

# Aufgespritzte und verputzte Zellulose- Kompaktabsorber

Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung aufgespritzter  
und verputzter, hygrophil aktivierender Zellulose-  
Schallabsorber

P. Kautsch et.al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**00/2006**

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>  
oder unter:

Projektfabrik Waldhör  
Währingerstraße 121/3, 1180 Wien  
Email: [versand@projektfabrik.at](mailto:versand@projektfabrik.at)

# Aufgespritzte und verputzte Zellulose- Kompaktabsorber

Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung  
aufgespritzter und verputzter, hygrophil aktiver  
Zellulose-Schallabsorber

Kautsch P., Drotleff H., Egger J., Graber G., Häupl P.  
Halper T., Hengsberger H., Lackner W., Leistner P.  
Petzold H., Schmied R., Zhou X.

Technische Universität Graz  
Institut für Architekturtechnologie

Graz, 28.04.2006

**Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie**



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



**Antragsteller:**  
Ing. **Wolfgang Lackner**

Zellulosedämmstoffproduktion -  
CPH-Beteiligungs GmbH & Co KG  
A-8230 Hartberg, Ökopark 6  
Tel.: +43-(0)3332 – 66680; Fax: / 66681  
Email: info@cph.at  
Website: www.cph.at

**Projektleiter:**  
Ao.Univ.-Prof. DI DDr. **Peter Kautsch**

Technische Universität Graz -  
Institut für Architekturtechnologie  
A-8010 Graz, Rechbauerstraße 12  
Tel.: +43-(0)316 – 873 / 6245; Fax: / 6083  
Email: kautsch@tugraz.ac.at  
Website: www.TUgraz.at

**Koordination:**  
Dipl.-Ing. **Herwig Hengsberger**

Tel.: +43-(0)316 –873 / 6807; Fax: / 4999  
Email: hengsberger@tugraz.at

**Projektpartner** (alphabetisch):

Ao.Univ.-Prof. DI Dr. **Enrico Eustacchio**

Technische Universität Graz – Institut für Materialprüfung  
und Baustofftechnologie mit angeschlossener  
Technischer Versuchs- und Forschungsanstalt  
A-8010 Graz, Stremayrgasse 11  
Tel.: +43-(0)316 - 873 / 7152; Fax: / 7650  
Email: enrico.eustacchio@tugraz.at  
Website: www.tvfa.tugraz.at

Ao.Univ.-Prof. DI Dr. **Gerhard Graber**

Technische Universität Graz -  
Institut für Breitbandkommunikation  
A-8010 Graz, Inffeldgasse 12  
Tel.: +43-(0)316 - 873 / 7435; Fax: +43-(0)316-463697  
Email: graber@tugraz.at  
Website: http://inw.tugraz.at

Prof. Dr.-Ing. habil. **Peter Häupl**

Technische Universität Dresden - Institut für Bauklimatik  
D-01069 Dresden, Zellescher Weg 17  
Tel.: +49-(0)351 - 4633 / 3171; Fax: / 2627  
Email: haeupl@ibk.arch.tu-dresden.de  
Website: www.tu-dresden.de/aribk

**Martin Kormout**

J.W. Bau Ges.m.b.H.  
A-1160 Wien, Hasnerstraße 42/18  
Tel.: +43-(0)699-14861651; Fax: +43-(0)1-9133234  
Email: kormouts@chello.at

Dr.-Ing. **Philip Leistner**

Fraunhofer Institut für Bauphysik  
D-70569 Stuttgart, Nobelstraße 12  
Tel.: +49-(0)711 – 970 / 3346; Fax: / 3406  
Email: philip.leistner@ibp.fhg.de  
Website: www.ibp.fhg.de

Dipl.-Ing. **Robert Schmied**

Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke AG  
A-8120 Peggau, Alois-Kern-Straße 1  
Tel.: +43-(0)3127 – 201 / 2290; Fax: / 2289  
Email: r.schmied@wup.baumit.com  
Website: www.baumit.com



## Abstract

The increasing awareness with regard to growing burdens on the environment in general and noise in particular – some scientists are already talking about “noise as the pollutant of the decade” – is reflected, among other things, in the increased importance of appropriate acoustic quality of “everyday spaces”. Particularly the unreasonably high level of noise in schools and educational facilities but also in office and recreation rooms requires action to be taken by all those involved.

The aim of the project was to develop a completely new kind of spray-on and plastered noise absorber on the basis of cellulose from recycled paper. The absorber system preferably attenuates the low-frequency range, that can usually only be controlled with rather complex systems, and can also be used where conventional absorbers could cause problems due to impermissible water vapour condensation: on the inside of the outside wall. The inexpensive and ecological composite system can also be applied on uneven or curved surfaces.

The innovative absorber system is based on a further development of the “slit absorber” principle. A two-layer plaster system is applied on a flow-optimised, 5 – 6 cm layer of cellulose that is sprayed on in situ. As a complete innovation in slit absorbers, it forms a jointless surface and thus fulfils the demand of many planners for “invisible” acoustic measures while still attenuating low frequencies. At the same time, the system achieves far higher tensile strength perpendicular to the sample plane and compressive strength than is required for insulating materials in composite outside wall thermal insulation systems.

A new levelling system was developed for creation of the cellulose wall coating that, unlike state-of-the-art systems, allows complete independence from levelling devices that usually stay in the finished cellulose layer and therefore the creation of homogeneous in-situ bodies of insulation with a constant thickness and fast work progress.

Although there is still some need to further research the assessment of long-term behaviour, to develop suitable component connectors, and to catalogue acknowledged constructions for application on the inside of outside walls, the present studies have demonstrated the fundamental suitability of the composite system of in-situ spray-on cellulose insulation and special interior plaster as a noise absorber designed primarily to attenuate low-frequency noise.





## Kurzfassung

Die zunehmende Sensibilisierung gegenüber wachsenden Umweltbelastungen im Allgemeinen und Lärm im Besonderen – manche Wissenschaftler sprechen bereits von „Lärm als dem Schadstoff des Jahrzehnts“ – hat ihren Niederschlag unter anderem in der gestiegenen Bedeutung einer zweckentsprechenden akustischen Qualität von „Alltagsräumen“ gefunden. Insbesondere die oftmals unzumutbar hohen Lärmpegel in Schul- und Bildungseinrichtungen aber auch in Büro- und Aufenthaltsräumen bedeuten konkreten Handlungsbedarf für alle Beteiligten.

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines völlig neuartigen, aufgespritzten und verputzten Schallabsorbers auf Basis von Altpapierzellulose. Das entwickelte Absorbersystem bedämpft vorzugsweise den üblicherweise nur recht aufwändig in den Griff zu bekommenden tieffrequenten Bereich und kann auch dort eingesetzt werden, wo konventionelle Absorber Probleme mit unzulässiger Wasserdampfkondensation hervorrufen können: an der Innenseite der Außenwand. Das kostengünstige und ökologische Verbundsystem kann zudem auf unebenem oder gekrümmtem Untergrund appliziert werden.

Bei dem neuartigen Absorbersystem wurde das Prinzip des so genannten Schlitzabsorbers weiterentwickelt indem ein zweischichtiges Putzsystem auf eine 5 – 6 cm dicke, vor Ort aufgespritzte, strömungstechnisch optimierte Zelluloseschicht aufgebracht wird, als absolute Innovation bei Schlitzabsorbern eine fugenlose Oberfläche bildet und damit dem Bedarf vieler Planer nach „Unsichtbarkeit“ der akustischen Maßnahmen bei gleichzeitiger Bedämpfung tiefer Frequenzen Rechnung trägt. Zugleich wurden deutlich höhere Werte der Zugfestigkeit normal zur Probenebene und der Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung erzielt, als sie für Dämmstoffe für Außenwand-Wärmedämmverbundsystem gefordert werden.

Zur Herstellung ebener, gleichmäßig dicker Zelluloseschichten wurde ein völlig neuartiges Abzugssystem entwickelt, das zum Unterschied gegenüber dem Stand der Technik die völlige Unabhängigkeit von den bislang in der fertigen Zelluloseschicht verbleibenden Abzugslehren und damit die Herstellung homogener Zelluloseschichten konstanter Dicke bei gleichzeitig raschem Arbeitsfortschritt ermöglicht.

Obwohl weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Beurteilung des Langzeitverhaltens, der Entwicklung entsprechender Bauteilanschlüsse sowie der Katalogisierung nachweisfreier Konstruktionen für die Anwendung an der Innenseite von Außenwänden besteht, konnte mit den vorliegenden Untersuchungen die grundsätzliche Eignung aufgespritzter und verputzter Zelluloseschichten als vorwiegend tieffrequent wirksamer Schallabsorber gezeigt werden.



## **Teil A**

### **Motivation**

Die Bedeutung einer zweckentsprechenden akustischen Qualität von „Alltagsräumen“ rückt zunehmend ins Bewusstsein nicht nur der Fachwelt. Insbesondere die oftmals unzumutbar hohen Lärmpegel in Schul- und Bildungseinrichtungen aber auch in Büro- und Aufenthaltsräumen bedeuten konkreten Handlungsbedarf für alle Beteiligten! Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines völlig neuartigen, aufgespritzten und verputzten Schallabsorbers auf Basis von Altpapierzellulose. Das entwickelte Absorbersystem soll vorzugsweise den üblicherweise nur recht aufwändig in den Griff zu bekommenden tief-frequenten Bereich bedämpfen und zudem auch dort einsetzbar sein, wo konventionelle Absorber Probleme mit unzulässiger Wasserdampfkondensation hervorrufen können: an der Innenseite der Außenwand.

### **Grundlagen**

Das Projekt baut direkt auf zwei abgeschlossenen Zellulose-Vorgängerprojekten der Programmlinie „Haus der Zukunft“ auf. Beide Projekte hatten die Weiterentwicklung der zur Zeit überwiegend als Einblasdämmstoff verwendeten Zellulosedämmung zu einem tragfähigen, verputzbaren Wandsystem zum Inhalt, das zudem auch als Innendämmung ohne Dampfsperre einsetzbar sein soll. Dabei wurden die positiven Eigenschaften des Materials weiterentwickelt, so dass nun ein weitgehend homogener, tragfähiger und mittels Spezial-Innenputz verputzbarer Dämmkörper zur Verfügung steht.

### **Projekthalt**

Basierend auf dem Prinzip des klassischen Schlitzabsorbers wurde ein zweischichtiges Putzsystem auf eine 5 – 6 cm dicke, vor Ort aufgespritzte, strömungstechnisch optimierte Zelluloseschicht aufgebracht und bildet - als absolute Innovation bei Schlitzabsorbern – eine fugenlose Oberfläche. Damit wird dem Bedarf vieler Planer nach „Unsichtbarkeit“ der akustischen Maßnahmen bei gleichzeitiger Bedämpfung tiefer Frequenzen Rechnung getragen. Der neuartige Absorber kann auch auf unebenen oder gekrümmten Wand- oder Deckenfläche appliziert werden. Zudem kann das System durch die besonderen hygrothermischen Eigenschaften des Zellulosedämmkörpers und des Spezialputzes auch die bislang infolge der Gefahr von unzulässiger Wasserdampfkondensation kaum für akustische Maßnahmen geeigneten Innenflächen von Außenwänden nutzbar machen.

### **Methode der Bearbeitung**

Basierend auf der Bestimmung des längenbezogenen Strömungswiderstandes und des Absorptionsgrades anhand von Laborprobekörpern wurden Zellulose- und Putzschicht optimiert und schließlich im diffusen Schallfeld des Hallraumes vermessen. Nach vorher gegangenen akustischen und hygrothermischen Simulationsberechnungen bildete die Ausstattung einer Schulklasse in Graz mit dem entwickelten System und die Vor-Ort-Messung des Ist-Zustandes sowie des optimierten akustischen Verhaltens den Abschluss des Projekts.



## **Teil B**

### **Ergebnisse**

Durch umfangreiche Optimierungsschritte konnte der längenbezogene Strömungswiderstand des entwickelten Schlitzabsorbersystems auf den nahezu idealen Wert von  $19.600 \text{ Pa s/m}^2$  bei einer Dichte von etwa  $100 \text{ kg/m}^2$  eingestellt und die Streuung der akustischen und hygrischen Messwerte minimiert werden. Mittels der entwickelten Abzugsvorrichtung können vor Ort aufgespritzte Zelluloseschichten erstmals ohne die bisher verwendeten Abzugslehren hergestellt werden und wird damit der Weg in Richtung einer rationellen Baustellenfertigung aufgezeigt. Mit dem völlig neuartigen Absorbersystem kann der gestiegenen Nachfrage nach „Unsichtbarkeit“ von akustischen Maßnahmen weitgehend Rechnung getragen werden. Hinsichtlich erhöhter mechanischer Beanspruchungen wie sie beispielsweise in Schulen gegeben sind, besteht Optimierungsbedarf.

Durch Vorfertigung von gebundenen Zelluloseplatten in Kombination mit einer vor Ort aufgespritzten Zellulosebeschichtung konnte erstmals ein Decken-Zelluloseabsorber von 10 cm Dicke ohne die bisher erforderlichen Zwischentrocknungszeiten realisiert werden.

Sowohl die Messungen der Zugfestigkeit normal zur Probenebene als auch der Druckspannung bei 10 % Stauchung haben Werte erbracht, die erheblich über denen der Produktnorm für werkmäßig hergestellte Dämmstoffe liegen.

Die akustischen Simulationsberechnungen haben die relativ große Variationsbreite der Schlitz- und Abdeckungsgeometrie sowie der Putzdicke und damit die Möglichkeit auf spezielle Raumanforderungen einzugehen gezeigt. In Form des entwickelten Berechnungstools wird dem Anwender ein einfaches Werkzeug an die Hand gegeben um die akustischen Auswirkungen verschiedener Absorber abzuschätzen.

Die hygrothermischen Simulationsberechnungen haben das infolge der akustisch notwendigen Schlitz- und Abdeckungsgeometrie gegenüber dem Vorgängerprojekt „Zelluloseinnen-dämmung ohne Dampfsperre“ etwas kritischere Verhalten an der Innenseite der Außenwand gezeigt. Um den Gesamtwassergehalt der Wandkonstruktion mit rund  $1 \text{ kg/m}^2$  zu begrenzen, sollte ein vorhandener Bestandsinnenputz belassen bzw. wieder hergestellt werden.

### **Schlussfolgerungen**

Die Vor-Ort-Versuche in einer Grazer Schule haben neben der gezeigten grundsätzlichen Eignung des verputzten Systems und der Demonstration der akustischen Möglichkeiten in Kombination mit dem neuartigen zweischichtigen Zellulose-Deckenabsorber insbesondere zur Bewusstseinsbildung in Bezug auf nachhaltige Sanierungsmaßnahmen beigetragen. Um diesen Prozess weiter zu führen und damit auch einen Beitrag zur Steigerung des Anteils nachwachsender Rohstoffe im Bauwesen zu leisten, bedarf es neben der Abdeckung des Forschungsbedarfs insbesondere hinsichtlich Langzeitverhalten und Bauteilanschlüssen sowie der Katalogisierung nachweisfreier Konstruktionen für die Anwendung an der Innenseite von Außenwänden der gezielten Bewusstseinsbildung bei allen Beteiligten.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b> .....	<b>19</b>
<b>Verwendete Methoden und Daten</b> .....	<b>21</b>
<b>1 Patentrecherche, Kick-off, Anforderungsprofil</b> .....	<b>25</b>
1.1 Grundlagen.....	25
1.2 Funktionsweise.....	26
1.3 Schlitzherstellung .....	27
1.4 Schlitzgeometrie.....	28
<b>2 Entwicklung des Zelluloseabsorbers</b> .....	<b>29</b>
2.1 Materialoptimierung mittels Sieblinien.....	29
2.2 Maschinen zur Herstellung.....	29
2.3 Materialprüfungen .....	31
2.4 Abziehsystem .....	34
<b>3 Putzentwicklung und Putzprüfung</b> .....	<b>37</b>
3.1 Schalldichter Grundputz.....	37
3.2 Schalloffener Deckputz .....	38
<b>4 Probenherstellung für die Akustikmessungen</b> .....	<b>41</b>
4.1 Zellulose-Probekörper .....	41
4.2 Ablauf der Musterherstellung .....	41
4.3 Muster für die Messung des Strömungswiderstandes .....	42
4.4 Zellulose-Hallraummuster .....	43
4.5 Vor-Ort-Zellulosemusterherstellung im BRG Kepler .....	43
4.5.1 Wandbeschichtung.....	43
4.5.2 Deckenabsorber .....	44
4.6 Labor-Putzmuster.....	45
4.7 Ausstattung eines Klassenzimmers mit dem neuartigen Putzsystem .....	47
<b>5 Akustische Messungen</b> .....	<b>49</b>
5.1 Orientierungsmessungen des Absorptionsgrades aufgespritzter Zellulose im Impedanzrohr 10 x 10 cm.....	49
5.1.1 Messergebnisse .....	50
5.1.2 Umrechnung $\alpha_0$ auf $\alpha_{diff}$ .....	50
5.2 Bestimmung des Strömungswiderstandes der unverputzten Zelluloseproben .....	51

5.3	Bestimmung des Absorptionsgrades unverputzter Zellulose im Impedanzrohr 20 x 20 cm.....	52
5.4	Bestimmung des Absorptionsgrades von verputzten Probekörpern .....	52
5.5	Bestimmung des Strömungswiderstandes des Einkornputzes .....	54
5.6	Hallraum-Messungen .....	56
5.6.1	Absorbertypen .....	56
5.6.2	Probengröße: .....	56
5.6.3	Messergebnisse .....	58
5.7	Vor Ort Messung und raumakustische Optimierung eines Klassenraumes .....	59
5.7.1	Gemessene Nachhallzeit – Rohzustand .....	61
5.7.2	Alcons im Rohzustand gemessen und simuliert.....	66
5.7.3	Berücksichtigung der Schüler.....	67
5.7.4	Erforderliche Nachhallzeit .....	68
5.8	Gemessene Nachhallzeit nach Einbau der Schlitzabsorber .....	69
5.9	Gemessene Nachhallzeit im Endzustand.....	70
5.9.1	Endzustand – Alcons.....	73
<b>6</b>	<b>Akustische und hygrothermische Simulationsberechnungen .....</b>	<b>77</b>
6.1	Verputzter Zolulosedämmstoff als Schallabsorber .....	77
6.1.1	Elastizität von Platten / Putz.....	78
6.1.2	Auswirkungen der Putzschicht auf den Zolulosedämmstoff .....	80
6.2	Simulation des Schlitzabsorbers .....	80
6.2.1	Absorptions-Optimierung zu tieferen Frequenzen.....	82
6.3	Kalibrieren des Simulationsmodells mittels Hallraummessungen .....	83
6.4	Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche .....	84
6.4.1	Simulation der Verbesserung des Alcons .....	85
6.4.2	Variation der Absorberflächen.....	86
6.5	Optimierung der Nachhallzeit durch Verwendung verschiedener Absorberkombinationen .....	87
6.6	Vergleich Simulation – Messung BRG .....	91
6.7	Softwaretool .....	93
6.8	Hygrothermische Simulationsberechnungen.....	96
6.8.1	Gegenstand und Ziel der Untersuchungen .....	96
6.8.2	Methodik, Vorkenntnisse und Quellen.....	96
6.8.3	Materialkennwerte .....	98
6.8.4	Hygrothermisches Verhalten des Schlitzabsorbers.....	100



<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>111</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>117</b>
<b>9</b>	<b>Verwendete und weiter führende Literatur</b> .....	<b>121</b>
A 1	Strömungswiderstände und Dichten unverputzter Zelluloseproben.....	A 3
A 2	Absorptionsgrad 6 cm dicker, unverputzter Zelluloseproben mit Wandabstand .....	A 4
A 3	Schlitzabsorber – Vorab-Parametervariationen .....	A 5
A 4	Putzprobekörper-Varianten .....	A 6
A 5	Hallraumergebnisse .....	A 7
A 6	Rechnerische Parametervariationen der Absorbertypen .....	A 13
A 7	Absorberauslegung für Raumnutzung „Sprache“ - $T_{\text{soll}} = 0,75 \text{ s}$ .....	A 18
A 8	Absorberauslegung für Raumnutzung „Unterricht“ - $T_{\text{soll}} = 0,6 \text{ s}$ .....	A 19
A 9	Messprotokolle der Vor-Ort-Messungen im BRG Kepler .....	A 23



## Einleitung

Dem Schutz vor Lärmbelastung am Arbeitsplatz aber auch in Unterrichts- und Aufenthaltsräumen kommt in Zukunft immer stärkere Bedeutung zu. Einige Wissenschaftler sprechen bereits von Lärm als „dem Schadstoff des Jahrzehnts“.

Obwohl die subjektive Einstellung gegenüber einem Schallereignis mitentscheidend für die Einstufung als „angenehm“ oder „störend“ ist, sind ab einer bestimmten Schallbelastung gesundheitliche Schäden bei den exponierten Personen zu erwarten.

Insbesondere die oftmals unzumutbar hohen Lärmpegel in Schul- und Bildungseinrichtungen aber auch in Büro- und Aufenthaltsräumen bedeuten konkreten Handlungsbedarf für alle Beteiligten.

Obwohl das Bewusstsein für die Notwendigkeit schalldämpfender Maßnahmen in der Öffentlichkeit zunimmt, ist die Problematik der Bedämpfung tiefer Frequenzen noch weitgehend unbekannt. Zu geringes Absorptionsverhalten und damit zu lange Nachhallzeiten im tieffrequenten Bereich wirken sich durch Überdeckungseffekte auf die Sprachverständlichkeit negativ aus und werden unter anderem in Form von unspezifischem Unwohlsein wahrgenommen. Zudem können tiefe Frequenzen insbesondere in kleinen Räumen zu unangenehmen Dröhneffekten führen.

### Motivation

Herkömmliche Akustiksysteme, die im tieffrequenten Bereich wirksam sein sollen, werden zumeist an Deckenflächen angebracht und benötigen eine Bauhöhe von 20 – 40 cm. Im Sanierungsfall, insbesondere in Bauten aus den 50er – 70er Jahren des 20. Jht., reicht die vorhandene Raumhöhe dafür allerdings oft nicht aus. Durch die geringe Bautiefe von maximal 10 cm könnte das zu entwickelnde System in diesen Fällen sogar die einzige Möglichkeit sein, das Frequenzspektrum unter 250 Hz zu bedämpfen.

Die Notwendigkeit der Bedämpfung der tiefen Frequenzen bzw. zunehmend kürzerer Nachhallzeiten wird nicht zuletzt in der Neuauflage von DIN 18041, die seit Mai 2004 die „alte DIN“ von 1968 ersetzt, bzw. der ÖNORM B 8115-3 von November 2005 unterstrichen. Dabei wurden neben der Weiterentwicklung und zunehmenden Integration von elektroakustischen Anlagen insbesondere die Bedürfnisse von Personen mit eingeschränktem Hörvermögen bzw. nicht deutscher Muttersprache berücksichtigt. Gerade für diese Personengruppen sind möglichst kurze Nachhallzeiten – bei Sprachdarbietungen insbesondere im tieffrequenten Bereich - und hohe Sprachverständlichkeit substantziell notwendig, um an der Kommunikation mit anderen Menschen teilnehmen zu können.

In relativ kleinen Räumen reichen die Decken als alleinige Absorptionsflächen oftmals nicht aus, bzw. sind die Innenwände meist intensiv möbliert. Da insbesondere Fensterwände oft nur spärlich möbliert sind, würden sie sich für die Unterbringung zusätzlicher Absorptionsflächen anbieten. Allerdings besteht in diesen Fällen durch die wärmedämmende Wirkung von herkömmlichen porösen Absorbern die Gefahr von Bauteilkondensation und damit von Schimmelpilzbildung.

## Zielsetzung

Ziel des gegenständlichen Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines völlig neuartigen, aufgespritzten und verputzten Schallabsorbers auf Basis von Altpapierzellulose, welcher insbesondere der Problematik tiefer Frequenzen entschärfen sollte, da beispielsweise in Versammlungsräumen die mittleren und hohen Frequenzen meist durch die anwesenden Personen ausreichend bedämpft werden.

Damit leistet das Projekt sowohl im Hinblick auf die verwendeten ökologischen Materialien als auch auf die Möglichkeit der akustisch / thermischen Gebäudemodernisierung in einem Arbeitsgang und die damit verbundene Steigerung der Lebensqualität einen wichtigen Beitrag zu der Programmlinie „Nachhaltig Wirtschaften“.

Weiters fühlt sich das Projekt dem in Zukunft stark zunehmenden Prinzip der „On-Site-Factory“ verbunden, bei dem der automatisationsgestützten Baustellenfertigung immer größere Bedeutung zukommt. Ein aufspritzbares Akustik-/Dämmsystem bietet geradezu ideale Voraussetzungen hierfür.

## Aufbau der vorliegenden Arbeit

Aufgrund des intensiven Ineinandergreifens der einzelnen Arbeitsschritte wird das Projekt im Folgenden anhand der antragsgemäßen Arbeitspakete dargestellt.

<b>AP 1 Kick-off, Patentrecherche</b>	beschreibt die Anforderungen an das zu entwickelnde Absorbersystem basierend auf einer intensiven Grundlagen- und Patentrecherche
<b>AP 2 Entwicklung Zelluloseabsorber</b>	stellt die Optimierung des Strömungswiderstandes und der Abziehvorrichtung für die aufgespritzte Zelluloseschicht vor
<b>AP 3 Putzentwicklung</b>	beschreibt die Entwicklung einer fugenlosen akustisch wirksamen Abdeckung der Zelluloseschicht
<b>AP 4 Probekörperherstellung</b>	beschreibt die Herstellung von Probekörpern im Labor- und Hallraum-Maßstab sowie für den 1:1 - Versuch in einer Grazer Schule
<b>AP 5 Akustikmessungen</b>	stellt die Labor-, Hallraum- und Vor-Ort-Messungen des Systems vor
<b>AP 6 Simulationsberechnungen</b>	beschreibt die akustischen und hygro-thermischen Simulationsberechnungen und stellt das entwickelte Software-Tool vor

## Zusammenfassung und Ausblick

## Verwendete Methoden und Daten

### Ausgangsbasis

Ausgangsbasis des Forschungsprojektes sind die guten Erfahrungen, die in den vergangenen 30 Jahren beginnend in den USA mit der so genannten aufgespritzten Zelloosedämmung gemacht wurden. Dabei handelt es sich wie bei der bekannten Einblaszellulose um vermahlendes Altpapier, dem mineralische, nicht flüchtige Brand- und Insektenschutzmittel zugesetzt werden. Unter Befeuchtung mit einer Bindemittelmischung können die Zelluloseflocken auch über Kopf auf nahezu jeden Untergrund aufgespritzt werden. Das Produkt zeichnet sich durch einen äußerst geringen Primärenergieaufwand bei der Herstellung, weitgehende CO<sub>2</sub> – Neutralität und geringes Versauerungspotential aus. In den beiden „Haus der Zukunft“ - Vorgängerprojekten „Grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zelloosedämmschichten mit Putzauflage für Außenfassaden“ (abgeschlossen 2001) und „Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ (abgeschlossen August 2005) wurden die positiven Eigenschaften des Materials weiterentwickelt, sodass nun ein tragfähiger und mittels Spezialputz verputzbarer Dämmkörper zur Verfügung steht.

Untenstehende Graphik zeigt die erfolgte gute Austrocknung einer auf eine 50 cm dicke Ziegelwand aufgespritzten und verputzten 5 cm dicken Zellooseschicht als Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeiten an der Grenzschicht Bestandputz / Dämmung in Wandmitte (F4) zu Wandaußenkante (F10), in der Mitte der Dämmschicht in der Wandaußenkante (F11) sowie Innenraumluftfeuchte ( $F_{\text{Raum}}$ ) und Innenraum- und Außentemperaturen ( $T_{\text{Raum}}$  bzw.  $T_{\text{außen}}$ ) über den Messzeitraum vom 01.05.2004 bis 17.06.2005. Die Messwerte über 100 % r.F. resultieren aus der speziellen Fühlercharakteristik und sollten nicht absolut verstanden werden.

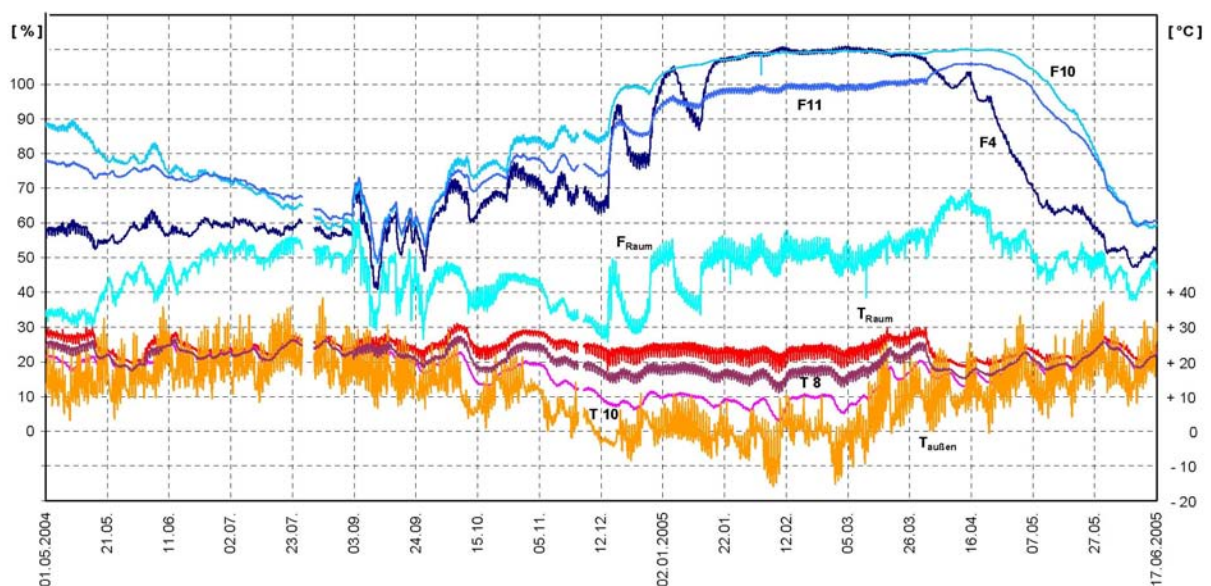


Fig. 1 „Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ -  
Vor Ort gemessenes Kondensations- und Austrocknungsverhalten

Weitere wichtige Vorarbeiten stellen die Entwicklungen des „Verbundplattenresonators“ [EP 0811097] und des „Schlitzabsorbers“ [DE 10151474] dar, deren Entwickler ihr Know-how als Partner in das gegenständliche Projekt eingebracht haben. Im Zuge einer umfangreichen Patentrecherche wurde wiederholt festgestellt, dass das zu entwickelnde Absorbersystem eine absolute Innovation darstellt und für dessen Realisierung auch in keine fremden Schutzrechte eingegriffen wird.

### **Vorgangsweise**

Aufbauend auf dem Prinzip des Schlitzabsorbers wurde im ersten Schritt ein völlig neuartiges Absorberkonzept entwickelt, das das Wirkungsprinzip des Schlitzabsorbers mit dem herkömmlicher Akustikputze kombiniert. Damit kann eine fugenlose Oberfläche bei gleichzeitiger Konzentration auf die bis dato unzureichend bedämpften tiefen Frequenzen erzielt werden.

In einem zweiten Schritt wurde die Homogenität und Reproduzierbarkeit der aufgespritzten Zelluloseschichten verbessert. Dazu war neben der Weiterentwicklung der speziellen Fördermaschine insbesondere die Abstimmung der Fördermenge und der Befeuchtungsintensität durch eine Weiterentwicklung der Regelungstechnik von Bedeutung.

Anschließend wurden zahlreiche Probekörper mit den Abmessungen  $\varnothing$  10 cm sowie 20 x 20 cm sowohl am Institut für Breitbandkommunikation (INW) der TU Graz hinsichtlich ihres Absorptionsverhaltens bei senkrechtem Schalleinfall als auch parallel dazu am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) hinsichtlich ihres längenspezifischen Strömungswiderstandes, als dem wichtigsten Kriterium für die Absorberschicht eines Schlitzabsorbers, untersucht. 20 x 20 cm große Probekörper mit der strömungstechnisch optimierten Zelluloseschicht wurden mit und ohne Schlitz verputzt und im Impedanzmessrohr auf ihr Absorptionsverhalten geprüft. Schließlich wurde das Absorptionsverhalten des Systems normgemäß anhand von etwa 12 m<sup>2</sup> großen Probeflächen im Hallraum der TU Graz bestimmt.

Einen wesentlichen Aspekt des Projektes bildete die Ausstattung einer Klasse des Bundesrealgymnasiums Keplerstraße in Graz mit dem neu entwickelten Absorbersystem. Dabei wurde erstmals eine neuartige Abzugsvorrichtung verwendet, die die Herstellung ebener Zelluloseflächen definierter Dicke ohne die Verwendung der bislang notwendigen Abzugslehren ermöglicht. Mittels umfangreicher Vor-Ort-Messung konnten zum einen die verschiedenen Absorbertypen unter realen Bedingungen getestet, zum anderen der Schule die akustische Sanierung eines Unterrichtsraumes ermöglicht werden.

Die Dokumentation und Publikation des Schul-Projektes bildet einen wichtigen Bestandteil des Forschungsvorhabens und soll über dessen Dauer hinaus zur Bewusstseinsbildung für die Notwendigkeit und die Möglichkeiten einer adäquaten akustischen Gestaltung beitragen.

	Bezeichnung	Partner	Projekttablauf											
1	Kick-off, Anforderungsprofil	alle	■											
2	Entwicklung Zelluloseabsorber	A/P3/W1/W2		■	■	■		■		■				
3	Putzentwicklung	P2 / P3 / W1				■	■	■		■		■		
4	Probekörperherstellung	A / P2 / P3			■		■		■		■		■	
5	Akustikmessungen	P3 / W1				■		■		■		■	■	
6	Simulationsberechnungen	P3 / P4					■		■		■		■	
7	Projektleitung, (Berichtslegung)	P1, (alle)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

- A Zellulosedämmstoffproduktion – CPH GmbH & Co KG / CPH
- P1 Technische Universität Graz, Institut für Architekturtechnologie / AT
- P2 Wietersdorfer und Peggauer Zementwerke AG (WUP)
- P3 Technische Universität Graz, Institut für Breitbandkommunikation / INW
- P4 Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik / TUD
- W1 Fraunhofer Institut für Bauphysik / IBP
- W2 J.W. Bau Gesm.b.H.





# 1 Patentrecherche, Kick-off, Anforderungsprofil

## 1.1 Grundlagen

Die akustische Qualität eines Raumes wird wesentlich von der Anordnung im Gebäude, der Schalldämmung seiner Umfassungsbauteile, der Geräuscentwicklung haustechnischer Anlagen sowie der Raumform und Raumgröße (Primärstruktur) und der Oberflächenbeschaffenheit der Raumbegrenzungsflächen und Einrichtungsgegenstände (Sekundärstruktur) bestimmt. Die Dimensionierung und die räumliche Verteilung Schall absorbierender und Schall reflektierender Flächen im Raum sind dabei wesentliche Einflussgrößen.

Da die aktuelle [ÖNORM B 8115-3, 11/2005] weitgehend mit [DIN 18041, 05/2004] übereinstimmt wird in weiterer Folge aufgrund der Internationalität des Projektes aus DIN 18041 zitiert.

Bei der Planung von Räumen für sprachliche Kommunikation sind die Belange von Personen mit eingeschränktem Hörvermögen besonders zu berücksichtigen. Von Personen mit Hörschäden wird die raumakustische Situation für Sprachkommunikation umso günstiger empfunden, je kürzer die Nachhallzeit ist. Nach heutigem Kenntnisstand sollte deshalb die anzustrebende Nachhallzeit vorrangig für Räume mit einem Volumen bis zu 250 m<sup>3</sup> und der Nutzung Sprache / Unterricht in den Oktavbändern 250 Hz bis 2000 Hz bis 20 % unter den für „normalen“ Unterricht geforderten Werten liegen – also beispielsweise für einen 150 m<sup>3</sup> großen Raum anstelle von etwa 0,55 Sekunden nur etwa 0,44 Sekunden. Diese Anforderungen entsprechen in etwa jenen, die bereits 1997 von [Sust und Lazarus] für geistig anspruchsvolle Tätigkeiten empfohlen wurden.

Vergleichbare Anforderungen gelten auch für die Kommunikation in einer Sprache, die nicht als Muttersprache gelernt wurde, bei der Kommunikation mit Personen, die Deutsch als Fremdsprache sprechen, und bei der Kommunikation mit Personen, die auf andere Weise ein Bedürfnis nach erhöhter Sprachverständlichkeit haben, wie z. B. Personen mit Sprach- oder Sprachverarbeitungsstörungen, Konzentrations- bzw. Aufmerksamkeitsstörungen und Leistungsschwäche.

Überschlägig gilt, dass z.B. im o.a. 150 m<sup>3</sup> großen, konventionell eingerichteten Klassenraum zur Erfüllung dieser Anforderungen zusätzlich zur Einrichtung äquivalente Absorptionsflächen von ca. 24 m<sup>2</sup> anzuordnen sind!

Im Allgemeinen sollten die Nachhallzeiten im Frequenzbereich von 250 bis 2000 Hz nicht mehr als 20 % gemäß vom Wert bei 500 Hz abweichen - bei Frequenzen unter 250 Hz und über 2000 Hz werden für Sprachdarbietungen zusätzlich bis zu 20 % kürzere Nachhallzeiten empfohlen.

## 1.2 Funktionsweise



Fig. 2 Aufgespritzte Zelluloseakustikbeschichtung, Dom im Berg, Graz  
(Foto: Stadt Graz, Schmied)

Das neuartige Absorbersystem sollte zum einen auf der Weiterentwicklung des seit rund 30 Jahren bewährten, so genannten CSO-Verfahrens zur Aufsprühung von befeuchteten Zelluloseflocken zum anderen auf dem Prinzip des so genannten Schlitzabsorbers basieren. Dabei sind auf einem porigen, meist fasrigen Absorberkörper streifenförmig schallharte, plattenförmige Abdeckungen mit dazwischen liegenden Schlitzern angeordnet. Die Absorptionseigenschaften können durch Variation der Breite und Dicke der Abdeckung sowie durch die Breite der Schlitzre auf den jeweiligen Bedarf abgestimmt werden.

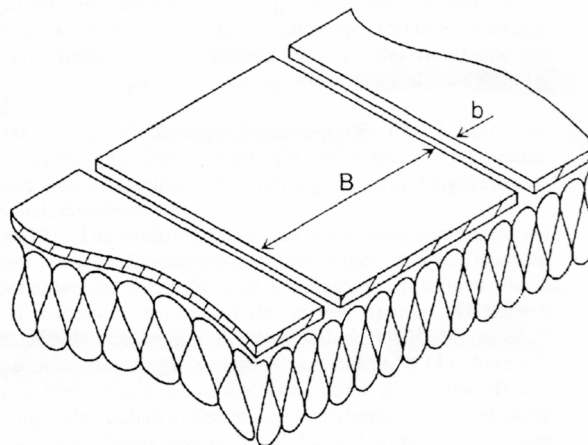


Fig. 3 Prinzipskizze Schlitzabsorber

Im gegenständlichen Projekt sollte der klassische Schlitzabsorber weiterentwickelt werden indem ein zweischichtiges Putzsystem auf eine 5 – 6 cm dicke, vor Ort aufgespritzte, strömungstechnisch optimierte Zellosegeschicht aufgebracht wird und – als absolute

Innovation bei Schlitzabsorbern – eine fugenlose Oberfläche bilden sollte. Damit würde dem Bedarf vieler Planer nach „Unsichtbarkeit“ der akustischen Maßnahmen bei gleichzeitiger Bedämpfung tiefer Frequenzen Rechnung getragen. Zudem besteht durch Modifikation des Spezialputzes in gewissem Rahmen die Möglichkeit, das Absorptionsverhalten breitbandiger zu gestalten.

Der neuartige Absorber sollte – ähnlich den bekannten „Akustikputzen“, aber mit gänzlich unterschiedlichem Wirkungsprinzip und Absorptionsverhalten - auf der gesamten Wand- oder Deckenfläche applizierbar sein und auch auf unebenem oder gekrümmtem Untergrund aufgebracht werden können. Damit könnte – im Gegensatz zu den meisten bekannten Schallabsorbern - die ursprüngliche Raumcharakteristik erhalten werden. Dieser Umstand sollte durch den zu entwickelnden Spezialputz unterstrichen werden, der zumindest aus einiger Entfernung den Eindruck einer konventionellen Oberfläche bietet. Bei näherer Betrachtung sollte sich durch die für die weit gehende Schalloffenheit notwendige offenporige Struktur ein interessanter neuartiger Effekt ergeben.

Zudem sollte das System durch die günstigen hygrothermischen Eigenschaften des Zellularsedämmkörpers und des Spezialputzes auch die bislang infolge der Gefahr von unzulässiger Wasserdampfkondensation kaum für akustische Maßnahmen geeigneten Innenflächen von Außenwänden nutzbar machen.

Die guten Erfahrungen, die im „Haus der Zukunft“ - Vorgängerprojekt „Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ mit der hervorragenden Kapillaraktivität und Feuchtepufferfähigkeit von aufgespritzten und verputzten Zelluloseschichten gemacht worden waren sollten eine Ausgangsbasis für die Entwicklung eines Schallabsorbers darstellen, der zudem als Innendämmung ohne Dampfsperre wirksam sein sollte.

### **1.3 Schlitzherstellung**

Nach intensiver Erwägung zahlreicher Varianten - von profilierten Zellulose-Abzugsvorrichtungen bis zum nachträglichen schlitzförmigen Ausfräsen des Grundputzes - haben sich folgende zwei Möglichkeiten der Schlitzherstellung zur weiteren Untersuchung heraus kristallisiert:

#### **Variante 1 - Zelluloseleisten**

Dieses System sieht die Montage von vorgefertigten, 15 mm dicken Leisten aus Zellulose vor, die mittels Drahtstiften auf der durchgetrockneten aufgespritzten Zelluloseschicht befestigt werden. Die Leisten können je nach gewünschtem Absorptionsverhalten in verschiedenen Achsabständen montiert und verschieden breit ausgeführt werden und dienen als Abzugslehren für den schallharten Grundputz, nachdem sie mittels eines ablösbaren Klebebandes vor dem maschinell aufgespritzten Putz geschützt wurden. Der Vorteil dieses Systems ist der relativ leichte Auftrag des etwa 3 mm dicken Einkornputzes während der Nachteil die geringe mechanische Stabilität der Zellulosestreifen während der Montage und die unbedingt erforderliche Ebenflächigkeit des Untergrundes ist.

## **Variante 2 – Abzugsleisten aus Lochblech**

Bei dieser Variante übernehmen Streifen aus hutförmig gekantetem Lochblech mit einem offenen Flächenanteil > 60 % sowohl die Funktion der Freihaltung des Schlitzes als auch der Abzugsleisten. Auch diese Profile werden mittels eines leicht ablösbaren Klebebandes temporär gegen Putzeintrag geschützt und verbleiben ebenfalls im Putz. Der Vorteil dieser Variante ist die verbesserte Möglichkeit, Unebenheiten des Zelluloseuntergrundes auszugleichen während der schwierigere Auftrag des Einkornputzes einen gravierenden Nachteil darstellt.

### **1.4 Schlitzgeometrie**

Das Prinzip des Schlitzabsorbers erlaubt es, ein bestimmtes Absorptionsverhalten mittels verschiedener Schlitz- und Abdeckungsweiten bzw. -dicken zu realisieren (Anhang / Kap. A 3 / Seite A 5). Konkret sollte bei einer Gesamtputzdicke von 15 – 18 mm von einer Schlitzbreite von 30 – 50 mm und einer Abdeckungsweite von 400 – 500 mm ausgegangen werden. Die endgültige Schlitzgeometrie sollte nach der Messung der Schalldurchlässigkeit des Deckputzes mittels akustischer Simulationsberechnungen festgelegt werden.

## 2 Entwicklung des Zelluloseabsorbers

### 2.1 Materialoptimierung mittels Sieblinien

Im Rahmen des gegenständlichen Projekts wurden in der Produktionseinrichtung von CPH durch Verstellung der Umfangsgeschwindigkeit bzw. Veränderung des Mahlspaltes der Papiermühle zahlreiche Zelluloseflockenmusterserien hergestellt, die mittels eines Siebsatzes auf ihre Grob- bzw. Feinanteile geprüft wurden. Dabei kristallisierte sich ein Flockenmuster als verarbeitungs- und festigkeitstechnisch optimal heraus, das durch untenstehende Sieblinie gekennzeichnet ist. Die hier verwendete Zellulose wird mittels Boraten, wie sie auch zur Herstellung der Einblasflocken eingesetzt werden, gegen Pilzbefall bzw. Brandgefahr geschützt

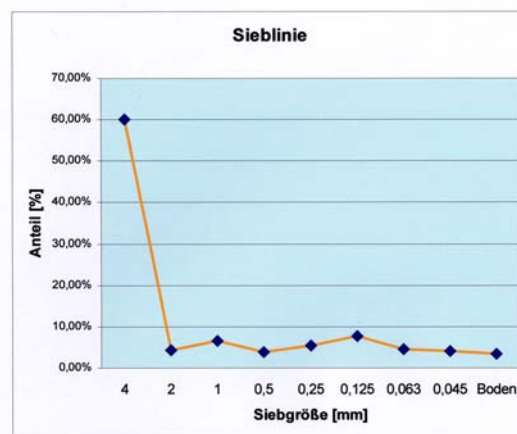


Fig. 4 Siebsatz mit Rüttelmaschine und Sieblinie

### 2.2 Maschinen zur Herstellung

Für das Auftragen der Zellulose wurde für die Musterserien 1 + 2 ein Schaumverfahren gewählt, das sich nach den ersten Tests als nicht optimal für den gewünschten Dichtebereich herausgestellt hat. Daher wurde für die weiteren Versuche auf ein Sprühverfahren zurückgegriffen, welches die Zellulose am Düsenaustritt mit einer Mischung

aus PVA (PolyVinylAcetat) und Wasser benetzt. Diese Variante ermöglicht höhere spezifische Dichten der Zellulose.

Als Basis für einen Umbau zur Verarbeitungsmaschine wurde eine Einblasmaaschine der Fa. Krendl herangezogen. Die Einblasmaaschine wurde um eine Auflockervorrichtung erweitert und mit einer elektronischen Regelung der Füllmenge für die Zellradschleuse ausgestattet.

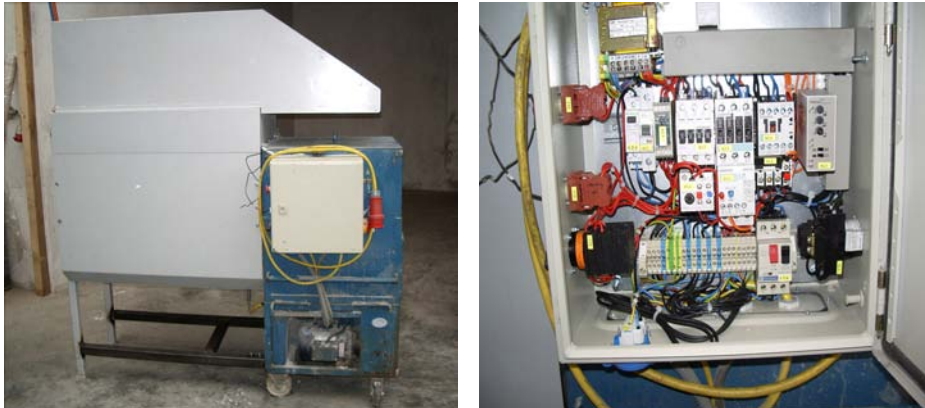


Fig. 5 Fördermaschine neu und Regelungsanlage

Für die Aufbereitung des Wasser-Leim-Gemisches ist eine Förderpumpe notwendig, die mit einem verstellbaren Druckbereich arbeitet. Der Materialtransport wird mittels Luftturbinen gewährleistet. Auch diese lassen sich wie die Zellradschleuse in der Durchsatzmenge verstellen.



Fig. 6 Förderpumpe und Abzugsbürste

Für die Herstellung einer ebenen Oberfläche wurde eine elektrische Abzugsbürste verwendet, die das überschüssige Material entlang von Abzugslehren in der gewünschten Schichtdicke abstreift und so eine Oberflächenbeschaffenheit erzeugt, die weiterverarbeitbar ist. Eine Formatkreissäge diente zur Herstellung der benötigten Maße für die diversen Prüfeinrichtungen.

## 2.3 Materialprüfungen

Der im Folgenden beschriebene Arbeitsschritt erfolgte zwar chronologisch nach Feststehen der endgültigen Zellulose- und Putzrezepturen, deren Beschreibung in den nachfolgenden Kapiteln zu finden ist, wird aber im Hinblick auf die Übereinstimmung mit den antragsgemäßen Arbeitspaketen an dieser Stelle eingefügt.

Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, das Verbundsystem 50 mm Zellulose / 15 mm Grundputz / 3 mm Einkornputz hinsichtlich der mechanischen Festigkeit in Anlehnung an in [ÖNORM B 6035] bzw. [ÖNORM EN 13162] festgelegten Anforderungen an Wärmedämmverbundsysteme aus Mineralwolle zu überprüfen. Dabei war vorerst davon ausgegangen worden, dass im Innenraum infolge des Wegfallens der intensiven Belastungen von Wärmedämmverbundsystemen durch Winddruck / -sog oder Frost- / Tauwechselwirkung niedrigere Werte anzusetzen wären als die für Mineralwolle MW-PT in [ÖNORM B 6035] für die Zugfestigkeit normal zur Probenebene genannten 10 kPa (TR 10) bzw. die 30 kPa (CS(10\Y) 30) für die Druckspannung bei 10 % Stauchung oder die Druckfestigkeit.

Die Zugfestigkeitsprüfungen wurden an 8 x 8 cm großen Prüfkörpern im Fall der ungestörten Verbundfläche sowie an 15 x 15 cm großen Probekörpern durchgeführt, die jeweils 5 cm breite Putzfelder zu beiden Seiten eines 5 cm breiten zellulosegefüllten Schlitzes im Grundputz abdeckten. Im Bereich des - akustisch notwendigen, später beschriebenen Schlitzes – besteht das System aus 50 mm Zellulose gespritzt, 15 mm Zellulosestreifen, mechanisch befestigt und 3 mm Einkornputz.

Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden in Analogie zu den Vorgängerprojekten ebenfalls an 8 x 8 cm großen Prüfkörpern durchgeführt.



Fig. 7 Verbundsystem-Probekörper ohne und mit aufgeklebter Stahlplatte

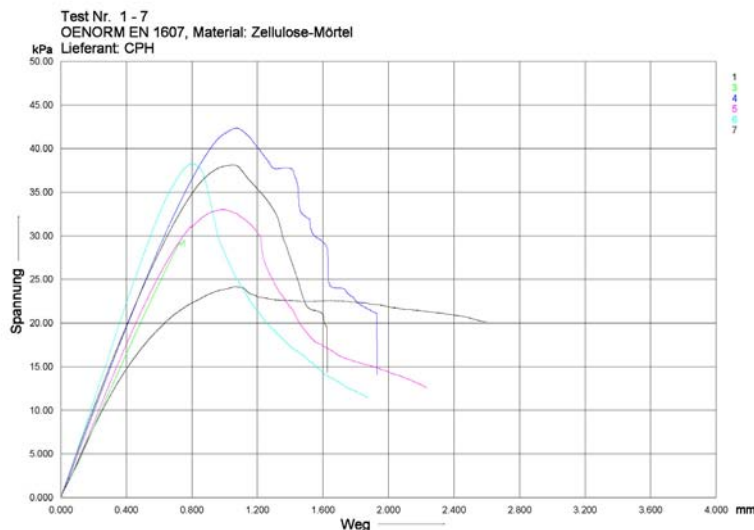
Wie in den folgenden Abbildungen in tabellarischer und graphischer Form dargestellt, hat die im Zuge der Optimierung des Strömungswiderstandes der Zellose-schicht aus akustischer Sicht notwendig gewordene Einstellung der Materialdichte auf rund 100 kg/m<sup>3</sup> sowie die Optimierung der Materialhomogenität in Bezug auf die Zugfestigkeit normal zur Probenebene mit im Mittel 34 kPa im Fall der ungestörten Putzflächen (bzw. 18 kPa im Fall der Schlitz-



Proben) sogar eine deutliche Überschreitung des o.a. Grenzwertes erbracht. Das Versagen erfolgte überwiegend in der Grenzschicht zwischen Grundputz und Zellulose. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung liegen mit im Mittel 130 kPa ebenfalls deutlich über den Anforderungen an Mineralwolle MW-PT.



Fig. 8 Prüfvorrichtung Zugfestigkeit normal zur Probenebene nach ÖNORM EN 1607 und Druckfestigkeit nach ÖNORM EN 826



Test Nr.	ChNo	Fm N	Rm MPa	a mm	b mm	Kommentar
1	I-1	152.8	0.024	78.55	80.50	Zell./Putz
3	I-3	186.1	0.030	78.89	79.94	dto.
4	II-1	268.1	0.042	79.29	79.84	Zell.
5	II-2	210.1	0.033	79.67	79.92	Zell. bzw. Zell./Putz
6	II-3	242.0	0.038	79.34	79.67	Zell.
7	II-4	239.6	0.038	78.79	79.76	Zell./Putz
Mittelwert:		216.5	0.034	79.09	79.94	
Std.Abw.:		42.12	6.52E-3	0.415	0.293	

Fig. 9 Zugfestigkeit normal zu Probenebene nach ÖNORM EN 1607, Probekörper 8 x 8 cm in graphischer und tabellarischer Darstellung



Test Nr.	ChNo	Fm N	Rm MPa	a mm	b mm	Kommentar
8	1	533.6	0.024	150.0	149.2	Zellst. bzw. Zellst./Putz
9	III-1	305.4	0.014	149.8	148.1	dto.
10	III-2	450.5	0.020	150.0	149.9	dto.
11	III-3	295.3	0.013	150.1	149.5	dto.
Mittelwert:		396.2	0.018	150.0	149.2	
Std.Abw.:		115.8	5.19E-3	0.126	0.772	

Fig. 10 Zugfestigkeit normal zu Probenebene nach ÖNORM EN 1607, Probekörper 15 x 15 cm, mit Zelluloseschlitz



Fig. 11 Zugversuch normal zur Probenebene – Versagen in der Grenzfläche Putz / Zellulose

Test Nr.	ChNo	Fm kN	Rt10 MPa	Kommentar
26	I-2	1.871	0.236	
27	I-3	0.779	0.116	
28	II-1	0.601	0.081	
29	II-2	0.655	0.086	
Mittelwert:		0.977	0.130	
Minimum:		0.601	0.081	
Maximum:		1.871	0.236	
Std.Abw.:		0.601	0.072	
Var.Koeff. %:		61.53	55.88	

Fig. 12 Druckfestigkeit nach ÖNORM EN 826, Probekörper 8 x 8 cm

## 2.4 Abziehsystem

Erheblicher Optimierungsbedarf bestand hinsichtlich der Gewährleistung einer konstanten Dicke und Ebenflächigkeit der vor Ort aufgespritzten Zelluloseschicht. Während die Herstellung der Laborprüfkörper mittels oben erwähnter rotierender Abzugsbürste gute Ergebnisse liefert, stellen die bislang notwendigen Abzugslehren ein Problem dar. Deren nachträgliche Entfernung aus der getrockneten Zelluloseschicht und das Verschließen der entstandenen Spalten mit bindemittelgetränkten Zelluloseflocken war infolge der entstandenen Materialinhomogenitäten nicht zielführend.

Als Alternative wurden Kantenschutzwinkel aus Karton, wie sie in der Verpackungsindustrie verwendet werden, getestet. Diese Abzugslehren konnten gut an der Wand ausgerichtet und befestigt werden und auch das Abziehen entlang des sehr schmalen Grates funktionierte einwandfrei. Allerdings hatte der Austrocknungsprozess der Zelluloseschicht eine etwa 10 %-ige Dickenreduktion und zudem eine Ablösung von den Kartonwinkeln zur Folge, die nun aus der Zelluloseschicht hervor ragten und „Sollbruchstellen“ für den folgenden Putz bildeten.

Aus diesem Grund wurde die Entwicklung eines Systems mit verfahrbarer rotierender Abzugsbürste gewählt, das sich in einem zweidimensionalen Achsensystem bewegt.

### Schienensystem

Das Schienensystem besteht aus einem, in Boden- und Deckenführungsprofilen horizontal verschiebbaren, senkrechten Profilrahmen, in dem die o.a. rotierende Abzugsbürste - in einem ersten Schritt noch manuell - geführt wird. Durch die maßgenaue Einrichtung der Boden- und Deckenführung gegenüber der zu beschichtenden Wandfläche kann die Dicke der Zelluloseschicht stufenlos eingestellt werden. Die durchgehende horizontale und vertikale Führung der Abzugsbürste ermöglicht eine ebene Oberflächenausbildung ohne Materialinhomogenitäten. Aufgrund des erheblichen Gewichtsvorteils wurde das komplette Abzugssystem aus leichtem Aluminium gefertigt.

### Systemsteher

Die Systemsteher bilden das Grundgerüst für dieses Abzugssystem, wobei diese federbelastet sind und im ersten Versuch für Raumhöhen zwischen 2 und 4,5 Metern angefertigt wurden. Im weiteren Ausbau sind auch größere Raumhöhen geplant.

### Verfahrsschienen

Um eine möglichst spielfreie Führung des „Geräteträgers“ zu ermöglichen, wurden für die Verfahrachse in der waagerechten Ebene rechtwinkelige Formrohrprofile gewählt, die an den Trägerelementen mittels Spannverschlüsse befestigt werden. Weiters sind diese Schienen in der Länge durch eine Steckmöglichkeit beliebig zu verlängern, um das Abzugssystem jeder Raumlänge anpassen zu können. Vorerst werden die Schienen noch an vorgegebenen Punkten an den Stehern befestigt. In Zukunft ist jedoch eine variablen Befestigungsmöglichkeit der Schienen an den Stehern vorgesehen.

## Verfahrwagen

Der Verfahrwagen lässt sich auf den waagerechten Systemschienen frei bewegen, wobei dieser selbst die Führungen für die eigentliche Rotationsbürste beinhaltet. Auch dieser „Systemträger“ bietet die Möglichkeit der Führungsverlängerung durch ein eigens dafür angefertigtes Stecksystem aus Aluminiumprofilen. Um die Möglichkeit einer halbautomatischen Bedienung des gesamten Systems aufzuzeigen, wird der eigentliche Geräteträger in den ersten Versuchen durch einen speziellen Niederspannungsmotor (12V) und eine Kabelfernbedienung elektrisch bewegt.

## Geräteträger

Der eigentliche Geräteträger kann sich somit in der waagrechten Ebene manuell als auch in der horizontalen Ebene ferngesteuert innerhalb des Schienensystems frei bewegen und im Bezug zur bearbeitenden Fläche jeden Punkt erreichen. Auf dem Geräteträger ist die eigens dafür entworfene Abzugsrotationsbürste montiert, die im Bezug zur Wand in einer Neigung von ca. 30 – 45 Grad verstellbar ist. Angetrieben wird die Abzugsrolle von einem leistungsfähigen, in der Drehzahl stufenlos verstellbaren E-Motor. Die Kraftübertragung erfolgt hier über einen leichten und nahezu wartungsfreien Keilriemen. Ein weiterer Vorteil dieses Geräteträgers ist, dass die Möglichkeit besteht, die Bürste um 360 Grad zu verdrehen, um die Ecken der zu bearbeitenden Fläche bestmöglich zu erreichen.

Um eine größtmögliche Bewegungsfreiheit der Rotationsbürste zu erzielen, wurde eine Variante mit zentralem Führungsrohr gewählt. Diese Variante hat aber, wie sich bereits in den ersten Versuchen gezeigt hat, den Nachteil, dass Bürstenlängen über 1,2 m Probleme bezüglich ungewollter Schwingungen der freiliegenden Enden der Rolle bei höheren Drehzahlen bereiten. Gerade hohe Drehzahlen sind jedoch für eine feine Oberflächenbehandlung zwingend erforderlich.



Fig. 13 Gesamtansicht des Prototyps des neuartigen Abziehsystems



### 3 Putzentwicklung und Putzprüfung

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines Putzsystems bestehend aus einem schallharten Grundputz und einem schalldichten Deckputz.

#### 3.1 Schalldichter Grundputz

Wesentlich für den schallharten Grundputz ist die Abstimmung auf den speziellen Putzgrund, das Verhältnis von Rohdichte zu Elastizität, der Wasserdampfdiffusionswiderstand sowie die mechanische Festigkeit.

Ausgangspunkt für die Produktentwicklung war ein maschinell verarbeitbarer Kalk-Zement-Innenputz, der durch den Zusatz von mineralischen Leichtzuschlagstoffen und durch Variation des Bindemittelverhältnisses von Kalk zu Zement auf den Zelluloseuntergrund angepasst wurde.

Wesentlich bei der Einstellung der Produkteigenschaften war auch eine angestrebte langsame Festigkeitsentwicklung in den ersten Tagen nach der Putzherstellung. Dadurch sollte gewährleistet sein, dass auch ein nachträgliches Ausfräsen von Putzfugen ohne großen Aufwand möglich ist.

Nach der Abwicklung von ersten Anwendungsversuchen auf Laborversuchswänden trat in den ersten Wochen der Erhärtung an einigen Stellen eine deutliche Rissbildung im Putz auf, die zum einen auf das ungünstige Längen-/Breitenverhältnis der einzelnen Putzfelder, zum anderen aber auch auf Schwindvorgänge im Putz selbst zurückzuführen war. Es waren daher für diesen Kalk-Zement-Leichtputz weitere Optimierungsschritte erforderlich, um in erster Linie die Festigkeitsentwicklung und das Schwindverhalten zu verbessern, ohne aber die anderen Materialkennwerte, wie den Elastizitätsmodul oder die Wasserdampfdiffusion nachteilig zu beeinflussen.

Durch ein geändertes Bindemittelverhältnis und durch die Zugabe von schwindreduzierenden Additiven konnten in Labor- und Anwendungsversuchen messbare Verbesserungen erzielt werden. Diese verbesserten Rezepturen wurden anschließend auf Laborprüfwänden im System mit der Zellulosedämmschicht getestet. Aus diesen Versuchen wurde die Variante CP13 als der am besten für das gewählte Akustiksystem geeignete Grundputz ausgewählt.

Alle weiteren Untersuchungen zur Systemauswahl bis hin zur abschließenden Ausstattung einer Klasse des Bundesrealgymnasiums Keplerstraße in Graz wurden mit diesem Grundputz durchgeführt.

In nachfolgender Tabelle sind die mörteltechnischen Kennwerte dieser Putzvariante bei maschineller Verarbeitung zusammengefasst:

Putzvariante CP13		
Wasseranspruch	[M-%]	32
Frischmörtelrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1290
Luftporengehalt	[V-%]	25
Wasserrückhaltevermögen	[%]	92,5
Biegezugfestigkeit 28d	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,75
Druckfestigkeit 28d	[N/mm <sup>2</sup> ]	1,5
Trockenrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	980

### 3.2 Schalloffener Deckputz

Als Endbeschichtung für das Putzsystem war ein zu entwickelnder hochporöser, schalloffener Strukturputz geplant. Als wesentliche Eigenschaft eines derartigen Putzes wurde eine hohe offene Porosität bei sehr geringem Gewicht angestrebt. Aus diesem Grund wurden die ersten Laborversuche mit einem dispersionsgebundenen Einkornputz durchgeführt. Als Zuschlagstoff wurde im ersten Schritt ein Schaumglasgranulat gewählt, weil es am besten die Anforderungen an die Korneigenfestigkeit bei gleichzeitig geringer Kornrohddichte erfüllt. Durch die Wahl einer Kunstharzdispersion als Bindemittel kann gewährleistet werden, dass bereits bei geringen Bindemittelanteilen ein guter Haftverbund zwischen den einzelnen Körnern sowie auch zum Grundputz gegeben ist. Wesentlich dabei war auch, dass durch einen geringen Bindemittelgehalt nur eine Verklebung der einzelnen Körner an den Kontaktpunkten entsteht und die Hohlräume zwischen den Zuschlagkörnern nicht mit Bindemittel gefüllt werden. Entsprechend wurde auch die Sieblinie des Zuschlags so gewählt, dass möglichst viele Hohlräume entstehen.

Insgesamt wurden mehr als 30 verschiedene Varianten getestet, bei denen sowohl die Sieblinie des Leichtzuschlags als auch das Masse-Verhältnis von Zuschlag zu Bindemittel variiert wurde. Der Leichtzuschlag wurde mit einem Größtkorn von 0,5 bis 4 mm eingesetzt, aus ästhetischen Gründen sollte die maximale Korngröße aber unter 2 mm liegen, weil dadurch der optische Eindruck einer homogenen Putzoberfläche erreicht wird. Eine Zusammenfassung aller Varianten befindet sich im Anhang / Kap. A 4 / Seite A 6.

Eine weitere wesentliche Anforderung an den schalloffenen Deckputz war auch eine möglichst leichtgängige Verarbeitung. Ausgehend vom händischen Aufziehen und Glätten mit einer Stahltraufel wurde auch das maschinelle Auftragen auf den Grundputz mit einer Spritzvorrichtung getestet.

Mit Schaumglasgranulat als Zuschlagstoff waren zwar eine sehr schöne Struktur und eine hohe Porosität erreichbar, das Produkt war aber nur sehr schwer zu verarbeiten und wies – weitgehend unabhängig vom Bindemittelgehalt - eine nur geringe Haftung zum Untergrund auf. Weder das händische noch maschinelle Auftragen war auch unter Baustellenbedingungen mit einem im Vergleich zu konventionellen pastösen Deckputzen ähnlichem Zeitaufwand und zu akzeptablen Kosten für den Verarbeiter möglich.

**2 cm Schlitz**

CA22



CA26: Metallgitter



CA28: Metallgitter Einkornputz

CA24: Metallgitter Einkornputz  
Fugen gefüllt mit ZellulosematerialCA30: Metallgitter Einkornputz  
Fugen gefüllt mit Grobenkornputz**5 cm Schlitz**

CA23



CA27: Metallgitter



CA29: Metallgitter Einkornputz

CA25: Metallgitter Einkornputz  
Fugen gefüllt mit ZellulosematerialCA31: Metallgitter Einkornputz  
Fugen gefüllt mit Grobenkornputz

Fig. 14 Putzprobekörper CA22 – CA31

Daher wurden weitere Putzmischungen getestet, bei denen das Schaumglasgranulat zuerst teilweise und dann ganz durch eine mineralische Gesteinskörnung ersetzt wurde. Mit diesen Varianten war eine deutliche Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften möglich, sodass schlussendlich die Variante CA 32 als vernünftiger Kompromiss zwischen den akustischen und baupraktischen Anforderungen für die Beschichtung ausgewählter Probekörper für die Hallraummessungen und für die Beschichtung einer Teilfläche des Klassenzimmers ausgewählt wurde.





## 4 Probenherstellung für die Akustikmessungen

### 4.1 Zellulose-Probekörper

In der ersten Musterserie wurde hauptsächlich Augenmerk auf die jeweiligen Rohdichten der aufgespritzten Zelluloseschichten gelegt. Dazu wurden sechs Probekörper mit den Maßen 50 x 50 x 12 cm gefertigt, wobei jeweils aus einem Probekörper drei Muster geschnitten wurden.

Eine zweite Herstellungsserie diente zum Vergleich gegenüber der ersten Serie. Dabei wurden die Dichten der ersten Serie beibehalten und ebenfalls Probekörper der Größe 50 x 50 x 12 cm hergestellt.

In der dritten Serie wurden Probekörper hergestellt, die beträchtlich größer waren als die vorher gehenden, da dadurch die Randverwirbelungen an den Feldbegrenzungen reduziert und die Homogenität der Zelluloseschicht verbessert werden konnte. Folgende Probekörpermaße wurden produziert: vier Stück mit 125 x 170 x 5 cm, zwei Stück mit 90 x 45 x 11 cm und zwei Stück mit 45 x 45 x 10 cm.



Fig. 15 Probekörperplatte 125 x 170 x 4 cm, Rückwand 22 mm OSB-Platte, seitliche Berandung aus 4 cm Fichtenlattung

### 4.2 Ablauf der Musterherstellung

Vor Beginn des Materialauftrages müssen einige Vorbereitungen getroffen werden um einen reibungslosen Versuchsablauf zu gewährleisten. Das Mischungsverhältnis des Poly-Vinyl-Acetats mit Wasser ist ausschlaggebend für eine Reproduzierbarkeit des Faser-Leim-Gemisches. Hinzu kommt eine penible Auflockerung der Zellulose um Dichteschwankungen

im fertigen Aufbau zu vermeiden. Weiteres ist die Düsenbeschaffenheit ein wichtiges Kriterium, das die Befeuchtung und den Strahlwinkel massiv beeinflussen kann. Außerdem können Faktoren wie Feuchteanteil der Zellulose, Druck des Klebergemisches, Verunreinigungen der Prüfkörper die Messergebnisse beeinflussen.

Das Polyvinylacetat-Wassergemisch wird sorgfältig angerührt und zum Mischen drucklos durch die Pumpe befördert. Der Druckaufbau findet erst kurz vor dem Spritzvorgang statt. Des Weiteren wird der Auflockerungsbunker mit Zellulose befüllt, um eine Unterbrechung der Materialzufuhr zu vermeiden. Die diversen Maschineneinstellungen werden vorgenommen, danach werden die Schlauchleitungen für Zellulose und Klebergemisch frei ausgelegt und montiert. Vor dem eigentlichen Befüllen der Probekörper wird eine Musterplatte produziert, um etwaige grobe Abweichungen zu erkennen. Im Anschluss werden die Probekörper aufgespritzt, und danach in einem Klimaschrank zum schnelleren Trocknen gelagert. Danach werden die Proben in gewünschter Größe zurechtgeschnitten.

### 4.3 Muster für die Messung des Strömungswiderstandes

Bei den ersten beiden Serien wurden aus den völlig durchgetrockneten Zellulosekörpern mit einer Formatkreissäge je drei Quader im Ausmaß von 15 x 15 x 6 bzw. 10,1 x 10,1 x 6 cm ausgeschnitten. Durch die drei verschiedenen Dichten ergaben sich 18 Stück Proben.



Fig. 16 Prüfkörper 15 x15 x 6 cm

Diese Muster wurden für weitere Versuche bezüglich Eignung der Dichten für den vorgesehenen Frequenzbereich an IBP versandt.

Bei Serie 4 wurden in einem ersten Schritt aus zwei Platten zu je 90 x 45 x 11 cm neun Stück Probekörper mit den Abmessungen 19,7 x 19,7 x 6 cm geschnitten und ohne Trägerplatte an IBP gesandt. Nach Vorliegen der positiven Strömungswiderstandsmessungen wurden aus einer 125 x 170 cm großen Musterplatte weitere 24 Stück Probekörper mit den Maßen 19,7 x 19,7 x 5 cm geschnitten, wobei die Zellulose auf der Trägerplatte belassen wurde, und an WUP zum Putzauftrag versandt.

#### 4.4 Zellulose-Hallraummuster

Für die zur Vermessung im Hallraum angefertigten Muster wurden handelsübliche OSB-Platten mit der Stärke von 22 mm verwendet, um eine ausreichende Stabilität der Muster während der Transportwege zu gewährleisten. Anhand vorangegangener Messungen wurden Musterplatten für die Hallraummessungen im Herstellerwerk in Hartberg gefertigt. Die erste Serie wurde auf diese OSB-Platten aufgebracht und mittels Handabzugsbürste auf Maß abgezogen. Dazu diente ein einfaches Holzgestell mit jeweils links und rechts angeordneten Abzugsprofilen. Lediglich zwei Musterserien (Probe I und III) wurden nicht mit der Abzugsbürste behandelt - diese wurden später unbehandelt im Hallraum vermessen. Nach der Austrocknung des wassergebundenen Klebergemisches stellte sich eine leichte Krümmung der Musterplatten ein, weshalb in der Folge anstelle der Abmessungen 2 m x 0,75 m Platten der Größe 1,2 m x 0,6 m hergestellt wurden. Danach folgte ein Zuschnitt der Platten, um eine möglichst fugenlose Probe für die Messungen im Hallraum der TU Graz zu erhalten. Anschließend wurden die Musterplatten zur weiteren Verarbeitung in das Bautechnikzentrum der TU Graz transportiert.

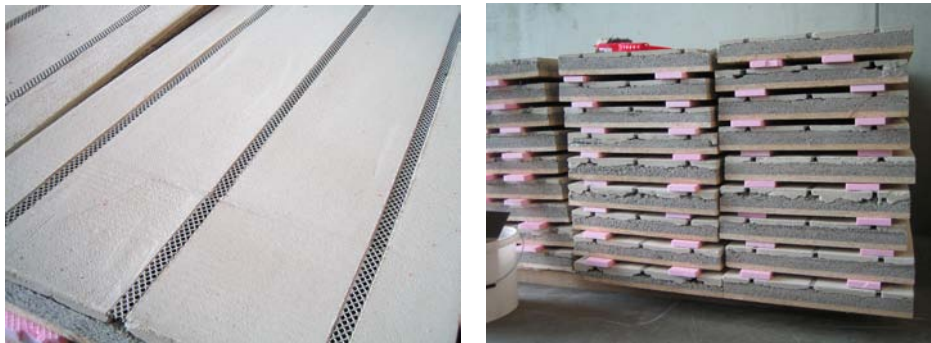


Fig. 17 Verputzte Zellulose-Hallraummuster

#### 4.5 Vor-Ort-Zellulosemusterherstellung im BRG Kepler

##### 4.5.1 Wandbeschichtung

Am 10. Oktober 2005 wurde mit der Montage der Zellulosebeschichtung im Klassenraum des BRG Kepler begonnen. Zuerst wurden die nicht zu behandelnden Flächen mit speziellen, Wasser abweisenden Abdeckmaterialien abgedeckt um Verunreinigungen zu verhindern. Nun wurden die vorhandenen Elektroinstallationsdosen mit eigens angefertigten Zwischenringen versehen, um ein nachträgliches Erreichen der E- Installation zu gewährleisten. Auch mussten die Anschlüsse für die Lichtbänder gesondert behandelt werden. Die Zellulosefördermaschine wurde direkt unter der Klasse im Hof platziert, um einen reibungslosen Ablauf der Montage zu gewährleisten. Die Zellulose und das Klebergemisch werden jeweils getrennt mittels Schlauchleitungen entlang der Fassade durch ein Fenster zur Mischdüse transportiert.

Beim Aufspritzvorgang ist unbedingt darauf zu achten, dass der Auftrag der Zellulose möglichst homogen verläuft, um eine gleichmäßige Oberfläche nach dem Abzug zu erreichen. Parallel zu dem Materialauftrag wurde mit der Ausmessung und Installation der Grundsteher für die Abzugslehre begonnen. Diese wurden in einem zuvor definierten Abstand zur Wand montiert. Danach wurden die Schienen für den Verfahrwagen angebracht, der aufgrund der Raumhöhe von vier Metern in zwei übereinander liegenden horizontalen Ebenen verfährt. Im Anschluss wurde nun der Geräteträger im Verfahrwagen befestigt und danach die Energieleitungen für die Fernbedienung ausgelegt.

Begonnen wurde mit dem Abzug in der oberen Ebene mit der Feinjustierung der gewünschten Zellulosestärke für den weiteren Materialabtrag. Nun wurde der Motor der Abzugsbürste mit langsamer Geschwindigkeit gestartet. Die Oberflächenbeschaffenheit ist auch abhängig von der Geschwindigkeit der Abzugsbürste, deshalb wurde nun eine Optimierung der Bürstendrehzahl durchgeführt. Nun wurde entlang der waagrechten Ebene Bahn um Bahn von oben nach unten die überschüssige Zellulose abgestreift. Hier zeigte sich, dass die konstruktionsbedingten Passungenauigkeiten und zu geringen Materialsteifigkeiten der Hauptsteher für die Herstellung eines vollständig ebenen Untergrundes noch verbesserungsfähig sind.



Fig. 18 Klassenraum mit Zellulosegrundbeschichtung

#### 4.5.2 Deckenabsorber

Die aus akustischer Sicht für den Deckenbereich notwendige 10 cm dicke Zellosoeschicht stellte eine besondere Herausforderung dar, da die konventionelle Aufspritztechnologie aufgrund des relativ hohen Eigengewichts der feuchten Zelluloseflocken lediglich Schichtdicken bis zu 7 cm zulässt. Daher wurde bereits im Vorfeld der Montage mit einer Vorfertigung von Platten mit Zellulosebeschichtung im Werk in Hartberg begonnen. Als Trägerplatten wurden wie schon zuvor für die Hallraummessungen OSB-Platten mit einer Stärke von 22 mm gewählt, die mit einer Schichtstärke von 5 cm Zellulose versehen wurden.

Nach vorhergehenden Prüfungen der Deckenunterkonstruktion wurde am mit der Montage der vorgefertigten, vollständig durch getrockneten Zelluloseplatten begonnen. Im Anschluss wurden als Begrenzung und optischer Abschluss der nun aufzuspritzenden 5 cm dicken Zelloseschicht 10 cm breite Fermacellstreifen angebracht. Wie schon zuvor im Wandbereich wurde nun die Zellulose von einem verfahrbarem Gerüst auf die Decke gespritzt. Speziell für diese Aufbringung über Kopf benötigt man langjährige Erfahrung, um eine gleichmäßig ebene Oberfläche zu erreichen. Die hier vorgestellte teilweise Vorfertigung der Zellulosebeschichtung wird – neben der noch zu optimierenden Schaum-Spritztechnologie - als zukunftsweisende Methode betrachtet, die relativ dicken, für eine optimale akustische Auslegung notwendigen Zelloseschichten herzustellen und gleichzeitig praktikable Austrocknungszeiten zu realisieren.



Fig. 19 10 cm dicker Deckenabsorber als „Spielplatz“

#### 4.6 Labor-Putzmuster

Für die Bestimmung des Absorptionsgrades unterschiedlicher Systemaufbauten wurden quadratische Grundkörper mit einer Seitenlänge von 198 mm - bestehend aus einer 22 mm dicken OSB-Trägerplatte mit 4 cm Zellulosebeschichtung – herangezogen.

(Probenbezeichnung CA1 bis CA10, CA22 bis CA31) Entsprechend den ausgewählten Systemaufbauten wurde zuerst der Grundputz in einer Schichtdicke von 13 bis 15 mm und nach der erforderlichen mehrtägigen Trocknungszeit der Deckputz manuell aufgebracht.



Fig. 20 Herstellung der Putzprobekörper für die Bestimmung des Absorptionsgrades



Für die Bestimmung des Strömungswiderstandes als Maß für die Schalloffeneit wurden von ausgewählten Rezepturvarianten des Deckputzes Probekörper mit unterschiedlicher Dicke von 5 bis 15 mm hergestellt (Probenbezeichnung CA11 bis CA21, CA32). Dafür wurde der Putz in kreisrunde Kunststoffringe mit einem Durchmesser von 98 mm gefüllt und plan abgezogen. Als Unterlage wurde eine keramische Fliese verwendet.



Fig. 21 Unterschiedliche Putzmuster für die Bestimmung des Strömungswiderstandes

Für die Hallraummessungen wurden mit Zellulose beschichtete OSB-Platten mit den Abmessungen 60 x 120 cm herangezogen und entsprechend dem ausgewählten Systemaufbau mit Grund- und Deckputz beschichtet.

Aufgrund einer Schwankungsbreite von 5 bis 15 mm bei der Schichtdicke der Zellulosebeschichtung wurde vor Applikation des Grundputzes die Aluminiumprofile befestigt und um die Platten ein umlaufender Rahmen angebracht, damit eine weitgehend plane Oberfläche erzielt werden konnte. Der Grundputz wurde mit einer bauüblichen Putzmaschine angemischt, aber aufgrund der kleinen Plattenabmessungen nicht maschinell aufgespritzt, sondern gleichmäßig mit einer Kelle auf der Oberfläche verteilt und mit einer Latte eben abgezogen. Nach entsprechender Trocknungszeit wurde der schalloffene Deckputz manuell aufgezogen und geglättet.



Fig. 22 Probekörperherstellung für die Hallraummessungen

#### 4.7 Ausstattung eines Klassenzimmers mit dem neuartigen Putzsystem

Nach dem Aufbringen der Zellulosedämmung wurde nach einer mehrwöchigen Trocknungszeit die Putzbeschichtung aufgebracht, wobei vom grundsätzlichen Aufbau drei Systeme unterschieden werden konnten.

Für das System VII (Beschreibung siehe Kap. 5.6 / Hallraummessungen) wurden im ersten Schritt die Aluminiumlochprofile mit Nägeln in der Zellulosebeschichtung befestigt. Aufgrund von Unebenheiten in der Zelluloseschicht wurden die Profile zusätzlich seitlich mit dem Grundputz verklebt. Danach wurde der Grundputz mit einer bauüblichen Putzmaschine (Typ PFT G4) aufgespritzt und mit einer Stahltraufel plan abgezogen. Nach einigen Stunden war der Grundputz soweit verfestigt, dass die Oberfläche mit einem Schwammbrett fertig verrieben werden konnte.



Fig. 23 Vor Ort Montage der Probe VII – Anheften, Fixieren und Verputzen der abgeklebten Aluminium-Lochblechprofile

Für das System VI (siehe Kap. 5.6) wurden anstelle der Aluminiumprofile Zellulosestreifen auf dem Zelluloseuntergrund befestigt. Danach wurde in gleicher Weise wie beim System VII der Grundputz aufgebracht. Problematisch dabei war, dass an der Kontaktfläche Grundputz zu Zellulosestreifen der Putz schneller austrocknete als in der Fläche und beim Verreiben in diesem Bereich aufgerissen wurde und daher aufwändig nachgearbeitet werden musste (siehe nachfolgende Abbildung).



Fig. 24 Probe VI – Probleme beim Verreiben des Grundputzes

Auf einer Raumseite wurde beim System VI auf den Grundputz nach einer zweiwöchigen Trocknungszeit ein schalloffener Deckputz mit einer Stahltraufel aufgezogen und gleichzeitig geglättet.



Fig. 25 Applikation des Einkornputzes auf Probe VI\_mB



## 5 Akustische Messungen

### 5.1 Orientierungsmessungen des Absorptionsgrades aufgespritzter Zellulose im Impedanzrohr 10 x 10 cm

Da akustische Messwerte aufgespritzter Zelluloseschichten, welche als Putzgrund geeignet sind, vollständig fehlen, wurde in einem ersten Arbeitsschritt eine Standortbestimmung hinsichtlich des Absorptionsgrades mittels Impedanzrohrmessungen durchgeführt. Die erwähnten 10 x 10 cm großen Laborprobekörper wurden jeweils doppelt vermessen um die Konsistenz der Messergebnisse sicherzustellen und eine Mittelung der Werte zu ermöglichen.

Nach dem ersten Messzyklus (zwei Messungen mit identischen Einstellungen) wurde der Mikrofon-Abstand von „kurz“ auf „weit“ (= 10 bzw. 20 cm) gestellt. Damit verschiebt sich der Messbereich zu tieferen Frequenzen. Nach den ersten vier Messungen wurde der Prüfling herausgenommen und um 90° gedreht wieder in das Impedanzrohr eingebracht. So sollten Effekte, die durch den Einbau und die Montage der Messanordnung verursacht werden, sichtbar werden, um gegebenenfalls eine Kompensation durchzuführen. Danach wurde zunächst wieder mit kurzem Mikrofon-Abstand gemessen, hierauf mit weitem Mikrofon-Abstand. In Summe wurde also jede Probe achtmal gemessen. Eine Ausnahme stellte die erste Probe A2I dar. Hier kamen weitere acht Messungen hinzu, bei denen die Probe vertikal gedreht wurde, sodass die Seite mit der weniger glatten Oberfläche zum Lautsprecher des Impedanzrohres zeigte.

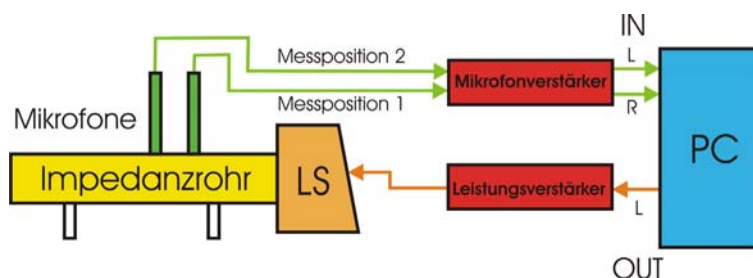


Fig. 26 Schematische Skizze der Messanordnung und Impedanzrohr 10 x 10 cm (hier ohne Messmikrofone)

### 5.1.1 Messergebnisse

Beispielhaft für die Messungen des Absorptionsgrades verschiedener 6 cm dicker Zelluloseproben ist im Folgenden Probekörper A2I (Dichte ca. 80 kg/m<sup>3</sup>) angeführt.

200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz
0,36	0,46	0,59	0,69	0,81	0,92	0,94	0,91	0,86	0,84

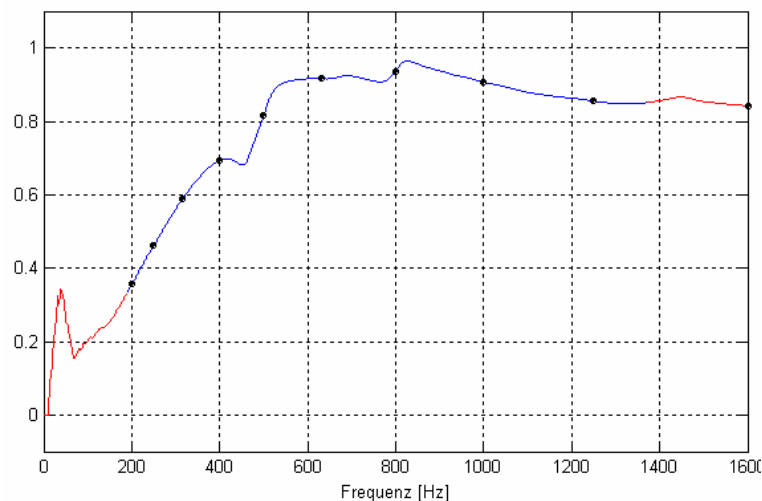


Fig. 27 Absorptionsgrade der Probe A2I

### 5.1.2 Umrechnung $\alpha_0$ auf $\alpha_{\text{diff}}$

Ist der Absorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall  $\alpha_0$  bekannt, lässt sich daraus für lokal wirkende ebene Absorber der Absorptionsgrad für diffusen Schalleinfall  $\alpha_{\text{diff}}$  nach der folgende Gleichung berechnen [Mechel]:

$$\alpha_{\text{diff}} = 8 \left[ \frac{2}{1 - \sqrt{1 - \alpha_0}} - \frac{1 - \sqrt{1 - \alpha_0}}{2} + 2 \ln \frac{1 - \sqrt{1 - \alpha_0}}{2} \right] \cdot \left[ \frac{1 - \sqrt{1 - \alpha_0}}{1 + \sqrt{1 - \alpha_0}} \right]^2$$

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang von  $\alpha_0$  und  $\alpha_{\text{diff}}$  sowie die Differenz  $\alpha_{\text{kor}} = \alpha_{\text{diff}} - \alpha_0$  um die der Absorptionsgrad  $\alpha_{\text{diff}}$  bei diffusem Schalleinfall größer ist als der im Impedanzrohr gemessene Absorptionsgrad  $\alpha_0$ .

Daraus ist ersichtlich, dass der gemessene Absorptionsgrad  $\alpha_0$  insgesamt eher einen unteren Grenzwert für die tatsächlich zu erwartende Absorption darstellt, und insbesondere bei mittleren Absorptionswerten die tatsächliche Absorption um bis zu 0,17 höher liegt.

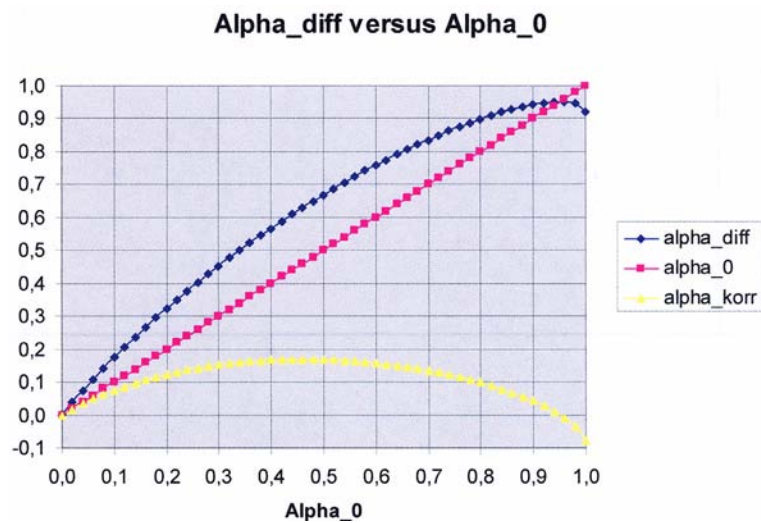


Fig. 28 Zusammenhang zwischen  $\alpha_0$  und  $\alpha_{\text{diff}}$ , sowie die Differenz  $\alpha_{\text{korr}} = \alpha_{\text{diff}} - \alpha_0$

## 5.2 Bestimmung des Strömungswiderstandes der unverputzten Zelluloseproben

Gemäß der in AP 1 festgelegten Vorgangsweise wurde in ersten Orientierungsmessungen die Homogenität und Reproduzierbarkeit der Zellulosekörper anhand der Bestimmung des längenbezogenen Strömungswiderstandes nach [DIN EN 29053] und des Absorptionsgrades bei senkrechtem Schalleinfall als dem wichtigsten Kriterium für den Absorberkörper überprüft.

Aus den von CPH erhaltenen Mustererien wurden mittels einer Bandsäge scheibenförmige Probekörper mit 10 cm Durchmesser (bei unveränderter Dicke) erzeugt und in unten abgebildeter Vorrichtung vermessen.



Fig. 29 Probenvorbereitung und Messung des Strömungswiderstandes nach DIN EN 29053 (1993)

Die Messwerte der Strömungswiderstände der ersten beiden Serien wiesen eine Streuung bis zu einem Faktor von 11 auf. Daher wurde von CPH eine dritte Serie mit höherer Dichte erzeugt und analog vermessen.

Die Streuung der Messwerte bei Serie 3 war aufgrund der Probenkonsistenz deutlich kleiner als bei den Serien 1 und 2. Gemittelt aus fünf Probekörpern betrug der längenbezogene Strömungswiderstand  $19.600 \text{ Pa s/m}^2$  und liegt damit schon recht nahe an den in den Vorabberechnungen angesetzten und für das Absorptionsmaximum bei 250 Hz bei den gegebenen Randbedingungen erforderlichen  $21.000 \text{ Pa s/m}^2$ . Die Messergebnisse der Serien 1 - 3 sind im Anhang / Kapitel A 1 / Seite A 3 angeführt.

### 5.3 Bestimmung des Absorptionsgrades unverputzter Zellulose im Impedanzrohr 20 x 20 cm

Nach Adaptierung der Aufspritztechnologie wurden weitere Probekörper im 20 x 20 cm großen Impedanzrohr gemessen. Die Messergebnisse der Serie 3 (4a-4, 4a-5, 4a-6) bei direkter Aufbringung auf eine schallharte Wand sind in nachfolgender Abbildung dargestellt. Zwei weitere Messergebnisse mit 5 cm und 10 cm Wandabstand befinden sich im Anhang / Kap. A 2 / Seite A 4.

Es hat sich herausgestellt, dass eine Dichte von ca.  $105 \text{ kg/m}^3$  optimal für die Absorption bei der Zielfrequenz ist.

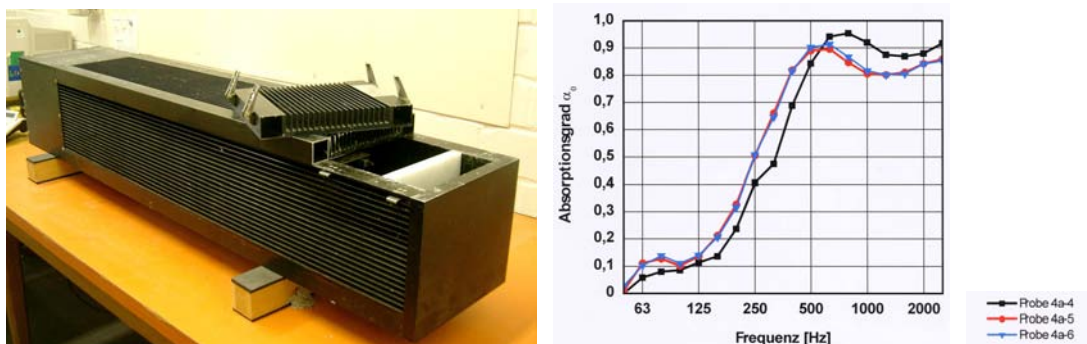


Fig. 30 Impedanzmessrohr für Probekörper 20 x 20 cm und gemessene Absorptionsgrade der Proben 4a-4, 4a-5 und 4a-6, Wandabstand  $D = 0 \text{ cm}$

### 5.4 Bestimmung des Absorptionsgrades von verputzten Probekörpern

In einem weiteren Schritt wurden Zelluloseprobekörper der Serie 4 von WUP mittels schalldichtem Grundputz und 2 sowie 5 cm Schlitzbreite verputzt. Auf dieser Basis wurden verschiedene Schlitzfüllungen und Endbeschichtungen hergestellt und im Impedanzrohr vermessen. Damit wurde der Optimierungsbedarf insbesondere des Spezialputzes ermittelt.

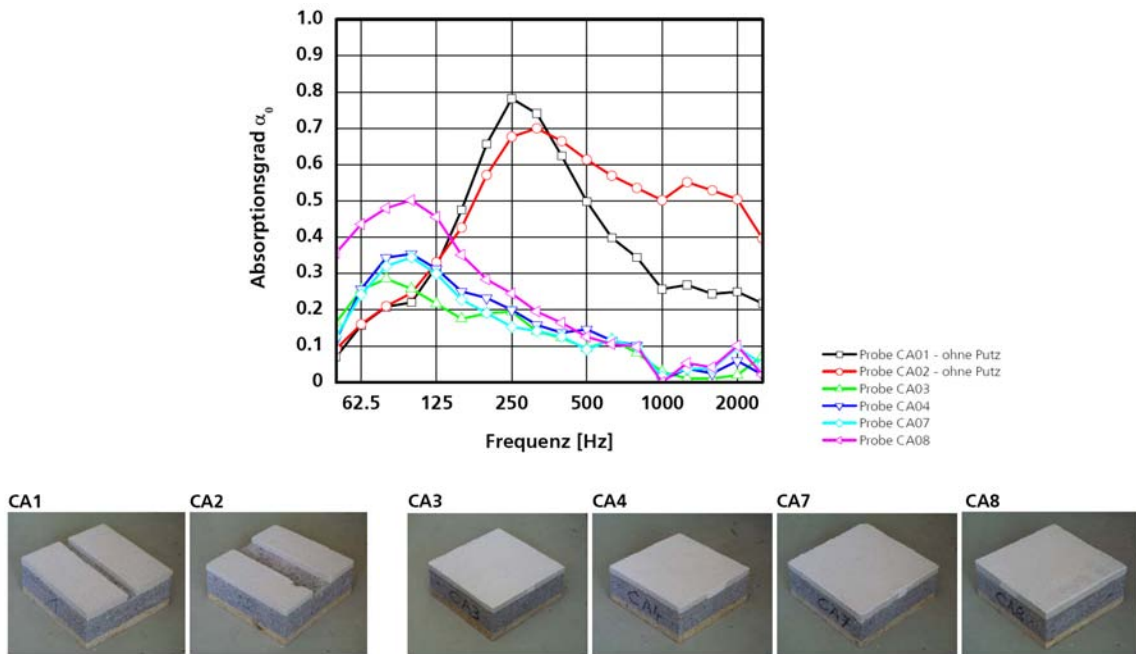


Fig. 31 Gemessenes Absorptionsverhalten von mit Feinkornputz verputztem (rechts) zu unverputztem Schlitz (links)

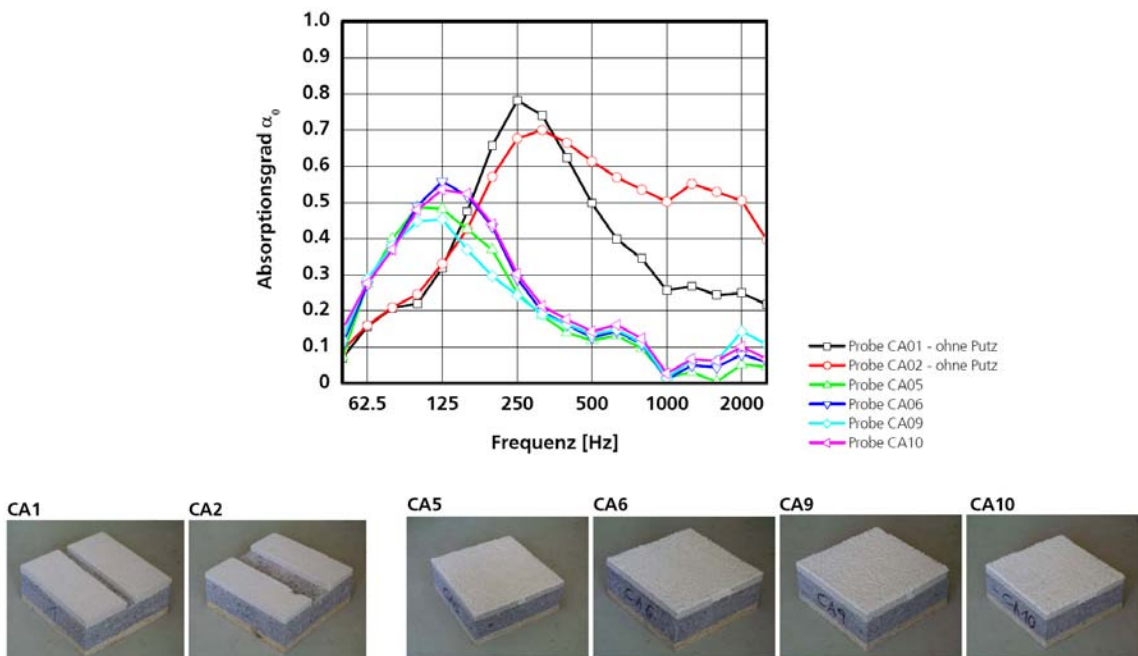


Fig. 32 Gemessenes Absorptionsverhalten von mit Grobkornputz verputztem (rechts) zu unverputztem Schlitz (links)



## 5.5 Bestimmung des Strömungswiderstandes des Einkornputzes

Obwohl die voran gegangenen Messungen an den im Labor hergestellten verputzten Probekörpern zum Teil gute Werte ergeben haben, waren aus Gründen einer praktikablen Baustellenfertigung Adaptierungen des Bindemittelanteils und der Schlitzfüllung notwendig. Das wesentliche Kriterium war dabei die Erhaltung einer weitgehenden Schalloffenheit bei gleichzeitig hoher Bindekraft des Einkornputzes. Nachfolgend wird die Bestimmung des längenbezogenen Strömungswiderstandes verschiedener Einkornputzschichten und des Absorptionsgrades mit verschiedenen Schlitzvarianten verputzter Zellulose-Probekörper dargestellt.

Bezeichnung der Proben	Abmessung		Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Strömungswiderstand [Pa s/m]	Längenbezogener Strömungswiderstand [Pa s/m <sup>2</sup> ]
	Radius [m]	Dicke [m]			
CA11	0.098	0.015	481.3	>99000	-
CA12	0.098	0.015	457.5	>99000	-
CA13	0.098	0.005	435.4	6690	1338000
CA14	0.098	0.010	413.8	>99000	-
CA15	0.098	0.015	406.6	62200	4146667
CA16	0.098	0.005	443.1	1140	228000
CA17	0.098	0.010	374.3	2040	204000
CA18	0.098	0.015	380.3	1430	95333
CA19	0.098	0.005	285.2	17	3400
CA20	0.098	0.010	332.3	163	16300
CA21	0.098	0.015	346.3	824	54933



Fig. 33 Strömungswiderstand verschiedener Einkornputzproben

Bezeichnung der Proben	Zelluloseflocken		Putzschichtdicke [cm]	Schlitz		
	Abmessung [cm]	Dicke [cm]		Breite [cm]	Füllung	Abdeckung
CA22	19.8 x 19.8	4	1.5	2	-	-
CA26	19.8 x 19.8	4	1.5	2	-	Metallgitter
CA28	19.8 x 19.8	4	1.5	2	-	Metallgitter und Einkornputz (fein)
CA24	19.8 x 19.8	4	1.5	2	Zellulose-Flocken	Metallgitter und Einkornputz (fein)
CA30	19.8 x 19.8	4	1.5	2	Einkornputz (grob)	Metallgitter und Einkornputz (fein)
CA23	19.8 x 19.8	4	1.5	5	-	-
CA27	19.8 x 19.8	4	1.5	5	-	Metallgitter
CA29	19.8 x 19.8	4	1.5	5	-	Metallgitter und Einkornputz (fein)
CA25	19.8 x 19.8	4	1.5	5	Zellulose-Flocken	Einkornputz (fein)
CA31	19.8 x 19.8	4	1.5	5	Einkornputz (grob)	Einkornputz (fein)

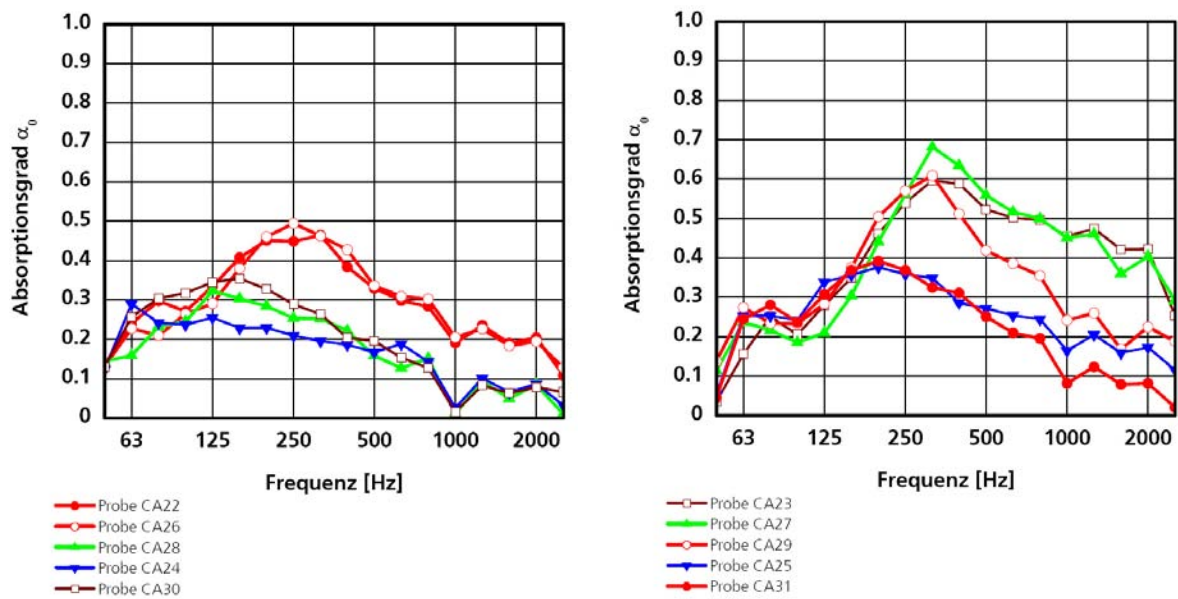


Fig. 34 Absorptionsgrade verschiedener Schlitz- und Abdeckungsvarianten (CA 22 – CA31)

Schließlich wurde nach weiteren Optimierungsschritten ein mittlerer Strömungswiderstand der endgültigen Einkornputzschicht CA 32 von 160 Pa s/m bestimmt.

Bezeichnung der Proben	Abmessung [mm]	Strömungswiderstand [Pa s/m]
CA 32, Probe 1	Radius ca. 50, Dicke ca. 3	70
CA 32, Probe 2	Radius ca. 50, Dicke ca. 3	130
CA 32, Probe 3	Radius ca. 50, Dicke ca. 3	170
CA 32, Probe 4	Radius ca. 50, Dicke ca. 3	290
CA 32, Probe 5	Radius ca. 50, Dicke ca. 3	140



Fig. 35 Verschiedene Probekörper der Endbeschichtung CA 32

## 5.6 Hallraum-Messungen

### 5.6.1 Absorbertypen

Für die Messung des Absorptionsgrades im Hallraum an der TU Graz wurden anhand der Ergebnisse der Untersuchungen im Impedanzrohr die nachfolgend beschriebenen Proben hergestellt.

Probe I: 7 cm Zellulose

Eine ursprünglich geplante Probe II wurde wegen fertigungstechnischer Probleme nicht realisiert

Probe III: 4 cm Zellulose

Probe IV: 4 cm Zellulose (= Probe III) plus 5 mm Dickschichtklebespachtel

Probe V: 4 cm Zellulose plus 5 mm Dickschichtklebespachtel (= Probe IV) plus 5 mm Grobkornputz (Größtkorn 2 mm)

Probe VI\_oB: 4 cm Zellulose mit 15 mm Poraverputz geschlitzt; Schlitzbreite 5 cm; Schlitzabstand 20 cm, Schlitz mit Zellulose gefüllt; ohne Endbeschichtung

Probe VI\_mB: wie Probe VI\_oB aber Endbeschichtung mit 2 mm dickem Grobkornputz

Probe VII: 4 cm Zellulose mit 15 mm dicken Poraverputz geschlitzt; Schlitzbreite 2 cm; Schlitzabstand 20 cm; Schlitz leer; mit Aluminiumlochblechprofil ohne Endbeschichtung

### 5.6.2 Probengröße:

Die Gesamtprobenfläche für die normgemäße Hallraummessung betrug 480 x 300 cm und bestand aus 10 Einzelementen mit je 240 x 60 cm.

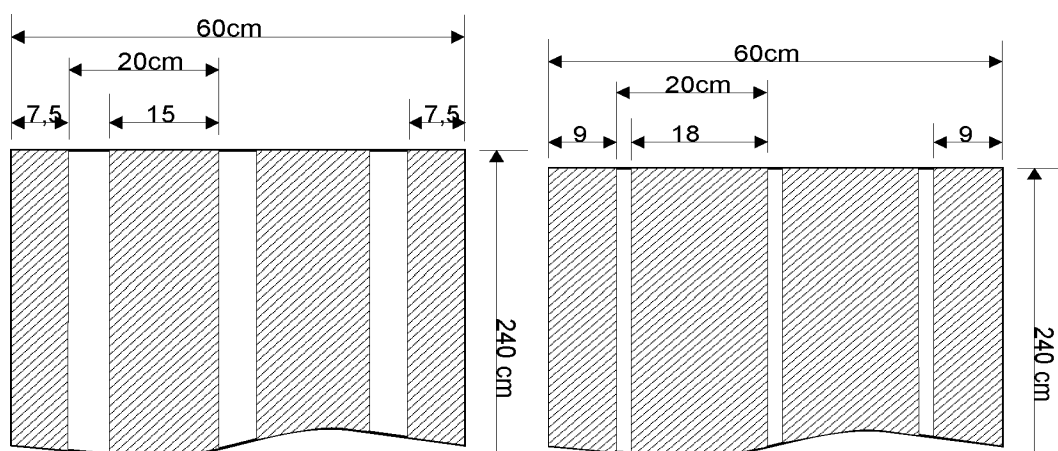


Fig. 36 Schlitzbreite und -abstand für Probe VI (links) und Probe VII (rechts)



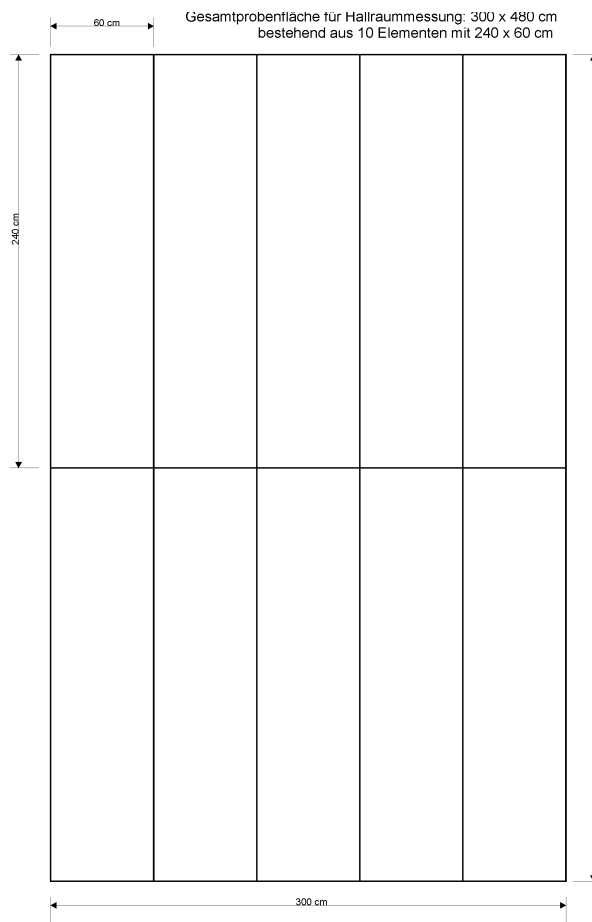


Fig. 37 Gesamtprobengröße für Hallraummessung 480 x 300 cm für die Proben I bis V

Um einerseits für die Proben mit Schlitzten das Risiko von Putzrissen infolge ungünstigem Breiten-/Längenverhältnis der Probenfläche zu minimieren und andererseits durchgehende Schlitzte zu erreichen, wurde die Probenfläche gemäß folgender Abbildung aufgeteilt.

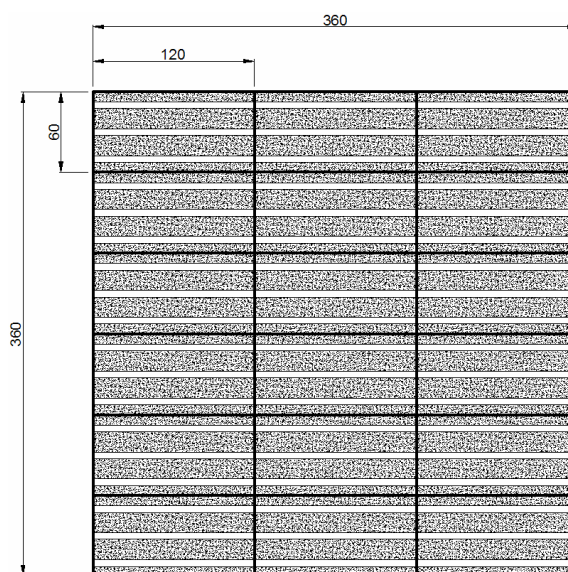


Fig. 38 Gesamtprobengröße 360 x 360 cm für die Probekörperserien VI bis VII

### 5.6.3 Messergebnisse

In nachfolgender Abbildung ist beispielhaft das Messergebnis für die Probe VI\_mB dargestellt. Hinsichtlich der weiteren Messprotokolle siehe Anhang / Kap. A 5 / Seite A 7 ff.

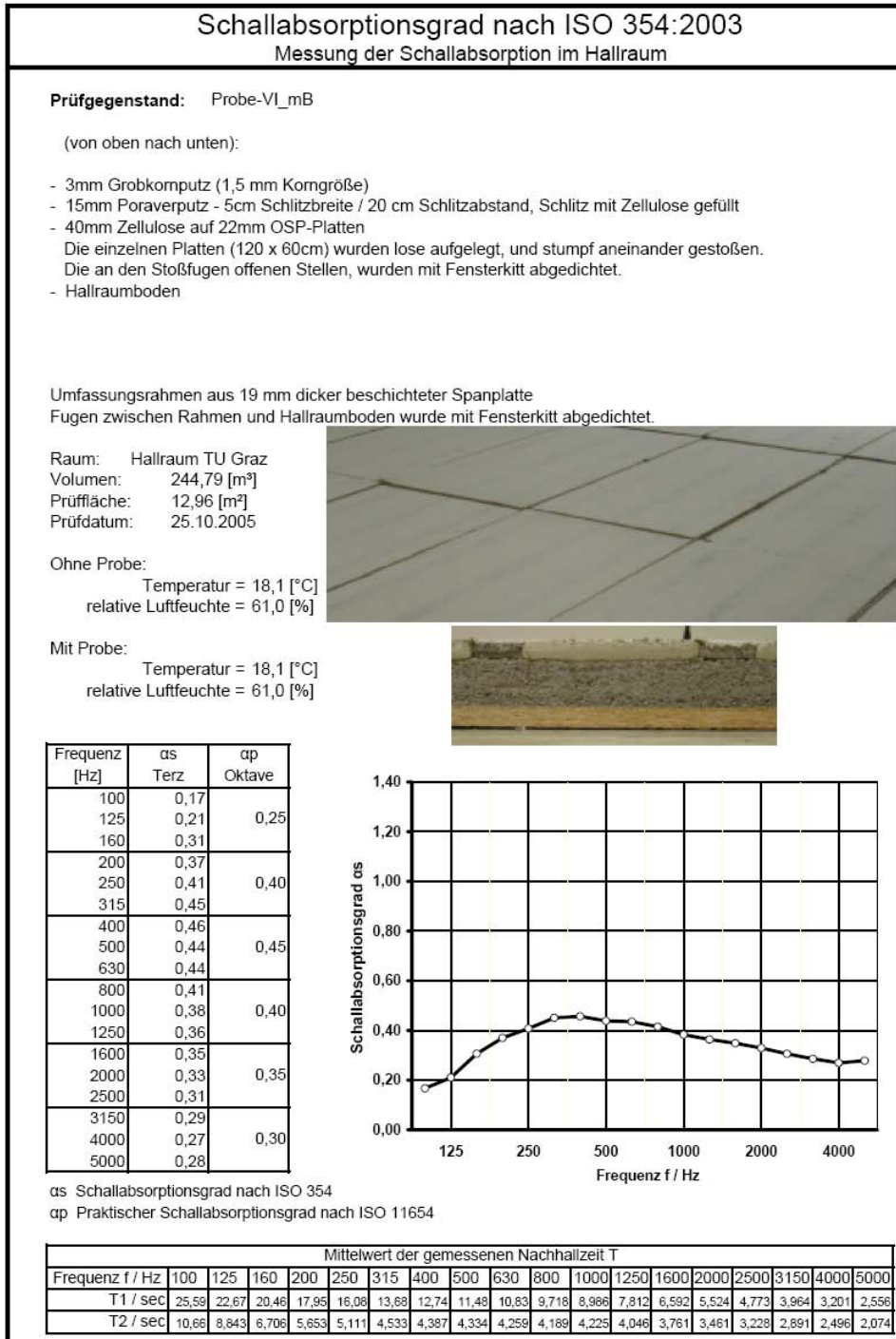


Fig. 39 Messergebnis der Hallraummessung von Probe VI\_mB

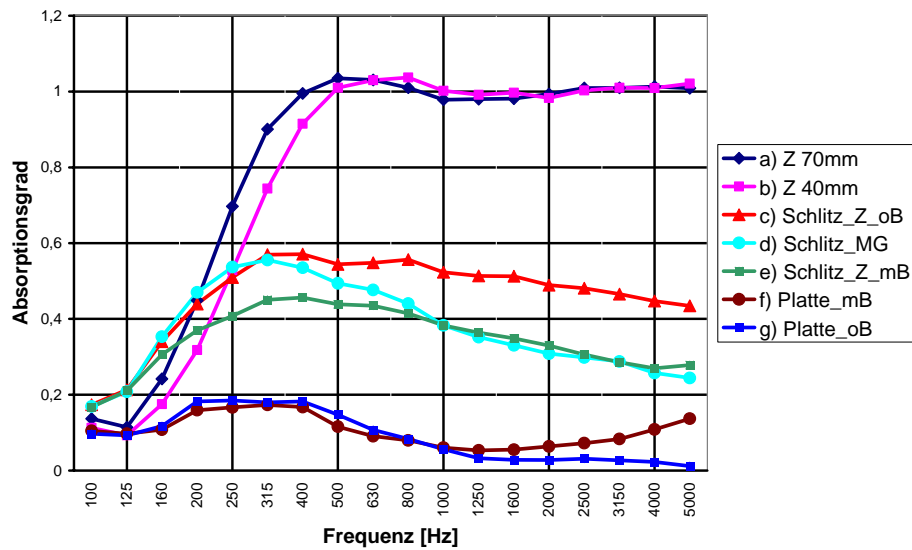


Fig. 40 Zusammenfassung der Hallraum-Messergebnisse

Obige Abbildung zeigt die Zusammenfassung aller im Hallraum vermessenen Absorber. Die beiden Plattenabsorber („f“ mit Beschichtung und „g“ ohne Beschichtung) zeigen kein typisches Plattenabsorberverhalten, was mit großer Wahrscheinlichkeit seine Ursache in verschiedenen Einflüssen beim Aufbau der Absorber im Hallraum hat. Daher wurden diese Absorber im weiteren Verlauf des Projekts ausgeklammert. Die porösen Absorber Probe I („a“) und Probe III („b“), sowie die Schlitzabsorber Proben VI\_oB („c“), Probe VI\_mB („e“) und Probe VII („d“) zeigen das jeweils typische Verhalten. Damit ist erwiesen, dass auch der verputzte Zelluloseabsorber in diesen Konfigurationen akustisch funktioniert.

## 5.7 Vor Ort Messung und raumakustische Optimierung eines Klassenraumes

### Geometrische Abmaße



Fig. 41 Blick in die Klasse

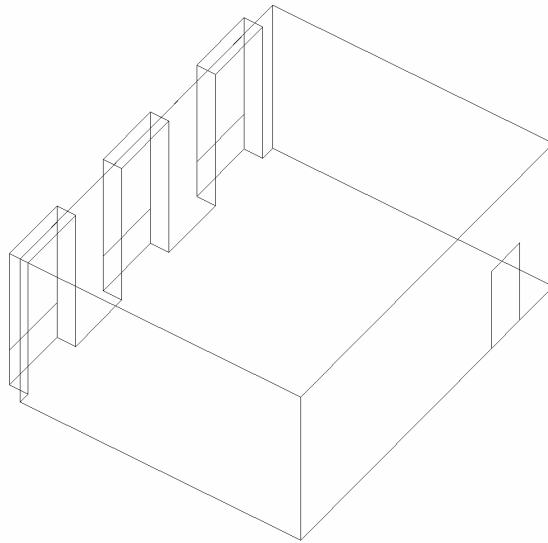


Fig. 42 Schrägriss des Klassenraums mit den Fenster­nischen

Volumen  $V = 263,8 \text{ m}^3$

Gesamtoberfläche  $A = 269,5 \text{ m}^2$

#### **Raumnutzung:**

Unterrichtsraum mit audiovisueller Darbietung

#### **Volumenkennzahl:**

Nach [DIN 18041] wird für Sprachdarbietung eine Volumenkennzahl von  $k = 3 - 6 \text{ m}^3/\text{Platz}$  (Person) gefordert. Für ein Volumen von  $263,8 \text{ m}^3$  und 24 Personen ergibt sich eine Personen­kennzahl von  $k = 11 \text{ m}^3/\text{Platz}$ , womit die Forderung nach DIN nicht erfüllt ist. Erst mit 45 Personen ergäbe sich eine Personenanzahl von  $k = 5,86 \text{ m}^3/\text{Platz}$ .

#### **Bauakustische Anforderung:**

Störschall­druckpegel bauseitiger Geräusche  $L_{NA,Bau}$ :

Schall­druckpegel im betrachteten Raum, der von Außengeräuschen, Geräuschen aus Nachbarräumen, von haustechnischen Anlagen, Sanitärinstallationen und den fest installierten medientechnischen Geräten erzeugt wird.

Störschall­druckpegel der Betriebsgeräusche  $L_{NA,Betrieb}$ :

Schall­druckpegel von zusätzlich im betrachteten Raum betriebenen Geräten, wie mobilen Wiedergabegeräten von Bild und Ton, wie z.B. Lüfter von Videobeamern usw.

Störschall­druckpegel der Publikumsgeräusche  $L_{NA,Publ}$ :

vom Publikum (hier: Darbietende, Lernende, Zuhörer, Nutzer des Raumes) erzeugte Geräusche, wie Stühle rücken, Murmeln, Flüstern, Husten, Gehgeräusche usw.

Der Störschalldruckpegel der bauseitigen sowie der betriebsseitigen Geräusche, sollte für eine mittlere Entfernung von 5 – 8 m zwischen Sprecher und Hörer nach [DIN 18041]  $\leq 40$  dB sein.

Für zweisprachigen Unterricht bzw. für die Eignung schwieriger oder fremdsprachiger Texte sollte der Störschalldruckpegel der bauseitigen sowie der betriebsseitigen Geräusche nach [DIN 18041]  $\leq 30$  dB bzw. für eine bedingte Eignung  $\leq 35$  dB betragen.

Da keine direkte Einflussnahme auf die Höhe der Publikumsgeräusche möglich ist, sollte zumindest der Fußbodenkontakt der mobilen Möblierung (Stuhl- und Tischfüße) entsprechend geräuscharm gestaltet werden (z.B. Gummiunterlagen, Filzgleiter u.ä.), um die durch das Publikum erzeugten Geräusche möglichst gering zu halten.

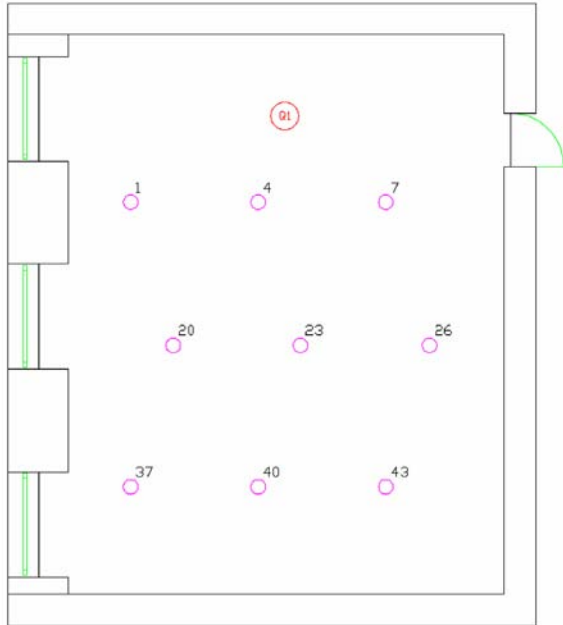
### 5.7.1 Gemessene Nachhallzeit – Rohzustand

Definitionsgemäß ist die Nachhallzeit („Reverberation time / RT“) jene Zeit in Sekunden, die der Schalldruckpegel benötigt, um sich um 60 dB zu vermindern. Nach [ÖNORM EN ISO 3382] kann die Nachhallzeit  $T$  [sec] über ein Auswerte-Intervall der Abklingkurve von 30 dB ermittelt werden, ergibt mit dem doppelten Betrag die „Nachhallzeit  $T$  [sec] mit der normierten Pegelabnahme um 60 dB und ist mit  $T_{30}$  [sec] zu bezeichnen. Da die über  $T_{30}$  [sec] ermittelten bzw. gemessenen Nachhallzeiten den weiteren Berechnungen zugrunde liegen, wird auch dort die Bezeichnung  $T_{30}$  [sec] weiter verwendet.

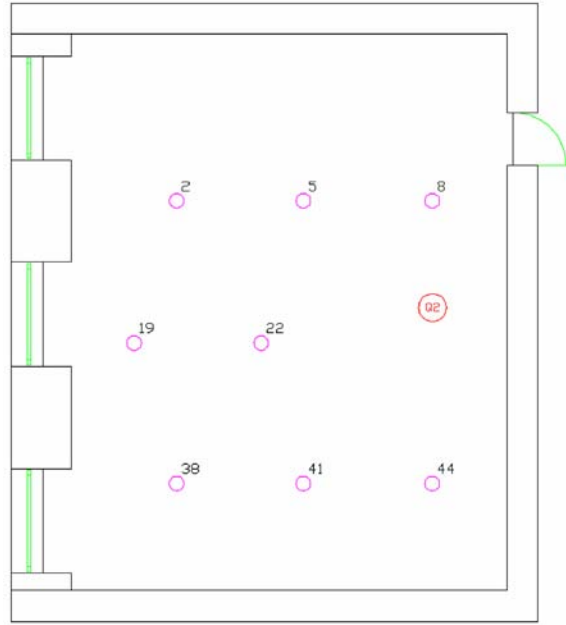
Der anzustrebende Sollwert der Nachhallzeit ( $T_{\text{soll}}$ ) bei mittleren Frequenzen beträgt im besetzten Zustand gemäß [DIN 18041] für ein effektives Raumvolumen  $V$  von rund  $260 \text{ m}^3$  und die Nutzungsart „Unterricht“ (bzw. „Kommunikation“ in [ÖNORM B 8115-3])  $0,60$  s. Im unbesetzten Zustand sollte die Nachhallzeit des Raumes im Allgemeinen nicht mehr als  $0,2$  s über dem Sollwert liegen. Laut [ÖISS] - Richtlinien für den Schulbau / Raumakustik und Schallschutz liegt der Sollwert der Nachhallzeit zur Zeit noch bei  $0,7 - 0,9$  s und das Toleranzband bei  $25 \%$  (anstatt  $20 \%$  in DIN und ÖNORM). Diese Richtlinie befindet sich allerdings in Überarbeitung.

Die Nachhallzeit im Rohzustand (Klassenraum mit Tischen und Stühlen für 24 Schüler, ohne Personen) wurde an drei ausgewählten Quellpositionen und den in unten stehender Abbildung dargestellten Hörpositionen nach [ÖNORM EN ISO 3382] gemessen.

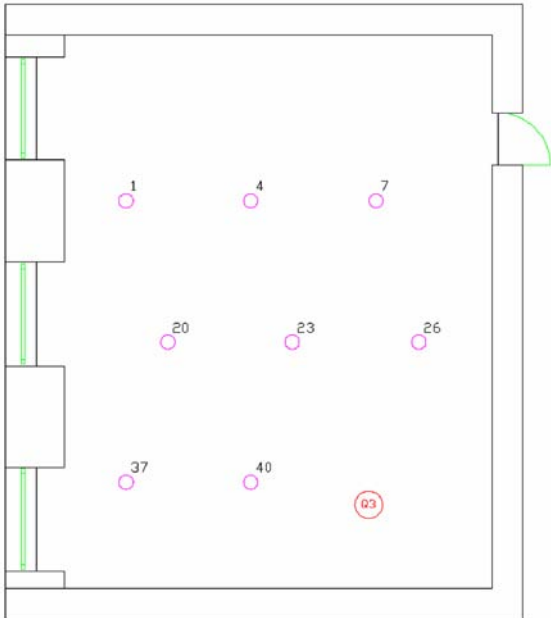
Meßpunkte\_Klassenraum 6a-BRG  
Quelle Q1



Meßpunkte\_Klassenraum 6a-BRG  
Quelle Q2



Meßpunkte\_Klassenraum 6a-BRG  
Quelle Q3



Quellpunkte\_Klassenraum 6a-BRG

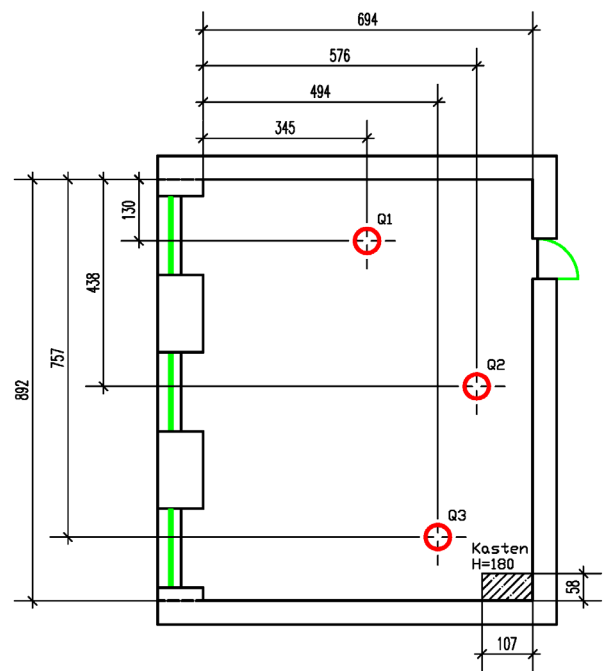


Fig. 43 Quellpositionen und Messpositionen für die Nachhallzeitmessung im Rohzustand



Fig. 44 Betischung und Bestuhlung bei der Messung im Rohzustand sowie Quellpunkt Q2 (rechts)

In der folgenden Grafik wird der im Rohzustand (mit Bestuhlung, ohne Personen) gemessene und über alle Messpunkte gemittelte Frequenzgang der Nachhallzeit in Oktaven von 63 Hz – 8000 Hz dargestellt.

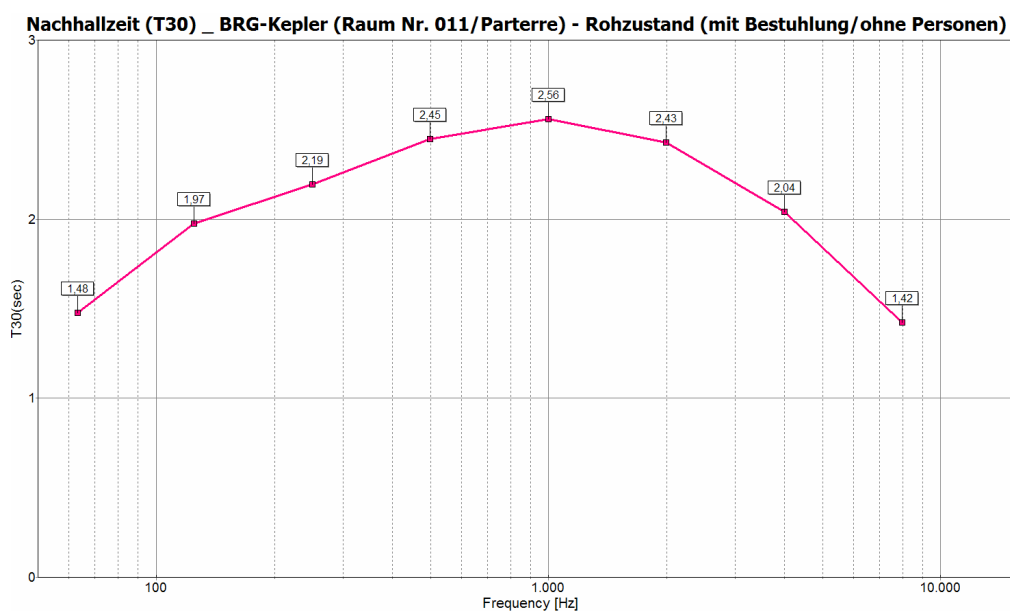


Fig. 45 Über alle Messpunkte gemittelte Nachhallzeit – Rohzustand

#### Verwendete Messgeräte:

Messquelle: Genelec-1032A

Messmikrofon: AKG-480

Messsignal: Sine-Sweep

Mess- und Auswertesoftware: WinMLS

Datum: 12. Juli 2005

Uhrzeit	Temperatur [°C]	Rel. Feuchte [%]	Ruhepegel [dB(A)]
10:30	22°	60%	37,6
11:50	23°	57%	40,6
12:42	24°	56%	37,6
13:25	24°	55%	-

Zur Erfassung der akustischen Feinstruktur des Klassenraumes wurde für alle drei Quellpunkte an dem in unten stehender Abbildung dargestellten Messpunktraster die Raumimpulsantwort gemessen. Daraus lassen sich die in den beiden anschließenden Abbildungen gezeigten räumlichen Verläufe der Nachhallzeit und des Alcons (Articulation loss of consonants) darstellen, anhand derer Problembereiche wie Modenbildung deutlich erkennbar sind. Ebenso können daraus für die Ermittlung der Nachhallzeit die normgemäßen Messpunkte ausgewählt werden.

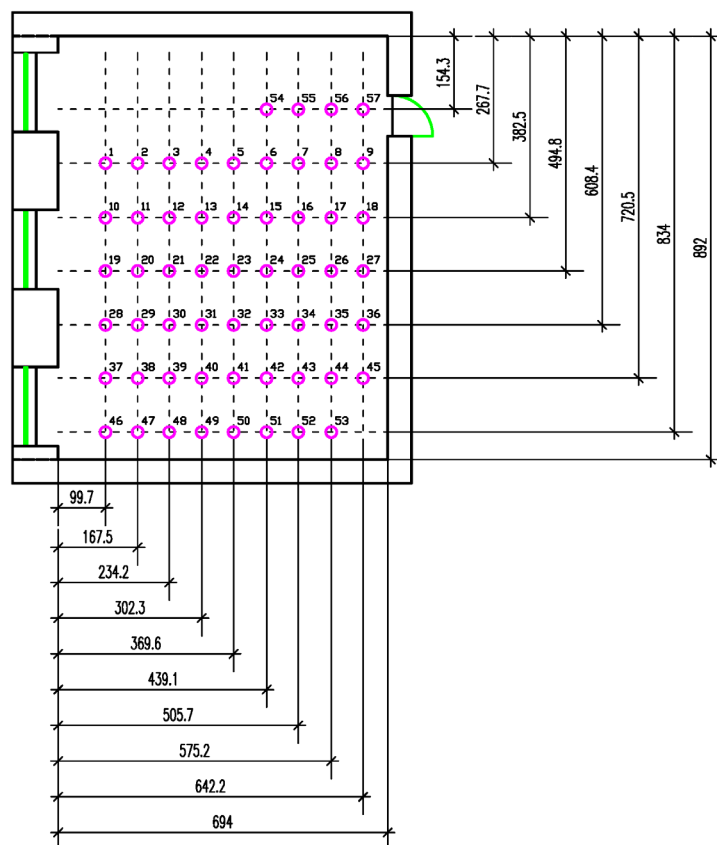


Fig. 46 Messpunkteraster für die Nachhallmessung im Rohzustand

Die räumliche Feinstruktur der Nachhallzeit zeigt in unten stehender Abbildung ab einer Frequenz von 500 Hz einen gleichmäßigen Verlauf im gesamten Klassenraum. Darunter ist insbesondere bei 63 Hz und 125 Hz deutliche Modenbildung erkennbar. Maßnahmen zur Verringerung der Nachhallzeit reduzieren auch die Möglichkeit der Raummodenbildung.



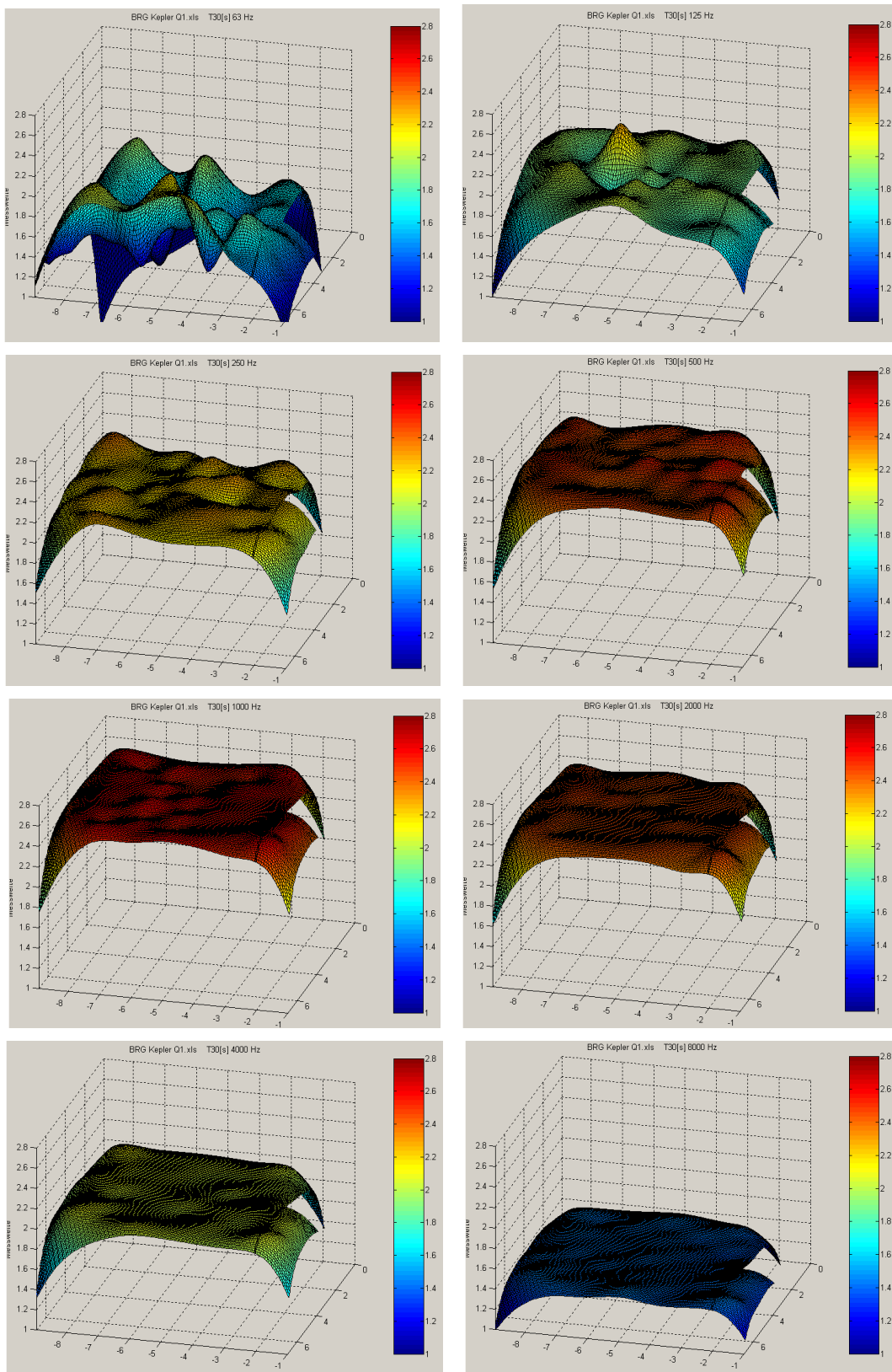


Fig. 47 Nachhallzeitverteilung im Klassenraum bei 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k und 8 kHz

## 5.7.2 Alcons im Rohzustand gemessen und simuliert

Die Beurteilung der Sprachverständlichkeit bzw. Sprachqualität in einem Raum kann über den Alcons erfolgen, der sich aus der Nachhallzeit des Raumes, dem Raumvolumen, dem Abstand des Hörers von der Schallquelle und der Richtwirkung der Schallquelle errechnet. Er gibt in % die Verschlechterung der Sprachverständlichkeit an und sollte für gute Sprachverständlichkeit kleiner als 7 % sein [Ahnert].

- Alcons < 2 % ideale Verständlichkeit
- 2 % < Alcons < 7 % gute Verständlichkeit
- 7 % < Alcons < 20 % befriedigende Verständlichkeit
- 20 % < Alcons unbrauchbare Verständlichkeit

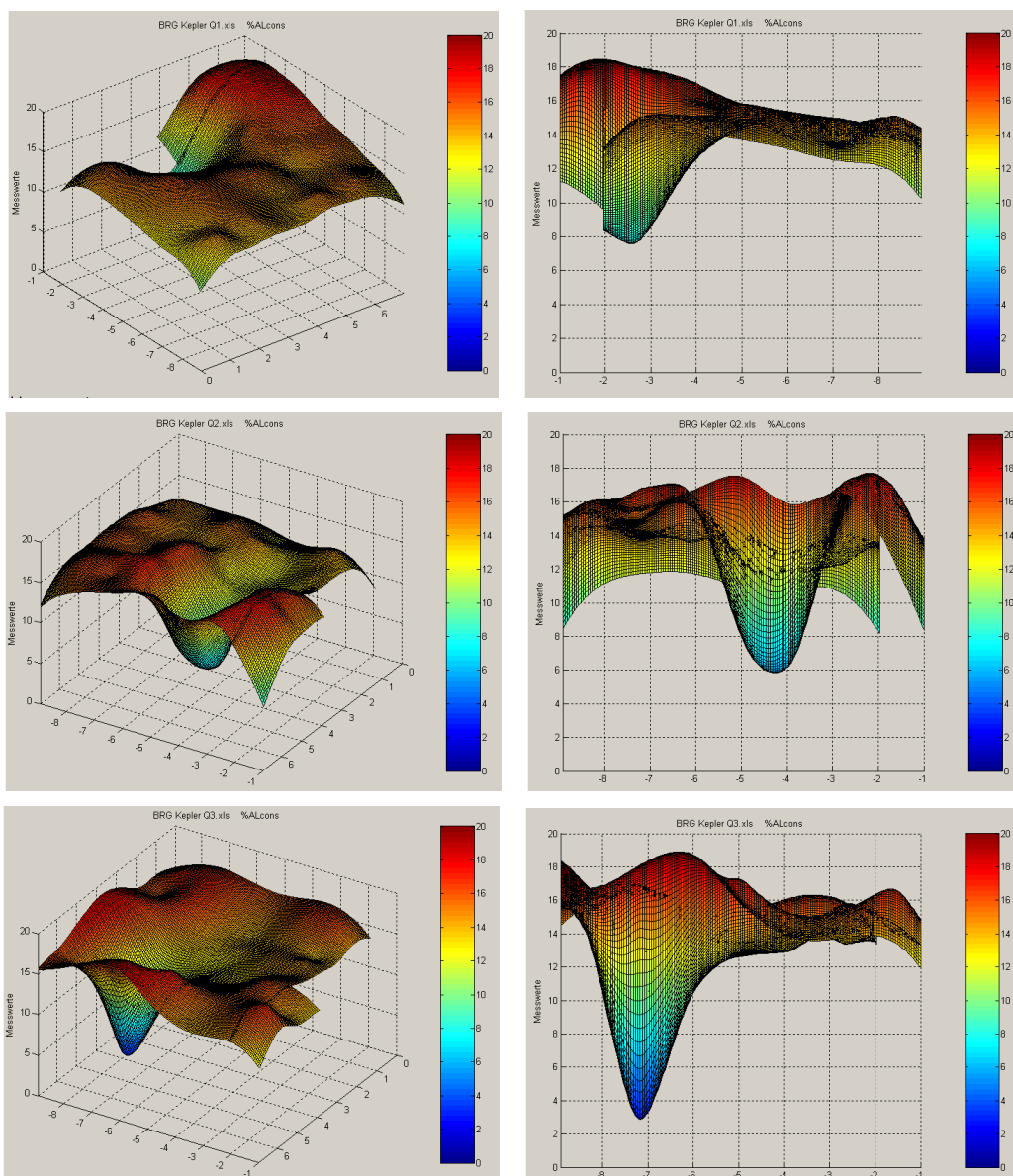


Fig. 48 Alcons für die Quellpunkte Q1 (oben), Q2 (Mitte) und Q3 (unten) im Rohzustand – gemessen

In Annäherung an einen menschlichen Sprecher mit seiner frequenzabhängigen Richtcharakteristik, wurde für die Messung eine Schallquelle mit Richtwirkung verwendet. Obige Abbildung zeigt den aus den Messdaten ermittelten Alcons für die Quellpunkte Q1, Q2 und Q3, der in 1 m Entfernung von der Schallquelle jeweils um 10 % liegt und sich für den restlichen Klassenraum zwischen 14 % und 18 % bewegt. Im leeren Klassenraum ist also lediglich eine befriedigende Sprachqualität vorhanden. Die folgende akustische Simulation des leeren Klassenraumes liefert eine Alcons -Verteilung, die sehr gut mit der Messung übereinstimmt.

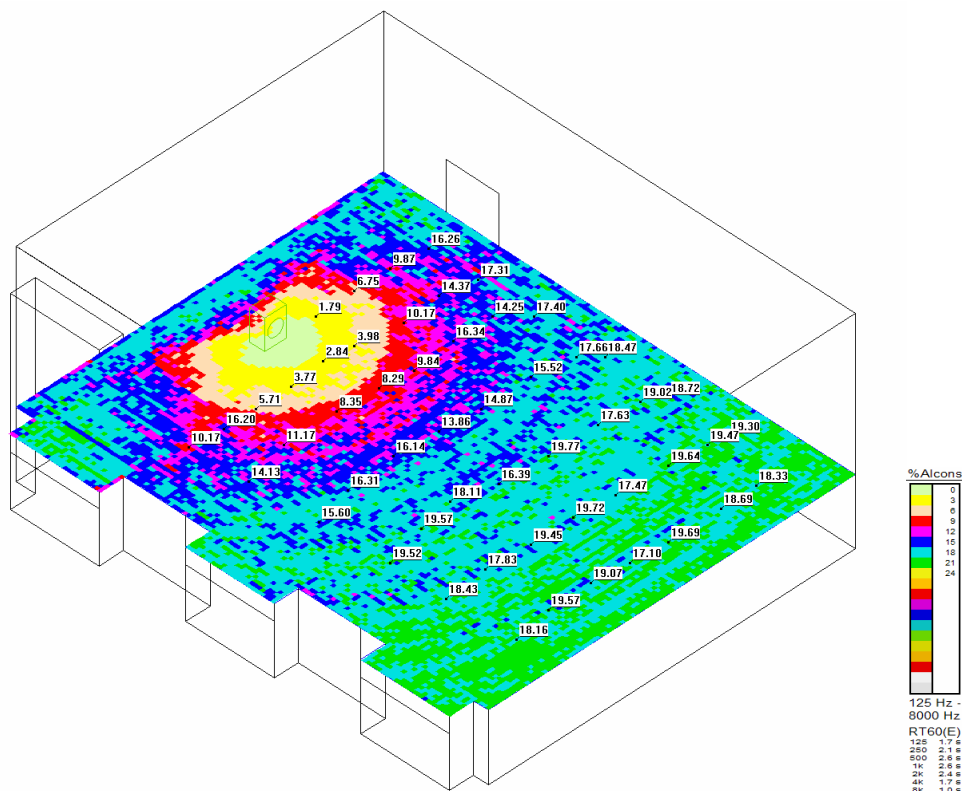


Fig. 49 Simulierte Alcons-Verteilung im leeren Klassenraum für Quellpunkt Q1

### 5.7.3 Berücksichtigung der Schüler

In der folgenden Grafik wird der im Rohzustand (mit Bestuhlung, ohne Personen) gemessene und gemittelte Frequenzgang der Nachhallzeit in Oktaven von 125 Hz – 4000 Hz, im Vergleich zu einer zusätzlichen äquivalenten Absorptionsfläche von 24 Personen sitzend auf Holzgestühl (simuliert) dargestellt.

<b>RT30 - BRG-Kepler (Raum Nr. 011/Parterre)</b>	Frequenz:	125	250	500	1000	2000	4000	[Hz]
	RT30 - Rohzustand:	1,97	2,19	2,45	2,56	2,43	2,04	[sec]
	RT30 - Rohzustand + 24 Personen:	1,67	1,67	1,56	1,52	1,46	1,37	[sec]

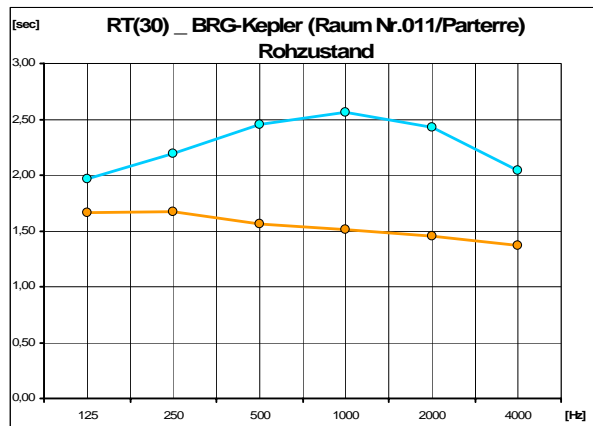


Fig. 50 Simulierte Nachhallzeit bei 24 Schülern (untere Kurve) im Vergleich zur gemessenen Nachhallzeit im Rohzustand (obere Kurve)

### 5.7.4 Erforderliche Nachhallzeit

Für ein Volumen von 263,8 m<sup>3</sup> beträgt die optimale mittlere Nachhallzeit für die Nutzungsart „Unterricht“ nach [DIN 18041]  $T_{\text{soil}} = 0,6 \text{ s}$ .

In folgender Grafik wird das Toleranzband für den anzustrebenden Bereich der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Frequenz für Sprache nach [DIN 18041] gezeigt und die durch eine zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche von 24 Personen (sitzend auf Holzgestühl) verkürzte gemessene Nachhallzeit im Rohzustand.

<b>Projekt:</b>	<b>RT30_BRG-Kepler (Raum Nr.011/Parterre)</b>						
	(Nachhallzeit-Toleranzen nach DIN 18041:2004-05)						
<b>Raumzustand:</b>	Rohzustand + 24 Personen (sitzend auf Holzgestühl)						
<b>Frequenz:</b>	125	250	500	1000	2000	4000	[Hz]
<b>Istzustand:</b>	1,67	1,67	1,56	1,52	1,46	1,37	[sec]

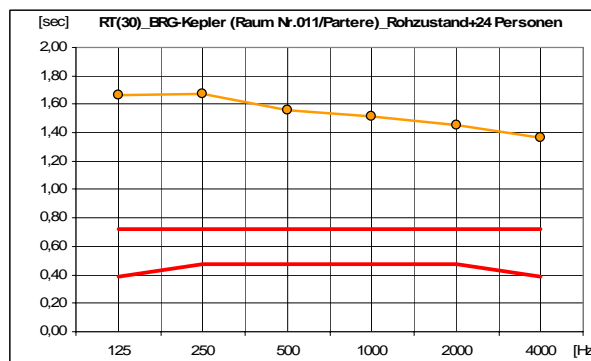


Fig. 51 Toleranzband für die optimale Nachhallzeit und simulierte Nachhallzeit bei 24 Schülern

## 5.8 Gemessene Nachhallzeit nach Einbau der Schlitzabsorber

Nach dem Einbau der Schlitzabsorber im Wandbereich wurde die Nachhallzeit gemessen und daraus verschiedene Möglichkeiten des Aufbaus für den Deckenabsorber berechnet. Durch die höheren Absorptionswerte der Wandabsorber im Vergleich zur Simulation ergibt gegenüber der ursprünglichen Berechnung für den Deckenabsorber eine Flächenreduktion von 30 auf 24 m<sup>2</sup>. Die Protokolle der schrittweisen Vor-Ort-Messungen bezogen auf die verschiedenen Absorbertypen und die Variantenberechnungen zur Optimierung des Deckenabsorbers sind im Anhang dargestellt.

### Leere Klasse mit Wandabsorbern ohne Schüler

26,76 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-400 (BRG-Messung)

26,83 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (BRG-Messung)

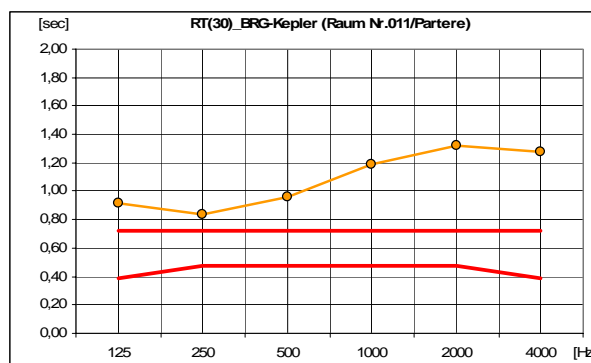


Fig. 52 Gemessene Nachhallzeit nach Einbau der Schlitzabsorber

### Klasse mit Wandabsorbern und Schülern

26,76 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-400 (BRG-Messung)

26,83 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (BRG-Messung)

32 Personen sitzend auf Holzgestühl (simuliert)

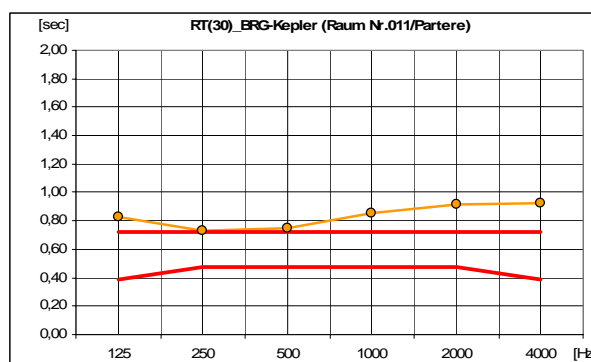


Fig. 53 Gemessene Nachhallzeit nach Einbau der Schlitzabsorber, mit simulierten Schülern

### 5.9 Gemessene Nachhallzeit im Endzustand



Fig. 54 Blick in die Klasse nach der Sanierung

<b>Projekt:</b>	<b>RT30_BRG-Kepler (Raum Nr.011/Parterre)</b>						
(Nachhallzeit-Toleranzen nach DIN 18041:2004-05)							
<b>Raumzustand:</b>	Endzustand (gemessen) + 32 Personen (simuliert)						
<b>Frequenz:</b>	125	250	500	1000	2000	4000	[Hz]
<b>Istzustand:</b>	0,68	0,56	0,55	0,61	0,63	0,59	[sec]

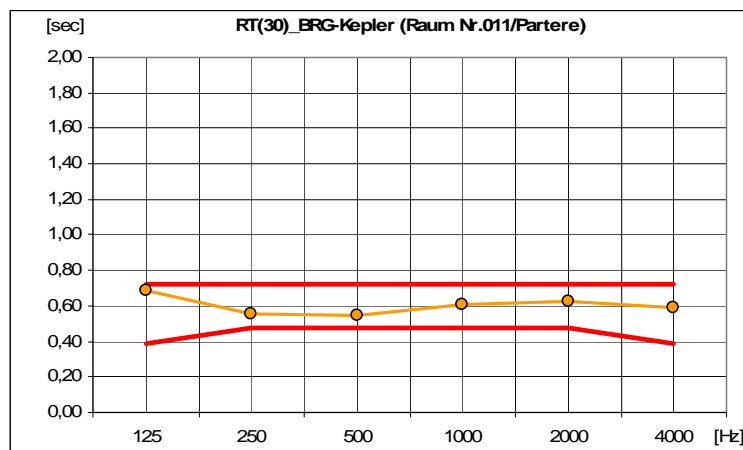


Fig. 55 Nachhallzeit Endzustand (gemessen) + 32 Personen auf Holzgestühl (simuliert)



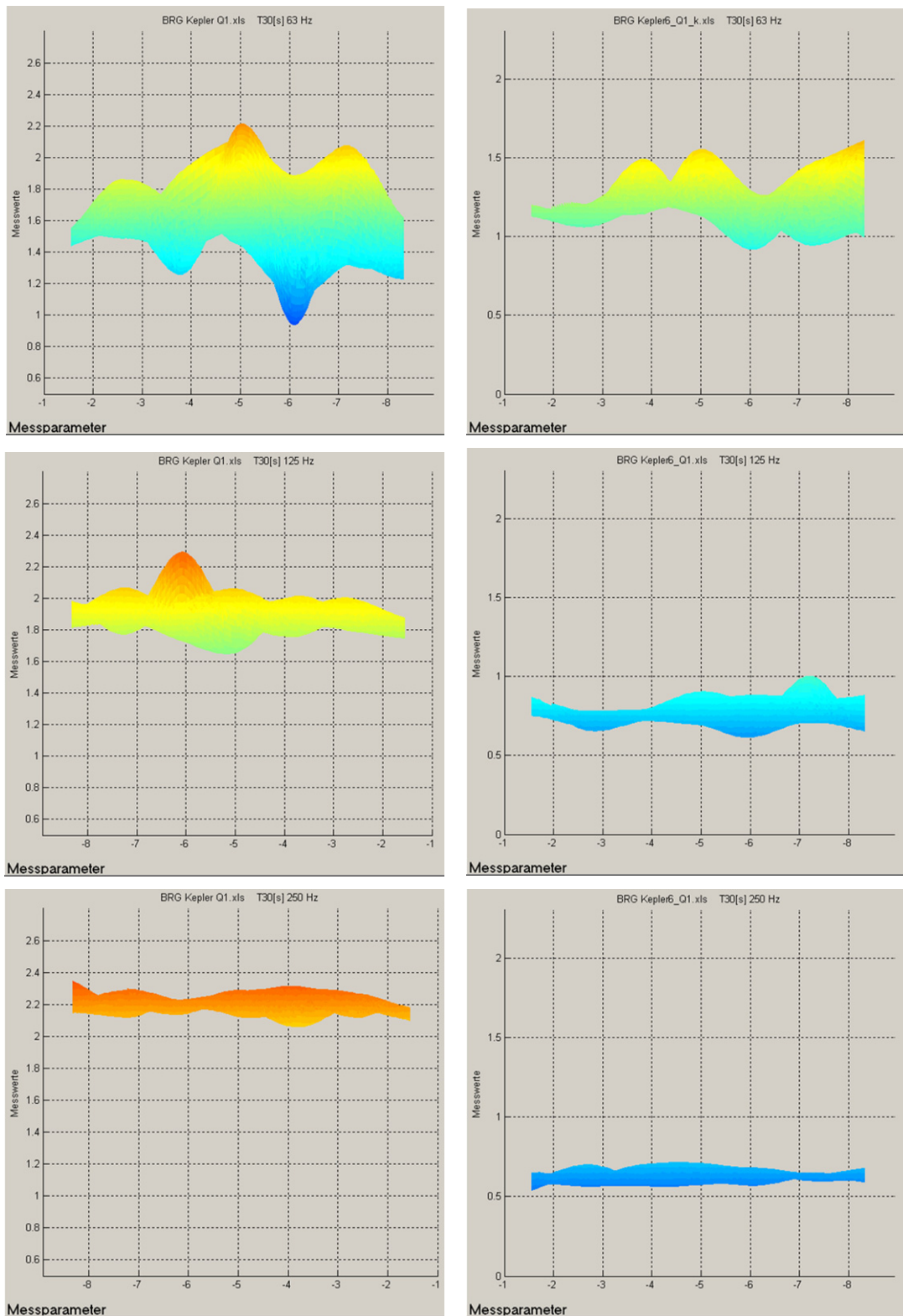


Fig. 56 Vergleich der Nachhallzeiten bei 63, 125 und 250 Hz jeweils vor (links) und nach der Sanierung (rechts)

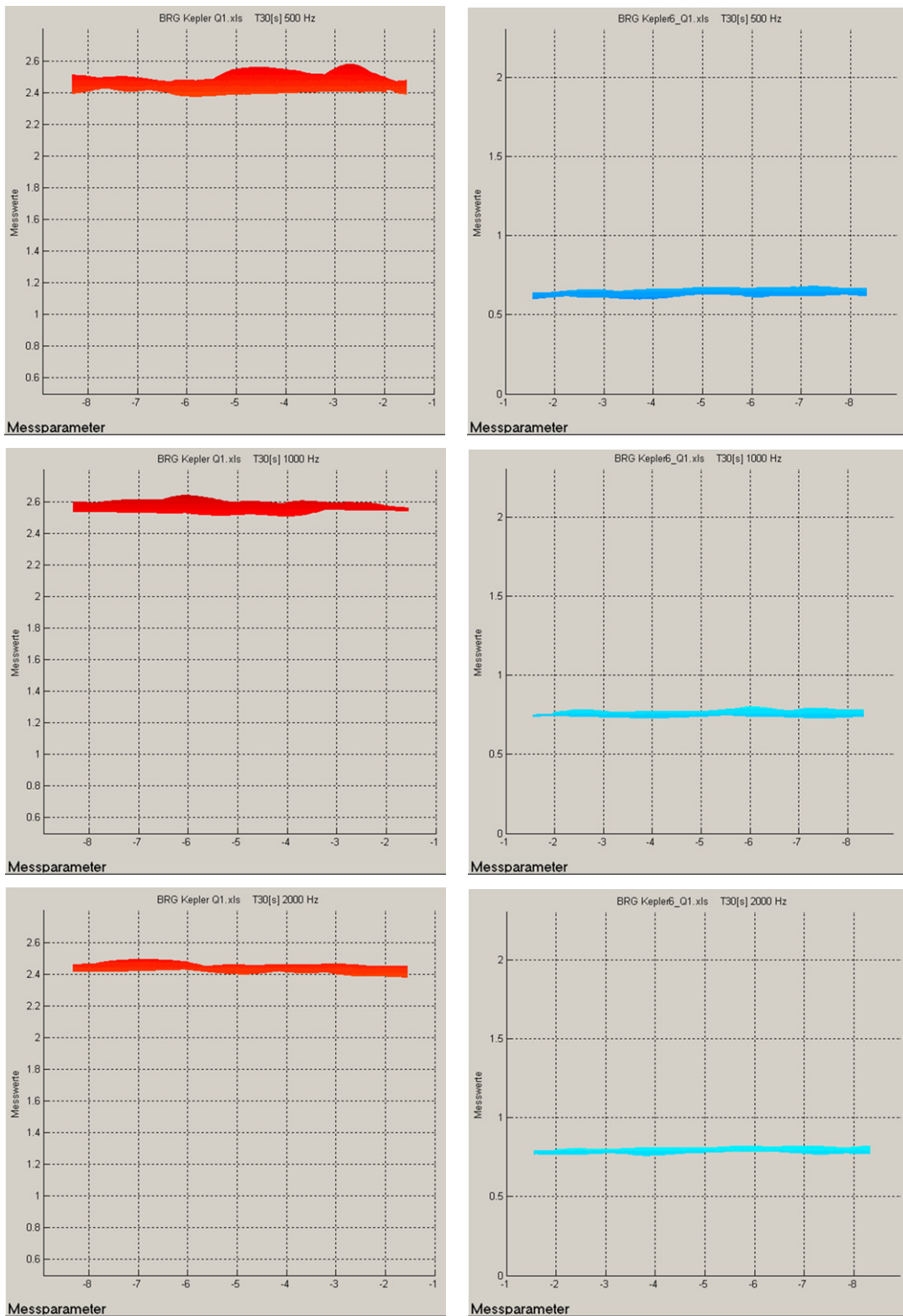


Fig. 57 Vergleich der Nachhallzeiten bei 500 Hz, 1k und 2 kHz, jeweils vor (links) und nach der Sanierung (rechts)



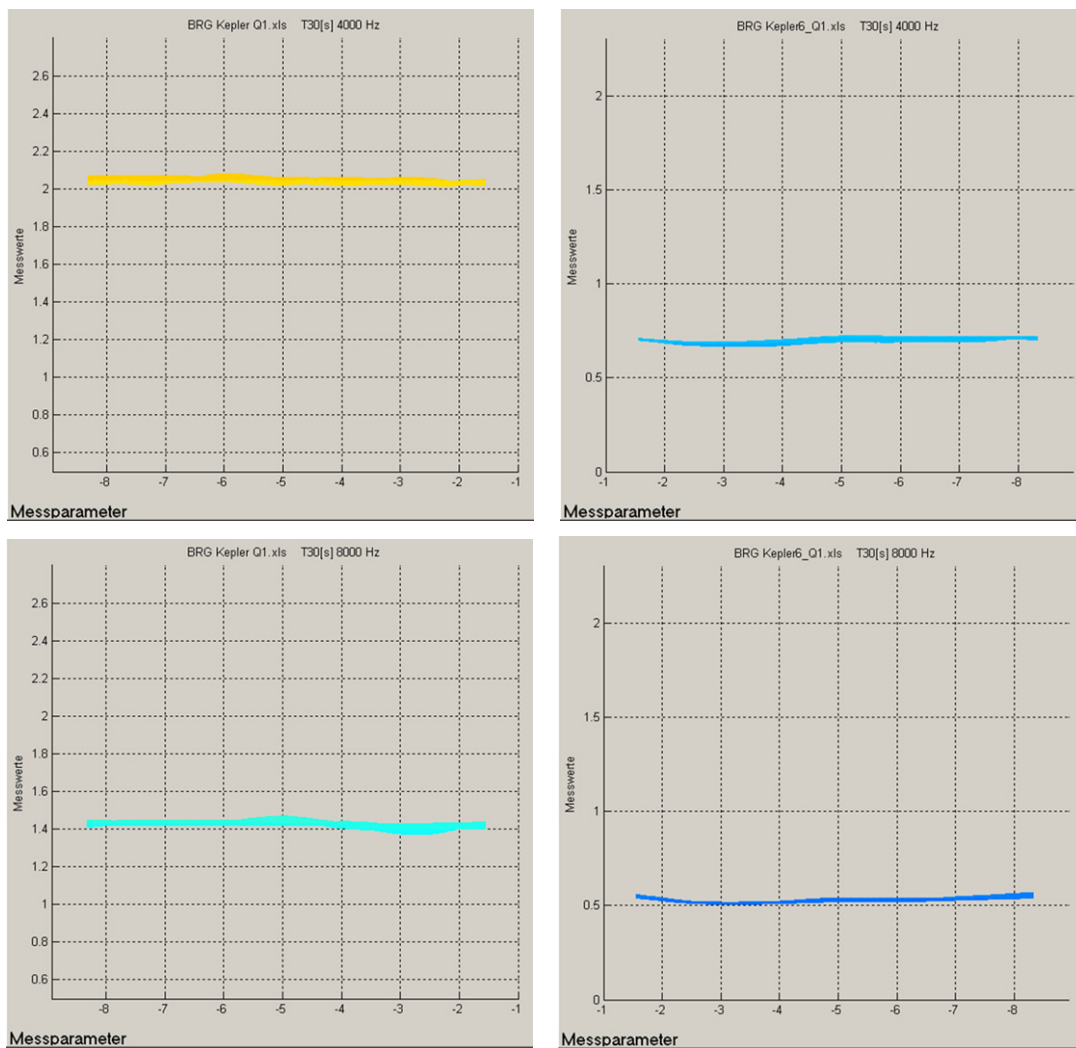


Fig. 58 Vergleich der Nachhallzeiten bei 4k und 8 kHz, jeweils vor (links) und nach der Sanierung (rechts)

### 5.9.1 Endzustand – Alcons

#### Alcons Endzustand gemessen (ohne Personen)

2,1 – 5,1 %, großteils 3,5 %

Alcons:

0 – 2 %: ideal

2 – 7 %: gut

7 – 20 %: befriedigend

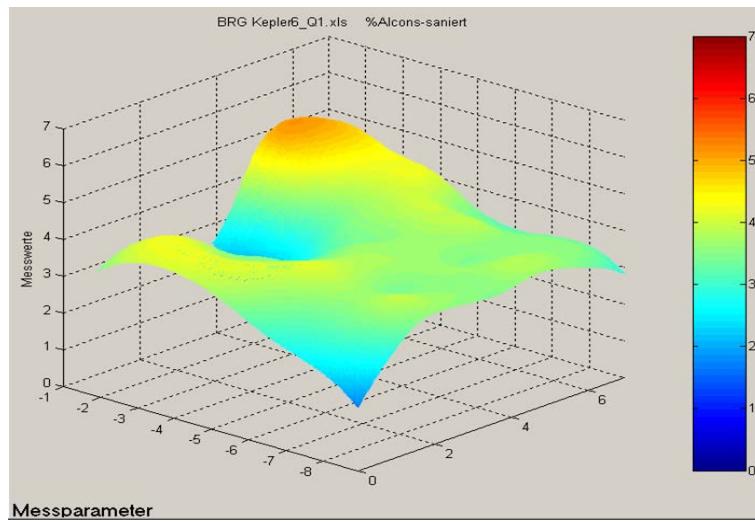


Fig. 59 Alcons nach der Sanierung (gemessen)

**Alcons Endzustand simuliert:**

0,23 – 7,0 %, großteils 3,0 %

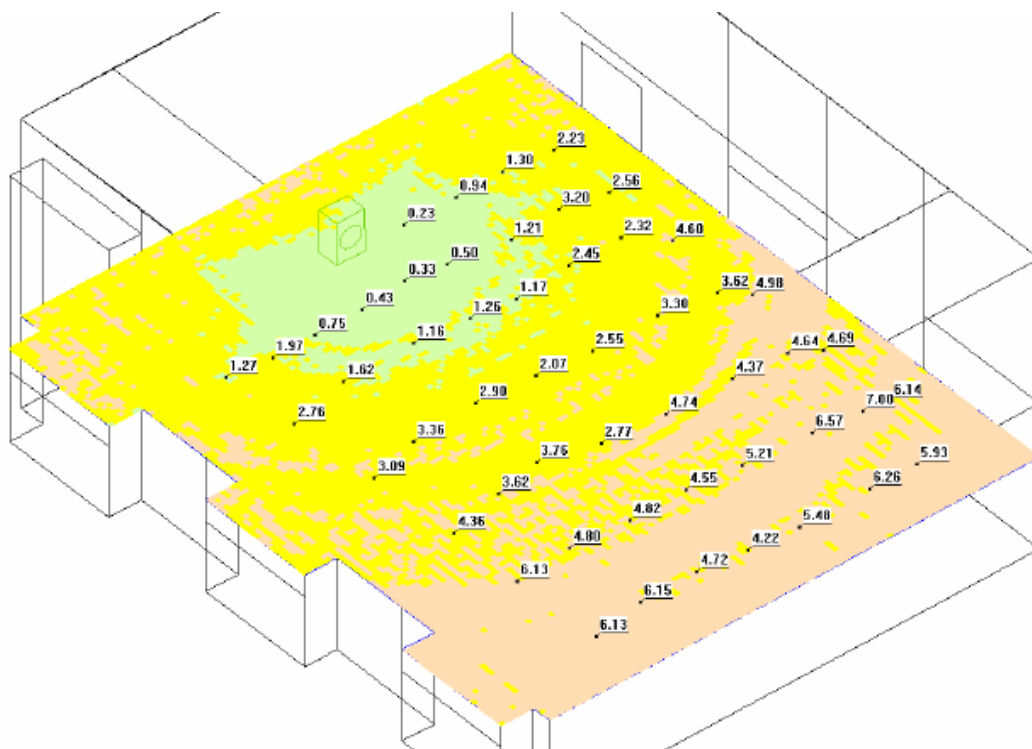


Fig. 60 Alcons nach der Sanierung (simuliert)

### Alcons (gemessen): Vergleich Rohzustand – Endzustand

Unten stehende Abbildung zeigt den Vergleich des Alcons vor und nach der Sanierung. Die Verbesserung erfolgte dabei von durchschnittlich 14,5 % auf 3,5 %.

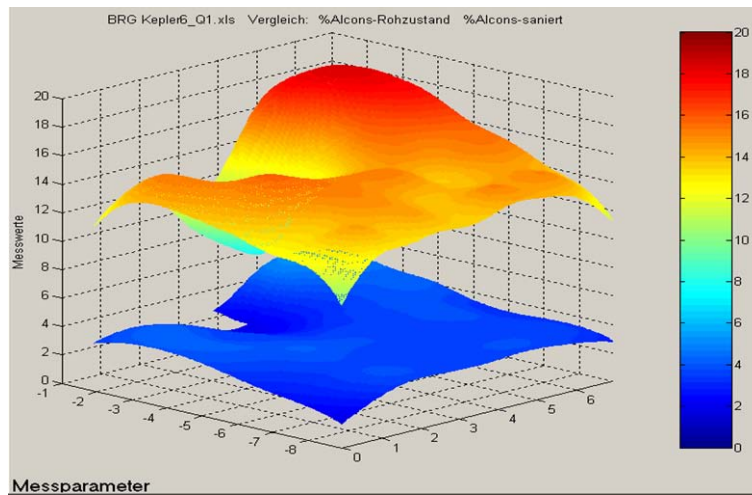


Fig. 61 Vergleich des Alcons vor (oben) und nach der Sanierung (unten)



## 6 Akustische und hygrothermische Simulationsberechnungen

### 6.1 Verputzter Zellulosedämmstoff als Schallabsorber

Im Folgenden werden beispielhaft die angenäherten Absorptionsgrade zweier Absorberaufbauten mit Zellulosedämmstoffen gezeigt. Eventuell strukturierte (porige) Oberflächen des Innenputzes, und sich dadurch ergebende höhere Absorptionsgrade im oberen Frequenzbereich werden in den folgenden Berechnungen nicht berücksichtigt. Als Basis für die ersten angenäherten Berechnungen diente ein Prüfbericht der Firma Isofloc (Isofloc-Zellulosedämmstoff\_Typ Standard L B2 mit einer Dicke von 100 mm, Dichte  $\sim 25 \text{ kg/m}^3$ , Probekörper im Aufblasverfahren erstellt).

Aufbau A.)

- 1.) schallharte Wand
- 2.) 100 mm Zellulosedämmstoff\_Typ Standard L B2
- 3.) 20 mm Putz (Rohdichte =  $500 \text{ kg/m}^3$ ) Flächengewicht =  $10 \text{ kg/m}^2$

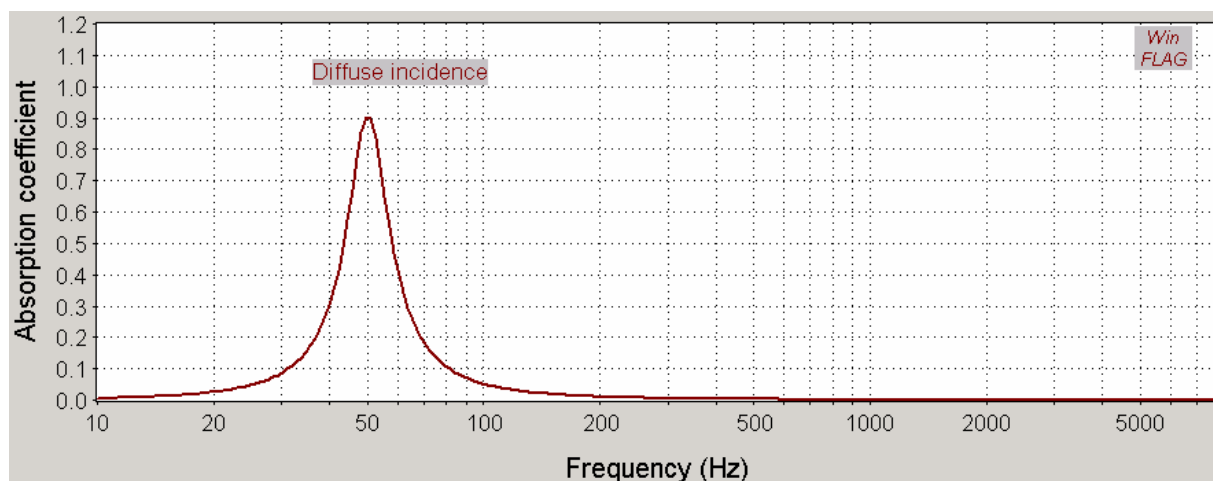


Fig. 62 Vorabsimulation einer vollflächig verputzten Zelloseschicht

Mit einem Flächengewicht von  $10 \text{ kg/m}^2$  werden für Musik brauchbare Absorptionen als Tiefenabsorber erreicht. Um die Absorptionwirkung des Zellulosedämmstoffes im oberen Frequenzbereich besser auszunützen, müsste man den Putz durch streifenförmige Anordnung o.ä. öffnen. Dadurch kommt die so genannte transparente Abdeckung von Gewebeabsorbieren und die Resonanzabsorption (Helmholtzresonator\_Masse-Feder Prinzip) zum Tragen. Im Folgenden wird der Putz streifenförmig, mit entsprechenden Schlitten zwischen den Putz-Streifen auf den Zellulosedämmstoff aufgebracht.

Aufbau B.)

- 1.) schallharte Wand
- 2.) 100 mm Zellulosedämmstoff\_Typ Standard L B2
- 3.) streifenförmiger 10 mm Putz (Rohdichte =  $500 \text{ kg/m}^3$ ) Flächengewicht =  $5 \text{ kg/m}^2$ , freier Abstand zwischen den Putz-Streifen (Schlitzbreite) = 10 mm, Breite des Putz-streifens = 190 mm

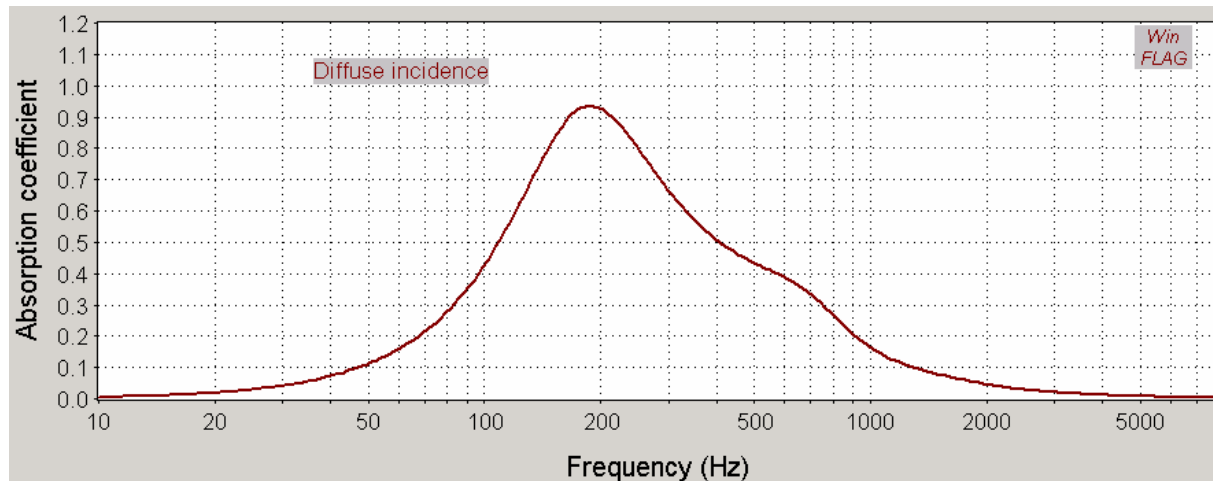


Fig. 63 Vorabsimulation einer streifenförmig verputzten Zelluloseschicht

An diesen Beispielen wird klar: je größer die Schlitzbreite (freier Abstand zwischen den Putz-Streifen) desto besser die Absorption im oberen Frequenzbereich, und je größer die Breite des Putz-Streifens desto geringer die Absorption im oberen Frequenzbereich. Wird die Schlitzbreite immer kleiner gemacht, und die Breite des Putz-Streifens immer größer, so stellt sich wieder ein Plattenschwingerverhalten mit einer mehr oder weniger schmalen Güte ein.

### 6.1.1 Elastizität von Platten / Putz

Für die vorangegangenen Aufbauten wurde auf die Elastizität der auf den porösen Absorber (Zellulosedämmstoff) aufgetragenen Abdeckungen (Putz, Platten) keine Rücksicht genommen, da sie für die Gesamtabsorption keine besondere Veränderung darstellt. Jedoch für die Berechnung des Schalldämm-Maßes  $R$  ist die Betrachtung der Elastizität solcher Abdeckungen von größerer Wichtigkeit.

Die Platteneigenfrequenzen  $f_n$  und die Koinzidenzfrequenz  $f_c$  mit deren Auswirkung der Koinzidenz oder Spuranpassung verschlechtern die Schalldämmung.

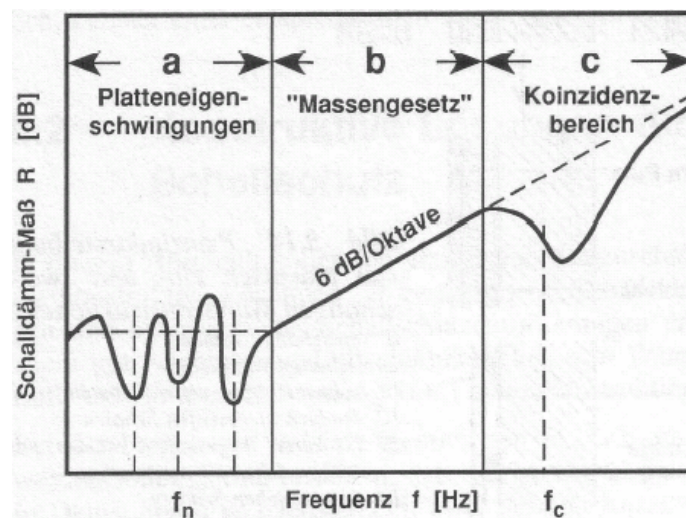


Fig. 64 Schalldämmmaß abhängig von der Plattenelastizität

Für eine hohe Schalldämmung sind Bauteile zu bevorzugen, deren Koinzidenzgrenzfrequenz entweder an der unteren Grenze des in der Bauakustik interessierenden Frequenzbereichs (dick, biegesteif) oder an dessen oberer Grenze (dünn, biegeweich, schwer) liegt. Bauteile mit  $f_c < 200$  Hz (z.B. Schwerbetonplatten  $> 100$  mm Dicke) werden als ausreichend biegesteif, solche mit  $f_c > 2500$  Hz (z.B. Gipskartonplatten  $< 15$  mm) als ausreichend biegeweich bezeichnet.

Aufbau C.)

- 1.) schallharte Wand
- 2.) 100 mm Zellulosedämmstoff\_Typ Standard L B2
- 3.) 10 mm Gipsplatte (Rohdichte =  $850 \text{ kg/m}^3$ , Flächengewicht =  $8,5 \text{ kg/m}^2$   
Elastizitätsmodul =  $4,1 \times 10^9 \text{ Pa}$ , Poisson-Zahl =  $0,3$  (Poissonsche Querkontraktionszahl der Platte), innerer Verlustfaktor der Platte =  $0,012$ )

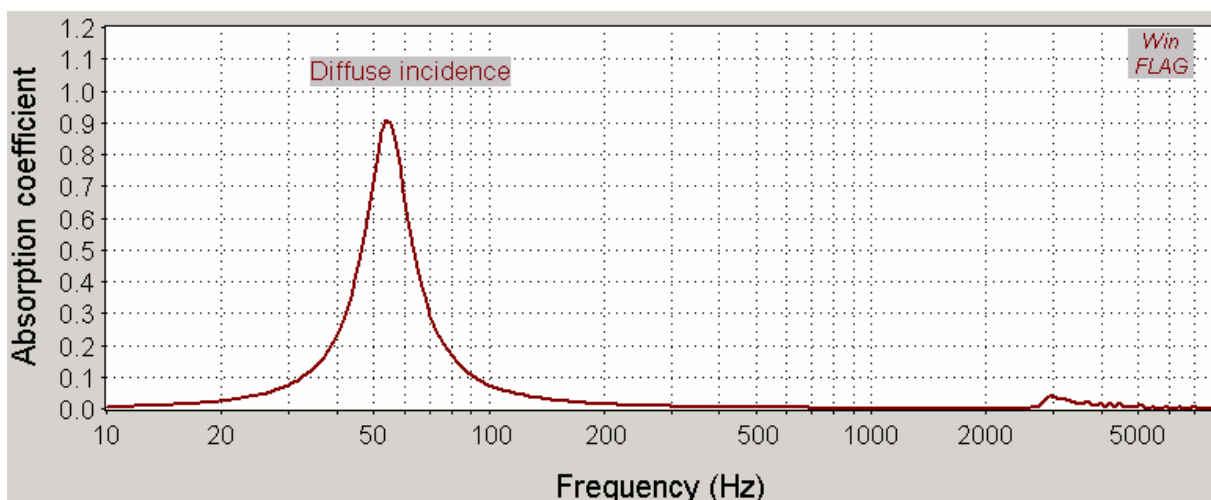


Fig. 65 Vorabsimulation Zellulose + GK Platte

In o.a. Beispiel (Aufbau C., Gipsplatte biegeweich), befindet sich die Koinzidenzgrenzfrequenz bei etwa 2800 Hz. Da die Verschlechterung der Schalldämmung erst im Frequenzbereich  $> 2800$  Hz auftritt, wurde für beide Fälle (mit und ohne Berücksichtigung der Elastizität), für den in der Bauakustik interessierenden Frequenzbereich nach [ISO 717-1] ein bewertetes Schalldämm-Maß von  $R_w = 35$  dB berechnet

### 6.1.2 Auswirkungen der Putzschicht auf den Zellulosedämmstoff

Ausgehend von der Tatsache, dass die Putzschicht direkt auf den Zellulosedämmstoff aufgetragen wird, wäre zur Optimierung der Simulationsmodelle in weiterer Folge zu prüfen inwieweit der pastöse Putz nach dem maschinellen Auftrag durch Kapillarwirkung in den Zellulosedämmstoff eindringt und damit die oberste Zellosoeschicht verhärtet.

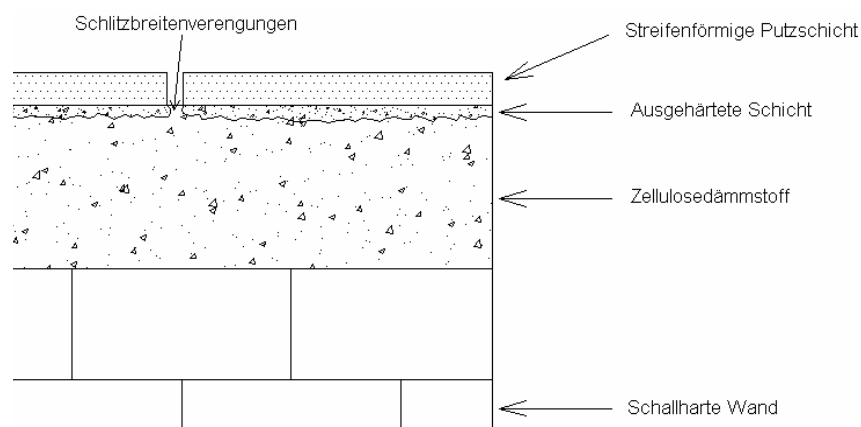


Fig. 66 Schlitzaufbau mit möglicher Ausbildung einer verhärteten Schicht zwischen Putz und Zellulose

Diese Phänomene simulationstechnisch abzubilden konnte im Rahmen des gegenständlichen Projektes nicht realisiert werden und bleibt zukünftigen Forschungsvorhaben vorbehalten. Im Falle der Lochblech-Schlitzprofile kann es durch seitlich eingedrungenen Putz zu unkontrollierbaren Schlitzverengungen kommen und dadurch das Absorptionsverhalten beeinflusst werden.

## 6.2 Simulation des Schlitzaufbauers

Gemäß dem Anforderungsprofil aus AP1 wurde in einem ersten Schritt das Absorptionsmaximum des zu entwickelnden Systems bei 250 Hz angestrebt. Dies deshalb, weil ein kostengünstiges Absorbersystem für diesen Bereich in der Praxis bereits eine bedeutende Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand darstellt und zum gegebenen Zeitpunkt mit dem noch relativ unbekanntem Material auch realisierbar erscheint. Die geplante fugenlose Oberfläche stellt für Schlitzaufbauer eine absolute Innovation dar und wird die Marktfähigkeit des Systems wesentlich erhöhen. Aufgrund der Vorabsimulationen



und insbesondere der ersten Messungen des längenbezogenen Strömungswiderstandes kristallisierte sich ein anzustrebender Strömungswiderstand der Zellosoeschicht von rund  $21.000 \text{ Pa s/m}^2$  heraus (Anhang / Kap. A 1 / Seite A 3).

Mit diesem Wert wurde in einem zweiten Schritt das Absorptionsverhalten einer 5 cm dicken Zellosoeschicht ( $D$ ) auf schallharter Wand unter Variation der Putzabdeckungsbreite ( $b$ ) und -dicke ( $t$ ) sowie der Schlitzbreite ( $d$ ), allerdings noch ohne schalloffene Endbeschichtung berechnet (Anhang / Kap. A 3/ Seite A 5). Die jeweils kleineren Abmessungen der Putzabdeckungen werden als deren Breite bezeichnet und die Längenausdehnungen bleiben unberücksichtigt. Weiters ist es unerheblich, ob die Schlitzze horizontal oder vertikal verlaufen.

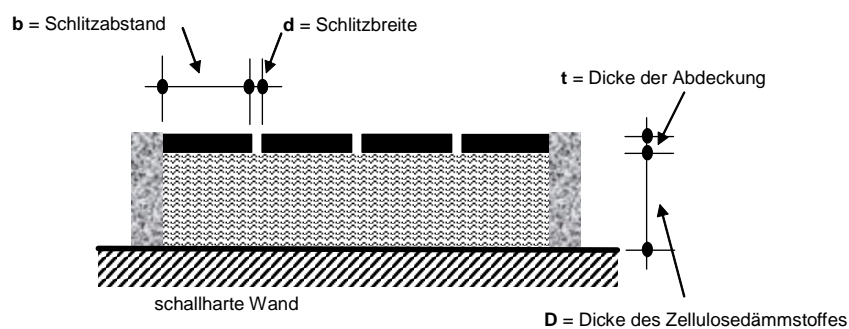


Fig. 67 Prinzip des Schlitzabsorbers

Die folgende Abbildung zeigt die berechneten Absorptionsgrade bei Variation der Schlitzbreite von 10 – 50 mm, 20 mm Dicke und 500 mm Abdeckungsbreite der Putzschicht auf 50 mm Zellosoe im Vergleich zum typischen Absorptionsgrad eines porösen Absorbers gleicher Schichtdicke.

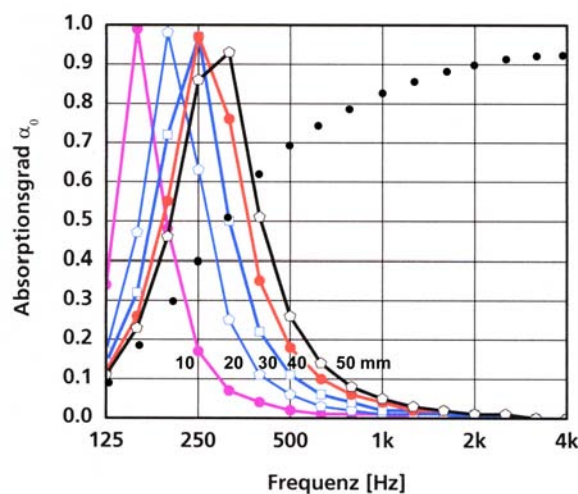


Fig. 68 Verschiedene Schlitzabsorber im Vergleich zu porösem Absorber (•••)

### 6.2.1 Absorptions-Optimierung der Probe-VI\_mB zu tieferen Frequenzen

Im Folgenden wird beispielhaft die Optimierung der Schlitzgeometrie im Hinblick auf das angestrebte Absorptionsverhalten vorgestellt (hinsichtlich weiterer Optimierungsschritte der Proben VI\_oB, VII und III siehe Anhang / Kap. A 6 / Seite A 13 ff.).

Durch Vergrößerung des Schlitzabstandes wird das Schlitz-Flächen-Verhältnis des Absorbers Probe-VI\_mB / 200 mm / Hallraummessung (rot) in 50 mm-Schritten von 250 bis 700 mm verkleinert.

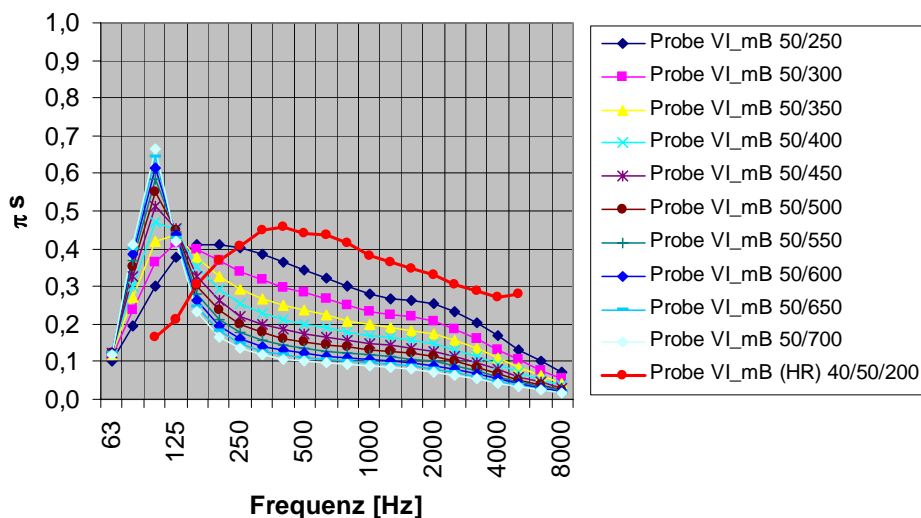


Fig. 69 Probe-VI\_mB - Variation des Schlitzabstandes

Wie in obiger Graphik gezeigt wird, geht der schlitzförmige Absorber mit Verkleinerung des Schlitz-Flächenverhältnisses immer mehr in den Zustand eines Plattenschwingers über. Ein Verbundsystem aus 3 mm Grobkornputz (Raumgewicht  $\sim 1650 \text{ kg/m}^3$ ), 15 mm Poraverputz (Raumgewicht  $\sim 980 \text{ kg/m}^3$ ) und einer 40 mm Zellosoeschicht würde als Plattenschwinger eine Resonanzfrequenz von ca. 96 Hz haben.

Da die Hallraummessung der Probe-V, mit dem Verbund eines 5 mm Grobkornputzes (Raumgewicht  $\sim 1650 \text{ kg/m}^3$ ), einer 5 mm Dickschichtklebespachtel (Raumgewicht  $\sim 1050 \text{ kg/m}^3$ ) und einer 40 mm Zellosoeschicht, in keiner Weise ein ausgeprägtes Plattenschwinger- oder Verbundplattenresonator-Verhalten zeigte (die Resonanzfrequenz sollte bei  $\sim 115 \text{ Hz}$  sein), sondern eher ein Schwingen des Verbundes „aufgebogene OSB-Platten - Zellosoeschicht - Dickschichtklebespachtel“ vermuten lässt, wurde bei der Optimierung der Probe-VI\_mB ein Schlitzbreitenverhältnis bzw. eine genügend große Schlitzbreite gewählt, sodass die Verschlussgefahr der Schlitzte beim Verputzen auf jeden Fall ausgeschlossen werden konnte.

### 6.3 Kalibrieren des Simulationsmodells mittels Hallraummessungen

Im Hinblick auf die Optimierung der verschiedenen Absorbertypen für die akustische Sanierung des Klassenzimmers wurden Simulationen mit der Simulationssoftware WinFlag der im Hallraum vermessenen Absorber durchgeführt und dabei verschiedene Parameter so variiert, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Hallraummessung und Simulation erzielt wurde. Für die wichtigsten Absorber ist in den folgenden Abbildungen der Vergleich von Hallraummessung und kalibrierter Simulation gezeigt. Dabei sind die Hallraumergebnisse schwarz mit Kreisen und die Simulationen rot mit Punkten dargestellt.

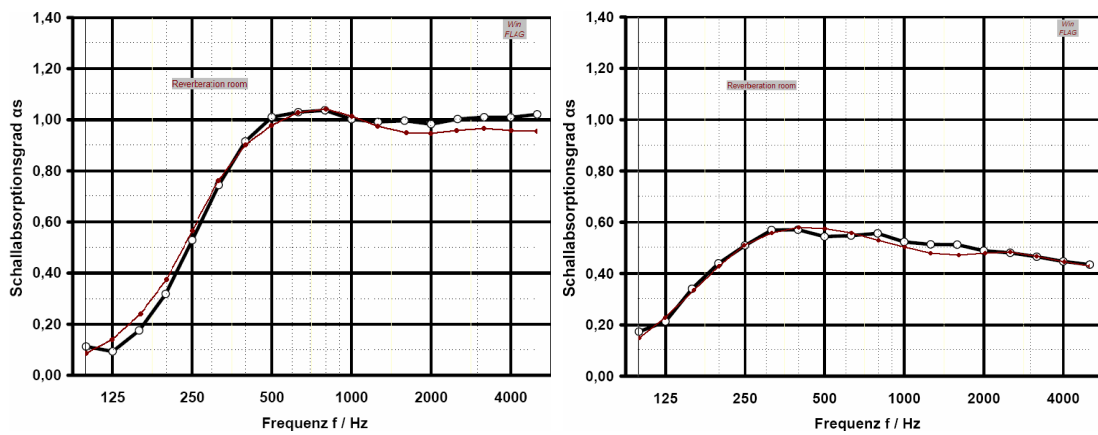


Fig. 70 Vergleich von Hallraummessung und kalibrierter Simulation für Probe-III (links) und Probe-VI\_oB (rechts)

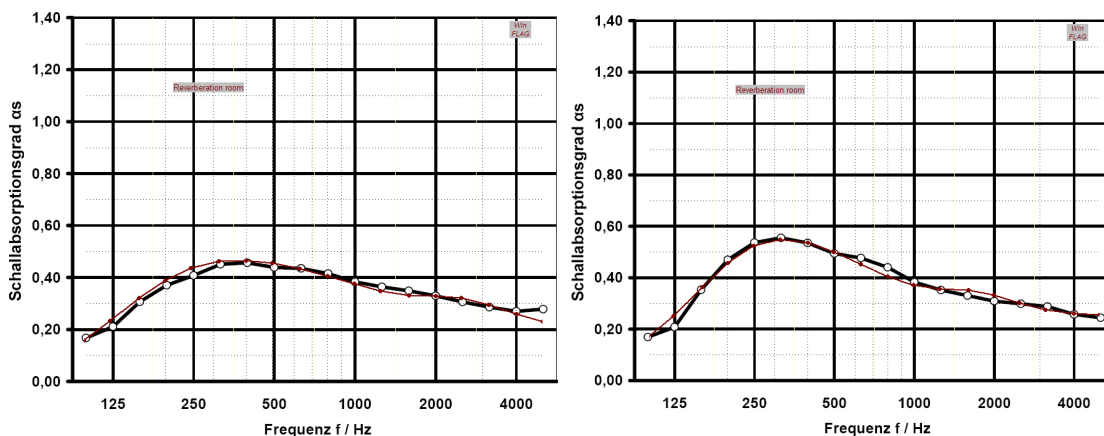


Fig. 71 Vergleich von Hallraummessung und kalibrierter Simulation für Probe-VI\_mB (links) und Probe-VII (rechts)

### 6.4 Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche

Um die für die Raumnutzung „Unterricht“ optimale mittlere Nachhallzeit von  $T_{\text{soll}} = 0,6 \text{ s}$  zu erreichen, ist nach [Eyring] für den rund  $264 \text{ m}^3$  großen Raum eine mittlere äquivalente Absorptionsfläche (Absorptionsgrad  $\alpha = 1$ ) von  $36 \text{ m}^2$  erforderlich.

$$T = -0,161 \left[ \frac{\text{s}}{\text{m}} \right] \cdot \frac{V}{S_{\text{ges}} \cdot \ln(1 - \overline{\alpha_m})}$$

Fig. 72 Nachhallzeitberechnung nach Eyring

In folgender Grafik wird der Frequenzgang der erforderlichen äquivalenten Absorptionsfläche in Oktaven von 125 Hz – 4000 Hz gezeigt.

BRG-Kepler (Raum Nr. 011/Parterre)	Frequenz:	125	250	500	1000	2000	4000	[Hz]
Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche:		37,9	38,0	36,4	35,7	35,0	33,9	[m <sup>2</sup> ]

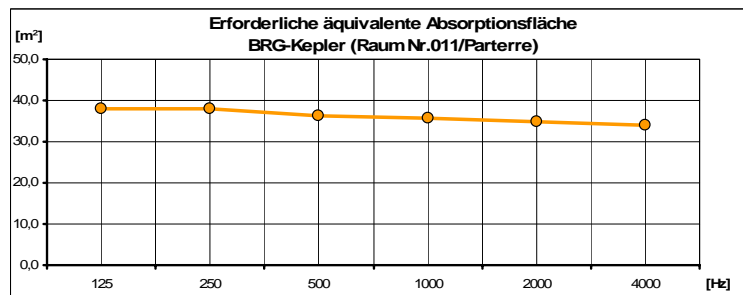


Fig. 73 Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche

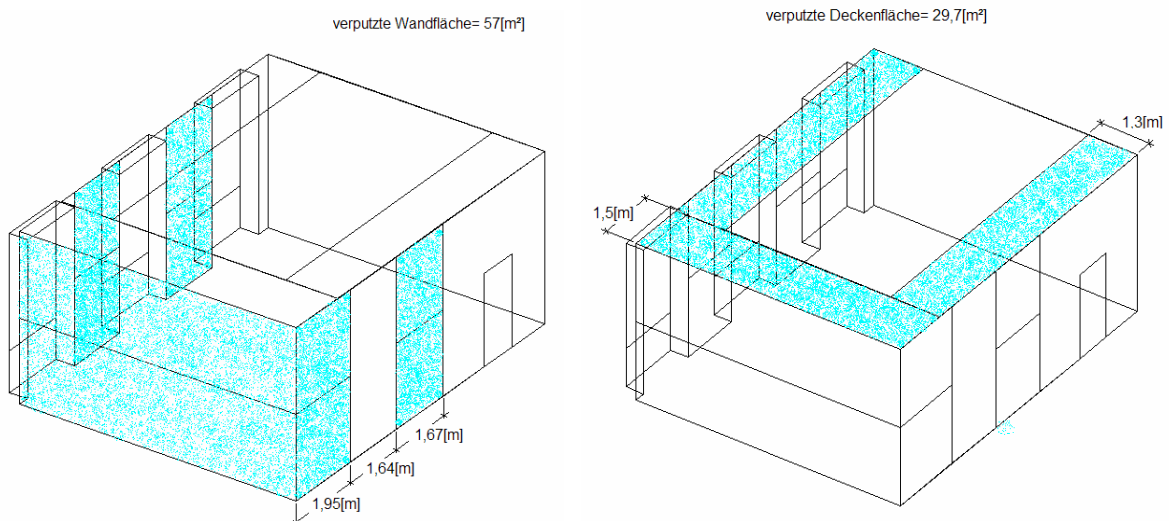


Fig. 74 Erste Skizze der Absorptionsflächenverteilung

Decke und oberer Wandbereich	58,2 m <sup>2</sup>	CA28 (2 cm Schlitz - leer mit Metallgitter und Putz abgedeckt)
Unterer Wandbereich	28,5 m <sup>2</sup>	Zellulose unverputzt
Gesamtfläche	86,7 m <sup>2</sup>	

Obige Abbildung zeigt die aus akustischer Sicht optimale Verteilung der Absorptionsflächen im Klassenraum. Dabei wurde in einem ersten Schritt der Schlitzabsorber CA28 an der Decke und im oberen Wandbereich vorgesehen, um im tieffrequenten Bereich die nötige Absorption zu erreichen und im unteren Wandbereich unverputzte Zellulose, um in der Sprachebene durch maximale Absorption den Störeinfluss von Flatterechos zu minimieren.

### 6.4.1 Simulation der Verbesserung des Alcons

Die Simulation des Alcons liefert die unten dargestellten Werte, die zwischen 2 und 4 liegen und damit eine sehr gute Sprachverständlichkeit anzeigen.

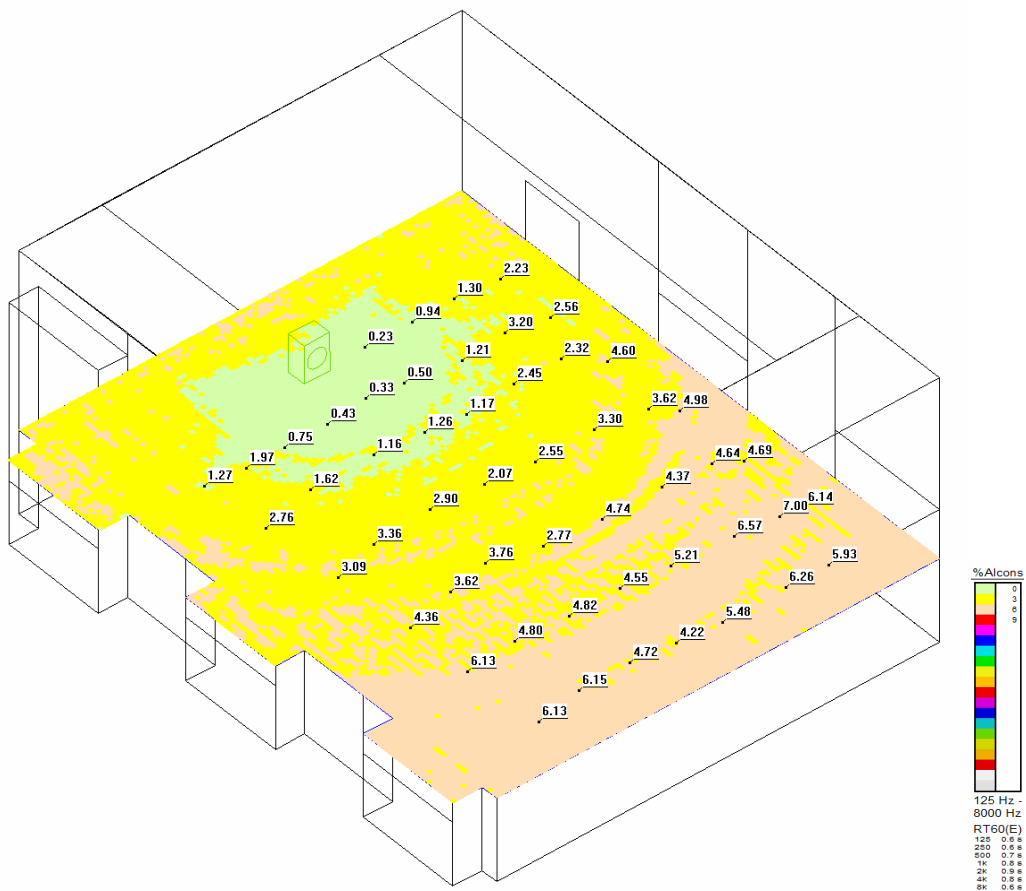


Fig. 75 Simulation der Verbesserung des Alcons

### 6.4.2 Variation der Absorberflächen

A:

Werden die Absorber an den Wandflächen oben und unten vertauscht, dann bleibt zwar der Alcons bzw. die Nachhallzeit gleich, aber Flatterechos treten deutlicher hervor.

B:

Wird die vorgesehene Absorptionsfläche von 80 m<sup>2</sup> nur mit 5 cm dicker Zellulose abgedeckt, ergibt sich folgender Nachhallzeitverlauf deutlich unter dem Toleranzband, wobei im tieffrequenten Bereich jedoch durch fehlende Absorption der Toleranzbereich nicht eingehalten werden kann.

<b>Projekt:</b>	<b>RT30_BRG-Kepler (Raum Nr.011/Parterre)</b>						
	(Nachhallzeit-Toleranzen nach DIN 18041:2004-05)						
<b>Raumzustand:</b>	Rohzustand + 24 Personen (sitzend auf Holzgestühl) + 80m <sup>2</sup> Zellulose						
<b>Frequenz:</b>	125	250	500	1000	2000	4000	[Hz]
<b>Istzustand:</b>	0,76	0,36	0,32	0,31	0,32	0,32	[sec]

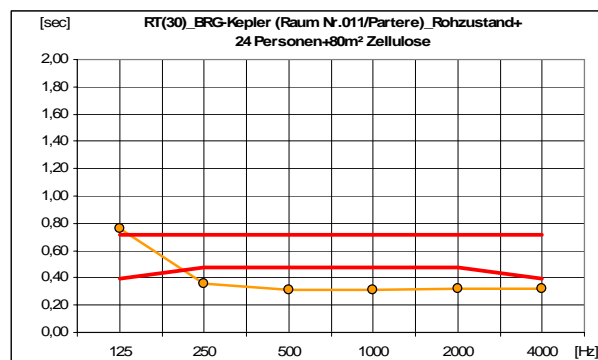


Fig. 76 Zu erwartende Nachhallzeit bei 80 m<sup>2</sup> unverputzter Zellulose

C:

Zur Vereinfachung des Arbeitsablaufes bei der Zelluloseaufbringung wurde - aus akustischer Sicht mit geringfügiger und vertretbarer Qualitätsverminderung - eine Konzentration der Flächen wie in nachfolgender Abbildung gezeigt durchgeführt. Diese Qualitätsminderung betrifft Effekte von untergeordneter Bedeutung, wie Raummodenbildung bei sehr tiefen Frequenzen, die hier so gut wie keine Rolle spielen, da diese Frequenzbereiche durch Sprache nicht angeregt werden.

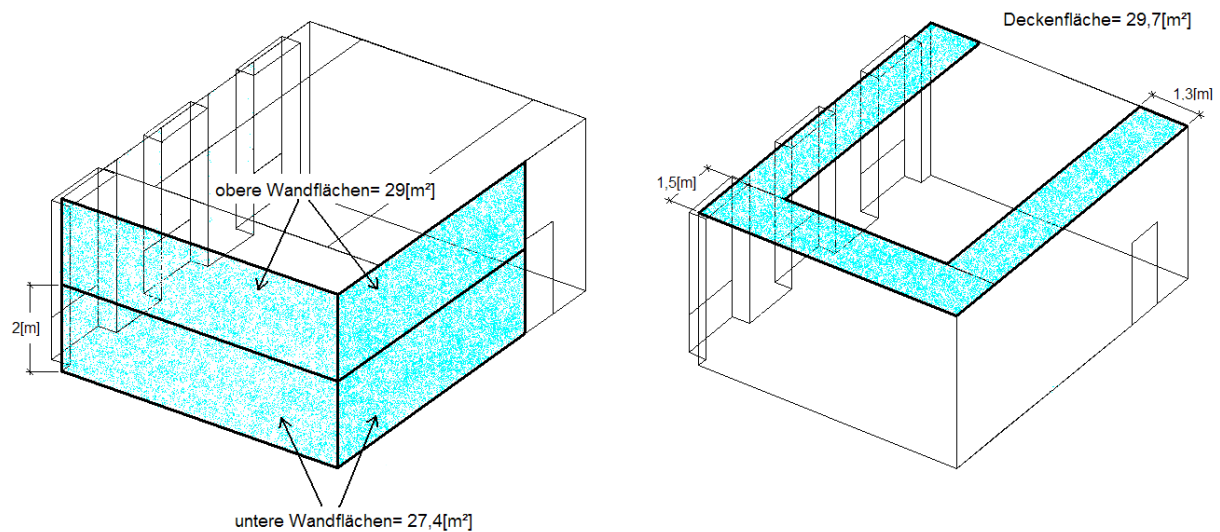


Fig. 77 Absorptionsflächen im Klassenraum – Modifikation

An den Wänden wurden Schlitzabsorber vorgesehen, deren Schlitze teils mit Lochblech-Hutprofilen abgedeckt, teils mit Zellulosestreifen gefüllt und teils mit Einkornputz versehen wurden. Die Schlitzabsorberparameter insbesondere hinsichtlich Schlitzbreite und Schlitzabstand wurden unter Zugrundelegung der Hallraummessungen der Proben VI mit und ohne Beschichtung und VII so berechnet, dass sich eine optimale Raumakustik im Hinblick auf Nachhallzeit und Flatterechos ergaben. Die Zellulose an den Wandflächen wurde in einer Dicke von 5 cm, die freiliegenden Zelluloseabsorber an der Decke in einer Dicke von 10 cm aufgebracht.

## 6.5 Optimierung der Nachhallzeit durch Verwendung verschiedener Absorberkombinationen

Im Folgenden werden unterschiedliche Absorberkombinationen ausgewählt, um die optimale mittlere Nachhallzeit nach [DIN 18041] zu erreichen. Ein Qualitätskriterium dabei ist nicht nur das Erreichen eines Nachhallverlaufs innerhalb der vorgesehenen Toleranzgrenzen, sondern ein möglichst ebener Frequenzgang insbesondere zu den tiefen Frequenzen.

Zur Verfügung stehende Flächen:

obere Wandflächen	= 29,0 m <sup>2</sup>
untere Wandflächen	= 27,4 m <sup>2</sup>
Deckenfläche	= 29,7 m <sup>2</sup>

Raumvolumen = 263,8 m<sup>3</sup>

Optimale mittlere Nachhallzeit nach [DIN 18041]: Raumnutzung „Sprache“:  $T_{\text{soil}} = 0,75 \text{ s}$   
 Raumnutzung „Unterricht“:  $T_{\text{soil}} = 0,60 \text{ s}$

**Verwendete Absorber:**

Probe-VI\_mB\_50/50/700: 50 mm Zellulose, 50 mm Schlitzbreite, 700 mm Schlitzabstand

Probe-VII\_50/100/400: 50 mm Zellulose, 100 mm Schlitzbreite, 400 mm Schlitzabstand

Probe-III\_50: 50 mm Zellulose

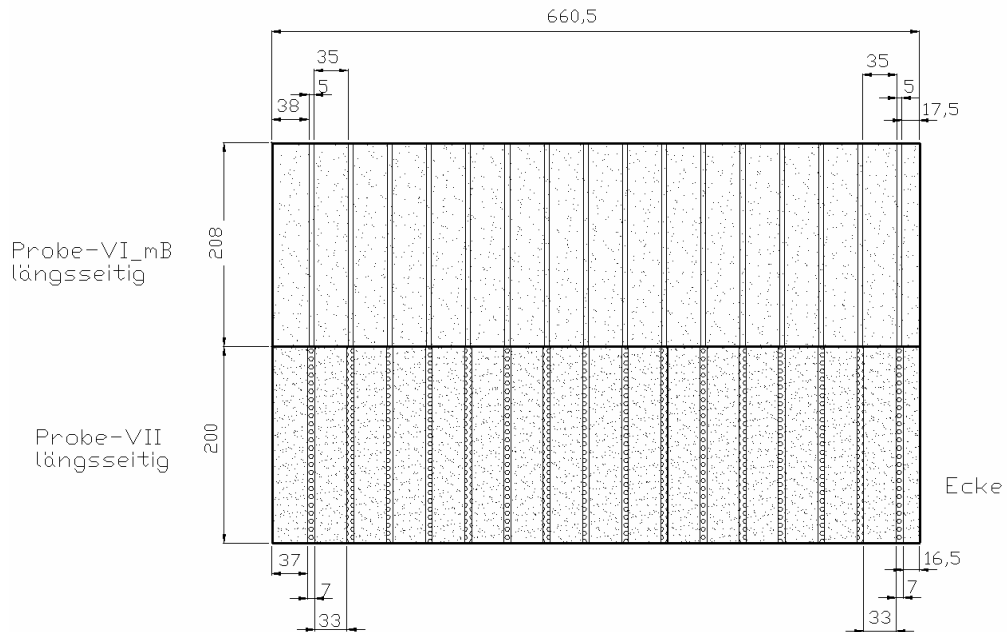


Fig. 78 Montage der Lochbleche bzw. Zellulosestreifen an der längsseitigen Türwand

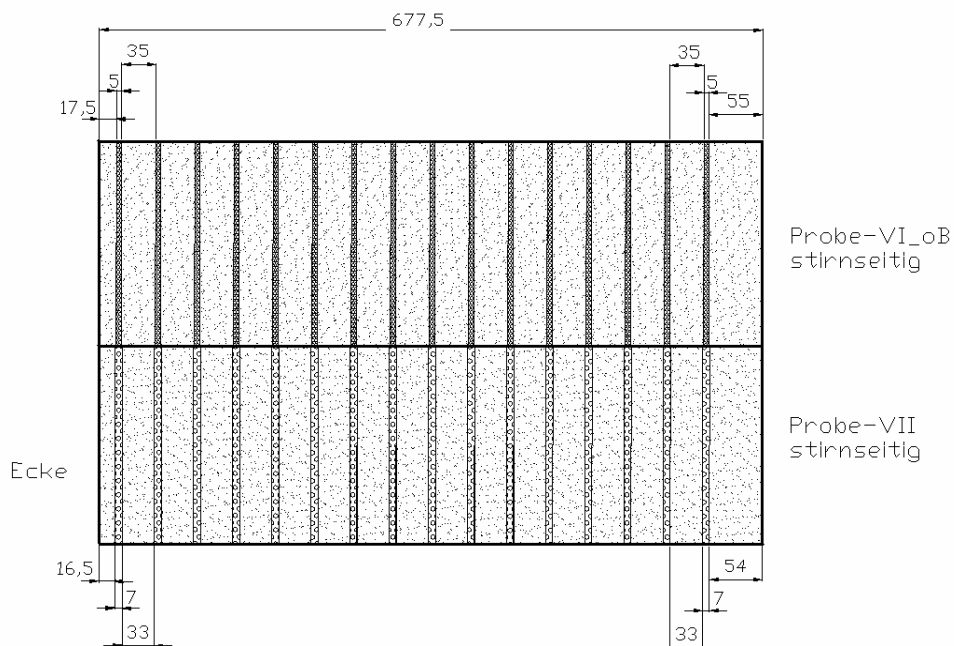


Fig. 79 Montage der Lochbleche bzw. Zellulosestreifen an der stirnseitigen Rückwand



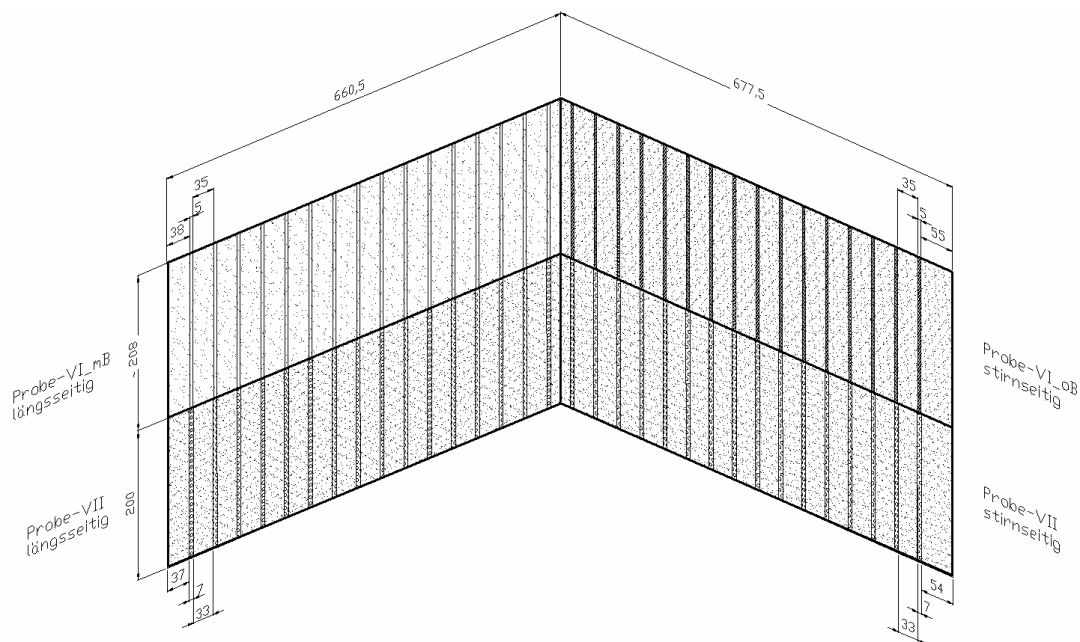


Fig. 80 Gesamtansicht der mit Absorbern verkleideten Wände

Im Folgenden wird die Berechnung der Nachhallzeit  $T_{soll}$  für den Verwendungszweck „Unterricht“ und die durchschnittliche Klassenschülerzahl von 32 berechnet. Die Berechnung erfolgt ausgehend vom Rohzustand durch schrittweises Hinzufügen der im Folgenden genannten Absorber. Die einzelnen Schritte sind im Anhang / Kap. A 8 / Seite A 19 ff. dargestellt.

**Verwendete Absorber:**

- Probe VII 48-70-400: im unteren Bereich, danach zusätzlich
- Probe VI\_oB 48-50-400: auf der Rückwand im oberen Bereich, danach zusätzlich
- Probe VI\_mB 48-50-400: auf der Seitenwand im oberen Bereich.
- + Deckenabsorber (sowohl abgehängt als auch direkt auf die vorhandene Decke montiert).

In diesen Simulationsschritten ist deutlich ersichtlich, dass die Schlitzabsorber so gewählt werden können, dass sich in jedem Simulationsschritt ein gleichmäßiger Nachhallfrequenzgang ergibt. Festgelegt wurden damit auch die Maße für die Herstellung der Lochblechstreifen für den Schlitzabsorber Probe-VII und die Zellulosestreifen Probe-VI.

	Material	Schlitzbreite	Schlitztiefe	Stück	Länge/Stk.	Gesamt-Länge
Probe-VII	Lochblech	70 mm	15 mm	32	2 m	64 lfm
Probe-VI_mB u. Probe-VI_oB	Zellulose weiß	50 mm	15 mm	32	2,08 m	66,56 lfm

## Optimierung des Deckenabsorbers – Endzustand

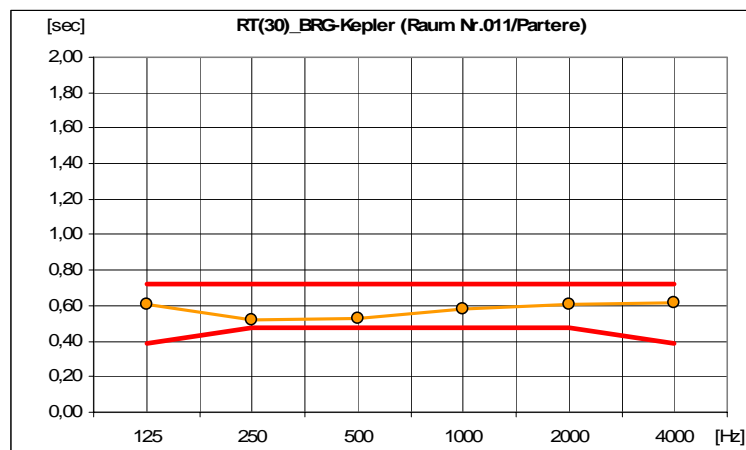
26,76 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-400 (BRG-Messung)

13,55 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (BRG-Messung)

13,28 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (BRG-Messung)

32 Personen sitzend auf Holzgestühl

25 m<sup>2</sup> Probe-III\_100/0 (100 mm Zellulose,  
0 mm Luftabstand)



Obige Abbildung zeigt die simulierte Nachhallzeit bei einer Deckenkonstruktion bestehend aus 25 m<sup>2</sup> Zellulose mit 100 mm Dicke ohne Deckenabstand. Es ist ersichtlich, dass die optimale Nachhallzeit von  $T_{\text{soil}} = 0,6$  s sehr gut erreicht wird und im Frequenzbereich von 250 bis 500 Hz sogar unterschritten wird, was eine deutlich verbesserte Sprachverständlichkeit erwarten lässt.

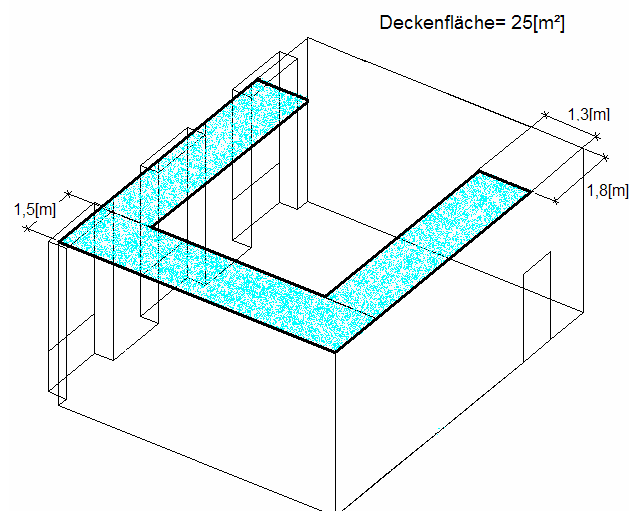


Fig. 81 Endgültige Dimensionierung des Deckenabsorbers

## 6.6 Vergleich Simulation – Messung BRG

### Probe-VII\_48/70/400

48 mm Zellulose, 70 mm Schlitzbreite, 400 mm Schlitzabstand, Schlitz leer, Schlitzabdeckung mit Metallgitter / Lochflächenverhältnis > 60 %.

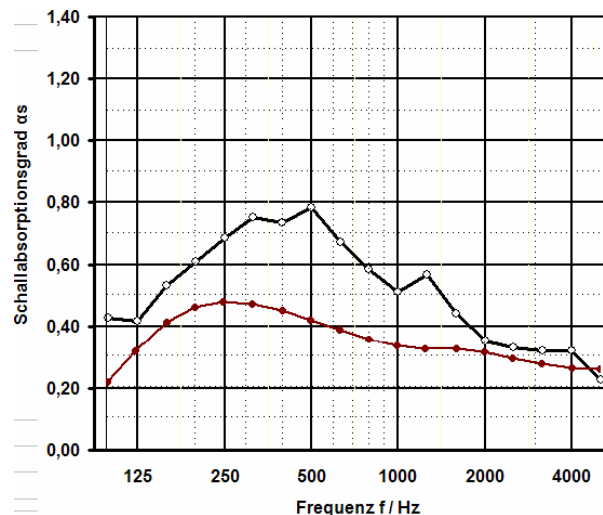


Fig. 82 Vergleich des Absorptionsgrades der Probe-VII\_48/70/400 in der WinFlag-Simulation (rot mit Punkten) mit der Messung BRG (schwarz mit Kreisen)

Obige Abbildung zeigt tendenziell einen ähnlichen Verlauf zwischen Simulation und Messung. Bezüglich der Abweichung ist anzumerken, dass die Simulation von den Randbedingungen, wie sie bei Hallraummessungen vorhanden sind, ausgeht. Die hier durchgeführte Messung des Absorbers im eingebauten Zustand, wurde zwar nach dem Formalismus für Hallraummessungen ausgewertet, die Messung im Klassenraum im BRG Kepler ist aber zwangsläufig unter völlig anderen Randbedingungen zustande gekommen, als sie für Hallraummessungen festgelegt sind. Selbst wenn im Hallraum ein und derselbe Absorber nicht normgemäß angebracht wird, sondern z.B. in den Raumecken vermessen wird, ergeben sich erhebliche Abweichungen im Absorptionsgradverlauf gegenüber der normgerechten Messung. Daher dient obige Abbildung lediglich zur Demonstration, dass der tendenzielle Verlauf der Messung mit der Simulation übereinstimmt. Für die tatsächlichen Absorptionsgrade der Probe-VII\_48/70/400 sind daher Hallraummessungen unerlässlich. Analoges gilt für die folgenden Vergleiche der Proben VI\_oB, VI\_mB und III\_100 mm.

**Probe-VI\_oB 48/50/400**

48 mm Zellulose, 50 mm Schlitzbreite, 400 mm Schlitzabstand, Schlitztiefe = 15 mm, Poraverputz. Die Schlitzte wurden mit Zellulose aufgefüllt.

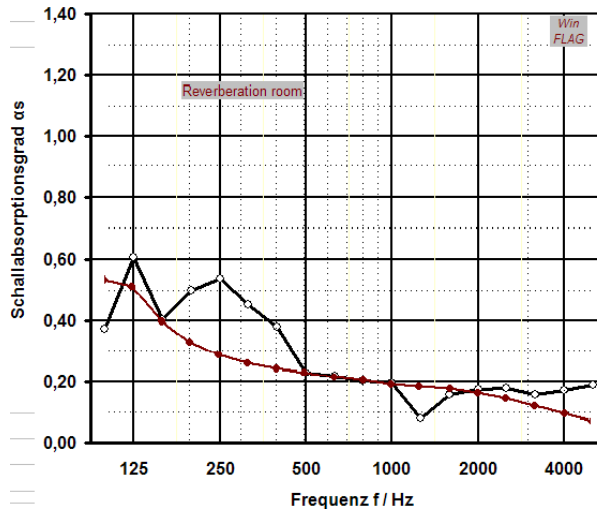


Fig. 83 Vergleich des Absorptionsgrades der Probe-VI\_oB 48/50/400 in der WinFlag-Simulation (rot mit Punkten) mit der Messung BRG (schwarz mit Kreisen)

**Probe-VI\_mB 48/50/400**

48 mm Zellulose, 50 mm Schlitzbreite, 400 mm Schlitzabstand, Schlitztiefe = 15 mm, Poraverputz. Die Schlitzte wurden mit Zellulose aufgefüllt. Endbeschichtung mit Einkornputz AK15.

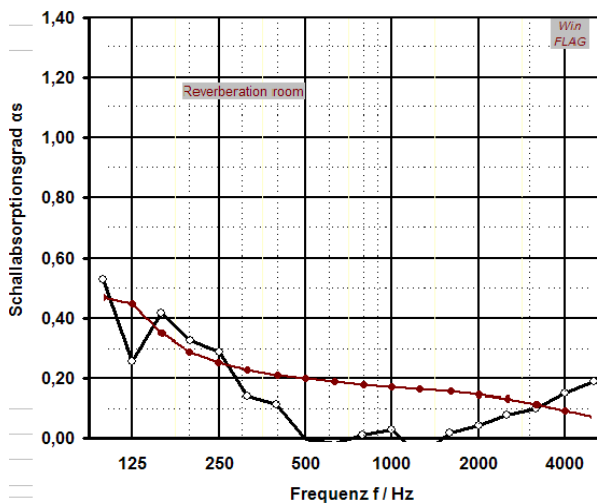


Fig. 84 Vergleich des Absorptionsgrades der Probe-VI\_mB 48/50/400 in der WinFlag-Simulation (rot mit Punkten) mit der Messung BRG (schwarz mit Kreisen)

### Probe-III\_100 mm

(100 mm Zellulose, als Deckenabsorber U-förmig angeordnet)

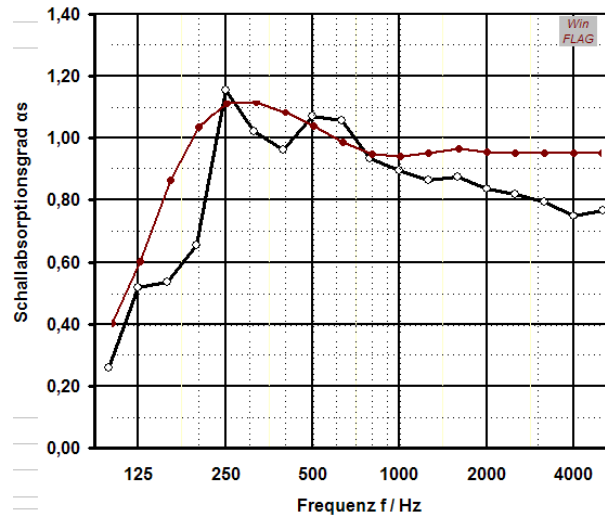


Fig. 85 Vergleich des Absorptionsgrades der Probe-III\_100 mm in der WinFlag-Simulation (rot mit Punkten) mit der Messung BRG (schwarz mit Kreisen)

## 6.7 Softwaretool

Das Raumakustik-Tool kann zur Abschätzung der notwendigen Absorberflächen zum Erreichen der, für einen bestimmten raumakustischen Verwendungszweck nach [DIN 18041] vorgeschlagenen Nachhallzeit verwendet werden. Da die raumakustische Planung und Gestaltung eine komplexe Aufgabenstellung ist und nicht nur den Nachhall betrifft, soll dieses Tool den Planer unterstützen, eine bei besonderen Anforderungen erforderliche Detailplanung aber nicht ersetzen. Die Benutzung des Raumakustik Tools ist im Großen und Ganzen intuitiv gestaltet, wobei Eingabefelder grau, Felder mit berechneten Daten gelb hinterlegt sind. Bei der Erstellung des Programms wurde Wert auf eine gewisse Bedienungssicherheit gelegt. Eingaben sind nur in jenen Tabellenbereichen möglich, in denen sie sinnvoll sind. Alle anderen Tabellenbereiche wurden für Eingaben gesperrt um nicht unbeabsichtigt Ergebnisse zu überschreiben. Ebenso wurde Wert darauf gelegt bei allen Eingaben auch die Auswirkungen in den Ergebnissen (Tabellen und Diagrammen) sofort zu aktualisieren.

- 1) Raumnutzungsart, über das Popup-Menü zu wählen. Es stehen die in der DIN 18041 angegebenen Nutzungsarten als Auswahl zur Verfügung. Aus den in „2“ eingegebenen Daten und der Raumnutzung wird die Nachhallzeit  $T_{\text{soil}}$  nach DIN 18041 angezeigt.
- 2) Raumgeometrie sowie Temperatur und Feuchte für die übliche Raumnutzung. Standardmäßig sind das 20°C und 50 % rel. Feuchte. Mit der Checkbox „Luftdämpfung“

kann diese berücksichtigt werden (in DIN 14081 nicht berücksichtigt). Nach aktivieren der Checkbox „Nachhallzeit gemessen“ kann bei Vorhandensein einer Nachhallmessung im Bereich „3“ die Nachhallzeit eingegeben werden. Ist die Checkbox deaktiviert, wird die Nachhallzeit aus den Eingaben in „2“ und „6“ berechnet.

- 3) Hier wird entweder die berechnete Nachhallzeit des Rohzustandes angezeigt (gelb hinterlegt), oder es kann die Nachhallzeit des Rohzustandes eingegeben werden.
- 4) Durch das Einbringen von Absorptionsflächen in den Bereichen „7“ bis „11“ verringert sich die Nachhallzeit. Das Berechnungsergebnis nach Sabine wird unter „4“ angezeigt.
- 5) Darstellung der berechneten Nachhallzeit in Diagrammform.
- 6) Eingabe der Materialien des Rohraumes, sofern keine Nachhallzeit gemessen bzw. in „3“ eingegeben wurde (in  $m^2$ ).
- 7) Eingabe eventueller Deckenabsorber (in  $m^2$ )
- 8) Eingabe eventueller Bodenabsorber (in  $m^2$ )
- 9) Eingabe eventueller Wandabsorber (in  $m^2$ )
- 10) Eingabe eventueller Streukörper (in  $m^2$ )
- 11) Eingabe von Personen bzw. Gestühl (in Anzahl/Stück)
- 12) Hier kann gewählt werden, welche Kurven im Diagramm angezeigt werden. Es gibt die Möglichkeit zwei beliebige Zustände als Variante 1 bzw. 2 abzuspeichern und anzuzeigen. Der Maximalwert für die Nachhallzeit für die Diagrammdarstellung kann unter „ $Y_{max}$ “ vorgegeben werden. Ist „ $Y_{max}$ “ deaktiviert, erfolgt eine automatische Anpassung der Y-Skala an die dargestellten Kurven.
- 13) Zeigt tabellarisch und als Diagramm die äquivalente Absorptionsfläche an, die noch benötigt wird um die Sollnachhallzeit zu erreichen.
- 14) Platz für Bemerkungen
- 15) Angaben zum Projekt

Im Tabellenblatt „Absorption“ sind die Absorber mit Namen und Absorptionsgrad eingetragen. Diese können beliebig erweitert werden. Die erste Zeile eines jeden Datenblocks gibt die Kategorie der Absorber an (z.B. Wand, Decke, Boden, ...). Es ist unbedingt darauf zu achten, dass innerhalb der Blöcke keine Leerzeilen vorhanden sind und vor jedem Datenblock mindestens eine Leerzeile frei bleibt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Darstellung des Raumakustik-Tools mit den Berechnungsdaten der Schulklasse im BRG-Kepler.

### Raumakustik (nach DIN18041)

**1** Raumnutzung: Unterrichtsraum  
nach DIN 18041 (Mai 2004) | Tsoll= 0,60 [s]

Rohraum Nachhallzeit berechnet					
125	250	500	1000	2000	4000
2,91	2,42	1,76	1,63	1,31	1,31

erreichte Nachhallzeit:					
125	250	500	1000	2000	4000
0,73	0,57	0,53	0,57	0,58	0,56

**5**

**12** Toleranzgrenze für Tsoll = 0,60 [sec]

— ohne Personen und Gestühl  Zeigen  
 — mit Personen und Gestühl  Zeigen  
 - - - Variante 1 zeigen  speichern  
 - - - Variante 2 zeigen  speichern

Y Skalierung  
 Ymax 3

**2** Raumeometrie  
 Länge l = 8,92 [m] | Breite b = 7,18 [m] | Höhe h = 4,12 [m]  
 Volumen = 263,87 [m³] | Gesamtoberfläche = 260,76 [m²]  
 Boden bzw. Decken - Fläche = 64,05 [m²] | Temperatur = 22,0 [°C]  
 Wandflächen = 132,66 [m²] | rel. Feuchte = 55,0 [%]

Nachhallzeit gemessen  neues Projekt  Luftdämpfung ein

**6** Rohdecke: 39,05 [m²]  α zeigen  
 Decke-Altbau (BRG)  
 Rohboden: 64,05 [m²]  α zeigen  
 Parkettfußboden, hohl liegend  
 Rohwände: 62,85 [m²]  α zeigen  
 Mauerziegelwand (BRG)  
 Fenster: 13,90 [m²] | max. erlaubt 76,75 [m²]

reset Absorber | reset Flächen  Deckenabsorber abdeckend  
 Decke (Teil 1): 25,00 [m²] | max. erlaubt 64,05 [m²]  α zeigen  
 Zellulose100mm (Messung-BRG) **7**  
 Decke (Teil 2): 0,00 [m²] | max. erlaubt 39,05 [m²]  α zeigen  
 kein Absorber  
 Bodenabsorber abdeckend **8**  
 Boden (Teil 1): 0,00 [m²] | max. erlaubt 64,05 [m²]  α zeigen  
 kein Absorber  
 Boden (Teil 2): 0,00 [m²] | max. erlaubt 64,05 [m²]  α zeigen  
 kein Absorber  
 Wandabsorber abdeckend **9**  
 Wand (Teil 1): 2,20 [m²] | max. erlaubt 65,05 [m²]  α zeigen  
 Tür (BRG)  
 Wand (Teil 2): 26,98 [m²] | max. erlaubt 89,73 [m²]  α zeigen  
 Probe-VII (Messung-BRG)  
 Wand (Teil 3): 13,55 [m²] | max. erlaubt 76,40 [m²]  α zeigen  
 Probe-VI\_oB (Messung-BRG)  
 Wand (Teil 4): 13,28 [m²] | max. erlaubt 76,13 [m²]  α zeigen  
 Probe-VI\_mB (Messung-BRG)

Streukörper aus Holz: 0,00 [m²]  α zeigen **10**  
 Streukörper aus Metall: 0,00 [m²]  α zeigen

Personen sitzend auf Gestühl: 34,00 [Personen]  
 1,0 m² / Person sitzend auf Holzgestühl **11**  
 Gestühl (ohne Personen): 0,00 [Stück]  α zeigen  
 kein Gestühl  
 Sonstiges: 0,00 [Stück]  α zeigen  
 keine sonstigen Absorptionsflächen

**13** noch erforderliche Absorptionsfläche:

125	250	500	1000	2000	4000
11,9	-4,1	-10,2	-3,5	-3,2	-5,1

**14** Bemerkungen:  
 Berechnung der Nachhallzeit aus dem Raumvolumen  
 Die Nachhallzeit des Rohraumes wurde mit der  
 Nachhallzeitmessung des Rohraumes kalibriert.

**15** Projekt: BRG-Kepler (Raum Nr. 011/Parterre)  
 Adresse: Keplerstraße 1, 8020 Graz  
 Datum: 6. April 2006  
 durchgeführt von:  
 Graber / Egger

## 6.8 Hygrothermische Simulationsberechnungen

### 6.8.1 Gegenstand und Ziel der Untersuchungen

Ein raumseitiger Schallabsorber wirkt automatisch als Innendämmung für die betreffende (Außen-)Wand. Es muss daher untersucht werden, ob es bei Winterklima zu einer Kondensation und damit Feuchteanreicherung im Inneren der Konstruktion kommen kann. Für Innenwände ist dies aufgrund der vergleichsweise geringen Temperaturdifferenzen über den Wandquerschnitt unerheblich. Analog trifft dies für Wände zu unbeheizten Nachbarräumen oder Treppenhäuser zu, deren Temperatur zwar unter der Raumtemperatur, aber aufgrund ihrer Lage innerhalb des Gebäudes wesentlich über der Außenlufttemperatur liegt.

Ein Schallabsorbersystem beinhaltet zur Dämpfung des Luftschalls poröse Materialien, die für die akustische Funktionstauglichkeit eine offenporige Struktur aufweisen müssen und damit auch wie Wärmedämmstoffe wirken. Dadurch sind diese Stoffe aber gleichzeitig auch relativ dampfdiffusionsoffen.

Betrachtet man die Außenwand (oder eine Decke zum Kaltdach), so wird zwar durch die Wärme dämmende Wirkung energetisch eine Verbesserung erreicht, als Nebeneffekt muss aber das Risiko von Kondensation im Inneren der Konstruktion untersucht werden.

### 6.8.2 Methodik, Vorkenntnisse und Quellen

Während im Vorgängerprojekt „Verputzte Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ ein Innendämmsystem in einem Versuchsobjekt appliziert, mit Messtechnik versehen und über zwei Winterperioden untersucht wurde, lag im vorliegenden Projekt der Schwerpunkt auf der akustischen Untersuchung. Daher wurden im BRG Kepler keine feuchtetechnischen Größen aufgezeichnet. Die im erstgenannten Projekt gewonnenen Erkenntnisse – Bestimmung der hygrischen und thermischen Materialparameter, Vergleich der in situ gemessenen Daten mit den Ergebnissen von Simulationsberechnungen – haben das Materialmodell und die Anwendung des Simulationspaketes DELPHIN verifiziert. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die damit durchgeführten Simulationsberechnungen auch ohne umfangreiche Vor-Ort-Messungen als hinreichend genau für eine hygrothermische Beurteilung der Konstruktion sind.

Herkömmliche Berechnungsverfahren (z.B. Glaserverfahren) für das winterliche Kondensationsverhalten berücksichtigen nicht die Feuchteleitfähigkeit und Feuchtespeicherung der beteiligten Materialien. Für „klassische“ Baustoffe ist dies ausreichend; bei höherem Feuchtespeicher- und Feuchteleitvermögen können diese jedoch zu einer erheblichen Veränderung der hygrischen Situation führen.

Da diese Parameter zum Teil in hohem Maße nichtlineare Funktionen über mehrere Zehnerpotenzen darstellen können, berücksichtigt das am Institut für Bauklimatik der TU Dresden entwickelte numerische Simulationspaket DELPHIN diese Materialeigenschaften als funktionale Zusammenhänge (in Abhängigkeit von Wassergehalt bzw. Kapillardruck).



In der physikalischen Modellierung ist weiterhin die Kopplung zwischen Wärme- und Feuchtetransport enthalten. Das physikalische Modell und die Softwareumsetzung wurde bereits an mehreren Objekten verifiziert und weiterentwickelt.

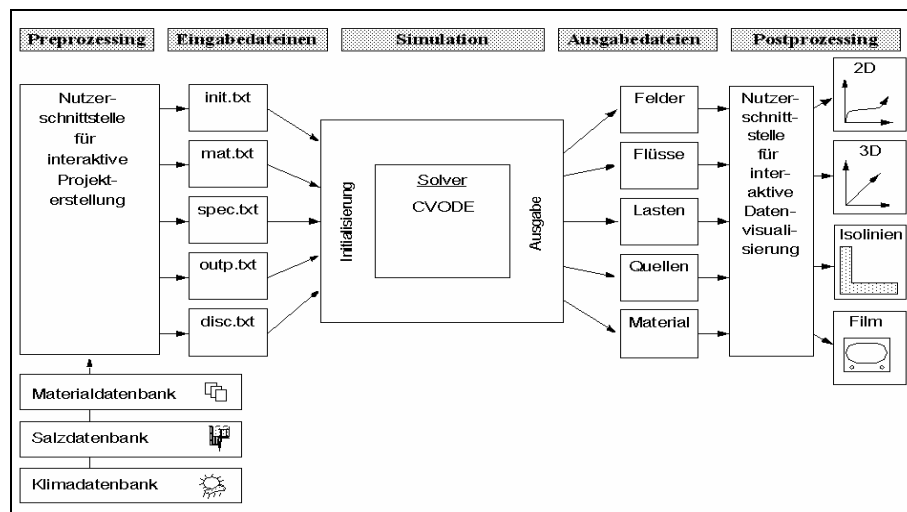


Fig. 86 Aufbau des numerischen Simulationsprogramms DELPHIN 4

Im Zuge des Vorgängerprojektes wurde das Materialsystem Zellulose-Putz im bauphysikalischen Labor der TU Dresden untersucht und die Parametrisierung der Materialfunktionen vorgenommen. Durch einen Vergleich von berechneten und gemessenen Zustandsgrößen im Versuchshaus konnte eine Verifizierung vorgenommen werden. Aufbauend auf diesen Erfahrungen wurden nochmals die Materialien des Akustiksystems den entsprechenden Materialmessungen unterzogen.

Prinzipiell hatte sich herausgestellt, dass die Zellulose ein sehr hohes Feuchteleitvermögen besitzt. Damit ist sie in der Lage, eventuell in der Ebene Zellulose-Altkonstruktion entstehendes Kondensat aufzunehmen und raumseitig abzuleiten. Damit wird die hygri-sche Belastung der Konstruktion wesentlich entspannt.

Für die hygrothermische Beurteilung wird jeweils eine zweidimensionale Simulation unter konstanten Klimarandbedingungen vorgestellt und diskutiert. Als Eignungskriterium wird dabei die Grenze von  $1 \text{ kg/m}^2$  Kondensat verwendet wie bei einfachen Verfahren auch, jedoch unter Berücksichtigung aller bauphysikalisch relevanten Prozesse wie Transport und Speicherung von Wärme und Feuchte (in Dampf- und flüssiger Form) sowie deren Kopplung.

Dieser Grenzwert ist naturgemäß hypothetisch und mit einer gewissen Sicherheitsreserve behaftet. Damit schließt er die Situation an geometrischen Wärmebrücken (Raumkante) in der Regel mit ein.

### 6.8.3 Materialkennwerte

Um eine numerische Berechnung durchzuführen, ist ein detailliertes Wissen über die thermischen und hygri-schen Eigenschaften der verwendeten Materialien notwendig. Sowohl die grundlegenden Eigenschaften wie Rohdichte, Wärmekapazität und Dampfleitfähigkeit ( $\mu$ -Wert in mehreren Feuchtebereichen) ist die Kenntnis der Feuchtespeicherung und der Kapillarwasserleitfähigkeit wesentlich für die Qualität der mit Hilfe von Simulationen möglichen Ergebnisse. Aufgrund des großen Wertebereiches der hygri-schen Funktionen können Unterschiede hier je nach Anwendungsfall zu grundlegend anderen Ergebnissen und Schlussfolgerungen führen. Aus diesem Grund ist an der TU Dresden in den letzten Jahren ein hochwertig ausgerüstetes Labor eingerichtet worden, in dem die oben genannten Materialeigenschaften gemessen werden. Hierbei wird wenn sinnvoll auf Standardverfahren zurückgegriffen, es kommen aber auch instationäre Messverfahren und erweiterte Messtechnik zum Einsatz. Die grundlegenden Materialeigenschaften werden dann als feuchte- bzw. kapillardruckabhängige Funktionen angepasst und in einer Materialdatenbank zur Verfügung gestellt. Folgende relevante hygrothermische Kennwerte wurden gemessen:

- Basiseigenschaften:** Matrixdichte, Trockenraumdichte, totale und offene Porosität  
**Thermale Eigenschaften:** Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität  
**Hygrische Eigenschaften:** Feuchtespeicherung im hygro-skopischen und überhygro-skopischen Bereich (Sorptionsisotherme und Wasserretention), Wasserdampfdiffusionswiderstand, Feuchteleitfähigkeit, Wasseraufnahmekoeffizient und Trocknungscharakteristik

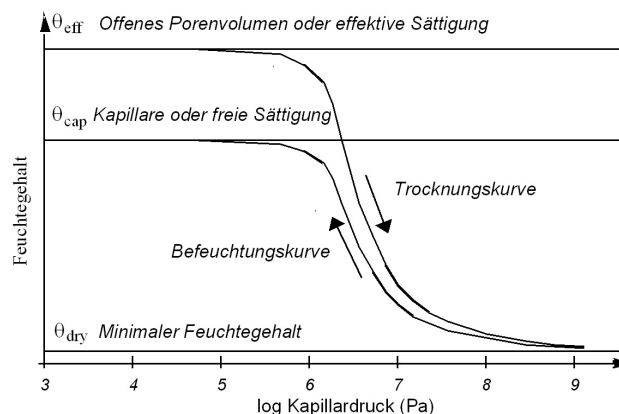


Fig. 87 Beispielhafte Darstellung einer Feuchtespeicherfunktion

Die Feuchtespeicherfunktion wird durch Druckplatten- und Sorptionsmessungen ermittelt. Eine ergänzende Bestimmung der Feuchtespeicherung kann auch – unter Zuhilfenahme eines geeigneten Porenmodells – mittels einer Porenstrukturanalyse (Quecksilberdruckporosimetrie, Stickstoff-BET- und optische Methoden) vorgenommen werden. Schließlich folgt aus der Porenstruktur und der Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten ( $A_W$ -Wert) sowie des Wasserwiderstandes im Bereich der freien Sättigung die Kapillarwasserleit-

fähigkeit. Die Analyse der überhygroskopischen Eigenschaften ist von besonderer Relevanz zur Beurteilung der eventuell anfallenden Kondensatmenge und zur Abschätzung der Trocknungsdauer.

Zur Ermittlung charakteristischer Materialfunktionen werden die gemessenen Materialkennwerte zur unmittelbaren Verwendung in Simulationsmodellen aufbereitet. Letztere benötigen kontinuierlich differenzier- und integrierbare Funktionen anstelle von Zahlenwerten. Über ein physikalisches Materialmodell werden daher die Kennwerte funktionalisiert, wobei die Wasserretentionscharakteristik, die Flüssigwasserleitfähigkeit, der Wasserdampfdiffusionskoeffizient und die Wärmeleitfähigkeit funktional abgebildet werden.

Zur Kontrolle der Materialmessungen im Labor und der Funktionsanpassungen am Computer werden typische Aufsaugexperimente und Verdunstungsexperimente mit einem physikalisch basierten wissenschaftlichen Simulationsprogramm nachgerechnet und so der Funktionssatz justiert und das Material verifiziert.

Die Materialkennwerte und die hygrothermischen Funktionen werden in einem relationalen Datenbanksystem abgelegt. In der Datenbank werden die Materialfunktionen graphisch übersichtlich visualisiert und zur einfachen Auswahl gegenübergestellt. Die Datenstruktur wird dabei so gewählt, dass auch künftige Ergänzungen, Anpassungen und Aktualisierungen möglich sind.

Die Materialfunktionen der für den Akustikabsorber modifizierten Zellulose wurden nochmals bestimmt und sind beispielhaft mit den aufbereiteten Messergebnissen zum Dampfdurchgang in zwei Feuchtedifferenzstufen in unten stehender Tabelle angegeben.

Material	Pk	$\mu$ (05/36)	$\mu$ (82/96)
Zellulose gebunden	CPH_C_70	2.25	1.60
Zellulose gebunden	CPH_C_71	2.03	1.43
Zellulose gebunden	CPH_C_72	2.17	1.62
Zellulose gebunden	CPH_C_73	2.08	1.47
Zellulose gebunden	CPH_C_74	2.16	1.61
	<b>Mittelwerte</b>	<b>2.151</b>	<b>1.549</b>
	StdDev	0.107	0.107
	Min	2.034	1.426
	Max	2.245	1.622
Kalkzementputz	WP50	5.39	
Kalkzementputz	WP51	5.62	5.01
Kalkzementputz	WP52	5.46	6.22
Kalkzementputz	WP53	5.47	6.16
Kalkzementputz	WP54	5.48	7.26
	<b>Mittelwerte</b>	<b>5.484</b>	<b>6.161</b>
	StdDev	0.086	0.919
	Min	5.388	5.013
	Max	5.623	7.261

#### 6.8.4 Hygrothermisches Verhalten des Schlitzabsorbers

Drei grundsätzliche Aufbauten des Schlitzabsorbers sind zu unterscheiden:

Zelluloseschlitz offen - Abdeckung mit Lochblech - Abdeckung mit Akustikputz

Diese drei Varianten weichen in Hinsicht auf ihr hygrothermisches Verhalten als Innendämmung nur marginal voneinander ab. Das Lochblech und die dahinter liegende Luftschicht haben keinen nennenswerten Einfluss auf den Wärme- und Feuchtedurchgang, der Dampfdiffusions- und Wärmewiderstand unterscheidet sich kaum von der Variante mit zellulosegefülltem Schlitz. Der aufgrund der hinter dem Blech geringeren Strömungsgeschwindigkeit der Luft etwas höhere Übergangswiderstand lässt sich ohne Messung schwer quantifizieren.

Der Einkorn-Akustikputz ist zwar als durchgehende Materialschicht anzusehen, besitzt aber aufgrund seiner Dicke von rund 2 mm und seiner aus akustischen Gründen offenporigen Struktur ( $\mu = 2..4$ ) auch nur einen geringen Dampfdiffusionswiderstand mit einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke  $s_d$  von wenigen Millimetern. Seine Funktion besteht in einer optischen Abdeckung der Zellulosestreifen, sodass eine einheitliche Oberfläche sichtbar ist. Die akustische Funktion ist umso besser, je durchlässiger der Einkornputz ist. Ein Nachweis sollte sich daher nicht auf die dampfbremsende Wirkung des Einkornputzes stützen. Aus diesen beiden Gründen wird der innen liegende Einkorn-Akustikputz in der hygrischen Berechnung nicht berücksichtigt.

Wie oben erwähnt ist die Anwendung des Systems auf Innenwänden aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen unkritisch. Als Untersuchung der Eignung auf Außenwänden werden im Folgenden zweidimensionale Berechnungen auf der ca. 50 cm dicken Ziegelmauerwerk-Außenwand des BRG Kepler dargestellt. Den Ergebnissen der Berechnungen unter konstanten Klimarandbedingungen schließt sich eine Variante an, die das im Versuchshaus Liebenau des o.a. Vorgängerprojektes vor Ort gemessene Innen- und Außenklima von Graz nutzt.

Da die nebeneinander liegenden Bereiche der Putzschicht und des Zelluloseschlitzes sich gegenseitig beeinflussen, ist zur Beurteilung eine zweidimensionale Berechnung notwendig. Die relevanten Größen Temperatur, Luftfeuchte und Wassergehalt sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

#### Konstruktionsaufbau (U-Wert ohne Akustiksystem = 1,3 W/m<sup>2</sup>K)

1 mm Akustik-Einkornputz (aufgrund des geringen  $s_d$ -Wertes vernachlässigt)  
15 mm Kalk-Zement-Putz Wietersdorfer & Peggauer Zementwerke (innen)  
50 mm Zellulose aufgespritzt  
15 mm Kalk-Zement-Putz (Bestandsputz)  
500 mm Ziegelmauerwerk  
20 mm Zementputz (außen)

Auf der Innenseite einer bestehenden Wand befindet sich üblicherweise ein Bestandputz (Kalk-Zement-Putz, Variante 1). Dieser wird in Variante 2 im Sinne einer „worst case“-Annahme einerseits unter dem Aspekt des höheren Gesamtwassergehaltes und andererseits deswegen nicht berücksichtigt, da im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme durchaus ein Abschlagen des vorhandenen Innenputzes denkbar ist.

**Variante 1 - mit Innenputz**

Aus dem 2D-Temperaturfeld ist zunächst ersichtlich, dass sich die Temperatur in den Achsen „Mitte Putz“ (= Location 0) und „Mitte Zelloseschlitz“ (= Location 200) nur geringfügig unterscheidet. Die Temperatur in der potentiellen Kondensationsebene liegt im Bereich des Schlitzes durch die Wärmedämmwirkung der zusätzlichen Zellulose etwa 0,5 K höher.

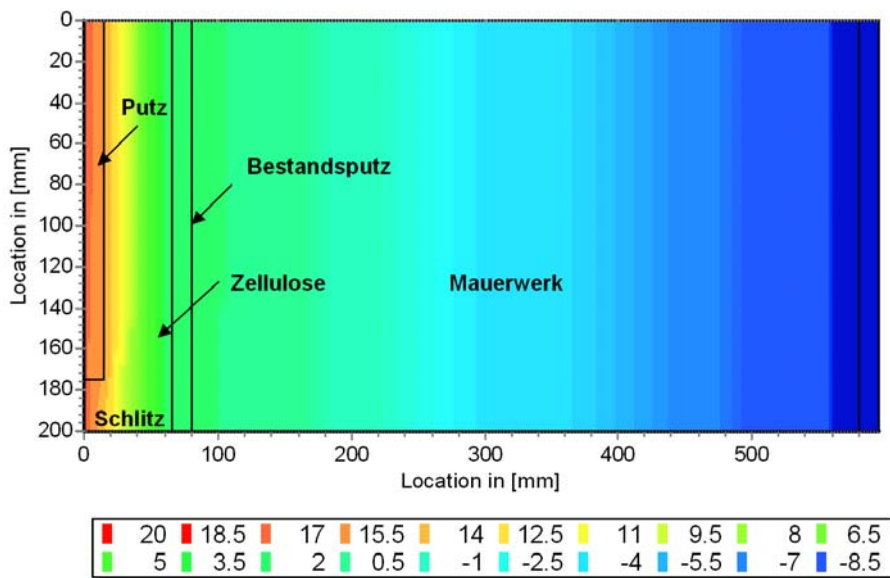


Fig. 88 Temperaturfeld bei Konstantklima 20°C / -10°C, zellulosegefüllter Schlitz

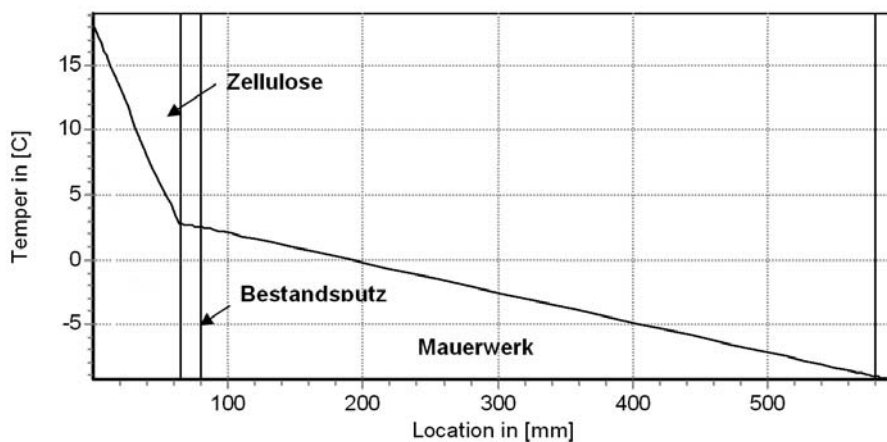


Fig. 89 Temperaturprofil in Ebene des Schlitzes nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50 % / -10°C, 80 %, zellulosegefüllter Schlitz

Das obige Temperaturprofil zeigt den Verlauf der Temperaturen in der Achse des Schlitzes, also am unteren Rand von Fig. 88. Die Temperatur in der Ebene Zellulose – Altkonstruktion liegt ca. 2,5°C über dem Gefrierpunkt.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich bei der Betrachtung der sich einstellenden Luftfeuchte (siehe untenstehende Abbildung). Im Bereich des Schlitzes ist gegenüber der Putzschicht ein geringerer Wasserdampfdiffusionswiderstand vorhanden. Dadurch stellt sich in der potentiellen Kondensationsebene (Ebene Zellulose-Altkonstruktion) im Schlitzbereich eine höhere Luftfeuchte ein. Diese beträgt nach Ende der Kondensationsperiode knapp 99 %. Es ist also in der Nachweisrechnung überhygroskopische Feuchte vorhanden.

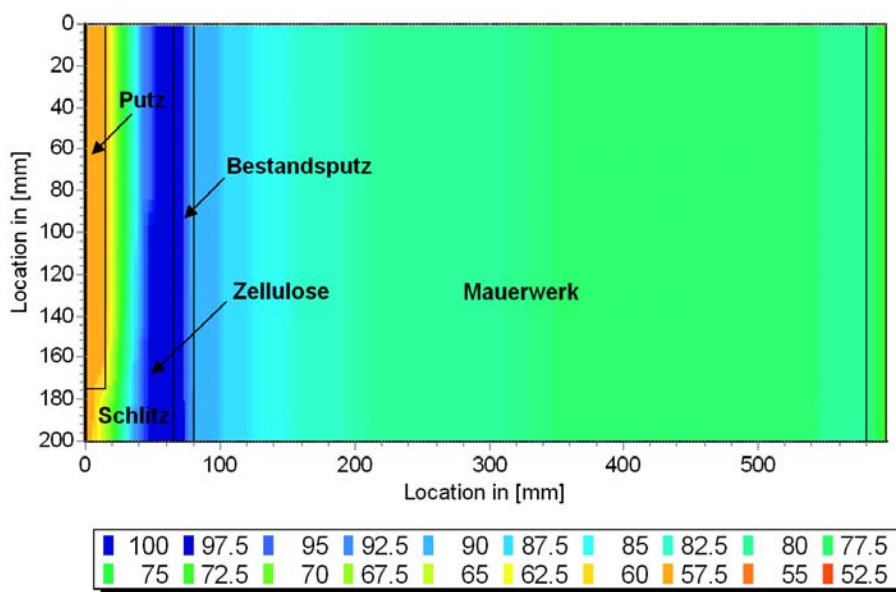


Fig. 90 Luftfeuchtefeld nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50 % / -10°C, 80 %, zellulosegefüllter Schlitz

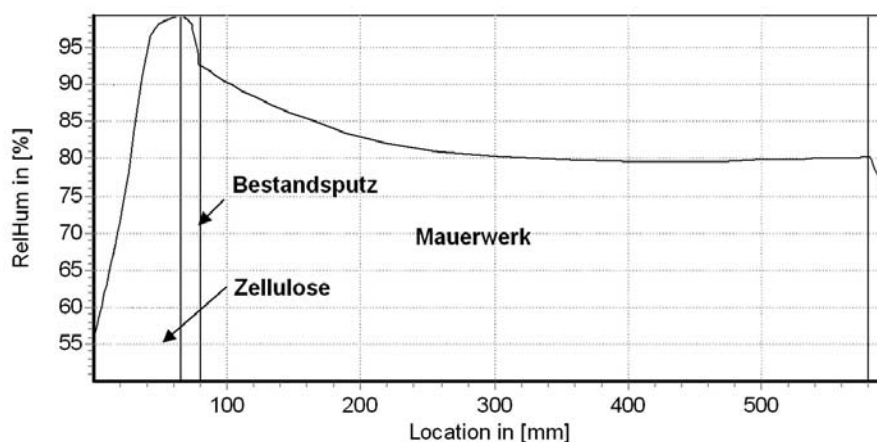


Fig. 91 Luftfeuchteprofil in Ebene des Schlitzes nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50 % / -10°C, 80 %, zellulosegefüllter Schlitz

Die Verteilung der Feuchtigkeit ist im Wassergehaltsfeld und –profil besser zu erkennen. In der Ebene Zellulose-Innenputz lagert sich ein relativ schmaler Wasserfilm an, wobei in der Grenzfläche in der Zellulose maximal 4 Vol % und im Bestandsputz 12,5 Vol % auftreten. Besonders im Profil, Fig. 93, zeichnet sich aber auch ab, wie durch die hohe Leitfähigkeit der Zellulose im Vergleich zum Putz eine gute Verteilung zur Raumseite hin stattfindet. Dadurch wird die überhygroskopische Feuchtemenge des Gesamt-Wandquerschnittes begrenzt. Umgerechnet auf 1 m<sup>2</sup> Wandfläche tritt knapp unter 1 kg/m<sup>2</sup> an Kondensat auf, sodass das Nachweiskriterium erfüllt ist. Inwieweit sich die hier gegenüber Variante 2 höhere Feuchtigkeitsmenge in der Zellose-schicht langfristig nachteilig auswirken könnte, wäre gesondert zu untersuchen.

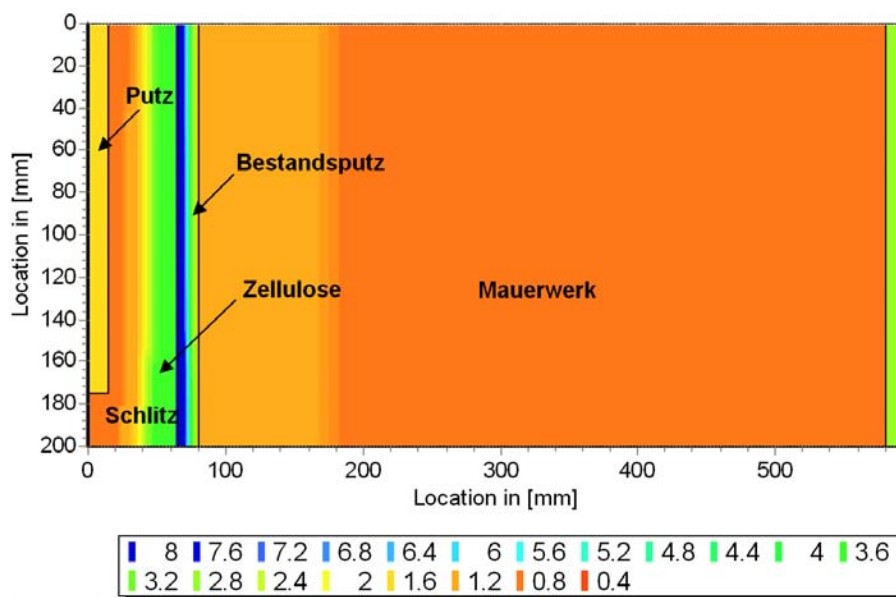


Fig. 92 Wassergehaltsfeld [Vol. %] nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50 % / -10°C, 80 %, zellulosegefüllter Schlitz

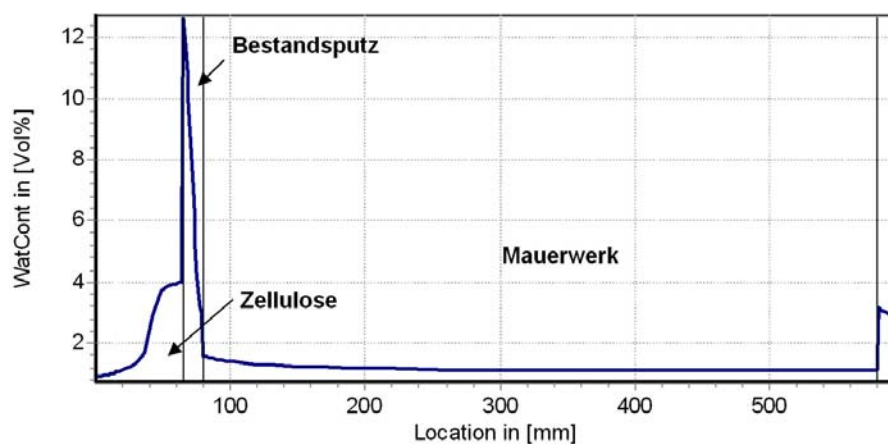


Fig. 93 Wassergehaltsprofil in Achse des Schlitzes nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50 % / -10°C, 80 %, zellulosegefüllter Schlitz

### Variante 2 - ohne Innenputz

Bei Annahme eines fehlenden Bestandsinnenputzes, also direktem Kontakt der aufgespritzten Zellulose mit dem Ziegelmauerwerk weicht das Temperaturfeld nur unwesentlich vom oben diskutierten Fall mit Innenputz ab. Es wird daher auf eine Darstellung verzichtet.

Wesentliche Unterschiede ergeben sich jedoch für die hygrischen Parameter. Sowohl Luftfeuchte- als auch Wassergehalt zeigen ein wesentlich tieferes Eindringen der Feuchte in das bestehende Mauerwerk. Dies ist durch die signifikant höhere Kapillarleitfähigkeit der Mauerziegel bedingt. Dadurch liegt zwar der Feuchtegehalt in der Zellulose etwas niedriger (3,4 Vol %), und auch die Durchfeuchtung der Zelluloseschicht ist geringer, jedoch steigt die überhygroskopische Gesamtwassermasse im Gegensatz zum obigen Fall auf etwa 1,7 kg/m<sup>2</sup>, liegt also erheblich über dem angestrebten Grenzwert von 1 kg/m<sup>2</sup>.

Durch einen gut Flüssigwasser leitenden Untergrund kommt also die kapillare Ableitung des Kondensats durch die Zellulose nicht so stark zum Tragen.

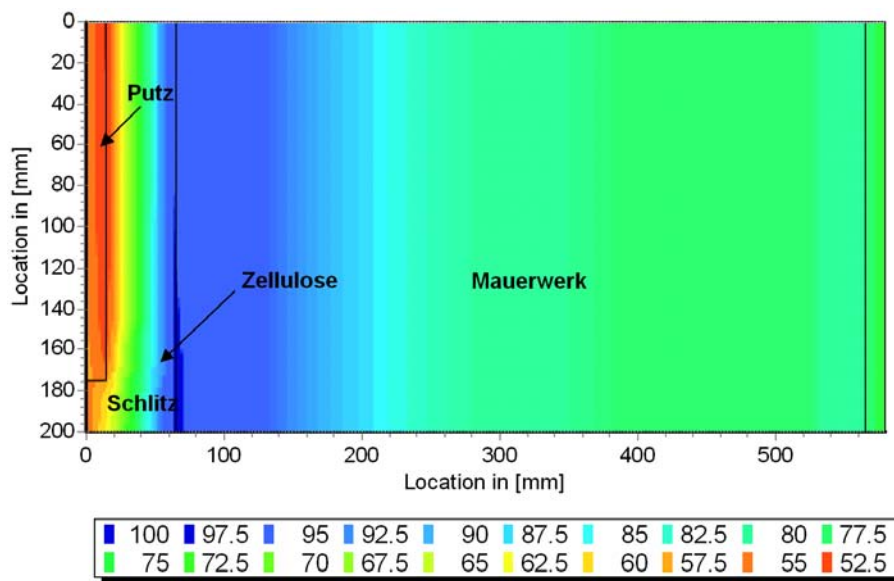


Fig. 94 Luftfeuchtefeld [%] nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50% / -10°C, 80%, zellulosegefüllter Schlitz



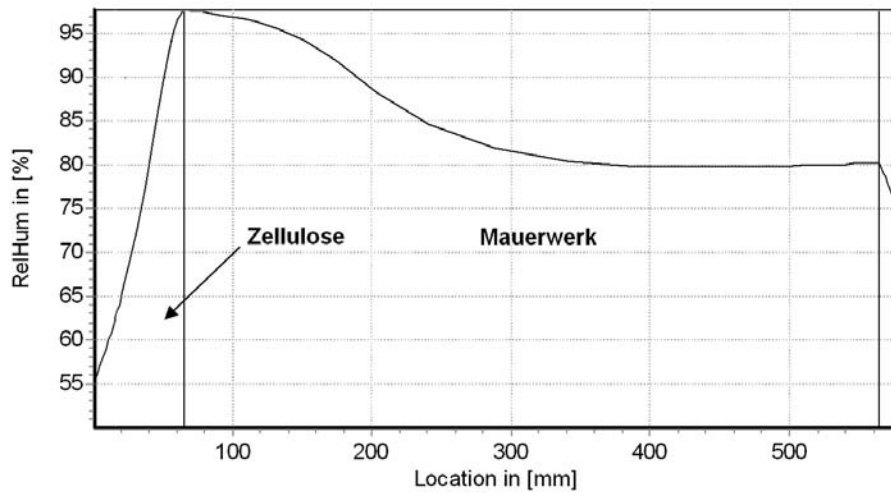


Fig. 95 Luftfeuchteprofil in Ebene des Schlitzes nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50 % / -10°C, 80 %, zellulosegefüllter Schlitz

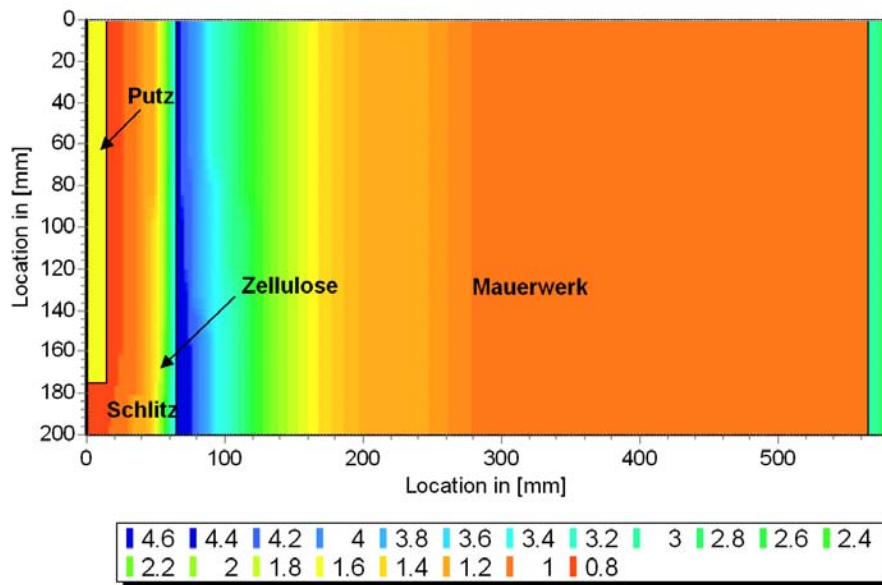


Fig. 96 Wassergehaltsfeld [Vol %] nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50 % / -10°C, 80 %, zellulosegefüllter Schlitz

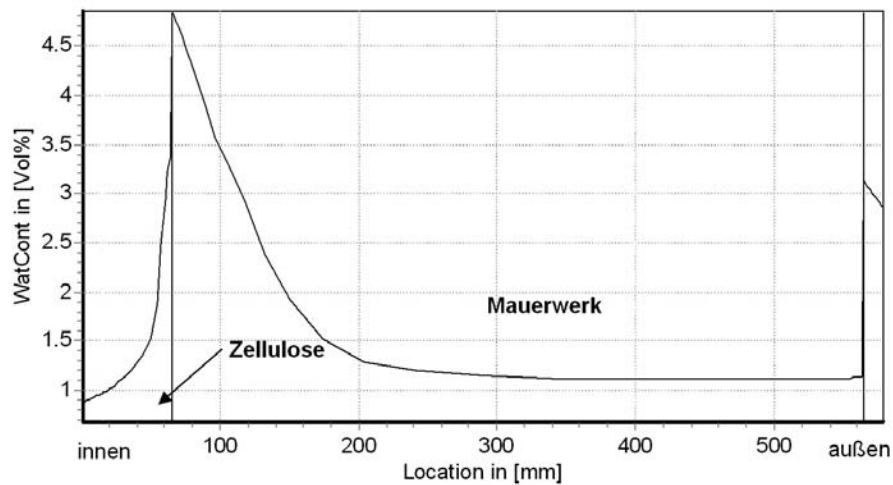


Fig. 97 Wassergehaltsprofil in Ebene des Schlitzes nach 60 Tagen bei Konstantklima 20°C, 50 % / -10°C, 80 %, zellulosegefüllter Schlitz

## Realklima

Um einen Anwendungsfall mit realen Klimabedingungen darzustellen, wurde eine Konstruktion analog zum Versuchshaus Liebenau aus dem Vorgängerprojekt untersucht. Dort wurde nach dem Aufbringen einer innen liegenden Zolulosedämmung mit Verputz das Innen- und Außenklima über zwei Kondensations- und zwei Verdunstungsperioden kontinuierlich aufgezeichnet und als Randbedingung für die Simulationsberechnungen verwendet. Die dortige Wandkonstruktion ist mit 50 cm Ziegelmauerwerk ähnlich der im Gebäude des BRG Kepler.

Um den kritischeren Fall zu zeigen, soll hier nur der Fall ohne Innenputz dargestellt werden. Die Einbaufeuchte wurde in der Simulation berücksichtigt. Da Klimamesswerte nur über einen Zeitraum von ca. 1,5 Jahren vorliegen, wurde das gemessene Klima der letzten zwölf Monate zyklisch verlängert, sodass eine weitere Winterperiode dargestellt werden kann.

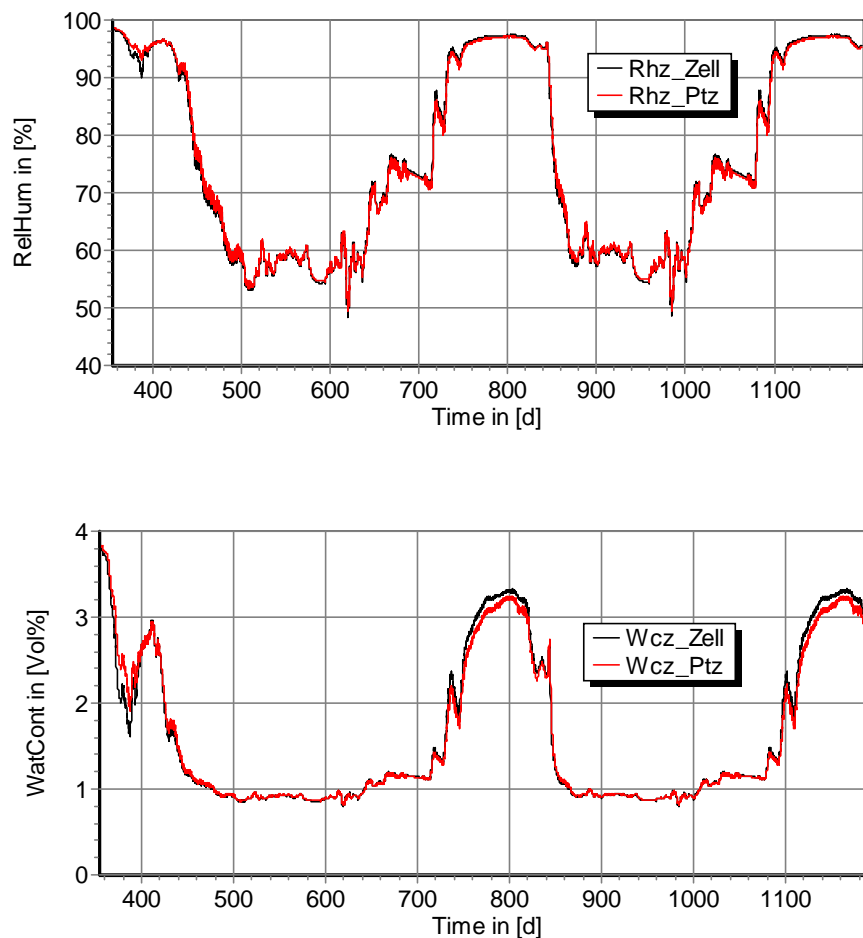


Fig. 98 Luftfeuchte und Wassergehalt in der potentiellen Kondensationsebene Zellulose – Altkonstruktion

Obige Abbildungen zeigen den zeitlichen Verlauf von Luftfeuchte und volumenbezogenen Wassergehalt in der Ebene Zellulose-Altkonstruktion. Dargestellt sind jeweils die Kurven in der Mitte des Schlitzes und in der Mitte des Putzbereichs. Die Kurven unterscheiden sich allerdings nur relativ gering, da zum einen der Diffusionswiderstand des Putzes mit  $\mu = 6$  nicht sehr hoch ist und als Nebeneffekt noch eine gewisse Querverteilung von Feuchte im Material stattfindet.

Im ersten Winter überlagert sich das Austrocknen der Einbaufeuchte mit dem Prozess der Feuchteanreicherung infolge Kondensation (Beginn der Rechnung im Dezember). Im darauf folgenden Sommer trocknet die Konstruktion dennoch vollständig aus.

Aus dem Verlauf der Kurven in der nächsten Kondensationsperiode ist zu erkennen, dass die Konstruktion auch hier vollständig abtrocknen kann, also keine Akkumulation von Feuchtigkeit über mehrere Jahre hin stattfindet. Maximalwerte und zeitlicher Verlauf sind gleich.

In der Winterperiode beträgt die maximale Luftfeuchte in dieser Ebene etwa 97,5 %, was nach der gemessenen Sorptionskurve 3,5 Vol % entspricht. Obwohl die Kondensations-ebene im Inneren der Konstruktion liegt und daher eine Belastung durch Schimmelpilzsporen aus der Raumluft nicht relevant ist und obwohl erste Schimmeluntersuchungen negativ ausfielen wären weitere längerfristige Untersuchungen sinnvoll.

Die Verteilung der Feuchte ist anschaulich nochmals in nachfolgender Abbildung dargestellt. Da das gemessene Klima eine geringere hygrische Belastung als das Simulationsklima darstellt, sind auch die Feuchtegehalte geringer.

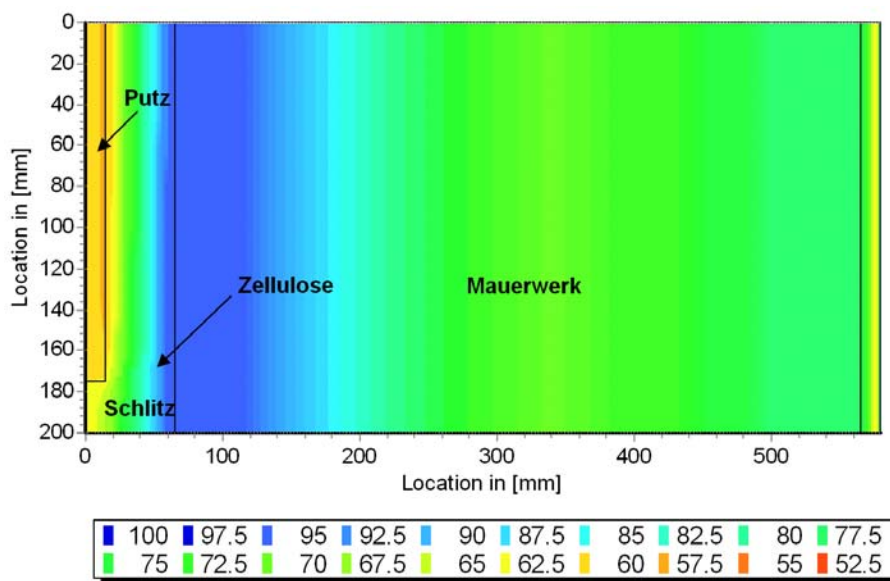


Fig. 99 Luftfeuchtefeld [%] in der Konstruktion am Tag mit dem maximalen Feuchtegehalt (Tag 798, 9. März)

## Fazit

Der Einsatz eines Schallabsorbers aus aufgespritzter und verputzter Zellulose kann an Außenwänden zur Anreicherung von Feuchte führen. Je größer die Dicke der aufgespritzten Zellulose ist, desto kritischer stellt sich die Situation dar. Da im Schlitzbereich keine innen liegende Putzschicht als „moderate Dampfbremse“ fungiert, wirkt die Zellulose als offene Innendämmung. Entsprechend hoch liegen die im Nachweis berechneten Kondensatmengen, die zwischen Zellulose und bestehender Konstruktion auftreten können.

Für die Funktion als Akustiksystem ist die Offenporigkeit der Zelluloseschicht essentiell, sodass keine Dampfbremse oder anders dichtende Schicht eingebaut werden kann. Die Nachweisrechnungen ergeben flächenbezogene Kondensatmengen, die durchaus im kritischen Bereich um 1 kg/m<sup>2</sup> liegen können. Die exakten Werte hängen neben den Eigenschaften der Zellulose und des Putzes – vor allem Wärmeleitfähigkeit, Dampfdiffusionswiderstand und kapillarer Leitung – von denen der angrenzenden Schicht

ab. Ein relativ dichter bestehender Innenputz kann das Eindringen von Feuchte in die Altkonstruktion verringern. Damit erhöht sich zwar der Feuchtegehalt in der Zellulose, die überhygroskopische Gesamtwassermenge bleibt jedoch geringer. Dieser gegenläufige Effekt muss also im Einzelfall geprüft werden, sodass sowohl die Feuchteakkumulation in der Zellulose (Schimmelgefahr, Trocknungszeit) als auch die Gesamtkondensatmenge unterhalb kritischer Werte bleiben.

Um Probleme zu vermeiden, muss unter Umständen die Dicke der Zellulose verringert werden und ggf. eine Einbuße bei den akustischen Eigenschaften in Kauf genommen werden. Alternativ wäre auch eine leichte vorherige thermische Aufbesserung der Fassade denkbar (z.B. Wärmedämmputz). Es muss allerdings betont werden, dass die Zellulose aufgrund ihrer hohen kapillaren Saugfähigkeit und des Speichervermögens hygrisch immer noch wesentlich günstiger wirkt als z.B. die oftmals in Akustikabsorbern verwendete Materialien ohne nennenswerte kapillare Leitung.

An Bauteilen ohne größere Temperaturdifferenzen kann das System aus aufgespritzter Zellulose unproblematisch eingesetzt werden. Der Einbau sollte daher vorrangig an Innenwänden und Decken erfolgen. An Außenwänden und Decken zu Kaltdächern ist eine feuchtetechnische Überprüfung vorzunehmen.



## 7 Zusammenfassung

Die zunehmende Sensibilisierung gegenüber wachsenden Umweltbelastungen im Allgemeinen und Lärm im Besonderen – manche Wissenschaftler sprechen bereits von „Lärm als dem Schadstoff des Jahrzehnts“ – hat ihren Niederschlag unter anderem in der DIN 18041 (05/2004) sowie in der ÖNORM B 8115-3 (11/2005) gefunden. Die Bedeutung einer zweckentsprechenden akustischen Qualität von „Alltagsräumen“ rückt also zunehmend ins Bewusstsein - nicht nur der Fachwelt. Insbesondere die oftmals unzumutbar hohen Lärmpegel in Schul- und Bildungseinrichtungen aber auch in Büro- und Aufenthaltsräumen bedeuten konkreten Handlungsbedarf für alle Beteiligten.

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines völlig neuartigen, aufgespritzten und verputzten Schallabsorbers auf Basis von Altpapierzellulose. Das entwickelte Absorbersystem kann vorzugsweise den üblicherweise nur recht aufwändig in den Griff zu bekommenden tieffrequenten Bereich bedämpfen und auch dort einsetzbar sein, wo konventionelle Absorber Probleme mit unzulässiger Wasserdampfkondensation hervorrufen können: an der Innenseite der Außenwand. Das kostengünstige und ökologische Verbundsystem kann auch auf unebenem oder gekrümmten Untergrund appliziert werden und zeichnet sich durch eine, im Vergleich zu abgehängten Akustikdecken wesentlich geringere Konstruktionshöhe aus – insbesondere im Renovierungsfall ein nicht zu unterschätzender Vorteil.

Das Projekt baut direkt auf einem abgeschlossenen und einem laufenden Zellulose-Vorgängerprojekt der Programmlinie „Haus der Zukunft“ auf. Beide Projekte hatten die Weiterentwicklung der nach wie vor überwiegend als Einblasdämmstoff verwendeten Zelloosedämmung zu einem tragfähigen, verputzbaren Wandsystem zum Inhalt, das zudem auch als Innendämmung ohne Dampfsperre geeignet ist.

### Anforderungsprofil

Bei dem neuartigen Absorbersystem wurde das Prinzip des so genannten Schlitzabsorbers weiterentwickelt indem ein zweischichtiges Putzsystem auf eine 5 – 6 cm dicke, vor Ort aufgespritzte, strömungstechnisch optimierte Zellooseschicht aufgebracht wird. Dabei werden die schallharten Flächen durch einen speziellen weitgehend diffusionsoffenen Innenputz gebildet und die dazwischen liegenden Schlitzlöcher in einem zweiten Arbeitsgang zusammen mit den schallharten Bereichen mit einer dünnen schalloffenen Beschichtung versehen. Dadurch wird – als absolute Innovation bei Schlitzabsorbern – eine fugenlose Oberfläche gebildet und dem Bedarf vieler Planer nach „Unsichtbarkeit“ der akustischen Maßnahmen bei gleichzeitiger Bedämpfung tiefer Frequenzen Rechnung getragen.

Durch Modifikation der Endbeschichtung besteht in gewissem Rahmen die Möglichkeit, das Absorptionsverhalten des Systems breitbandiger zu gestalten während das Absorptionsmaximum durch Variation der Breite und Dicke der Putzabdeckung sowie durch die Breite der Schlitzlöcher auf den jeweiligen Bedarf abgestimmt werden kann.

## **Entwicklung Zelluloseabsorber**

Das ursprünglich favorisierte Schaumsystem zur Bindung der Zelluloseflocken hat zwar – im Hinblick auf den Materialbedarf - vorteilhaft geringe Rohdichten und zum Teil gute akustische Messergebnisse der fertigen Zelluloseschicht – allerdings auch eine große Streuung des Strömungswiderstandes ergeben. Daher wurde auf ein Wasser-Bindemittel-Verfahren zurückgegriffen und eine bestehende Fördereinrichtung sowie der Aufspritzkopf modifiziert. Mit dem neuen System konnten nun ebenfalls sehr gute akustische Messwerte bei einer wesentlich geringeren Streuung erzielt werden. Die nun deutlich höhere Rohdichte von etwa  $100 \text{ kg/m}^3$  bewirkte zudem eine deutliche Überschreitung der an Wärmedämmverbundsysteme gestellten Anforderungen an die Zugfestigkeit normal zur Probenebene und die Druckfestigkeit bei 10 % Stauchung.

Zur Herstellung ebener, gleichmäßig dicker Zelluloseschichten wurde ein völlig neuartiges Abzugssystem entwickelt, das zum Unterschied gegenüber dem Stand der Technik die völlige Unabhängigkeit von den bislang in der fertigen Zelluloseschicht verbleibenden Abzugslehren ermöglicht. Es ermöglicht die Herstellung homogener Zelluloseschichten konstanter Dicke bei gleichzeitig raschem Arbeitsfortschritt und besteht aus einem horizontal und vertikal verfahrbaren Geräteträger mit rotierender Abzugsbürste der halbautomatisch in einem zwischen Boden und Decke eingespannten Schienensystem geführt wird.

## **Putzentwicklung**

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines neuartigen Putzsystems, bestehend aus einem schallharten Grundputz und einem weitgehend schalloffenem Deckputz.

Wesentlich für den schallharten, 12 - 15 mm dicken Grundputz war die Abstimmung auf den speziellen Putzgrund, das Verhältnis von Rohdichte zu Elastizität, ein niedriger Wasserdampfdiffusionswiderstand sowie eine relativ langsame Festigkeitsentwicklung. Obwohl die anspruchsvolle Herstellung der schalloffenen Schlitze eine Anpassung der Verarbeitungsweise erforderte, konnte die Putzschicht mit den integrierten Akustikschlitzen letztlich maschinell und relativ zügig hergestellt werden.

Die weitgehend schalloffene Endbeschichtung besteht aus einem 2 – 3 mm dicken, hochporösen, dispersionsgebundenen Einkornputz, mit dem die gesamte Wandfläche beschichtet wird. Dadurch werden sowohl die akustisch notwendigen Schlitze im Grundputz schalltransparent verschlossen als auch die schalldichten Felder für den mittleren und höheren Frequenzbereich absorbierender ausgestattet und vor allem eine fugenlose Oberfläche erzielt.

## **Probekörperherstellung**

Nachdem die ersten Zelluloseprobekörper aus 50 x 50 cm großen Versuchsflächen hergestellt worden waren, wurden die weiteren Proben aus 125 x 170 cm großen Versuchsflächen erzeugt. Dadurch konnten infolge des günstigeren Verhältnisses von Zonen mit Randverwirbelungen zu ungestörten Bereichen Probekörper größerer Homogenität erzeugt werden. Anhand zahlreicher Musterserien meist im Format 20 x 20 cm bzw.  $\varnothing 10 \text{ cm}$



wurden sowohl die Zellosoeschicht als auch der Einkornputz strömungstechnisch optimiert. Schließlich wurden insgesamt vier Musterserien zu je 14,4 bzw. 13 m<sup>2</sup> für die Hallraummessungen im Bautechnikzentrum der TU Graz hergestellt.

### **Akustikmessungen**

Die ersten Messergebnisse des längenbezogenen Strömungswiderstandes, als dem wichtigsten Kriterium für die Absorberschicht des Schlitzabsorbers, wiesen zum Teil hervorragende Werte, allerdings bei einer relativ großen Streuung, auf. Nach Umstellung des Herstellungsverfahrens wurde ein nach wie vor sehr guter mittlerer längenbezogener Strömungswiderstand von 19.600 Pa s/m<sup>2</sup> für die 5 cm dicke Zellosoeschicht bei einer Rohdichte von etwa 100 kg/m<sup>3</sup> ermittelt.

Nach weitgehendem Abschluss der Zellulose- und Putzentwicklung wurden erstmalige Hallraummessungen eines verputzten Zelluloseabsorbers durchgeführt. Die dabei erzielten Werte haben allerdings die Erwartungen nicht ganz erfüllt. Dies wird auf die für den Hallraum notwendige plattenförmige Probenherstellungsmethode und das dadurch bedingte, gegenüber einer Vor-Ort-Applikation unterschiedliche akustische Verhalten zurückgeführt.

Schließlich wurde in einem Bundesrealgymnasium in Graz im Rahmen eines Projektunterrichts eine Schulklasse mit dem neu entwickelnden Akustiksystem ausgestattet. Die Vor-Ort-Messungen des Absorptionsverhaltens der verschiedenen Absorbertypen haben trotz der im Vergleich zum Hallraum nicht optimalen Raumgeometrie bessere Werte ergeben. Zudem konnte der Schule die optimale akustische Ausstattung eines Klassenraumes zur Verfügung gestellt und die Notwendigkeit und Möglichkeiten einer akustischen Gebäudesanierung demonstriert werden.

### **Simulationsberechnungen**

Die akustischen Simulationsberechnungen haben die relativ großen Möglichkeiten des Systems hinsichtlich Abstimmung an unterschiedliche akustische Anforderungen durch die Variation der Breite und Dicke der schalldichten Putzfelder und der Breite der dazwischen liegenden Schlitze gezeigt. Damit können sowohl die Absorptionsmaxima als auch die Breitbandigkeit in gewissem Umfang eingestellt werden.

Nach dem Feststehen der endgültigen Materialeigenschaften, insbesondere des Deckputzes, unterstützten die akustischen Simulationsberechnungen die Auslegung der Vor-Ort-Musterflächen. Parallel dazu wurde ein einfaches Simulationstool entwickelt, mit dessen Hilfe die erforderlichen Absorptionsflächen zur Erreichung einer bestimmten Nachhallzeit und deren Aufteilung auf gegebenenfalls unterschiedliche Absorbertypen ermittelt werden können. Dieses Tool soll zwar für besondere Anwendungsfälle wie Musikprobe- oder Aufführungsräume den Fachplaner nicht ersetzen, aber für den bauakustischen Bereich dem Verarbeiter die Möglichkeit geben, eine für die allermeisten Anwendungsfälle befriedigende akustische Ausstattung oder Sanierung zu realisieren.

Abschließend wurde nach Bestimmung der Materialkennwerte der Endbeschichtung die Eignung des Systems für die Anwendung an der Innenseite der Außenwand mittels

hygrothermischen Simulationsberechnungen geprüft. Dabei wurde festgestellt, dass die aus akustischer Sicht notwendigen Schlitze die Anwendung an der Außenwand etwas kritischer erscheinen lassen als im Falle einer ununterbrochenen Innenputzschicht, da diese als moderate Dampfbremse wirkt. Bei Vorhandensein oder neuerlicher Herstellung eines Bestandsputzes kommt es zwar im Gegensatz zu dessen Fehlen zu einer Erhöhung des Feuchtegehaltes in der Zelluloseschicht, die Gesamtwassermenge der Konstruktion bleibt im vorliegenden Fall des BRG Kepler mit seinen etwa 50 cm dicken Ziegelwänden aber weitgehend unkritisch. Dennoch bedarf die Applikation des Absorbersystems an der Innenseite der Außenwand der Untersuchung im jeweiligen Anwendungsfall.

### **Ausblick**

Im Bezug auf das Akustiksystem besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung von schalloffenen Farben, mit denen Renovierungsanstriche durchgeführt werden können, ohne die akustische Wirksamkeit durch Verkleben der feinen Porenstruktur zu beeinträchtigen.

Die Prototyp-Installation im BRG Kepler hat gezeigt, dass hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung in Schulen oder ähnlichen Einrichtungen noch Optimierungsbedarf besteht. Bis zur Realisierung entsprechend massiver Konstruktionen kann es sinnvoll sein, das Absorbersystem nur im Bereich über etwa zwei Meter Höhe zu installieren.

Für den Zellulosekörper an sich wurde bereits eine teilweise Plattenvorfertigung versucht, die jedoch im Rahmen des gegenständlichen Projektes nicht über das Prototypstadium hinaus verfolgt werden konnte. Die im BRG Kepler vorgestellte Methode des Vor-Ort-Aufspritzens einer lediglich fünf Zentimeter dicken Zelluloseschicht auf vorgefertigte Zelluloseplatten mit beispielsweise ebenfalls fünf Zentimetern hat den entscheidenden Vorteil der Herstellung einer akustisch sehr wirksamen weil dicken Absorberschicht in einem Arbeitsgang. Diese Schichtdicke ist mittels konventioneller Verfahren zur Zeit nicht realisierbar. Als Alternative ist die Weiterentwicklung des Schaumverfahrens denkbar, welches größere Schichtdicken bei geringerem Wassergehalt als die Wasser-Bindemittelmischung erlaubt.

Obwohl sich das entwickelte Abzugssystem prinzipiell hervorragend bewährt hat, bestehen im Bezug auf die mechanische Stabilität der Konstruktion noch Optimierungsmöglichkeiten. Die diesbezüglichen Adaptierungen sollten mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich sein und erstmalig ein System zur Verfügung stellen, mit dem homogene, ebene Zelluloseschichten möglich sein werden.

Obwohl das beschriebene Schallabsorbersystem unter Beibehaltung oder Wiederherstellung des Bestandsinnenputzes auch für die Innenseite der Außenwand voraussichtlich tauglich ist, ist die Situation für jeden Anwendungsfall gesondert zu überprüfen. Hinsichtlich der Katalogisierung nachweisfreier Konstruktionen besteht jedenfalls weiterer Forschungsbedarf.

Für die anwendungsorientierte Weiterentwicklung des grundsätzlich überaus positiv zu wertenden Potenzials der aufgespritzten Zellulosedämmung ist die Bestimmung des für diesen speziellen Dämmstoff kritischen maximalen Wassergehalts von besonderer

Bedeutung. Dies einerseits im Hinblick auf die gemäß ÖNORM B 8110-2 maximal zulässige Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaft aber auch im Hinblick auf eine mögliche Migration der Brand- und Insektenschutz- oder der Bindemittel. Weiters bedarf es gezielter Langzeituntersuchungen um die Auswirkungen wiederholter Befeuchtungs- und Austrocknungsvorgänge auf die mechanische Stabilität, gegebenenfalls auf die Schimmelpilzrestistenz zu untersuchen. Erste Untersuchungen der Schimmelpilzgefährdung im Laufe des Vorgängerprojektes „Innendämmung ohne Dampfsperre“ haben keinerlei Schimmelpilzwachstum an Probekörpern ergeben, die aus dem Bereich einer Raumaußenkante entnommen worden waren.

Dennoch besteht unter anderem auch hinsichtlich der Beurteilung von Bauteilanschlüssen wie beispielsweise Balkenköpfe von Holzbalkendecken im Falle einer Innendämmung ohne Dampfsperre weiterer Forschungsbedarf. Ebenso nicht Gegenstand der vorgestellten „Proof of Principle“ - Untersuchungen war die baupraktische Realisierung von Anschlussdetails beispielsweise von Fensterlaibungen oder Installationsführungen.

Schließlich besteht intensiver Bedarf nach einer verstärkten Bewusstseinsbildung hinsichtlich der Notwendigkeit und Möglichkeiten der akustischen Gebäudesanierung insbesondere in Schul- und Bildungseinrichtungen aber auch hinsichtlich der verstärkten Berücksichtigung raumakustische Maßnahmen sowohl beim Neubau als auch insbesondere im Falle ohnehin notwendiger Bauwerksoptimierungen, da in diesem Zusammenhang gesetzte Maßnahmen kaum nennenswerte Mehrkosten verursachen.

Sogar die singuläre, nachträgliche akustische Sanierung amortisiert sich innerhalb kürzester Zeit z.B. in Call-Centres [Drotleff] oder aber in Form besserer Informationsübermittlung, geringerer Störung kognitiver Prozesse, geringerer Stimmbelastung von Vortragenden, reduzierter Ermüdung und verbesserter Aufmerksamkeit.



## 8 Abbildungsverzeichnis

Fig. 1	„Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ - Vor-Ort gemessenes Kondensations- und Austrocknungsverhalten.....	21
Fig. 2	Aufgespritzte Zelluloseakustikbeschichtung, Dom im Berg, Graz .....	26
Fig. 3	Prinzipskizze Schlitzabsorber .....	26
Fig. 4	Siebsatz mit Rüttelmaschine und Sieblinie .....	29
Fig. 5	Fördermaschine neu und Regelungsanlage .....	30
Fig. 6	Förderpumpe und Abzugsbürste.....	30
Fig. 7	Verbundsystem-Probekörper ohne und mit aufgeklebter Stahlplatte .....	31
Fig. 8	Prüfvorrichtung Zugfestigkeit normal zur Probenebene und Druckfestigkeit .....	32
Fig. 9	Zugfestigkeit normal zu Probenebene, Probekörper 8 x 8 cm .....	32
Fig. 10	Zugfestigkeit normal zu Probenebene, Probekörper 15 x 15 cm, mit Zelluloseschlitz .....	33
Fig. 11	Zugversuch normal zur Probenebene – Versagen in der Grenzfläche Putz / Zellulose.....	33
Fig. 12	Druckfestigkeit nach ÖNORM EN 826, Probekörper 8 x 8 cm .....	33
Fig. 13	Gesamtansicht des Prototyps des neuartigen Abziehsystems.....	35
Fig. 14	Putzprobekörper CA22 – CA31.....	39
Fig. 15	Probekörperplatte 125 x 170 x 4 cm, Rückwand 22 mm OSB-Platte.....	41
Fig. 16	Prüfkörper 15 x15 x 6 cm.....	42
Fig. 17	Verputzte Zellulose-Hallraummuster.....	43
Fig. 18	Klassenraum mit Zellulosegrundbeschichtung .....	44
Fig. 19	10 cm dicker Deckenabsorber als „Spielplatz“.....	45
Fig. 20	Herstellung der Putzprobekörper für die Bestimmung des Absorptionsgrades.....	45
Fig. 21	Unterschiedliche Putzmuster für die Bestimmung des Strömungswiderstandes .....	46
Fig. 22	Probekörperherstellung für die Hallraummessungen .....	46
Fig. 23	Vor-Ort-Montage der Probe VII .....	47
Fig. 24	Probe VI – Probleme beim Verreiben des Grundputzes.....	48
Fig. 25	Applikation des Einkornputzes auf Probe VI_mB .....	48
Fig. 26	Schematische Skizze der Messanordnung und Impedanzrohr 10 x 10 cm .....	49
Fig. 27	Absorptionsgrade der Probe A2I.....	50
Fig. 28	Zusammenhang zwischen $\alpha_0$ und $\alpha_{diff}$ , sowie die Differenz $\alpha_{korrr} = \alpha_{diff} - \alpha_0$ .....	51
Fig. 29	Probenvorbereitung und Messung des Strömungswiderstandes .....	51
Fig. 30	Impedanzmessrohr für Probekörper 20 x 20 cm und gemessene Absorptionsgrade cm.....	52
Fig. 31	Gemessenes Absorptionsverhalten, mit Feinkornputz verputzter Schlitz .....	53
Fig. 32	Gemessenes Absorptionsverhalten, mit Grobkornputz verputzter Schlitz .....	53
Fig. 33	Strömungswiderstand verschiedener Einkornputzproben .....	54
Fig. 34	Absorptiongrade verschiedener Schlitz- und Abdeckungsvarianten (CA 22 – CA31) .....	55
Fig. 35	Verschiedene Probekörper der Endbeschichtung CA 32 .....	55
Fig. 36	Schlitzbreite und -abstand für Probe VI (links) und Probe VII (rechts) .....	56
Fig. 37	Gesamtprobengröße für Hallraummessung 480 x 300 cm für die Proben I bis V.....	57
Fig. 38	Gesamtprobengröße 360 x 360 cm für die Probekörperserien VI bis VII.....	57
Fig. 39	Messergebnis der Hallraummessung von Probe VI_mB .....	58
Fig. 40	Zusammenfassung der Hallraum-Messergebnisse .....	59

Fig. 41	Blick in die Klasse .....	59
Fig. 42	Schrägriß des Klassenraums mit den Fensternischen .....	60
Fig. 43	Quellpositionen und Messpositionen für die Nachhallmessung im Rohzustand .....	62
Fig. 44	Betischung und Bestuhlung bei der Messung im Rohzustand sowie Quellpunkt Q2 .....	63
Fig. 45	Über alle Messpunkte gemittelte Nachhallzeit – Rohzustand.....	63
Fig. 46	Messpunkteraster für die Nachhallmessung im Rohzustand.....	64
Fig. 47	Nachhallzeitverteilung im Klassenraum bei 63, 125, 250, 500, 1k, 2k, 4k und 8 kHz .....	65
Fig. 48	Alcons für die Quellpunkte Q1, Q2 und Q3 im Rohzustand – gemessen.....	66
Fig. 49	Simulierte Alcons-Verteilung im leeren Klassenraum für Quellpunkt Q1 .....	67
Fig. 50	Simulierte Nachhallzeit Rohzustand und 24 Schüler.....	68
Fig. 51	Toleranzband für die optimale Nachhallzeit und simulierte Nachhallzeit bei 24 Schülern .....	68
Fig. 52	Gemessene Nachhallzeit nach Einbau der Schlitzabsorber.....	69
Fig. 53	Gemessene Nachhallzeit nach Einbau der Schlitzabsorber, mit simulierten Schülern .....	69
Fig. 54	Blick in die Klasse nach der Sanierung.....	70
Fig. 55	Nachhallzeit Endzustand und 32 Personen auf Holzgestühl .....	70
Fig. 56	Vergleich der Nachhallzeiten bei 63, 125 und 250 Hz vor und nach der Sanierung .....	71
Fig. 57	Vergleich der Nachhallzeiten bei 500 Hz, 1k und 2 kHz vor und nach der Sanierung .....	72
Fig. 58	Vergleich der Nachhallzeiten bei 4k und 8 kHz vor und nach der Sanierung .....	73
Fig. 59	Alcons nach der Sanierung, gemessen .....	74
Fig. 60	Alcons nach der Sanierung, simuliert .....	74
Fig. 61	Vergleich des Alcons vor und nach der Sanierung .....	75
Fig. 62	Vorabsimulation einer vollflächig verputzten Zelluloseschicht.....	77
Fig. 63	Vorabsimulation einer streifenförmig verputzten Zelluloseschicht.....	78
Fig. 64	Schalldämmmaß abhängig von der Plattenelastizität.....	79
Fig. 65	Vorabsimulation Zellulose + GK Platte .....	79
Fig. 66	Schlitzabsorber mit möglicher verhärteten Schicht zwischen Putz und Zellulose .....	80
Fig. 67	Prinzip des Schlitzabsorbers.....	81
Fig. 68	Verschiedene Schlitzabsorber im Vergleich zu porösem Absorber .....	81
Fig. 69	Probe-VI_mB - Variation des Schlitzabstandes .....	82
Fig. 70	Vergleich von Hallraummessung und kalibrierter Simulation für Probe-III und VI_oB .....	83
Fig. 71	Vergleich von Hallraummessung und kalibrierter Simulation für Probe-VI_mB und VII .....	83
Fig. 72	Nachhallzeitberechnung nach Eyring .....	84
Fig. 73	Erforderliche äquivalente Absorptionsfläche.....	84
Fig. 74	Erste Skizze der Absorptionsflächenverteilung.....	84
Fig. 75	Simulation der Verbesserung des Alcons .....	85
Fig. 76	Zu erwartende Nachhallzeit bei 80 m <sup>2</sup> unverputzter Zellulose.....	86
Fig. 77	Absorptionsflächen im Klassenraum – Modifikation 1 .....	87
Fig. 78	Montage der Lochbleche bzw. Zellulosestreifen an der längsseitigen Türwand .....	88
Fig. 79	Montage der Lochbleche bzw. Zellulosestreifen an der stirnseitigen Rückwand .....	88
Fig. 80	Gesamtansicht der mit Absorber verkleideten Wände .....	89
Fig. 81	Endgültige Dimensionierung des Deckenabsorbers.....	90
Fig. 82	Vergleich des Absorptionsgrades der Probe-VII in der WinFlag-Simulation .....	91

Fig. 83 Vergleich des Absorptionsgrades der Probe-VI_oB in der WinFlag-Simulation.....	92
Fig. 84 Vergleich des Absorptionsgrades der Probe-VI_mB in der WinFlag-Simulation.....	92
Fig. 85 Vergleich des Absorptionsgrades der Probe-III_100mm in der WinFlag-Simulation .....	93
Fig. 86 Aufbau des numerischen Simulationsprogrammes DELPHIN 4.....	97
Fig. 87 Beispielhafte Darstellung einer Feuchtespeicherfunktion.....	98
Fig. 88 Temperaturfeld bei Konstantklima 20°C / -10°C, mit Bestandsputz .....	101
Fig. 89 Temperaturprofil in Ebene des Schlitzes bei Konstantklima, mit Bestandsputz .....	101
Fig. 90 Luftfeuchtefeld nach 60 Tagen bei Konstantklima, mit Bestandsputz .....	102
Fig. 91 Luftfeuchteprofil in Ebene des Schlitzes bei Konstantklima, mit Bestandsputz .....	102
Fig. 92 Wassergehaltsfeld [Vol. %] bei Konstantklima, mit Bestandsputz .....	103
Fig. 93 Wassergehaltsprofil in Achse des Schlitzes bei Konstantklima, mit Bestandsputz .....	103
Fig. 94 Luftfeuchtefeld [%] bei Konstantklima, ohne Bestandsputz.....	104
Fig. 95 Luftfeuchteprofil in Ebene des Schlitzes bei Konstantklima, ohne Bestandsputz .....	105
Fig. 96 Wassergehaltsfeld [Vol %] bei Konstantklima, ohne Bestandsputz.....	105
Fig. 97 Wassergehaltsprofil in Ebene des Schlitzes bei Konstantklima, ohne Bestandsputz .....	106
Fig. 98 Luftfeuchte und Wassergehalt in der potentiellen Kondensationsebene Zellulose – Altkonstruktion, ohne Bestandsputz.....	107
Fig. 99 Luftfeuchtefeld [%] in der Konstruktion am Tag mit dem maximalen Feuchtegehalt, ohne Bestandsputz .....	108
Fig.100 Absorptionsgrade der Proben 4a–4, 4a–5 und 4a–6, Wandabstand D = 5 cm.....	A 4
Fig.101 Absorptionsgrade der Proben 4a–4, 4a–5 und 4a–6, Wandabstand D = 10 cm.....	A 4
Fig.102 Probe VI_oB - Variation des Schlitzabstandes im Vergleich zur Hallraummessung (HR) ...	A 13
Fig.103 Probe VI_oB - Variation des Schlitzabstandes mit verringerter Dichte.....	A 14
Fig.104 Probe VI_oB - Variation des Schlitzabstandes in Oktavbändern.....	A 14
Fig.105 Probe VII – Variation der Schlitzbreite bei 300 mm Schlitzabstand.....	A 15
Fig.106 Probe VII – Variation der Schlitzbreite bei 400 mm Schlitzabstand.....	A 15
Fig.107 Probe VII – Variation der Schlitzbreite bei 500 mm Schlitzabstand.....	A 16
Fig.108 10 cm abgehängte Zellulose - Variation der Dicke .....	A 16
Fig.109 Abgehängte Zellulose - Variation von Dicke und Abhängehöhe .....	A 17





## 9 Verwendete und weiter führende Literatur

1. Achtziger, J.: Praktische Untersuchungen der Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen mit Innendämmung, Proc. Innendämmung - Theorie und Praxis, Bremer Impulse: Bauen + Energie; Fachseminar, 18. Mai 2000, Bremen 2000
2. Ahnert, W., Steffen F.: Beschallungstechnik - Grundlagen und Praxis, S. Hirzel Verlag Stuttgart, Leipzig, 1993
3. Ahnert, W.; Reichardt, W.: Grundlagen der Beschallungstechnik, Berlin: Verlag Technik, 1981
4. Allinger-Csollich, W. et al.: Papierrecycling / Wald – Darstellung möglicher Zusammenhänge, Umweltbundesamt Monographien Bd. 131, Wien 2000
5. Amt der Steiermärkischen Landesregierung: Anforderungsprofil für Zelluloseplatten, Graz 2001
6. Ballou, G. M. (Hrsg.): Handbook for Sound Engineers, Third Edition, Focal Press Boston, Oxford, Auckland, Johannesburg, Melbourne, New Delhi 2002
7. Berndt, J., Schönwälder, H.-G., Ströver, F., Tiesler, G.: Belastung und Beanspruchung von Lehrerinnen und Lehrern, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), FB 989, NW-Verlag Bremerhaven, 2003
8. Biehn, K.; Gruhl, S.: Absorptionsschalldämpfer. In: Lärmbekämpfung. Hrsg. W. Schirmer, Berlin 1989
9. Borsch-Laaks, R.: Bauphysik der Innendämmung, Proc. Forum Innendämmung Schloß Raesfeld, Energieagentur NRW, Wuppertal 1997
10. Borsch-Laaks, R.: Die „kleinen“ Innendämmungen, Proc. Innendämmung - Theorie und Praxis, Bremer Impulse: Bauen + Energie ; Fachseminar, 18. Mai 2000, Bremen 2000
11. Cremer, L, Müller, H.A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1, Hirzel Verlag, Stuttgart, 1978
12. Cremer, L., Möser M.: Technische Akustik. Berlin: Springer, 2003
13. Czedik-Eysenberg, P. / Bundesministerium f. Umwelt, Jugend und Familie (Hrsg.): Chemie nachwachsender Rohstoffe, Proc., Wien 09./10.09.1997
14. DE 10151474 A1, Schallabsorber mit streifenförmiger schalldichter Abdeckung, Offenlegungsschrift, 2001
15. DIN 18032-1, Sporthallen - Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung, Teil 1: Grundsätze für die Planung, 09/2003
16. DIN 18041: Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen, Beuth Verlag, Berlin, 05/2004
17. DIN EN ISO 11690-1, Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer maschinenbestückter Arbeitsstätten, Teil 1: Allgemeine Grundlagen, Berlin 02/1997
18. DIN EN ISO 11690-2, Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer maschinenbestückter Arbeitsstätten, Teil 2: Lärminderungsmaßnahmen, 02/1997
19. Drotleff, H., Zhou, X.: Attractive room acoustic design for multi-purpose halls. ACUSTICA 87, H. 4, S. 500-504, 2001
20. Drotleff, H.: Funktionale Raumakustik macht sich bezahlt, 2. Akustik-Forum Raum und Bau, Stuttgart 17./18. Februar 2005
21. DSB-Ratgeber, Heft 11, Technische Hilfen für Hörgeschädigte, Deutscher Schwerhörigenbund e.V., Berlin, Oktober 2002
22. Eggenschwiler, K. et al.: Beschallungsanlagen für Sprache — Empfehlungen für Architekten und Bauherrschaften Hrsg.: Schweizerische Gesellschaft für Akustik, Januar 2001
23. EP 0 811 097 B1, Plattenresonator, Europäische Patentschrift, 1995
24. ETAG Nr. 004, Leitlinie für europäische technische Zulassungen für außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht, EOTA, Brüssel, 03/2000
25. EURIMA – European Insulation Manufacturers Association: Die maßgebliche Bedeutung der Gebäudedämmung für die Umwelt, Brüssel 2001

26. Eyring, C. F.: „Reverberation time in dead rooms“, JASA - Journal of the Acoustical Society of America, Heft 1, S. 217, 1930
27. Fasold, W., Kraak, W., Schirmer, W. (Hrsg.): Taschenbuch der Akustik. Bd. 1 u. 2, VEB Verlag, Berlin 1984
28. Fasold, W., Sonntag, E., Winkler, H.: Bau- und Raumakustik-Verlag Bauwesen, Berlin, 1987
29. Fasold, W., Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen, Berlin 1998
30. Fasold, W.: Schallabsorber und ihr Einsatz in Wohn- und Gesellschaftsbauten. In: Taschenbuch Akustik, Teil II. Hrsg. W. Fasold et al., Verlag Technik, Berlin, 1984
31. Fechner, H., Häupl, P., Martin, R., Neue, J., Petzold, H.: Thermische Sanierung von Fachwerkbauten mittels Innendämmung. Dresdner Bauklimatische Hefte. Heft 5, Eigenverlag TU Dresden, 1998
32. Fechner, J. (Hrsg.): Altbaumodernisierung - Der praktische Leitfaden, Springer, Wien 2002
33. Feldtkeller, R., Zwicker, E.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger, Stuttgart, Hirzel, 1956
34. Fellner, M., Pflüger, M.: Visualisierung von akustischen Mess- und Analyseergebnissen durch interaktive 3D-Darstellung, in: Fortschritte der Akustik – DAGA 2001, Hamburg
35. Fletcher, H.: Speech and Hearing in Communication. Toronto, van Nostrand, 1953
36. Fuchs, H. V. et al.: Schallabsorber und Schalldämpfer. Innovatorium für Maßnahmen zur Lärmbekämpfung und Raumakustik. Teil 1-6, Bauphysik 24 (2002), H. 2, S. 102-113; H. 4, S. 218-227; H.5, S. 286-295; H. 6, S. 316-367 und 25 (2003), H. 2, S. 80-88; H. 5, S. 261-270
37. Fuchs, H. V., Rambašek, N., Teltschik, R.: Raumakustische Verbesserung kleiner Räume bei tiefen Frequenzen. Deutsches Architektenblatt 23, H. 8, S. 1201-1207, 1991
38. Fuchs, H. V.: Weckruf für die Raumakustik. Trockenbau-Akustik, H. 10, S. 34-38 und H. 11, S. 32-38, 2003
39. Fuchs, H. V.; Zha, X.; Drotleff, H.: Lärmschutz und akustischer Komfort im Büro, Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 56, Sonderheft „Ergonomie im Büro“, S. 261-267, 2002
40. Fuchs, H.: Schallabsorber und Schalldämpfer, Springer Verlag, Berlin 2004
41. Fuchs, H.V., Ackermann, U., Rambašek, N.: Schallschutz: Schallabsorber für einen breiten Frequenzbereich, Deutsches Architektenblatt 22, 1990
42. Fuchs, H.V.: Gute Akustik in Büros, Trockenbau-Akustik, H. 5, S. 34-38 und H. 6, S. 26-29, 2003
43. Fuchs, H.V.; Hunecke, J.: Der Raum spielt mit bei tiefen Frequenzen, Das Musikinstrument 42, 1993
44. Graber, G., Hauser, D., Quiring, K.B.: AK 02 - Akustische Untersuchungen an Lochblenden als Sichtabdeckung und als Resonanzabsorber, Proc. Österr. Phys. Ges., W.A. Deutsch (ed.), p. 5, 1996.
45. Graber, G., Trink, A.: Intelligenter Lärmparameterrekorder, Mikroelektronik 1991, Tagungsband S. 166 – 171, Fric-Verlag, 1991
46. Graber, G.: Tontechnik und interdisziplinäres Sinnen – Eine grundlegende Fragestellung, Peter Lang Verlag, Frankfurt/Main, 2000
47. Großmann, H. et al. (Hrsg.): Grundlagen der Altpapieraufbereitungstechnik, PTS Verlag München, 1993
48. Grün, L.: Schimmelpilzbefall in Gebäuden – Innenraumhygienische und arbeitsschutzrechtliche Aspekte, Proc. 10. EUZ – Baufachtagung – Energetische Gebäudemodernisierung Hannover 18./19. 10. 2001, Energie und Umweltzentrum am Deister, Springe 2001
49. Grunewald, J., Bomberg, M.: An engineering approximation of material characteristics for input to Heat, Air and Moisture simulations. In: Tagungsband zum 11. Bauklimatischen Symposium Dresden 2002. Eigenverlag TU Dresden 2002
50. Grunewald, J.: Diffuser und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen, Dissertation, TU Dresden, 1997

51. Grüning, T.: Unsichtbare Akustik, Trockenbau-Akustik, Sonderheft, S. 49-50, 2003
52. Häupl P., et al.: Hygrisch motivierter Wärmeschutz – Thermische Sanierung eines Gründerzeithauses mit einer kapillaraktive Calciumsilikatinnendämmung, Dresden 1999
53. Häupl P., et al.: Thermische Sanierung von Fachwerkbauten mittels Innendämmung, Dresdner Bauklimatische Hefte, Bd. 5, Dresden 1998
54. Häupl, P., Fechner, H., Petzold, H., Jurk, K.: Sanierung historischer Gebäude mit Calciumsilikatinnendämmung, in: Tagungsband zum 11. Bauklimatischen Symposium Dresden 2002, Eigenverlag TU Dresden 2002
55. Hengsberger, H.; Mandl, M.: Bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulose-Dämmschichten. - in: Fachtagung "Verbundwerkstoffe - Neue Erkenntnisse für den Holzbau", 2001
56. Herlyn, J.W.: Verbesserung des Wärmeschutzes von Fachwerkwänden mit Innendämmungen, Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Braunschweig, 1995
57. Hoeg, W., Steinke, G.: Elektroakustische Übertragungsverfahren, in: Taschenbuch Akustik, Kap. 10.1., Berlin, Verlag Technik 1984
58. Hunecke, J., Zhou, X.: Resonanz- und Dämpfungsmechanismen in Membran-Absorbern, VDI Berichte 938, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992
59. ISO 31-7: Größen und Einheiten; Teil 7: Akustik, 09/1992
60. Jacob K.: Aus der Tiefe des virtuellen Raumes - Die perfekte Akustik entsteht im Computer, Die Zeit 46, S. 56, 2000
61. Kautsch, P.: Gebäude mit historischen Fassaden – Möglichkeiten und Grenzen der Innendämmung, in: Proc. Ecological Building Retrofit - International Conference And Exhibition, S. 119 – 127, Weiz, 13.-15.-10.2005
62. Kautsch, P., Hengsberger, H.: Aufgespritzte Zellulosedämmung mit Putzaufgabe, in: Technopress-Baummagazin Dez. 07/00, S. 18-21, 2000
63. Kautsch, P., Hengsberger, H.: Bauphysik in Forschung und Lehre für die Praxis, in: Die Praxis in Wissenschaft und Forschung, Proc. Bauphysiktagung 2000, TU Graz, S. 20-21, 2000
64. Kautsch, P., Hengsberger, H.: Die Fassade im Haus der Zukunft, in: Bauphysik - über die Grenzen hinweg, Proc. Bauphysiktagung 2002, TU Graz, S. 85-93, 2002
65. Kautsch, P., Hengsberger, H.: Gebundene Zellulosedämmung für Wärmeschutz und Raumakustik, in: Thinking New Structures, Proc. Bauphysiktagung 2004, TU Graz, S. 108-115, 2004
66. Kautsch, P., Häupl, P., Hengsberger, H., Streicher, W.: Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Wien 2005
67. Kehrer M., et al.: Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte an Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, IBP-Bericht HTB-12/2001
68. Kießl, K.: Wärmeschutzmaßnahmen durch Innendämmung – Beurteilung und Anwendungsgrenzen aus feuchtetechnischer Sicht, Proc. Innendämmung - Theorie und Praxis, Bremer Impulse: Bauen + Energie ; Fachseminar, 18. Mai 2000, Bremen 2000
69. Klatte, M., Meis, M., Nocke, Chr., Schick, A., (Hrsg.): Hören in Schulen, Ergebnisse des 9. Oldenburger Symposiums zur psychologischen Akustik, Oldenburg, Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 2003
70. Knudsen, V.O.: Architectural Acoustics. New York: Wiley & Sons, 1932
71. Krus, M., Sedlbauer, K.: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen hygrothermisch unter die Lupe genommen, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Valley/Oberlindern, 2001
72. Kunstmann, D., Kuttruff, H., Meyer, E.: Über einige Messungen zur Schallabsorption von Publikum, Acustica, 14, S. 119-124, 1964
73. Lamers, R.: Erfahrungen aus der Bauschadensforschung, Proc. Forum Innendämmung Schloss Raesfeld, Energieagentur NRW, Wuppertal 1997

74. MacKenzie, D. J., Airey, S.: Classroom Acoustics - Summary Report; Heriot-Watt University, Edinburgh; Department of Building Engineering and Survey, Riccarton, Edinburgh, EH144AS, 1999
75. Mandl M., Hengsberger, H., Kautsch, P., Stuhlbacher, A.: Grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulosedämmschichten mit Putzaufgabe für Außenfassaden, Endbericht Haus der Zukunft, 2001
76. Mechel, F.P.: Schallabsorber Band 1 - Äußere Schallfelder - Wechselwirkung, S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1989
77. Meis, M., Reckhardt, C., Schick, A. (Hrsg.): Contributions to Psychological Acoustics. Eighth Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics, Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 2000
78. Niese, H.: Vorschlag für die Definition und Messung der Deutlichkeit nach subjektiven Grundlagen, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik 65, H.1, S. 4, 1956
79. Oberdörster, M., Tiesler, G.: Akustische Maßnahmen in Klassenräumen - Grundlagen für effizienten Unterricht, 2. Akustik-Forum, Stuttgart 2005
80. Oelmann, J.; Zha, X.: Zur Messung der "Nachhallzeiten" bei geringer Eigenmodendichte, Rundfunktechnische Mitteilungen 30, 1986
81. ÖISS – Österreichisches Institut für Schul- und Sportstättenbau, Richtlinie für den Schulbau - Raumakustik und Schallschutz, Wien 1999
82. ÖNORM B 6000, Werkmäßig hergestellte Dämmstoffe für den Wärme- und / oder Schallschutz im Hochbau - Arten und Anwendung, 02/2003
83. ÖNORM B 6035, Dämmstoffe für den Wärme- und / oder Schallschutz im Hochbau - Gebundene Mineralwolle MW, Wien, 07 / 2003
84. ÖNORM B 8110-2, Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz, 07/2003
85. ÖNORM B 8115-1, Schallschutz und Raumakustik im Hochbau – Teil 1: Begriffe und Einheiten, 02/2002
86. ÖNORM B 8115-2, Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 2: Anforderungen an den Schallschutz, 12/2002
87. ÖNORM B 8115-3, Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik, 11/2005
88. ÖNORM B 8115-4 Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 4: Maßnahmen zur Erfüllung der schalltechnischen Anforderungen, 09/2003
89. ÖNORM EN 826, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung, 07/1996
90. ÖNORM EN 1607, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene, 02/1997
91. ÖNORM EN 1607/AC, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene, Berichtigung 09/1997
92. ÖNORM EN 13162, Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation, Wien, 03/2006
93. ÖNORM EN 29053, Akustik - Materialien für akustische Anwendungen - Bestimmung des Strömungswiderstandes, 08/1993
94. ÖNORM EN ISO 354: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen, 11/2003
95. ÖNORM EN ISO 717-1: Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 1: Luftschalldämmung, 07/1997
96. ÖNORM EN ISO 3382, Akustik - Messung der Nachhallzeit von Räumen mit Hinweis auf andere akustische Parameter, 09/2000
97. Oswald, R.: Nachträglicher Wärmeschutz für Bauteile und Gebäude, Bau-Verlag, 1995

98. Plagge, R., Cerny, R., Matiasovsky, P.: Laboratory measurements. In: Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation. EU-Project. TU Dresden, 2003
99. Plagge, R.: Application of multi-modal pore size distribution models to describe water storage and transfer in capillary porous building materials. Symposium on: Measurement of water flow in porous material and its numerical simulation, National Research Institute of Cultural Properties, Tokyo, Japan. P. 60-71, 2002
100. Prior, D.: Das Mensch-Haus-Umwelt Gebäude, Proc. World Sustainable Energy Day, Wels 2003
101. Rau, C.: Einfluss tieffrequenter Störgeräusche auf die Sprachverständlichkeit, Diplomarbeit am Fraunhofer IBP, 2004
102. Reichardt, W.: Grundlagen der Technischen Akustik, Leipzig, Geest & Portig, 1968
103. Reichardt, W.: Gute Raumakustik - aber wie? Berlin, Verlag Technik, 1979
104. Renz, J.: Die We(ä)nde zur besseren Akustik, Trockenbau-Akustik 21, Sonderheft, S. 30-33, 2004
105. Richtlinie 2003/10/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm), 6. Februar 2003
106. Ruhe, C.: Günstige Raumakustik hilft Hörgeschädigten, Berat. Ing. Heft 12/1998
107. Salthammer, T.: Organic Indoor Air Pollutants, WILEY-VCH, Weinheim 1999
108. Schönwälder, H.-G., Berndt, J., Ströver, F., Tiesler, G.: Lärm in Bildungsstätten – Ursachen und Minderung, Schriftenreihe der BAuA, FB 1030, NW-Verlag Bremerhaven, 2004
109. Schumpeter, J.: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung, Berlin 1934
110. Schuster, G., Szeider, G., Wölfl, M.: Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden, Zentrum für Bauen und Umwelt, Donau-Universität Krems, 1999
111. Simons, P.: Fachwerksanierung mit 12 cm Innendämmung – vierjährige Messung zum feuchtetechnischen Verhalten, Proc. Innendämmung - Theorie und Praxis, Bremer Impulse: Bauen + Energie ; Fachseminar, 18. Mai 2000, Bremen 2000
112. Sust, Ch., Lazarus, H.: Auswirkungen von Geräuschen mittlerer Intensität in Schule, Aus- und Weiterbildung, BAuA, Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse 103, NW Verlag Dortmund 1997
113. VDI 2058 Blatt 2, Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung, 06/1988
114. VDI 2058 Blatt 3, Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten, 02/1999
115. Venzmer, H. (Hrsg.): Altbauinstandsetzung - Fortschritte bei Verfahren und Produkten, Altbau-Symposium, 2000, Berlin, Verl. Bauwesen , 2000
116. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Proc. Temperatur 2003, Berlin 8./9. Sept. 2003, VDI Berichte 1784, VDI Verlag Düsseldorf 2003
117. Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Umgang mit Fasermaterialien, Kolloquium Berlin 1./2. Okt. 2003, VDI Berichte 1776, VDI Verlag, Düsseldorf 2003
118. Walther, W.: Innendämmung – 6 Weisheiten und 3 Erkenntnisse, Proc. 10. EUZ – Baufachtagung „Energetische Gebäudemodernisierung“, Hannover 18./19. 10. 2001, Energie und Umweltzentrum am Deister, Springe 2001
119. Walther, W.: Innendämmung ohne Dampfbremse, Energie- und Umweltzentrum am Deister, 1997
120. Wenski, H.: Die Macht der kleinen Löcher. Trockenbau-Akustik, Sonderheft, S. 54-58, 2003
121. Zha, X., Drotleff, H.: Raumakustische Maßnahmen für ein Videolabor unter Verwendung von Alternativen Faserfreien Absorbieren, IBP-Mitteilungen 28, Nr. 381, 2001
122. Zha, X., Fuchs, H. V., Hunecke, J.: Raumakustische Verbesserungen im Orchestergraben der Staatstheater Stuttgart. Bühnentechnische Rundschau 91, H. 1, S. 22-31, 1997



# Anhang





## A 1 Strömungswiderstände und Dichten unverputzter Zelluloseproben

Pos.	Probe	Serie	Sendung	Masse d. Probe [g]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	längenbezogener Ström.widerstand [Pas/m <sup>2</sup> ]
------	-------	-------	---------	--------------------	-----------------------------	--

nach Strömungswiderstand

1	1 C a	II	2	87,0	64,4	27.667
2	3 A	I	1	80,0	59,3	27.500
3	3 A a	II	2	88,0	65,2	25.667
4	4a-2/1	III	3	---	106,0	23.333
5	3 B	I	1	78,5	58,1	22.500
6	4a-1/2	III	3	---	98,0	22.000
7	1 C	I	2	82,0	60,7	21.667
8	1 A a	II	1	86,0	63,7	20.667
9	4a-3/1	III	3	---	102,0	19.500
10	4a-1/1	III	3	---	104,0	18.167
11	4a-2/2	III	3	---	100,0	15.000
12	2 B	I	1	69,0	51,1	7.000
13	2 C	I	2	69,0	51,1	6.333
14	2 C a	II	1	79,0	58,5	4.667
15	3 B a	II	1	86,0	63,7	2.500
nach Dichte						
16	4a-2/1	III	3	---	106,0	23.333
17	4a-1/1	III	3	---	104,0	18.167
18	4a-3/1	III	3	---	102,0	19.500
19	4a-2/2	III	3	---	100,0	15.000
20	4a-1/2	III	3	---	98,0	22.000
21	3 A a	II	2	88,0	65,2	25.667
22	1 C a	II	2	87,0	64,4	27.667
23	1 A a	II	1	86,0	63,7	20.667
24	3 B a	II	1	86,0	63,7	2.500
25	1 C	I	2	82,0	60,7	21.667
26	3 A	I	1	80,0	59,3	27.500
27	2 C a	II	1	79,0	58,5	4.667
28	3 B	I	1	78,5	58,1	22.500
29	2 B	I	1	69,0	51,1	7.000
30	2 C	I	2	69,0	51,1	6.333

	Serien 1 und 2: Wasserglas- / Schaum-gebunden
	Serie 3: PVA-Wasser-gebunden

## A 2 Absorptionsgrad 6 cm dicker, unverputzter Zelluloseproben mit Wandabstand

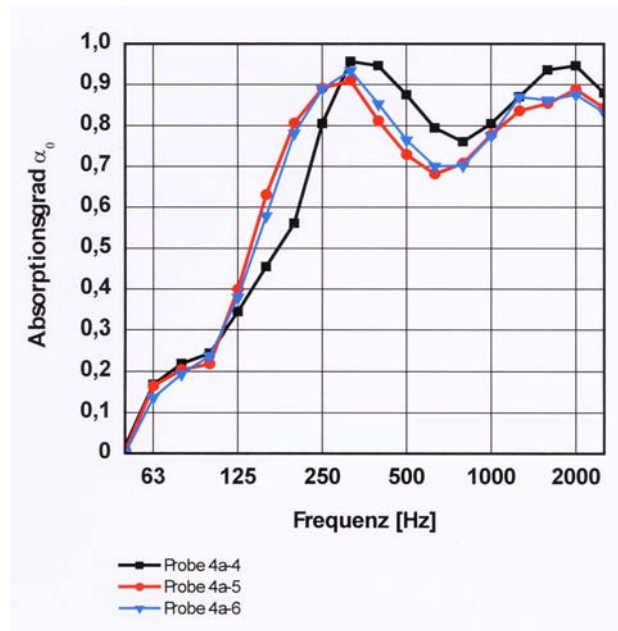


Fig. 100 Absorptionsgrade der Proben 4a-4, 4a-5 und 4a-6, Wandabstand  $D = 5$  cm

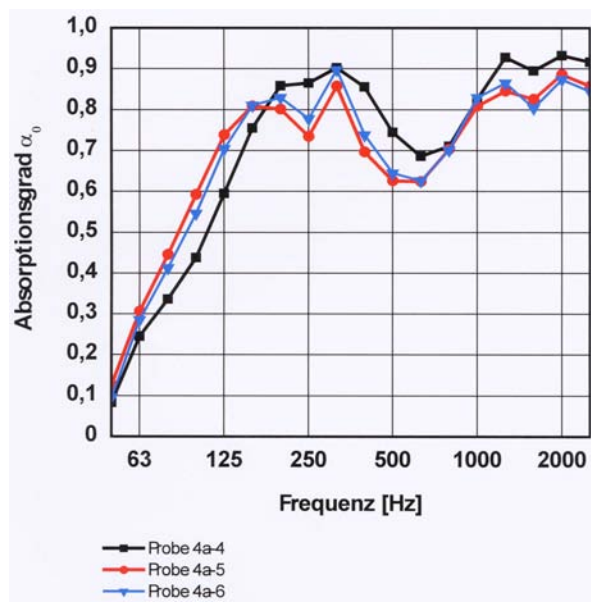


Fig. 101 Absorptionsgrade der Proben 4a-4, 4a-5 und 4a-6, Wandabstand  $D = 10$  cm

### A 3 Schlitzabsorber – Vorab-Parametervariationen

Nr.	Porösdicke D [mm]	Deckungs- Dicke t [mm]	Schlitz- breite d [mm]	Schlitz- Abstand b [mm]	Perforation $\sigma$ [%]	Center- Frequenz $f_0$ [Hz]
1	50	5	10	400	2.5	250
2	50	5	20	550	3.64	250
3	50	5	30	700	4.29	250
4	50	5	40	850	4.71	250
5	50	5	50	940	5.32	250
6	50	10	10	300	3.33	250
7	50	10	20	450	4.44	250
8	50	10	30	550	5.45	250
9	50	10	40	680	5.88	250
10	50	10	50	800	6.25	250
11	50	15	10	250	4.0	250
12	50	15	20	400	5.0	250
13	50	15	30	500	6.0	250
14	50	15	40	600	6.67	250
15	50	15	50	720	6.94	250
16	50	20	10	210	4.76	250
17	50	20	20	330	6.06	250
18	50	20	30	440	6.82	250
19	50	20	40	550	7.27	250
20	50	20	50	650	7.69	250
21	50	5	10	500	2	200
22	50	5	20	500	4	250
23	50	5	30	500	6	315
24	50	5	40	500	8	315
25	50	5	50	500	10	315
26	50	10	10	500	2	200
27	50	10	20	500	4	250
28	50	10	30	500	6	250
29	50	10	40	500	8	315
30	50	10	50	500	10	315
31	50	15	10	500	2	160
32	50	15	20	500	4	200
33	50	15	30	500	6	250
34	50	15	40	500	8	250
35	50	15	50	500	10	315
36	50	20	10	500	2	160
37	50	20	20	500	4	200
38	50	20	30	500	6	250
39	50	20	40	500	8	250
40	50	20	50	500	10	315

## A 4 Putzprobekörper-Varianten

### Zellulose mit Poraverputz

- CA1: Schlitzbreite 20 mm, ohne Endbeschichtung
- CA2: Schlitzbreite 50 mm, ohne Endbeschichtung
- CA3: Schlitzbreite 20 mm, Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm), ohne Gewebe
- CA4: Schlitzbreite 50 mm, Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm), ohne Gewebe
- CA5: Schlitzbreite 20 mm, Endbeschichtung (Größtkorn 2,0 mm), ohne Gewebe
- CA6: Schlitzbreite 50 mm, Endbeschichtung (Größtkorn 2,0 mm), ohne Gewebe
- CA7: Schlitzbreite 20 mm, Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm), mit Gewebe
- CA8: Schlitzbreite 50 mm, Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm), mit Gewebe
- CA9: Schlitzbreite 20 mm, Endbeschichtung (Größtkorn 2,0 mm), mit Gewebe
- CA10: Schlitzbreite 50 mm, Endbeschichtung (Größtkorn 2,0 mm), mit Gewebe

### Nur Endbeschichtung

- CA11: Größtkorn 1,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 15 mm.
- CA12: Größtkorn 2,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 15 mm.
- CA13: Größtkorn 1,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 5 mm.
- CA14: Größtkorn 1,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 10 mm.
- CA15: Größtkorn 1,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 15 mm.
- CA15/1: Größtkorn 1,0 mm, Platte 195 x 195 mm, Schichtstärke 15 mm.
- CA16: Größtkorn 2,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 5 mm.
- CA17: Größtkorn 2,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 10 mm.
- CA18: Größtkorn 2,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 15 mm.
- CA18/1: Größtkorn 2,0 mm; Platte 195 x 195 mm, Schichtstärke 15 mm.
- CA19: Größtkorn 4,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 5 mm.
- CA20: Größtkorn 4,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 10 mm.
- CA21: Größtkorn 4,0 mm, Ring-Durchmesser 98 mm, Schichtstärke 15 mm.
- CA21/1: Größtkorn 4,0 mm, Platte 195 x 195 mm, Schichtstärke 15 mm.

### Zellulosestärke 4 cm, Poraverputz 13 mm

- CA22: Schlitzbreite 20 mm, ohne Aluprofil und ohne Endbeschichtung.
- CA23: Schlitzbreite 50 mm, ohne Aluprofil und ohne Endbeschichtung.
- CA24: Schlitzbreite 20 mm, mit Zellulosestreifen, Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm).
- CA25: Schlitzbreite 50 mm, mit Zellulosestreifen, Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm).
- CA26: Schlitzbreite 20 mm, mit Aluprofil, ohne Endbeschichtung.
- CA27: Schlitzbreite 50 mm, mit Aluprofil, ohne Endbeschichtung.
- CA28: Schlitzbreite 20 mm, mit Aluprofil und Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm).
- CA29: Schlitzbreite 50 mm, mit Aluprofil und Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm).
- CA30: Schlitzbreite 20 mm, ausgefüllt mit Größtkorn 4,0 mm, ohne Aluprofil, mit Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm).
- CA31: Schlitzbreite 50 mm, ausgefüllt mit Größtkorn 4,0 mm, ohne Aluprofil, mit Endbeschichtung (Größtkorn 1,0 mm).

## A 5 Hallraumergebnisse

Ergänzend zu Kapitel 5 sind in den folgenden Abbildungen die Ergebnisse der Hallraummessungen dargestellt:

### Probe I

### Schallabsorptionsgrad nach ISO 354:2003 Messung der Schallabsorption im Hallraum

**Prüfgegenstand:** Probe-I (70mm Zellulose)

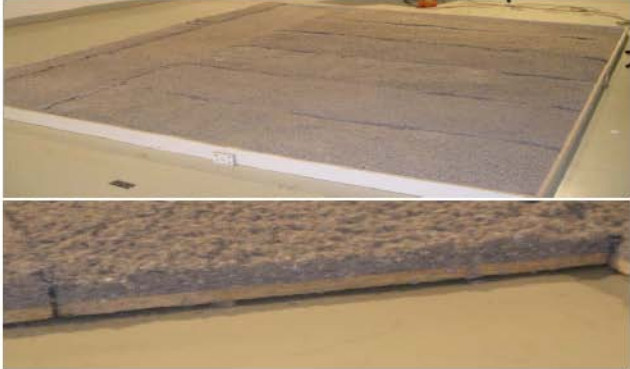
- 70mm Zellulose auf 22mm OSP-Platten  
Die Zellulose wurde auf den einzelnen Platten mit Dickenunterschiede von c.a. 40mm bis 70mm aufgetragen.  
Die einzelnen Platten wurden lose aufgelegt, und stumpf aneinander gestoßen. Die an den Stoßfugen offenen Stellen, wurde mit Zellulosematerial ausgefüllt.  
Die teilweise aufgewölbten Platten, wurde mit Doppelklebeband an den Hallraumboden befestigt.

Umfassungsrahmen aus 19 mm dicker beschichteter Spanplatte  
Fugen zwischen Rahmen und Hallraumboden wurde mit Fensterkitt abgedichtet.

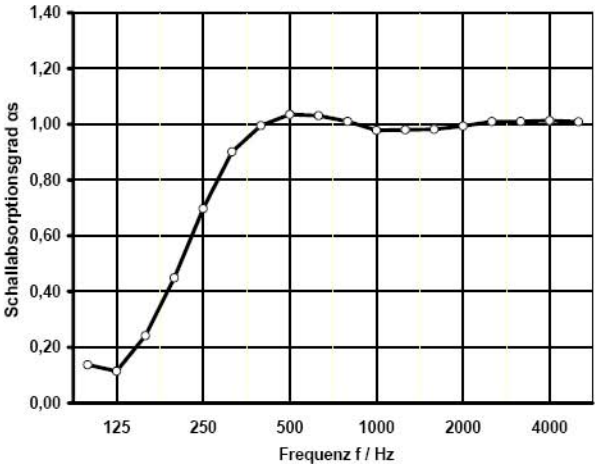
Raum: Hallraum TU Graz  
Volumen: 244,79 [m³]  
Prüffläche: 11,52 [m²]  
Prüfdatum: 01.09.2005

Ohne Probe:  
Temperatur = 21,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 69 [%]

Mit Probe:  
Temperatur = 22,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 71 [%]



Frequenz [Hz]	$\alpha_s$ Terz	$\alpha_p$ Oktave
100	0,14	
125	0,11	0,16
160	0,24	
200	0,45	
250	0,70	0,68
315	0,90	
400	1,00	
500	1,03	1,02
630	1,03	
800	1,01	
1000	0,98	0,99
1250	0,98	
1600	0,98	
2000	0,99	0,99
2500	1,01	
3150	1,01	
4000	1,01	1,01
5000	1,01	



$\alpha_s$  Schallabsorptionsgrad nach ISO 354  
 $\alpha_p$  Praktischer Schallabsorptionsgrad nach ISO 11654

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	27,80	23,80	21,25	18,28	16,78	14,26	12,86	11,25	10,57	9,69	8,79	7,72	6,62	5,62	4,94	4,21	3,52	2,91
T2 / sec	13,14	13,24	8,48	5,37	3,79	2,99	2,71	2,55	2,52	2,50	2,49	2,39	2,27	2,13	2,00	1,88	1,73	1,58

**Probe III**

### Schallabsorptionsgrad nach ISO 354:2003 Messung der Schallabsorption im Hallraum

**Prüfgegenstand:** Probe-III (40mm Zellulose)


- 40mm Zellulose auf 22mm OSP-Platten  
Die einzelnen Platten wurden lose aufgelegt, und stumpf aneinander gestoßen. Die an den Stoßfugen offenen Stellen, wurde mit Zellulosematerial ausgefüllt.  
Die teilweise aufgewölbten Platten, wurde mit Doppelklebeband an den Hallraumboden befestigt.  
~40% der Zellulose war noch nicht durchgetrocknet.

Umfassungsrahmen aus 19 mm dicker beschichteter Spanplatte  
Fugen zwischen Rahmen und Hallraumboden wurde mit Fensterkitt abgedichtet.

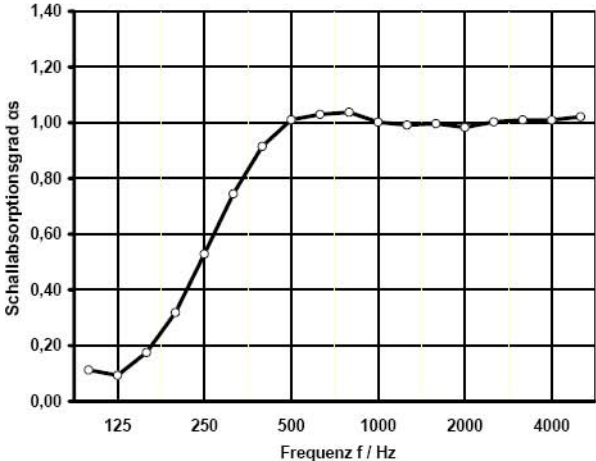
Raum: Hallraum TU Graz  
Volumen: 244,79 [m³]  
Prüffläche: 12,60 [m²]  
Prüfdatum: 01.09.2005

Ohne Probe:  
Temperatur = 21,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 69 [%]

Mit Probe:  
Temperatur = 22,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 74 [%]



Frequenz [Hz]	as Terz	ap Oktave
100	0,11	
125	0,09	0,13
160	0,18	
200	0,32	
250	0,53	0,53
315	0,74	
400	0,91	
500	1,01	0,98
630	1,03	
800	1,04	
1000	1,00	1,01
1250	0,99	
1600	1,00	
2000	0,98	0,99
2500	1,00	
3150	1,01	
4000	1,01	1,01
5000	1,02	



as Schallabsorptionsgrad nach ISO 354  
ap Praktischer Schallabsorptionsgrad nach ISO 11654

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	27,80	23,80	21,25	18,28	16,78	14,26	12,86	11,25	10,57	9,69	8,79	7,72	6,62	5,62	4,94	4,21	3,52	2,91
T2 / sec	13,89	13,93	9,70	6,39	4,37	3,24	2,70	2,42	2,35	2,29	2,29	2,22	2,12	2,02	1,91	1,79	1,66	1,52

**Probe IV**

### Schallabsorptionsgrad nach ISO 354:2003

Messung der Schallabsorption im Hallraum

**Prüfgegenstand:** Probe-IV (40mm Zellulose + 5mm Dickschichtklebespachtel)

(von oben nach unten):


- 5mm Dickschichtklebespachtel
- 40mm Zellulose auf 22mm OSP-Platten

Die einzelnen Platten wurden lose aufgelegt, und stumpf aneinander gestoßen. Die an den Stoßfugen offenen Stellen, wurde mit Zellulosematerial ausgefüllt.  
 Die teilweise aufgewölbten Platten, wurde mit Doppelklebeband an den Hallraumboden befestigt.  
 Die unregelmäßige Oberfläche der Zellulose wurde mit Schleifgeräten begradigt, danach wurde die schon oben erwähnte 5mm Dickschichtklebespachtel aufgetragen (Durchtrocknungszeit ~140Std.).

- Hallraumboden

Umfassungsrahmen aus 19 mm dicker beschichteter Spanplatte  
 Fugen zwischen Rahmen und Hallraumboden wurde mit Fensterkitt abgedichtet.

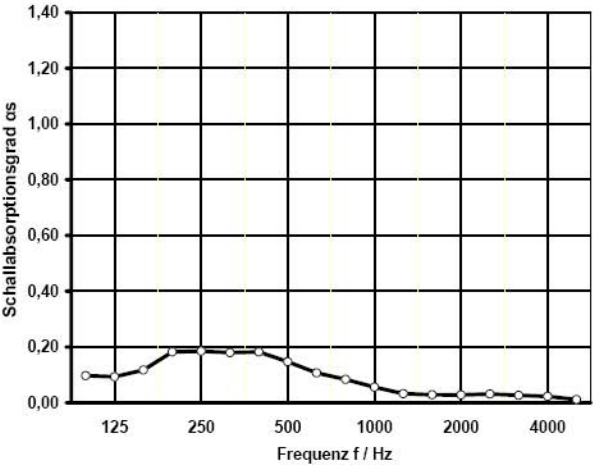
Raum: Hallraum TU Graz  
 Volumen: 244,79 [m³]  
 Prüffläche: 12,60 [m²]  
 Prüfdatum: 06.09.2005



Ohne Probe:  
 Temperatur = 21,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 69 [%]

Mit Probe:  
 Temperatur = 22,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 51 [%]

Frequenz [Hz]	as Terz	ap Oktave
100	0,10	
125	0,09	0,10
160	0,12	
200	0,18	
250	0,19	0,18
315	0,18	
400	0,18	
500	0,15	0,15
630	0,11	
800	0,08	
1000	0,06	0,06
1250	0,03	
1600	0,03	
2000	0,03	0,03
2500	0,03	
3150	0,03	
4000	0,02	0,02
5000	0,01	



as Schallabsorptionsgrad nach ISO 354  
 ap Praktischer Schallabsorptionsgrad nach ISO 11654

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	27,80	23,80	21,25	18,28	16,78	14,26	12,86	11,25	10,57	9,69	8,79	7,72	6,62	5,62	4,94	4,21	3,52	2,91
T2 / sec	14,81	13,81	11,70	8,75	8,33	7,76	7,29	7,32	7,75	7,72	7,63	7,16	6,20	5,25	4,54	3,83	3,15	2,56



Probe V

### Schallabsorptionsgrad nach ISO 354:2003 Messung der Schallabsorption im Hallraum

**Prüfgegenstand:** Probe-V (40mm Zellulose + 5mm Dickschichtklebespachtel + 5mm Grobkornputz)

(von oben nach unten):

- 5mm Grobkornputz
- 5mm Dickschichtklebespachtel
- 40mm Zellulose auf 22mm OSP-Platten

Die einzelnen Platten wurden lose aufgelegt, und stumpf aneinander gestoßen. Die an den Stoßfugen offenen Stellen, wurde mit Zellulosematerial ausgefüllt.  
 Die teilweise aufgewölbten Platten, wurde mit Doppelklebeband an den Hallraumboden befestigt.  
 Die unregelmäßige Oberfläche der Zellulose wurde mit Schleifgeräten begradigt, danach wurde die oben erwähnte 5mm Dickschichtklebespachtel aufgetragen (Durchtrocknungszeit ~140Std.). Darauf wurde ein 5mm dicker Einkornputz AK15 (1,5mm Korngröße) aufgebracht (Trocknungszeit ~ 115 Std.)

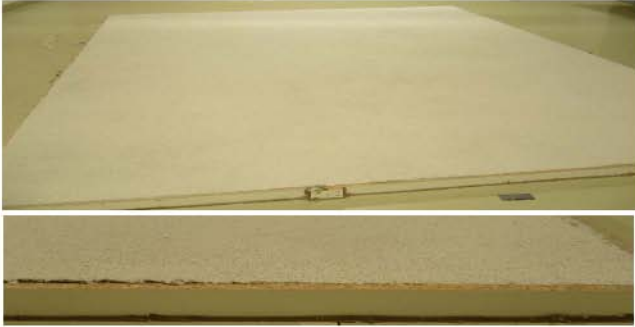
- Hallraumboden

Umfassungsrahmen aus 19 mm dicker beschichteter Spanplatte  
 Fugen zwischen Rahmen und Hallraumboden wurde mit Fensterkitt abgedichtet.

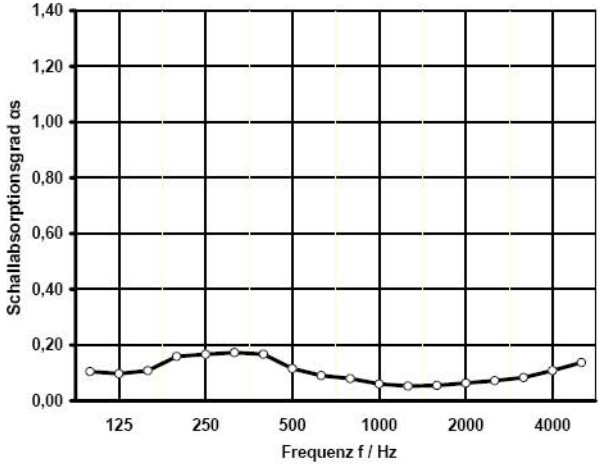
Raum: Hallraum TU Graz  
 Volumen: 244,79 [m³]  
 Prüffläche: 12,60 [m²]  
 Prüfdatum: 12.09.2005

Ohne Probe:  
 Temperatur = 21,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 69 [%]

Mit Probe:  
 Temperatur = 22,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 61 [%]



Frequenz [Hz]	αs Terz	αp Oktave
100	0,10	
125	0,10	0,10
160	0,11	
200	0,16	
250	0,17	0,17
315	0,17	
400	0,17	
500	0,12	0,12
630	0,09	
800	0,08	
1000	0,06	0,06
1250	0,05	
1600	0,06	
2000	0,06	0,06
2500	0,07	
3150	0,08	
4000	0,11	0,11
5000	0,14	



αs Schallabsorptionsgrad nach ISO 354  
 αp Praktischer Schallabsorptionsgrad nach ISO 11654

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	27,80	23,80	21,25	18,28	16,78	14,26	12,86	11,25	10,57	9,69	8,79	7,72	6,62	5,62	4,94	4,21	3,52	2,91
T2 / sec	14,35	13,62	12,19	9,42	8,81	7,92	7,57	7,89	8,05	7,73	7,48	6,79	5,89	5,00	4,37	3,72	3,06	2,50



Probe VI\_oB

### Schallabsorptionsgrad nach ISO 354:2003

Messung der Schallabsorption im Hallraum

**Prüfgegenstand:** Probe-VI\_oB

(von oben nach unten):


- 15mm Poraverputz - 5cm Schlitzbreite / 20 cm Schlitzabstand, Schlitz mit Zellulose gefüllt
- 40mm Zellulose auf 22mm OSP-Platten
- Die einzelnen Platten (120 x 60cm) wurden lose aufgelegt, und stumpf aneinander gestoßen.
- Die an den Stoßfugen offenen Stellen, wurden mit Fensterkitt abgedichtet.
- Hallraumboden

Umfassungsrahmen aus 19 mm dicker beschichteter Spanplatte  
Fugen zwischen Rahmen und Hallraumboden wurde mit Fensterkitt abgedichtet.

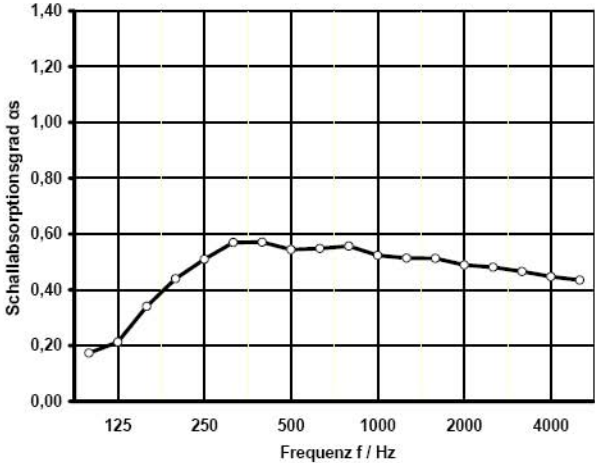
Raum: Hallraum TU Graz  
Volumen: 244,79 [m³]  
Prüffläche: 12,96 [m²]  
Prüfdatum: 19.10.2005

Ohne Probe:  
Temperatur = 18,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 51 [%]

Mit Probe:  
Temperatur = 18,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 51 [%]



Frequenz [Hz]	as Terz	ap Oktave
100	0,17	
125	0,21	0,25
160	0,34	
200	0,44	
250	0,51	0,50
315	0,57	
400	0,57	
500	0,54	0,55
630	0,55	
800	0,56	
1000	0,52	0,55
1250	0,51	
1600	0,51	
2000	0,49	0,50
2500	0,48	
3150	0,47	
4000	0,45	0,45
5000	0,43	



as Schallabsorptionsgrad nach ISO 354  
ap Praktischer Schallabsorptionsgrad nach ISO 11654

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	26,83	22,91	20,39	17,13	15,53	13,99	13,04	11,51	10,99	10,04	9,113	7,842	6,532	5,333	4,494	3,64	2,86	2,205
T2 / sec	10,63	8,825	6,232	4,945	4,328	3,878	3,794	3,776	3,698	3,55	3,559	3,383	3,117	2,878	2,632	2,341	2,016	1,678

**Probe VII**

### Schallabsorptionsgrad nach ISO 354:2003

Messung der Schallabsorption im Hallraum

**Prüfgegenstand:** Probe-VII

(von oben nach unten):

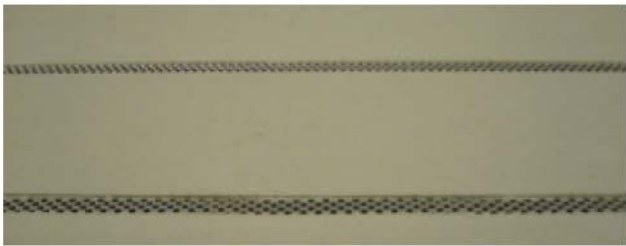
- 15mm Poraverputz - 2cm Schlitzbreite / 20 cm Schlitzabstand, Schlitz leer mit Gitter überdeckt
- 40mm Zellulose auf 22mm OSP-Platten
- Die einzelnen Platten (120 x 60cm) wurden lose aufgelegt, und stumpf aneinander gestoßen.
- Die an den Stoßfugen offenen Stellen, wurden mit Fensterkitt abgedichtet.
- Hallraumboden

Umfassungsrahmen aus 19 mm dicker beschichteter Spanplatte  
Fugen zwischen Rahmen und Hallraumboden wurde mit Fensterkitt abgedichtet.

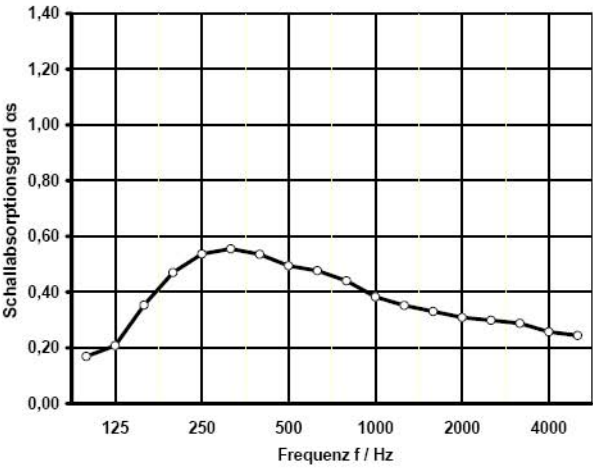
Raum: Hallraum TU Graz  
Volumen: 244,79 [m³]  
Prüffläche: 12,96 [m²]  
Prüfdatum: 19.10.2005

Ohne Probe:  
Temperatur = 18,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 51 [%]

Mit Probe:  
Temperatur = 18,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 50 [%]



Frequenz [Hz]	$\alpha_s$ Terz	$\alpha_p$ Oktave
100	0,17	
125	0,21	0,25
160	0,35	
200	0,47	
250	0,54	0,50
315	0,56	
400	0,54	
500	0,49	0,50
630	0,48	
800	0,44	
1000	0,38	0,40
1250	0,35	
1600	0,33	
2000	0,31	0,30
2500	0,30	
3150	0,29	
4000	0,26	0,25
5000	0,24	



Schallabsorptionsgrad  $\alpha_s$

Frequenz f / Hz

$\alpha_s$  Schallabsorptionsgrad nach ISO 354  
 $\alpha_p$  Praktischer Schallabsorptionsgrad nach ISO 11654

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	26,83	22,91	20,39	17,13	15,53	13,99	13,04	11,51	10,99	10,04	9,11	7,84	6,53	5,33	4,49	3,64	2,86	2,21
T2 / sec	10,79	8,94	6,07	4,71	4,17	3,95	3,97	4,02	4,05	4,10	4,25	4,12	3,82	3,46	3,11	2,70	2,29	1,86

## A 6 Rechnerische Parametervariationen der Absorbertypen

### Absorptions-Optimierung der Probe-VI\_oB in Richtung tieferer Frequenzen

Als Vergleich zeigt die folgende Abbildung die Simulation der Verkleinerung des Schlitz-Flächenverhältnisses für die Probe-VI\_oB (Schlitzabstand 200 mm, rot: Probe-VI\_mB aus Hallraummessung, bis 700 mm in 50 mm - Schritten).

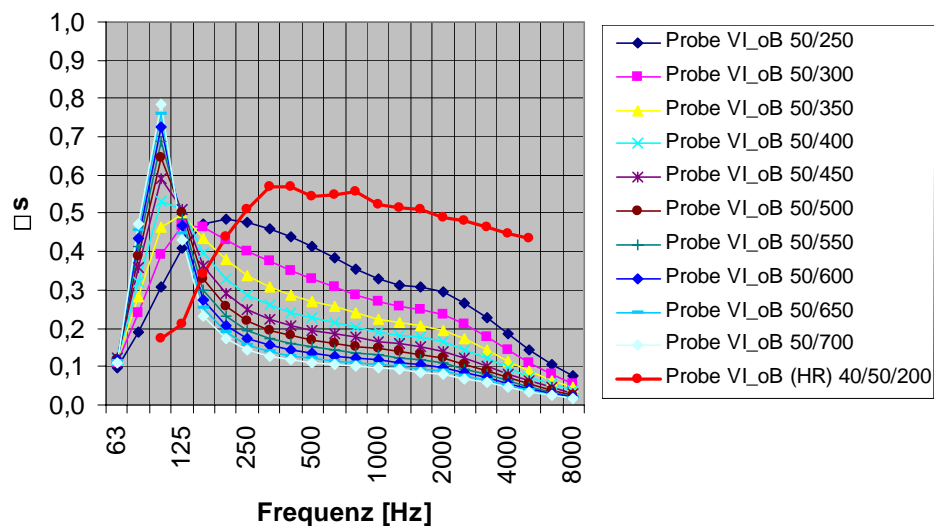


Fig. 102 Probe VI\_oB - Variation des Schlitzabstandes im Vergleich zur Hallraummessung (HR)

Das Verschieben von  $f_{\text{Res}}$  zu tiefen Frequenzen hin und das Ansteigen der Absorption sowie die Verschmälerung des Absorptionsbereichs ist tendenziell gleich wie bei Probe-VI\_mB jedoch erreicht man höhere Absorptionsmaxima bei  $f_{\text{Res}}$ . Für die schmalbandigen Varianten liegt  $f_{\text{Res}}$  mit ca. 100 Hz relativ tief. Für Frequenzen  $f > 2000$  Hz ist deutlich mehr Absorption zu erwarten, da bei der Simulation die Korrekturen für diesen Frequenzbereich nicht berücksichtigt wurden. Daher wurde eine weitere Variante simuliert mit dem Ziel,  $f_{\text{Res}}$  auf ca. 125 Hz zu erhöhen da ab diesem Terzband die relevanten Energieanteile von Sprache bei Männerstimmen beginnen. Dafür muss neben dem Schlitz-Flächenverhältnis die Dichte des Poraverputzes von  $980 \text{ kg/m}^3$  auf  $600 \text{ kg/m}^3$  verringert werden.

Die folgende Abbildung zeigt die zwei Varianten 30/400:600kg und 50/700:600kg im Vergleich zu den vorhergehenden Simulationen von Probe-VI\_oB.

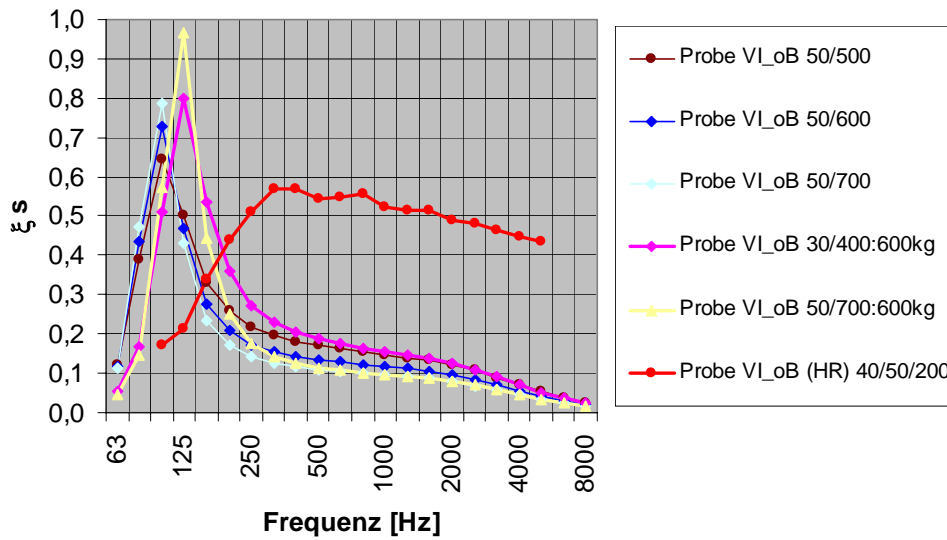


Fig. 103 Probe VI\_oB - Variation des Schlitzabstandes mit verringerter Dichte

Die folgende Abbildung zeigt die gleichen Proben mit auf Oktavbänder umgerechneten Absorptionswerten, wie sie für die T30 - Berechnung benötigt wurden. Probe-VI\_oB 30/400:600kg zeigt ein sehr brauchbares Verhalten: zwar etwas geringere Absorption bei  $f_{Res}$ , dafür aber im Bereich 250 – 2000 Hz deutlich höhere Absorption als die Variante 50/700:600kg.

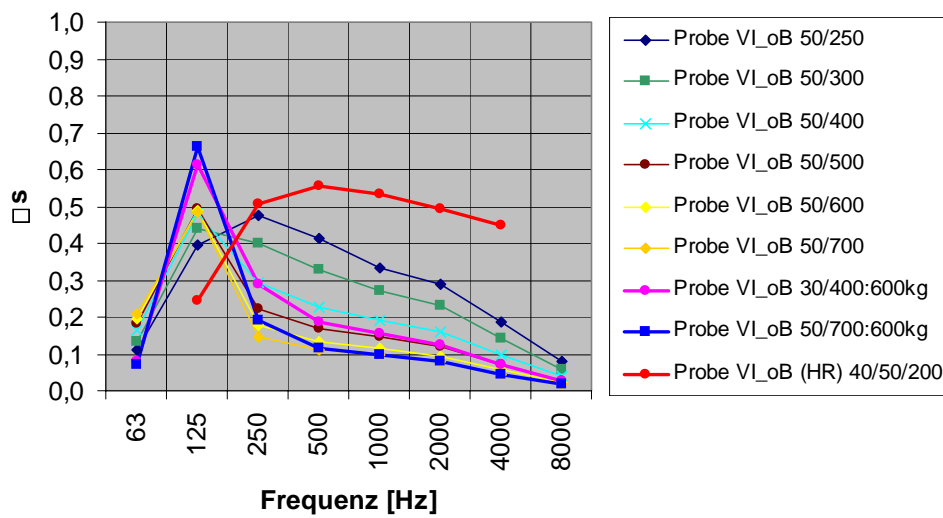


Fig. 104 Probe VI\_oB - Variation des Schlitzabstandes in Oktavbändern

### Absorptions-Optimierung der Probe-VII in Richtung höherer Frequenzen

Aus fertigungstechnischen Gründen sollte der Schlitzabstand  $> 200$  mm, vorzugsweise 700 mm sein. Mit einem Schlitzabstand von 700 mm, müsste die Schlitzbreite mit 270 mm gewählt werden, um das gleiche Absorptionsverhalten wie Probe-VII zu erreichen. In der folgenden Ergebnisgrafik wird das Schlitz-Flächen-Verhältnis von Probe-VII bei 300 mm Schlitzabstand und einer Schlitzbreite von 50 bis 100 mm variiert.

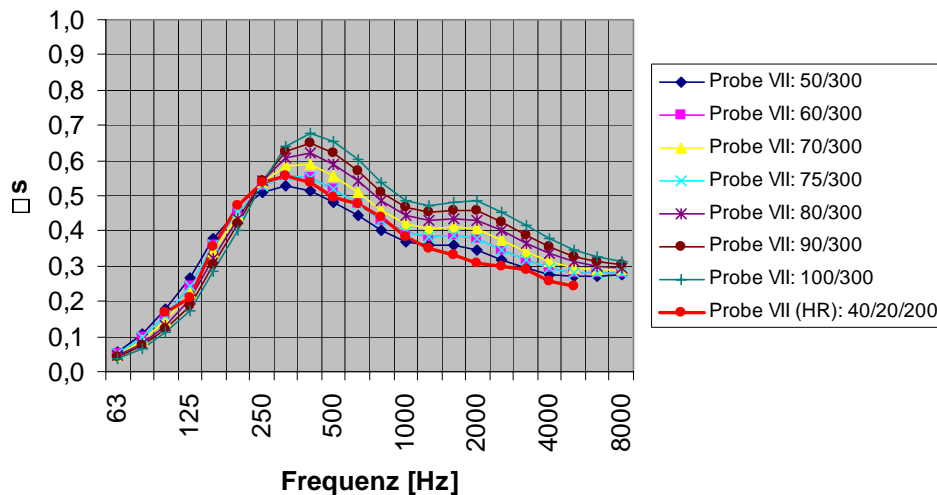


Fig. 105 Probe VII – Variation der Schlitzbreite bei 300 mm Schlitzabstand

Mit Vergrößerung des Schlitzes ergibt sich ein Ansteigen von  $f_{\text{Res}}$  und ein Anstieg der Absorption bei  $f_{\text{Res}}$  im Vergleich zur Hallraum-Probe-VII (rot).

In folgender Grafik wird das Schlitz-Flächenverhältnis der Probe-VII bei 400 mm Schlitzabstand und einer Schlitzbreite von 50 bis 100 mm variiert.

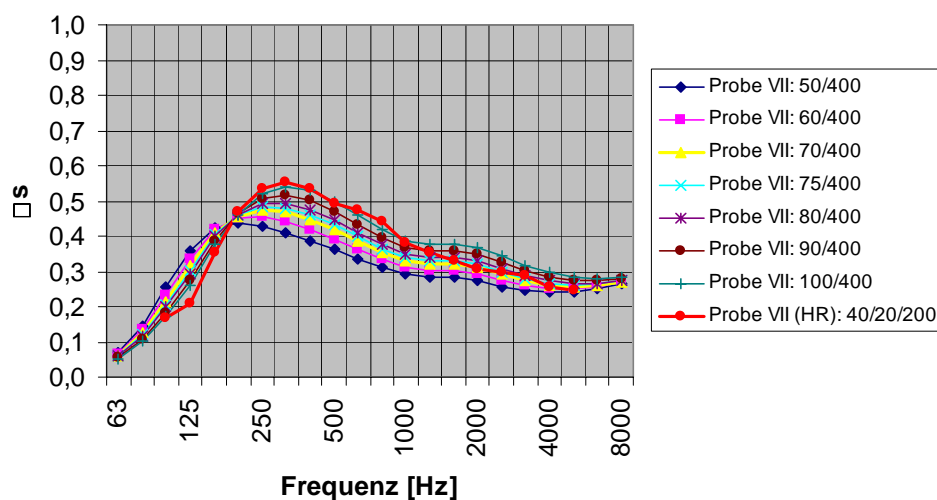


Fig. 106 Probe VII – Variation der Schlitzbreite bei 400 mm Schlitzabstand

Im Vergleich zur Hallraum-Probe-VII (rot) nimmt sowohl  $f_{\text{Res}}$  als auch die Absorption bei  $f_{\text{Res}}$  ab. In folgender Grafik wird das Schlitz-Flächenverhältnis von Probe-VII bei 500 mm Schlitzabstand und einer Schlitzbreite von 50 bzw. 100 mm variiert. Das Absorptionsmaximum bei  $f_{\text{Res}}$  nimmt ab und  $f_{\text{Res}}$  sinkt bis auf ca. 130 Hz.

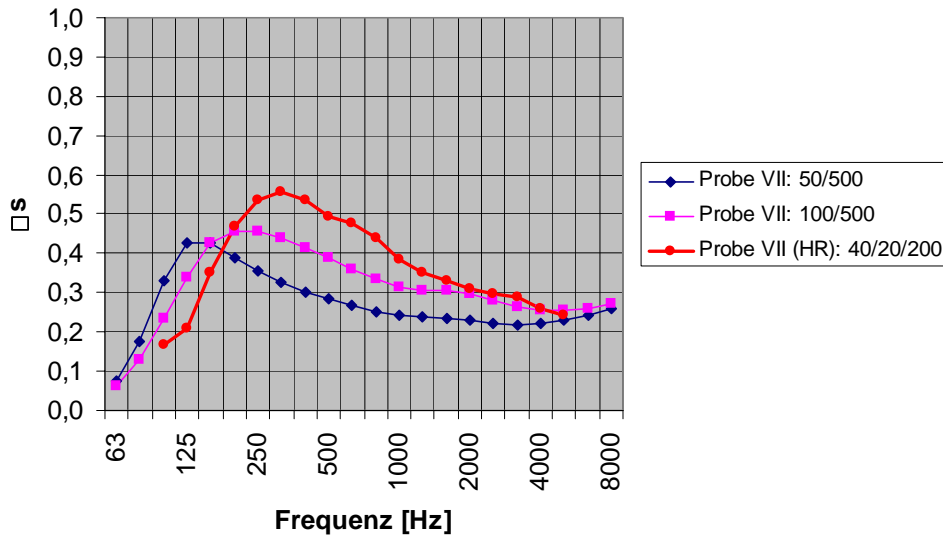


Fig. 107 Probe VII – Variation der Schlitzbreite bei 500 mm Schlitzabstand

### Absorptions-Optimierung der Probe-III in Richtung tieferer Frequenzen

Das Absorptionsverhalten von Probe-III kann zu tiefen Frequenzen hin durch Einfügen eines Abstands zur Decke entscheidend verbessert werden. Damit lässt sich die akustische Wirkung im Bereich 125/250 Hz deutlich verbessern. Die folgende Abbildung zeigt Zellulose mit unterschiedlicher Dicke von 40 bis 15 mm jeweils 100 mm von der Decke abgehängt. Dabei war die Intention die Minimierung des Zellulosegewichts im feuchten Zustand.

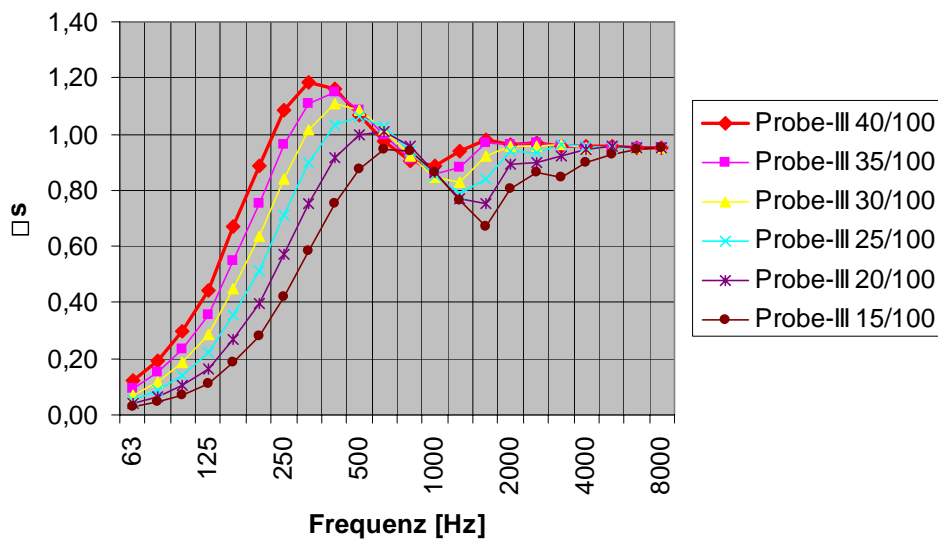


Fig. 108 10 cm abgehängte Zellulose - Variation der Dicke

Im Bereich 125 Hz sind Werte von  $\alpha_s = 0,11 \dots 0,45$  erreichbar. Der durch den Luftabstand bedingte Einbruch der Absorption zwischen 1000 und 2000 Hz – hier sinkt die Absorption auf 0,74 bis 0,85 – ist aus akustischer Sicht in diesem Fall kein Problem.

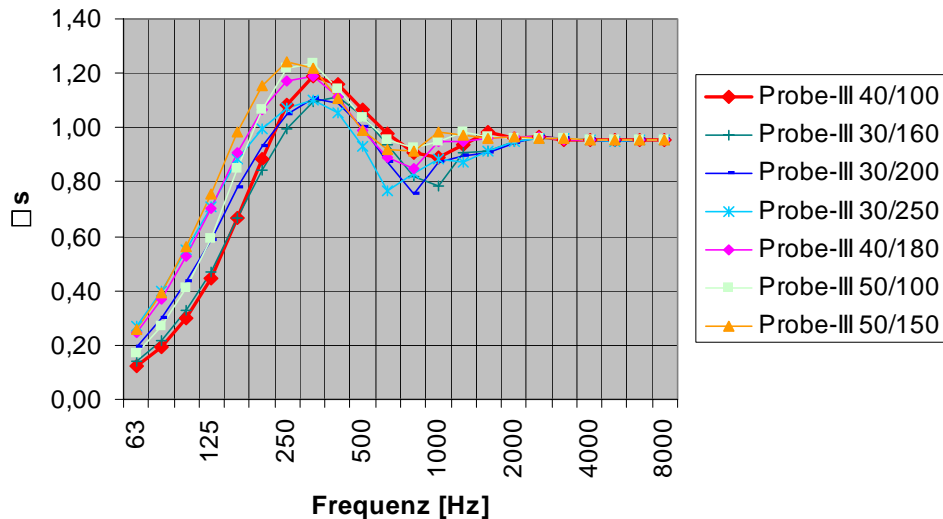


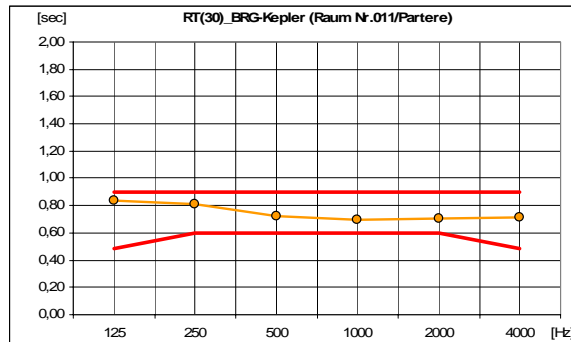
Fig. 109 Abgehängte Zellulose - Variation von Dicke und Abhängöhe

Wird der Abstand vergrößert, kann mit unterschiedlichen Dicken der Zellulose im tieffrequenten Bereich jeweils ähnliches Absorptionsverhalten erreicht werden. Z.B. Probe-III 30/160 weist bei 125 Hz gleiches Verhalten auf wie Probe-III 40/100. Grob gilt: je größer der Abstand zur Decke desto größer die Absorption bei 125 Hz. Mit den in obiger Abbildung simulierten Absorbern sind bei 125 Hz Absorptionsgrade von  $\alpha_s = 0,45 \dots 0,76$  erreichbar. Bei 250 Hz weisen alle Absorber bereits eine Absorption von  $\alpha_s = 1$  auf. Für die Nachhaltoptimierung bedeutet das: optimiert man den Wandabstand so, dass die Nachhallzeit bei 125 Hz  $T_{\text{soll}} = 0,6$  s erreicht, dann ist die Nachhallzeit bei 250 Hz etwas kürzer.

## A 7 Absorberauslegung für Raumnutzung „Sprache“ - $T_{soll} = 0,75\text{ s}$

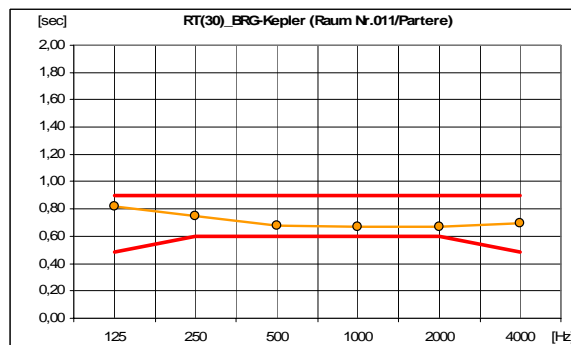
### Variante 1:

30 Personen sitzend auf Holzgestühl  
 27,89 m<sup>2</sup> Probe-VI\_mB\_48/50/700  
 26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48/70/400  
 20 m<sup>2</sup> Probe-III\_50



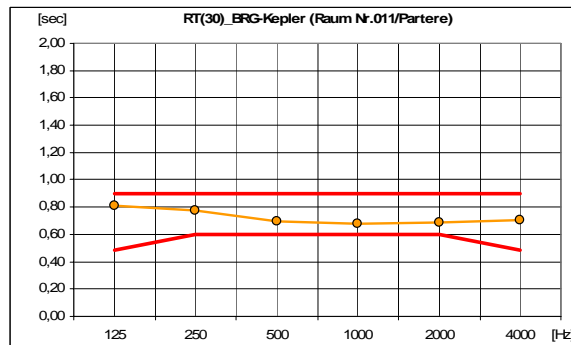
### Variante 2:

30 Personen sitzend auf Holzgestühl  
 27,89 m<sup>2</sup> Probe-VI\_oB\_48/50/400  
 26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48/70/400  
 20 m<sup>2</sup> Probe-III\_50



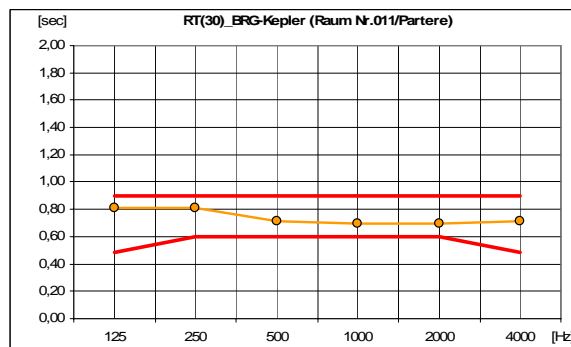
### Variante 3:

30 Personen sitzend auf Holzgestühl  
 27,89 m<sup>2</sup> Probe-VI\_oB\_48/50/500  
 26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48/70/400  
 20 m<sup>2</sup> Probe-III\_50



### Variante 4:

30 Personen sitzend auf Holzgestühl  
 27,89 m<sup>2</sup> Probe-VI\_oB\_48/50/700  
 26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48/70/400  
 20 m<sup>2</sup> Probe-III\_50



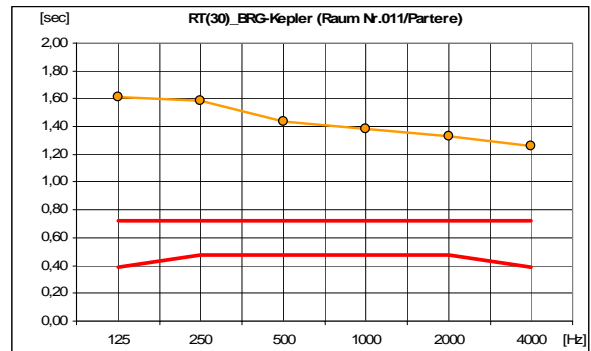


## A 8 Absorberauslegung für Raumnutzung „Unterricht“ - $T_{\text{soll}} = 0,6 \text{ s}$

### Schrittweise Optimierung der Nachhallzeit durch Verwendung verschiedener Absorberkombinationen und abgehängter Deckenabsorber

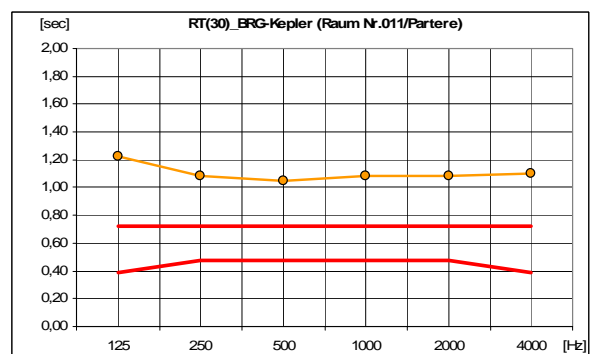
#### Schritt 1:

32 Personen sitzend auf Holzgestühl



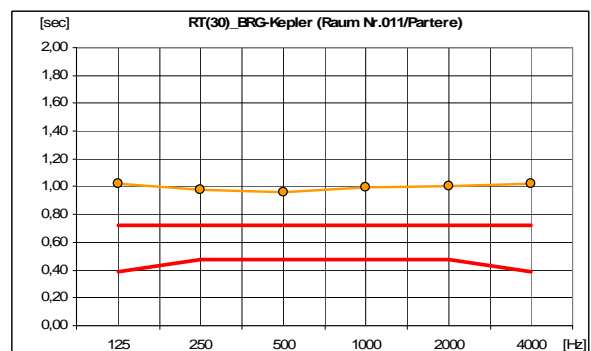
#### Schritt 2:

32 Personen sitzend auf Holzgestühl  
26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-400



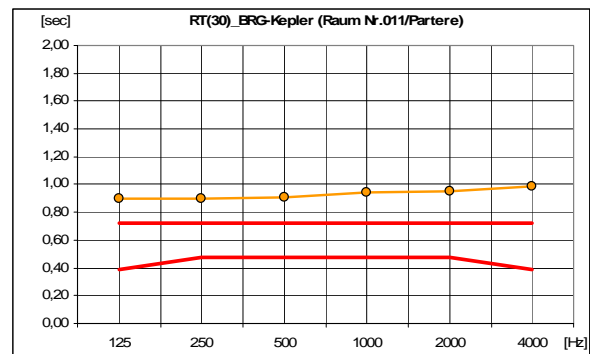
#### Schritt 3:

32 Personen sitzend auf Holzgestühl  
26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-400  
14,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)

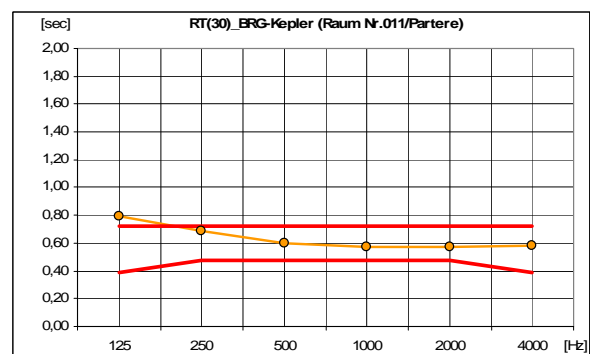


**Schritt 4:**

32 Personen sitzend auf Holzgestühl

26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-40014,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)13,81 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (längsseitig)**Variante 1: wie Schritt 4 mit Decke 50/0**

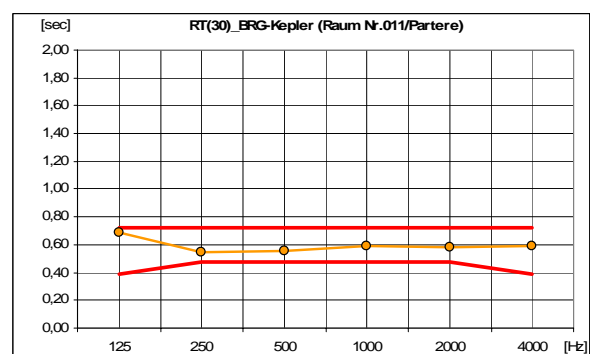
32 Personen sitzend auf Holzgestühl

26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-40014,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)13,81 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (längsseitig)30 m<sup>2</sup> Probe-III\_50/0

Wegen fehlendem Wandabstand zu wenig Absorption bei 125 / 250 Hz.

**Variante 2: wie Schritt 4 mit Decke 40/100**

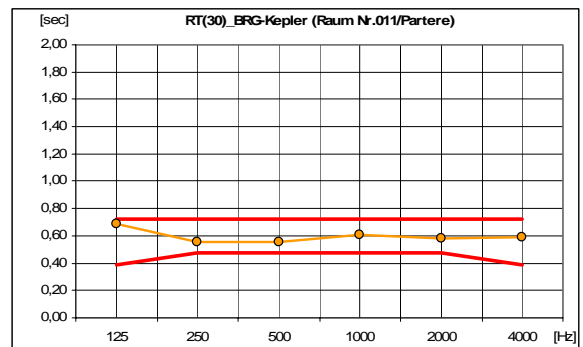
32 Personen sitzend auf Holzgestühl

26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-40014,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)13,81 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (längsseitig)30 m<sup>2</sup> Probe-III\_40/100

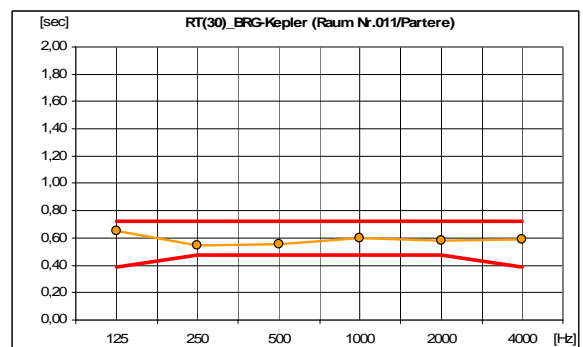
Die Toleranzgrenzen werden eingehalten, jedoch kein gleichmäßiger Verlauf bei 125 / 250 Hz, da zu wenig Absorption bei 125 Hz.

**Variante 3: wie Schritt 4 mit Decke 30/160**

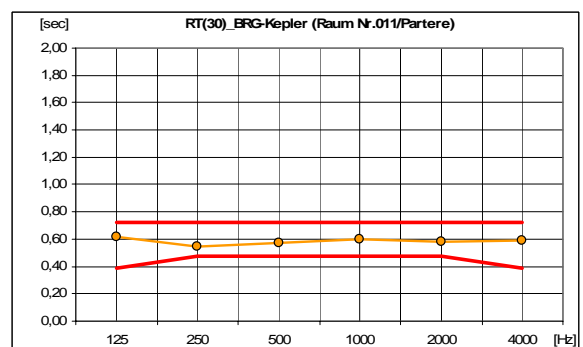
32 Personen sitzend auf Holzgestühl

26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-40014,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)13,81 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (längsseitig)30 m<sup>2</sup> Probe-III\_30/160**Variante 4: wie Schritt 4 mit Decke 30/200**

32 Personen sitzend auf Holzgestühl

26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-40014,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)13,81 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (längsseitig)30 m<sup>2</sup> Probe-III\_30/200**Variante 5: wie Schritt 4 mit Decke 30/250**

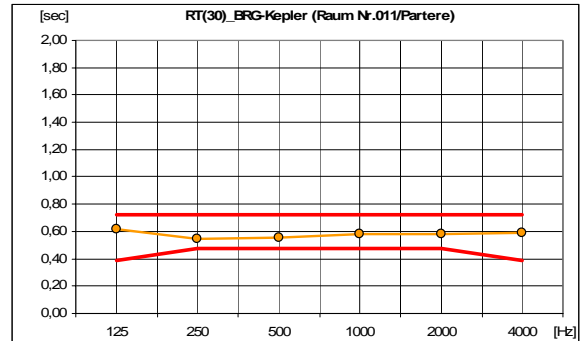
32 Personen sitzend auf Holzgestühl

26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-40014,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)13,81 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (längsseitig)30 m<sup>2</sup> Probe-III\_30/250

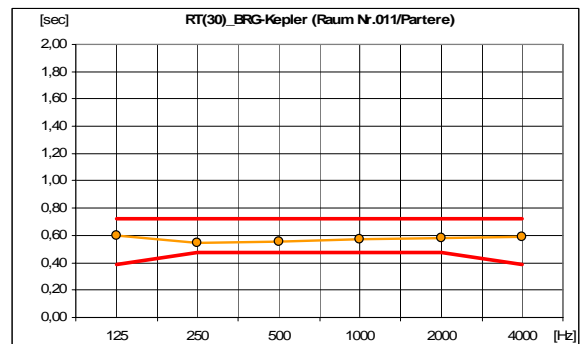
Durch mehr Absorption bei 125 Hz gleichförmigerer Verlauf über alle Frequenzen. Der geringfügige Einbruch bei 250 Hz wirkt sich akustisch eher vorteilhaft aus.

**Variante 6: wie Schritt 4 mit Decke 40/180**

32 Personen sitzend auf Holzgestühl

26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-40014,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)13,81 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (längsseitig)30 m<sup>2</sup> Probe-III\_40/180**Variante 7: wie Schritt 4 mit Decke 50/150**

32 Personen sitzend auf Holzgestühl

26,82 m<sup>2</sup> Probe-VII\_48-70-40014,05 m<sup>2</sup> ProbeVI\_oB\_48-50-400 (stirnseitig)13,81 m<sup>2</sup> ProbeVI\_mB\_48-50-400 (längsseitig)30 m<sup>2</sup> Probe-III\_50/150

# A 9 Messprotokolle der Vor-Ort-Messungen im BRG Kepler

## Probe-III\_48 mm Zellulose

### Schallabsorptionsgrad

Messung der Schallabsorption in einem Klassenraum

**Prüfgegenstand:** 48mm Zellulose


~48mm Zellulose auf schallharter Mauerwand

26,88m<sup>2</sup> - Türseitige Wand  
 27,5m<sup>2</sup> - Stirnseitige Wand  
 Gesamt= 54,38m<sup>2</sup>

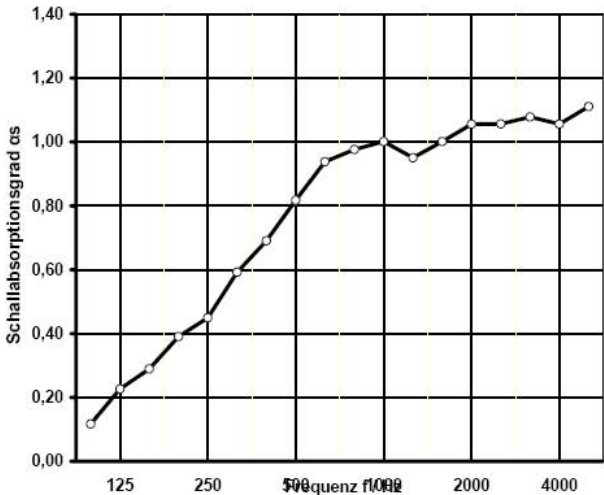
Raum: BRG-Kepler Raum Nr.11/Parterre  
 Volumen: 263,80 [m<sup>3</sup>]  
 Prüffläche: 54,38 [m<sup>2</sup>]  
 Prüfdatum: 09.11.05

Ohne Probe:  
 Temperatur = 23,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 57 [%]

Mit Probe:  
 Temperatur = 22,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 59 [%]



Frequenz [Hz]	as Terz	ap Oktave
100	0,12	
125	0,23	0,21
160	0,29	
200	0,39	
250	0,45	0,48
315	0,59	
400	0,69	
500	0,82	0,82
630	0,94	
800	0,98	
1000	1,00	0,98
1250	0,95	
1600	1,00	
2000	1,06	1,04
2500	1,06	
3150	1,08	
4000	1,06	1,08
5000	1,11	



as Schallabsorptionsgrad  
 ap Schallabsorptionsgrad gemittelt in Oktaven

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	1,62	1,95	2,01	2,20	2,06	2,25	2,45	2,35	2,53	2,54	2,57	2,58	2,46	2,42	2,40	2,26	2,03	1,80
T2 / sec	1,31	1,24	1,15	1,05	0,94	0,83	0,77	0,68	0,63	0,61	0,60	0,62	0,59	0,57	0,57	0,55	0,54	0,51

Probe-VII\_48/70/400

### Schallabsorptionsgrad

#### Messung der Schallabsorption in einem Klassenraum

**Prüfgegenstand:** Probe-VII\_48/70/400 (48mm Zellulose, 70mm Schlitzbreite, 400mm Schlitzabstand)  
 Die Schlitz wurden mit einem Schutzgitter abgedeckt (Lochflächenverhältnis >60%)  
 Die Schlitz sind leer (keine Füllung). Schlitztiefe= 15mm Poraverputz

13,21m<sup>2</sup> - Türseitige Wand  
 13,55m<sup>2</sup> - Stirnseitige Wand  
 Gesamt= 26,76m<sup>2</sup>


**Subtrahierende äquivalente Absorptionsfläche:**

Frequenz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	[Hz]	
Probe-III 48mm Zellulose (die 5cm hohe schallharte Schiene (für Aufhängungen) wurde berücksichtigt)																			Fläche: 26,88	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0,12	0,23	0,29	0,39	0,45	0,59	0,69	0,82	0,94	0,98	1,00	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
Bezeichnung																			Fläche: 0	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Bezeichnung																			Fläche: 0	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

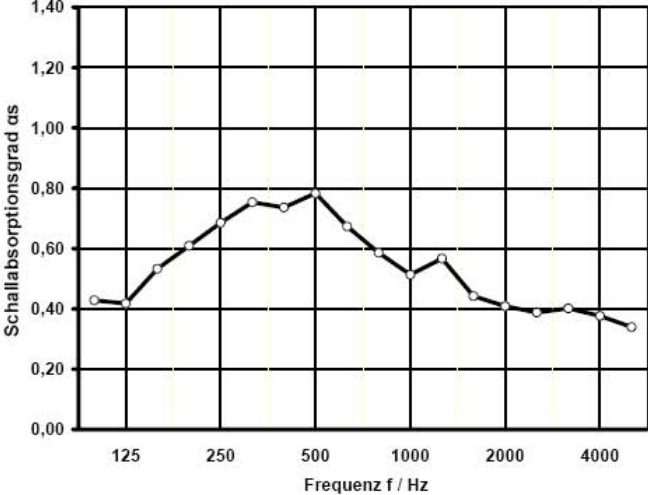
Raum: BRG-Kepler Raum Nr. 11/Parterre  
 Volumen: 263,80 [m<sup>3</sup>]  
 Prüffläche: 26,76 [m<sup>2</sup>]  
 Prüfdatum: 11.01.06

Ohne Probe:  
 Temperatur = 23,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 57 [%]

Mit Probe:  
 Temperatur = 22,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 42 [%]



Frequenz [Hz]	as Terz	ap Oktave
100	0,43	
125	0,42	0,46
160	0,53	
200	0,61	
250	0,69	0,68
315	0,75	
400	0,74	
500	0,78	0,73
630	0,67	
800	0,59	
1000	0,51	0,56
1250	0,57	
1600	0,44	
2000	0,41	0,41
2500	0,39	
3150	0,40	
4000	0,38	0,37
5000	0,34	



as Schallabsorptionsgrad  
 ap Schallabsorptionsgrad gemittelt in Oktaven

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	1,62	1,95	2,01	2,20	2,06	2,25	2,45	2,35	2,53	2,54	2,57	2,58	2,46	2,42	2,40	2,26	2,03	1,80
T2 / sec	1,04	1,09	0,98	0,92	0,83	0,77	0,76	0,70	0,71	0,72	0,74	0,74	0,76	0,76	0,77	0,74	0,71	0,68

Probe-VI\_oB\_48/50/400

### Schallabsorptionsgrad

Messung der Schallabsorption in einem Klassenraum

**Prüfgegenstand:** Probe-VI\_oB\_48/50/400 (48mm Zellulose, 50mm Schlitzbreite, 400mm Schlitzabst.)  
 Schlitztiefe= 15mm Poraverputz.  
 Die Schlitzte wurden mit Zellulose aufgefüllt.

13,28m<sup>2</sup> - Türseitige Wand  
 13,55m<sup>2</sup> - Stirnseitige Wand  
 Gesamt= 26,83m<sup>2</sup>


**Subtrahierende äquivalente Absorptionsfläche:**

Frequenz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	[Hz]	
Probe-VII_48/70/400 (BRG-Messung)																			Fläche: 26,76	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0,43	0,42	0,53	0,81	0,69	0,75	0,74	0,78	0,67	0,59	0,51	0,57	0,44	0,41	0,39	0,40	0,38	0,34		
Bezeichnung																			Fläche: 0	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Bezeichnung																			Fläche: 0	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

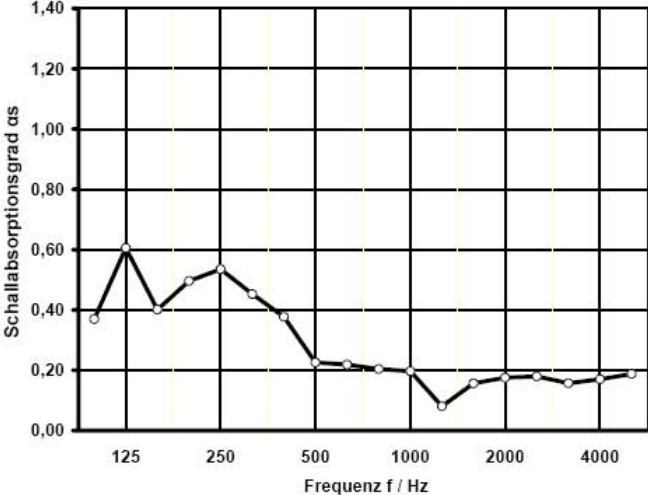
Raum: BRG-Kepler Raum Nr.11/Parterre  
 Volumen: 263,80 [m<sup>3</sup>]  
 Prüffläche: 26,83 [m<sup>2</sup>]  
 Prüfdatum: 01.02.06

Ohne Probe:  
 Temperatur = 23,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 57 [%]

Mit Probe:  
 Temperatur = 21,9 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 47 [%]



Frequenz [Hz]	as Terz	ap Oktave
100	0,37	
125	0,61	0,46
160	0,40	
200	0,50	
250	0,53	0,49
315	0,45	
400	0,38	
500	0,23	0,27
630	0,22	
800	0,20	
1000	0,20	0,16
1250	0,08	
1600	0,16	
2000	0,18	0,17
2500	0,18	
3150	0,16	
4000	0,17	0,17
5000	0,19	



as Schallabsorptionsgrad  
 ap Schallabsorptionsgrad gemittelt in Oktaven

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	1,62	1,95	2,01	2,20	2,06	2,25	2,45	2,35	2,53	2,54	2,57	2,58	2,46	2,42	2,40	2,26	2,03	1,80
T2 / sec	0,89	0,86	0,92	0,87	0,80	0,83	0,90	0,94	1,05	1,12	1,20	1,26	1,28	1,28	1,28	1,24	1,16	1,08



**Probe-VI\_mB\_48/50/400**

### Schallabsorptionsgrad

Messung der Schallabsorption in einem Klassenraum

**Prüfgegenstand:** **Probe-VI\_mB\_48/50/400** (48mm Zellulose, 50mm Schlitzbreite, 400mm Schlitzabst.)  
 Schlitztiefe= 15mm Poraverputz.  
 Die Schlitzte wurden mit Zellulose aufgefüllt.  
 Endbeschichtung= Einkornputz AK15 (1,5mm Korngröße)

13,28m<sup>2</sup> - Türseitige Wand  
 Gesamt= 13,28m<sup>2</sup>


**Subtrahierende äquivalente Absorptionsfläche:**

Frequenz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	[Hz]		
Probe-VII_48/70/400 (BRG-Messung)																			Fläche:	26,76	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0,43	0,42	0,53	0,61	0,69	0,75	0,74	0,78	0,67	0,59	0,51	0,57	0,44	0,41	0,39	0,40	0,38	0,34			
Probe-VI_oB 48/60/400 (BRG-Messung)																			Fläche:	13,55	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0,37	0,61	0,40	0,50	0,53	0,45	0,38	0,23	0,22	0,20	0,20	0,06	0,16	0,18	0,18	0,16	0,17	0,19			
Bezeichnung																			Fläche:	0	[m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

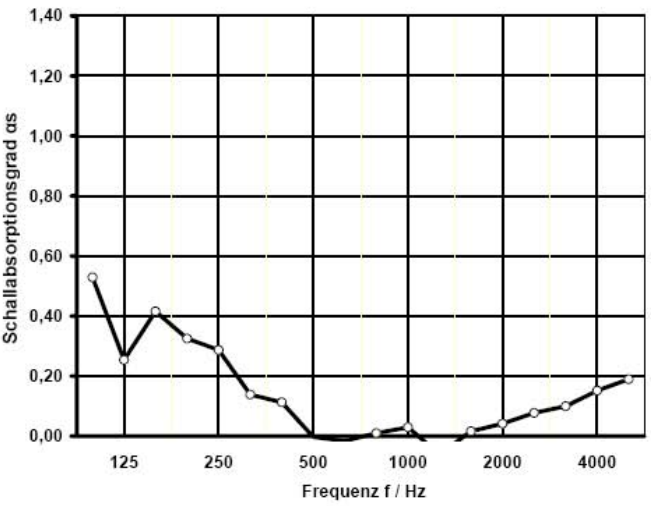
Raum: BRG-Kepler Raum Nr.11/Parterre  
 Volumen: 263,80 [m<sup>3</sup>]  
 Prüffläche: 13,28 [m<sup>2</sup>]  
 Prüfdatum: 08.02.06

Ohne Probe:  
 Temperatur = 23,0 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 57 [%]

Mit Probe:  
 Temperatur = 21,4 [°C]  
 relative Luftfeuchte = 41 [%]



Frequenz [Hz]	as Terz	ap Oktave
100	0,53	
125	0,25	0,40
160	0,42	
200	0,33	
250	0,29	0,25
315	0,14	
400	0,11	
500	0,00	0,03
630	-0,02	
800	0,01	
1000	0,03	-0,01
1250	-0,06	
1600	0,02	
2000	0,04	0,05
2500	0,08	
3150	0,10	
4000	0,15	0,15
5000	0,19	



as Schallabsorptionsgrad  
 ap Schallabsorptionsgrad gemittelt in Oktaven

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	1,62	1,95	2,01	2,20	2,06	2,25	2,45	2,35	2,53	2,54	2,57	2,58	2,46	2,42	2,40	2,26	2,03	1,80
T2 / sec	0,86	0,95	0,92	0,91	0,85	0,90	0,97	1,01	1,13	1,21	1,28	1,34	1,35	1,34	1,32	1,24	1,13	1,03



**Probe-III\_100 mm - Deckenabsorber**

### Schallabsorptionsgrad

Messung der Schallabsorption in einem Klassenraum

**Prüfgegenstand:** Deckenabsorber (100mm Zellulose)  
Der Deckenabsorber (Zellulose) wurde u-förmig an der Decke angeordnet.

25m<sup>2</sup> - Decke



**Subtrahierende äquivalente Absorptionsfläche:**

Frequenz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	[Hz]
Probe-VII_48/70/400 (BRG-Messung)																			Fläche: 28,76 [m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0,43	0,42	0,53	0,61	0,69	0,75	0,74	0,78	0,67	0,59	0,51	0,57	0,44	0,41	0,39	0,40	0,38	0,34	
Probe-VI_oB 48/60/400 (BRG-Messung)																			Fläche: 12,67 [m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0,37	0,61	0,40	0,50	0,53	0,45	0,38	0,23	0,22	0,20	0,20	0,08	0,16	0,18	0,18	0,16	0,17	0,19	
Probe-VI_mB 48/60/400 (BRG-Messung)																			Fläche: 12,62 [m <sup>2</sup> ]
Absorptionsgrad	0,53	0,26	0,42	0,33	0,29	0,14	0,11	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,02	0,04	0,08	0,10	0,16	0,19	

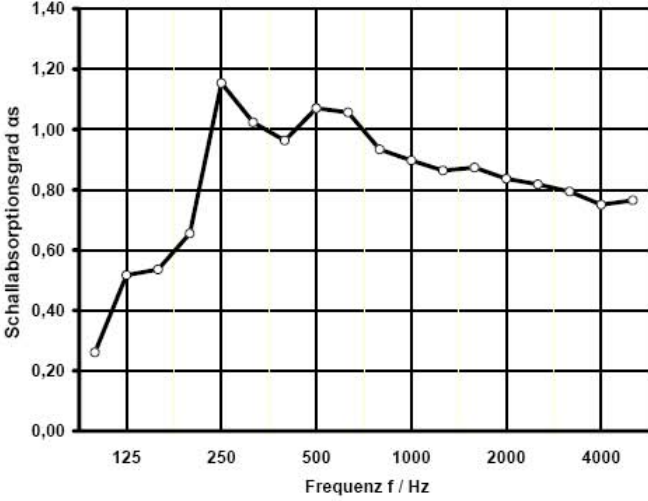
Raum: BRG-Kepler Raum Nr.11/Parterre  
 Volumen: 263,80 [m<sup>3</sup>]  
 Prüffläche: 25,00 [m<sup>2</sup>]  
 Prüfdatum: 13.03.06

Ohne Probe: Temperatur = 23,0 [°C]  
relative Luftfeuchte = 57 [%]

Mit Probe: Temperatur = 21,3 [°C]  
relative Luftfeuchte = 31 [%]

Frequenz [Hz]	as Terz	ap Oktave
100	0,26	
125	0,52	0,44
160	0,54	
200	0,65	
250	1,15	0,94
315	1,02	
400	0,96	
500	1,07	1,03
630	1,06	
800	0,93	
1000	0,90	0,90
1250	0,86	
1600	0,87	
2000	0,84	0,84
2500	0,82	
3150	0,79	
4000	0,75	0,77
5000	0,77	



as Schallabsorptionsgrad  
ap Schallabsorptionsgrad gemittelt in Oktaven

Mittelwert der gemessenen Nachhallzeit T																		
Frequenz f / Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T1 / sec	1,62	1,95	2,01	2,20	2,06	2,25	2,45	2,35	2,53	2,54	2,57	2,58	2,46	2,42	2,40	2,26	2,03	1,80
T2 / sec	0,76	0,75	0,72	0,68	0,54	0,59	0,63	0,62	0,66	0,73	0,77	0,78	0,79	0,80	0,80	0,76	0,72	0,66