

BBSR-  
Online-Publikation  
13/2023

# Raumakustik für den Denkmalschutz

von

Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner  
Dr. Moritz Späh  
Xiaoru Zhou  
Ting Zhang



# Raumakustik für den Denkmalschutz

Methoden, Konzepte und konstruktive Lösungen für die Akustik in  
denkmalgeschützten Gebäuden

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
F O R S C H U N G S F Ö R D E R U N G

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.18

Projektlaufzeit: 12.2020 bis 09.2022

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure  
im Auftrag des BBSR,  
Referat WB3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
zb@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart  
Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner (Projektleitung)  
philip.leistner@ibp.fraunhofer.de

Dr. Moritz Späh  
moritz.spaeh@ibp.fraunhofer.de

Xiaoru Zhou  
xiaoru.zhou@ibp.fraunhofer.de

Ting Zhang  
ting.zhang@ibp.fraunhofer.de

### Redaktion

Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart  
Dr. Moritz Späh

### Stand

November 2022

### Gestaltung

Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart  
Dr. Moritz Späh

### Bildnachweis

Titelbild: Dr. Moritz Späh

Alle Abbildungen mit Ausnahme der Logos stammen von den Autoren, soweit am Bild nicht anders ausgewiesen. Alle Abbildungen sind im Abbildungsverzeichnis aufgelistet ggf. mit Hinweis auf Abbildungen Dritter.

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Leistner, Philip; Späh, Moritz; Zhou, Xiaoru; Zhang, Ting: Raumakustik für den Denkmalschutz: Methoden, Konzepte und konstruktive Lösungen für die Akustik in denkmalgeschützten Gebäuden. BBSR-Online-Publikation 13/2023, Bonn.

ISSN 1868-0097

Bonn 2023

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>6</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>8</b>
1.1    Raumakustik im Denkmalschutz	8
1.2    Nutzung von Räumen	8
1.3    Anforderungen an die Akustik in Räumen	9
1.4    Schallabsorber und ihre Wirkungsweise	10
1.4.1    Poröse Schallabsorber	11
1.4.2    Resonanzabsorber	11
1.4.3    Kombinierte Schallabsorber	12
<b>2. Literatur</b>	<b>13</b>
<b>3. Experteninterviews</b>	<b>14</b>
3.1    Wichtigkeit der Raumakustik in Bezug auf Denkmalschutz	15
3.2    Herausforderung bei der Raumakustik im Denkmalschutz	15
3.3    Einfluss der Nutzung bei der Betrachtung der Raumakustik im Denkmalschutz	15
3.4    Wie wird mit Vorschlägen bezüglich der Raumakustik im Denkmalschutz umgegangen?	15
3.5    Wie wird der Denkmalschutz gegenüber einer guten Nutzbarkeit der Räume gewichtet?	16
3.6    Welche raumakustischen Maßnahmen werden als umsetzbar betrachtet?	16
3.7    Wie werden Änderungen an Oberflächen beurteilt, die einen Ersatz der historischen Oberflächen darstellt, die aber optisch nicht sichtbar sind?	16
3.8    Wie werden veränderbare (temporäre) raumakustische Maßnahmen beurteilt und welche werden genannt?	16
3.9    Welche raumakustischen Möglichkeiten werden für den Denkmalschutz in Zukunft gewünscht und benötigt?	17
3.10    Welche raumakustischen Themen sollten in Zukunft beforscht werden?	17
3.11    Fazit Experteninterview	17
<b>4. Reallabore</b>	<b>18</b>
4.1    Vorgehensweise	18
4.2    Reallabor Forum Heimat	19
4.2.1    Überblick	19
4.2.2    Raummodell und Bestandsmessung	20
4.2.3    Nutzungsszenarien	21
4.2.4    Mögliche akustischen Maßnahmen	22
4.2.5    Fazit Planung Forum Heimat	27
4.2.6    Vorort Untersuchung der Maßnahmen	27
4.2.7    Nachhallzeit bei Einsatz der verschiedenen raumakustischen Maßnahmen	30
4.2.8    Berechnung der Absorptionsgrade in Anlehnung an DIN EN ISO 354	36
4.3    Reallabor Franz-Marc-Raum	41
4.3.1    Überblick	41
4.3.2    Raummodell und Bestandsmessung	41
4.3.3    Simulation und Maßnahmen	43
4.3.4    Fazit Planung Franz-Marc-Raum	46

4.3.5	Vorort Untersuchung der Maßnahmen	47
4.4	Reallabor großer Sitzungssaal Deichmannsaue	49
4.4.1	Überblick	50
4.4.2	Raummodell und Bestandsmessung	51
4.4.3	Simulation und Maßnahmen	53
4.4.4	Fazit Planung großer Sitzungssaal	57
4.4.5	Prognose der Nachhallzeiten mit gemessenen Absorptionsgraden	58
<b>5.</b>	<b>Ergebnisse und Bewertung</b>	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>64</b>
<b>7.</b>	<b>Planungskompodium Raumakustik</b>	<b>65</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>68</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>69</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>70</b>
	<b>Anhang</b>	<b>74</b>
	A.1 Fragebogen für Experteninterview	74
	A.2 Angaben zu Messung der Raumakustik	76

## Kurzfassung

Für eine wirtschaftliche Nutzung von Räumen bzw. Gebäuden, die unter Denkmalschutz stehen, stellt eine gute Raumakustik eine wesentliche Voraussetzung für Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit der Nutzer dar. An Gestaltungskonzepten, Lösungswissen und Beispielen mangelt es. Daher wurden Lösungen für die Raumakustik in denkmalgeschützten Räumen in diesem Projekt erarbeitet, um denkmalgeschützte Gebäude dauerhaft zu erhalten.

In diesem Forschungsprojekt wurde die Raumakustik in denkmalgeschützten Räumen aus Sicht der Akustik und mit dem Ziel der Darstellung der umsetzbaren Möglichkeiten bearbeitet. Zunächst wurde eine Literaturstudie vorgenommen, die das Zusammenspiel von Akustik und denkmalschützerischen Aspekten beleuchten sollte. Hierbei wurde festgestellt, dass wenig Information zu diesem Thema vorliegt. Ausgehend von der Literaturstudie wurden Experteninterviews durchgeführt. Die Analyse beider Arbeitsschritte zeigte auf, dass Lösungen für die Nutzung der Räume in der Regel für jeden Raum individuell gefunden werden müssen, wobei es hierbei um das Zusammenwirken verschiedener Personen und Interessen und um eine Kompromissfindung geht. Diese gelingt umso besser, wenn sich die beteiligten Personen dieser Notwendigkeit bewusst sind und pragmatische Lösungen anstreben.

Im weiteren Vorgehen des Projekts wurden drei Reallabore ausgewählt, die verschiedene Raumgrößen, verschiedene Randbedingungen und Nutzungen aufwiesen. Anhand dieser drei Reallabore wurden Lösungsansätze gesucht und mittels raumakustischer Berechnungen und Simulationen analysiert und gefunden, wobei die Lösungsfindung die Randbedingungen des Denkmalschutzes in den spezifischen Räumen berücksichtigte. Mit Hilfe der beteiligten Nutzerinnen und Nutzer der Reallabore und der am Projekt beteiligten Firmen konnten Lösungen erarbeitet werden, die beispielhaft in den Reallaboren umgesetzt wurden. Diese beiden Räume mit den umgesetzten Lösungen wurden messtechnisch untersucht und damit die Annahmen der Raumakustik-Simulationen überprüft. Auch konnte aus diesen Messungen die Wirkung der schallabsorbierenden Materialien überprüft werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Wirkung geringfügig variieren kann, abhängig vom Schallfeld und den räumlichen Gegebenheiten der Räume sowie der Platzierung der schallabsorbierenden Maßnahmen. Die an diesen Beispielen ermittelten Werte wurden zur Überprüfung der Ergebnisse auf das dritte Reallabor, den großen Sitzungssaal im Schloss Deichmannsau, übertragen und auch für diesen Raum Lösungen gefunden, die zu einer guten Nutzung dieses Raumes führen können.

Die in diesem Projekt verwendeten Schallabsorber wurden von den Partnerfirmen des Projekts bereitgestellt und ermöglichten die praktische Betrachtung der Raumakustik und notwendiger Maßnahmen in den Reallaboren. Sie stehen für die Vielzahl an möglichen Raumakustik-Produkten, die gegebenenfalls in denkmalgeschützten Gebäuden eingesetzt werden können und zeigen insbesondere mit den schallabsorbierenden mobilen Stellwänden Lösungen, die in schwierigen Räumen dennoch zu einer guten Raumakustik führen. Wesentlich ist dabei, dass in der Regel größere Flächen bzw. eine größere Anzahl an absorbierenden Elementen notwendig sind, um die Raumakustik deutlich zu verbessern.

Die Ziele des Vorhabens, anhand von drei Reallaboren die raumakustische Planung für denkmalgeschützte Räume aufzuzeigen und Lösungen zu erarbeiten, wurden erreicht. Damit kann das Projekt als Beispiel, Inspiration und Informationsträger dienen, um die Planung der Raumakustik deutlich zu verbessern. Mit einem Planungskompodium wird eine Handreichung für interessierte Personen und betroffenen Stakeholder erstellt. Damit erhalten beteiligten Personen eine übersichtliche und prägnante Planungshilfe, mit der die Raumakustik von denkmalgeschützten Räumen verbessert und eine gute Nutzung gewährleistet wird, was zum Erhalt denkmalgeschützter Räume beiträgt und die Nachhaltigkeit des Gebäudebestands stärkt.

---

## Abstract

For an economic use of rooms or buildings, which are listed as historic buildings, good room acoustic conditions are an essential prerequisite for the health, wellbeing and productivity of the users. Concepts for the design and layout, knowledge and examples to solve this topic are insufficiently available. Exemplary solutions for room acoustics in listed rooms were investigated and found in this project, to help to preserve listed buildings permanently.

In this project, the room acoustics in listed rooms was investigated from the standpoint of acoustics and with the goal to show implementable solutions. The starting point was a literature study to examine the interaction of room acoustic solutions and matters for the protection of historic rooms. It was found, that only sparse information on this topic was available. From this finding, expert interviews were conducted with different stakeholders. The analysis showed, that solutions for the use of each room have to be found individually and that a collaboration of different stakeholders with different interests is necessary, to find a good compromise. This is more successful, when the persons are aware of the necessity for compromise and when they look for pragmatic solutions.

Following this, three "real laboratories" were chosen with different room size, different conditions of historic protection and different usage. On the basis of the three rooms, titled "real laboratories", solutions were investigated and analysed by room acoustic calculations and simulations and solutions were found, taking into account the individual requirements of the protection of the historic rooms. With help of the users of the "real laboratories" and the project associated companies, it was possible to find room acoustic solutions, which were exemplarily implemented. Two of the three rooms were measured when the solutions were installed, and the planning and simulation was verified. Also, the acoustic performance of the sound absorbing materials was verified in situ. It was found, that the performance was slightly different for different positioning of the two rooms were transferred to the third room, the large meeting room in Schloss Deichmannsaue, and also for this room solutions for a good room acoustic situation were found.

The sound absorbers utilised in this project were provided by partner companies of the project and they facilitated the practically necessary measures in the "real laboratories". The applied products stand for a multitude of room acoustic products, which can also be used in historically rated rooms. The products, especially the absorbing partition walls, show solutions, which can be applied in difficult rooms and lead to good room acoustic conditions. Essentially in this context is, that in normal cases a larger surface area or a larger number of partition walls with absorbing properties are necessary to improve the room acoustics adequately.

The goals of this project, to reveal the room acoustic planning process for historically listed rooms and to display possible solutions, was reached. Therefore, this project can be used as an example, inspiration and means of information to enhance the planning process of room acoustics of listed rooms and buildings.

A planning guide (Planungskompodium) as a media for interested persons and stakeholders is included in the report and will be separately released. With this document, interested persons will get a clear and concise planning guide to improve the room acoustics in listed rooms, which should lead to the preservation of listed rooms and should increase the sustainability of the building stock.

# 1. Einleitung

## 1.1 Raumakustik im Denkmalschutz

Die Raumakustik ist in vielen Gebäuden und Räumen, die unter Denkmalschutz stehen, schlecht. Oft wird der Restaurierung der Räume ein hohes Maß an Wichtigkeit zugeschrieben. Dabei wird die spätere Nutzung der Räume oft gar nicht oder zu wenig bedacht und eine Berücksichtigung der Raumakustik wird in vielen Fällen nicht vorgenommen. Dann wird nach Fertigstellung des sanierten Raumes festgestellt, dass eine Nutzung des Raumes sehr schwierig ist, denn in der Regel fehlt es an Schallabsorption im Raum, so dass die Räume zu hallig und viel zu laut sind, um sich darin z.B. zu unterhalten oder auch, um darin Musik zu machen oder Musik zu hören, oder den Raum als Büro zu nutzen.

Die Nutzbarkeit der Räume ist jedoch ein wesentlicher Aspekt für denkmalgeschützte Gebäude, der zum Erhalt des Gebäudes beiträgt. Räume, für die eine Nutzung nicht oder nur eingeschränkt möglich ist, lassen sich nicht vermieten und bieten daher nicht die Möglichkeit, diese finanziell zu verwerten. Im Angesicht der zukünftigen Finanzsituation und dem Trend, Bestandsgebäude für zukünftige Nutzung zu sanieren, kommt der möglichen Nutzung der Räume eine wesentliche Bedeutung zu.

In dieser Forschungsarbeit soll die Raumakustik im Denkmalschutz grundsätzlich betrachtet und Vorschläge gemacht werden, wie Lösungen zur Verbesserung und Optimierung der Raumakustik im Denkmalschutz ermöglicht werden können. Anhand von drei Reallaboren wird die Problematik sowie individuelle und innovative Lösungen beispielhaft dargestellt und beschrieben, die grundsätzlich auch auf andere Räume übertragbar sind. Abgeleitet von den Erfahrungen aus den Experteninterviews und aus der Raumakustik-Planung und Umsetzung von Maßnahmen in den Reallaboren werden die wichtigsten Grundsätze in einem Planungskompodium für die Raumakustik im Denkmalschutz zusammengefasst. Dieses Planungskompodium soll losgelöst von diesem Bericht herausgegeben und eine möglichst weite Verbreitung finden. Es soll Architekt\*innen und Planer\*innen Hinweise zur Problematik, Vorgehensweise und Lösungsansätzen geben, so dass sie die Raumakustik in den denkmalgeschützten Gebäuden bzw. Räumen berücksichtigen und entsprechend der Nutzung verbessern und optimieren können.

## 1.2 Nutzung von Räumen

Die Nutzungsarten von Räumen können sehr vielseitig sein. Grundsätzlich können Räume zur privaten Nutzung verwendet werden, zur beruflichen Nutzung oder auch zur Ausübung von Hobbys wie z.B. Sport. Räume können ebenso für die Produktion und Aufbewahrung von Produkten genutzt werden. Aus akustischer Sicht sind hierbei vor allem zwei Aspekte wichtig: zum einen der Lärmpegel, der in Räumen durch Schallquellen entstehen kann und der durch raumakustische Maßnahmen gemindert wird, zum anderen eine angemessene Akustik, um die notwendige und gewünschte Kommunikation zu ermöglichen, was auch die Ausübung und Wiedergabe von Musik beinhaltet. Die Individuelle Nutzung von Räumen im allgemeinen, aber auch von Räumen unter Denkmalschutz, kann bezüglich der notwendigen raumakustischen Eigenschaften nach DIN 18041: Hörsamkeit in Räumen [1] eingeordnet werden. Die Norm unterscheidet die Hörsamkeit über mittlere und größere Entfernungen (Räume der Gruppe A) sowie über geringe Entfernungen (Räume der Gruppe B). Unter Gruppe A fallen Unterrichtsräume, Gruppenräume, Konferenzräume, Gerichts- und Ratssäle, Seminarräume, Hörsäle und Tagungsräume, aber auch Sport und Schwimmhallen. In Gruppe B werden Verkehrsflächen mit Aufenthaltsqualität, Speiseräume, Kantinen, Ausstellungsräume, Eingangshallen, Schalterhallen und unter anderen Büros benannt. Büroräume, Großraumbüros und Callcenter werden ausführlich in der Richtlinie VDI 2569 [2] behandelt. Für Arbeitsstätten ist zusätzlich die ASR A3.7 Technische Regeln für Arbeitsstätten - »Lärm« [3] zu beachten.



### 1.3 Anforderungen an die Akustik in Räumen

Als Grundlage zur Ermittlung der raumakustischen Anforderungen an Räume unterschiedlicher Nutzung empfiehlt es sich, die DIN 18041 [1] heranzuziehen. Räume mit einer Nutzung, die nicht direkt in der Norm genannt ist, lassen sich dennoch in eine entsprechende Kategorie der DIN 18041 einordnen. Orientierungswerte werden für Räume der Gruppe B (Hörsamkeit über geringe Entfernungen) bezüglich des A/V – Verhältnisses genannt. Dabei ist A die äquivalente Absorptionsfläche im Raum und V das Raumvolumen. Je nach Nutzungsart des Raumes (B2 bis B5) wird für Räume bis zu einer Höhe von 2,5 m ein Grenzwert an das A/V-Verhältnis genannt, für Räume mit größerer Raumhöhe wird das geforderte A/V-Verhältnis durch eine Gleichung berechnet. Durch Verwendung der Sabine'schen Nachhallformel

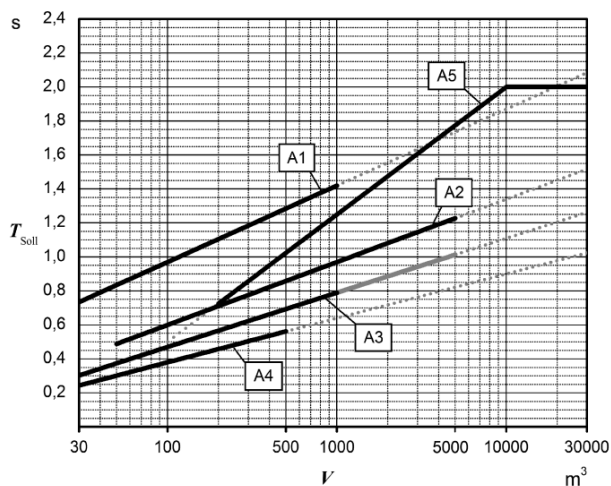
$$T = 0,163 \frac{V}{A} \quad (1)$$

lässt sich die Nachhallzeit T für ein diffuses Schallfeld aus dem Raumvolumen V und der äquivalenten Absorptionsfläche A, beziehungsweise aus dem Kehrwert des A/V Verhältnisses, Orientierungswerte berechnen.

Für Räume der Gruppe A wird in DIN 18041 die Anforderung direkt an die Nachhallzeit gestellt, die für die Raumakustik die wichtigste Größe darstellt. Die geforderte Nachhallzeit ist für alle Räume volumenabhängig. Die Anforderungen der DIN 18041 sind in Bild 1 dargestellt.

Bild 1:

Anforderung der DIN 18041 an die Nachhallzeit in Räumen der Gruppe A: A1 Nutzungsart Musik, A2 Sprache/Vortrag, A3 Unterricht/Kommunikation bzw. Sprache/Vortrag inklusiv, A4 Unterricht/Kommunikation inklusiv, A5 Sport.

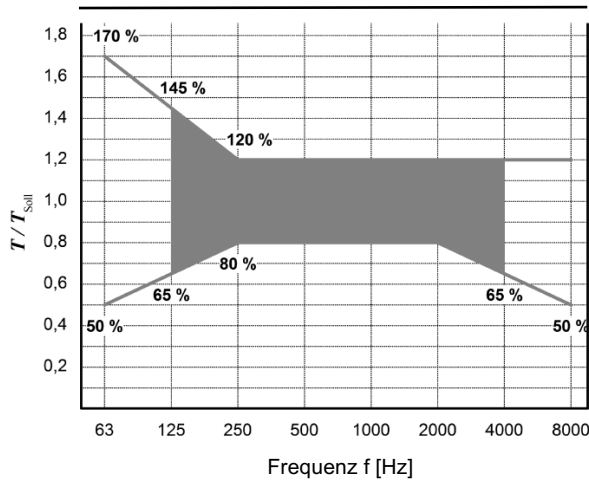


Quelle: Beuth Verlag

Zusätzlich zur Soll-Nachhallzeit wird für diese Raumgruppe gefordert, dass die Nachhallzeit über der Frequenz möglichst gleichmäßig ist. Im mittleren Frequenzbereich wird eine Abweichung von  $\pm 20\%$  toleriert, bei tiefen Frequenzen (125 Hz) ist eine etwas größere Abweichung möglich, bei hohen Frequenzen wird lediglich eine größere Abweichung zu niedrigeren Nachhallzeiten toleriert. Der Toleranzbereich ist in Bild 2 dargestellt.

Bild 2:

Anforderung der DIN 18041 an den Verlauf der Nachhallzeit über der Frequenz in Herz. Angabe von  $T/T_{\text{Soll}}$ , bezogen auf die in Bild 1 dargestellten Soll-Nachhallzeit für die entsprechende Nutzung und Raumvolumen.



Quelle: Beuth Verlag

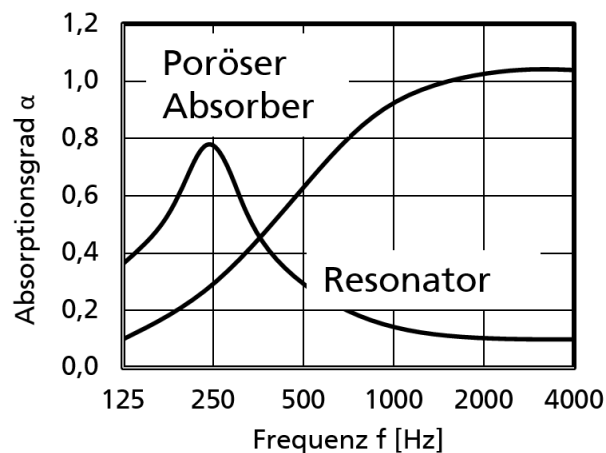
Die Gleichmäßigkeit der Nachhallzeit über der Frequenz ist für alle Räume anzustreben, da damit ein »neutrales« Schallfeld ohne Frequenzabhängigkeit vorhanden ist.

## 1.4 Schallabsorber und ihre Wirkungsweise

Grundlegend gibt es zwei Arten von Schallabsorbern, die zur Gestaltung der Raumakustik eingesetzt werden können. Schallabsorber können zum einen poröse Absorber darstellen, d.h. es sind Absorber, die durch ihre poröse Oberfläche oder Struktur der Schallwelle durch Reibung Schallenergie entziehen. Dabei muss die Schallwelle in das Material eindringen, so dass nur offenporöse Materialien als poröse Absorber wirken können. Diese Absorber haben, abhängig von ihrer Dicke und Absorberstruktur, tieffrequent eine geringe Schallabsorption, die mit zunehmender Frequenz ansteigt und bei hohen Frequenzen eine maximale Absorption erreicht. Resonatoren sind dagegen Elemente, bei denen entweder die Oberfläche (bei Plattenresonatoren) oder die Luft (bei mikroperforierten Absorbern) zu einer Resonanz angeregt wird, die durch mechanische Reibung bedämpft ist und die damit dem Schallfeld Energie entzieht. Der grundsätzliche Verlauf der Schallabsorption dieser beiden Absorbertypen ist in Bild 3 dargestellt.

Bild 3:

Beispielhafter Verlauf der Schallabsorption von porösen Absorbern und von Resonanzabsorbern.



Quelle: IBP

Natürlich sind auch Kombinationen beider Wirkmechanismen möglich. Die genaue Wirkungsweise verschiedener Absorber ist z.B. in [5] beschrieben. Der Anstieg der Schallabsorption bei porösen Absorbern

hängt von der Dicke des Materials ab. Textile Schallabsorber wie Teppiche, aber auch Stoffe und Bekleidung wirken wie poröse Absorber, die in der Regel eher hochfrequent wirksam sind. Resonanzabsorber können dagegen auch tieffrequent ihr Resonanzmaximum aufweisen (wie z.B. Leichtbauwände aus Gipskarton oder andere Plattenabsorber). Auch Wandverkleidungen oder Holzböden können tieffrequent eine gewisse Schallabsorption haben. Mikroperforierte Absorber als Resonanzabsorber haben den Vorteil, dass ihre Resonanzfrequenz, und damit das Absorptionsmaximum, gut vorherberechnet werden kann und diese gut auf verschiedene Anwendungen angepasst werden können. Die Herausforderung bei der Auswahl der Schallabsorber besteht darin, eine über den Frequenzgang gleichmäßige Nachhallzeit zu erreichen, die entsprechend der Nutzung angemessen lang bzw. kurz ist. Schallabsorber sind inzwischen mannigfaltig auf dem Markt und es gibt entsprechend viele Hersteller. Zur Übersicht sollen im Folgenden einige typische Schallabsorber genannt werden, die gegebenenfalls in Räumen, die unter Denkmalschutz stehen, eingesetzt werden können.

#### 1.4.1 Poröse Schallabsorber

Der Markt für Schallabsorber ist inzwischen umfangreich und es gibt eine kontinuierlich wachsende Zahl von Anbietern. In vielen Fällen handelt es sich dabei um poröse Schallabsorber. Dazu zählen abgehängte Akustik-Unterdecken (Knauf, OWA, Ecophon, Armstrong, etc.), aber auch schallabsorbierende fugenlose Putzsysteme (BASWA, Rockfon, STO, Trolldtect, etc.). Als Wandabsorber werden poröse Materialien oft mit einer Stoffbespannung angeboten. Sind diese Oberflächen bedruckt, werden sie oft als Akustikbilder vertrieben (Erler und Pless, XB-Acoustics, und weitere). Absorption kann auch durch absorbierende Stellwände in Räume gebracht werden. Diese sind oft mit porösem Material ausgestattet (Preform, Nimbus und viele weitere). Auch Möbel können schallabsorbierend ausgestattet werden, wie z.B. mit Stoff bezogene Bestuhlung und akustisch wirksame Schränke. In vielen Fällen können auch, zumindest in Räumen ohne Denkmalschutzanforderungen, schallabsorbierende Wandverkleidungen Verwendung finden.

Dabei ist die Oberfläche meist gelocht und mit einem als porösen Absorber wirkenden Vlies oder einer Kombination von Vlies mit weiterem porösem Material hinterlegt. Diese Arten von Absorbern können den Vorteil haben, dass ihre hochfrequente Absorption abnimmt, was für eine ausgeglichene Nachhallzeit sorgen kann. Auch möglich ist die Verkleidung von Wandflächen mit hartem porösem Material (z.B. Liever), wie es im Real-labor Forum Heimat beschrieben ist. Weiterhin sind hier schallabsorbierende Segel (Erler und Pless, Lindner, Ecophon, etc.), und Baffeln (Späh Acoustics, Pinta, K+N Raumqualität, etc.) genannt, die aus porösem Material bestehen und die meist von der Decke abgehängt sind. Diese haben oft filigrane Aufhängungen und können gegebenenfalls auch in Räumen unter Denkmalschutz eingesetzt werden. Schallabsorbierend im Sinne von porösen Schallabsorbern wirken auch die meisten Teppichböden und Vorhänge, jedoch in vielen Fällen eher hochfrequent (Teppichböden) und zum Teil auch relativ gering, wenn es nicht spezielle schallabsorbierende Vorhänge sind.

#### 1.4.2 Resonanzabsorber

Resonanzabsorber entziehen dem Schallfeld Energie durch ihre bedämpfte Resonanz. In vielen Fällen sind dies mikroperforierte Oberflächen mit einem Luftraum dahinter, der als Feder wirkt. Produkte mit dieser Wirkungsweise sind z.B. Plexiglasabsorber (Fritz, etc.), es können aber auch mikroperforierte Holzoberflächen (Akustik und Raum, Kaiser Akustik, Akustikplus, etc.) oder mikroperforierte Folien sein (Barrisol, etc.), die entweder gespannt oder auch als Oberflächen von Bauteilen entsprechend eingesetzt werden. Dies sind z.B. transluzente Stellwände oder Tischabtrenner (Nimbus), oder bedruckbare Stellwände (MBA) Dieses Prinzip kann aber auch in Schlitzabsorbern umgesetzt werden. Weitere Resonanzabsorber sind Helmholtz-Resonatoren, die ähnlich wie die mikroperforierten Absorber wirken, jedoch in der Regel aufwändiger herzustellen sind.

Wichtige Resonanzabsorber sind Plattenabsorber, bei denen Plattenresonanzen zur Absorption führen. Dieses Prinzip kann zum einen in speziellen Produkten umgesetzt sein, wie z.B. VPR (Renz), aber auch bei Wandverkleidungen und bei Leichtbauwänden zu höherer Absorption bei tiefen Frequenzen führen.

### **1.4.3 Kombinierte Schallabsorber**

Die Kombination von porösen Absorbern und Resonanzabsorbern ist bei vielen Produkten fließend, z.B. bei gelochten Oberflächen mit hinterlegtem Vlies und zusätzlichem porösen Material, wie z.B. bei gelochten Metalldecken (OWA, Fural, etc.). Dagegen wird die Kombination beim Produkt BKA (Renz) dadurch erreicht, dass ein Plattenabsorber mit einer porösen Schicht auf der dem Schall zugewandten Seite kombiniert wird. Inzwischen gibt es weitere Produkte, die eine Kombination von porösem und Resonanzabsorber darstellen. Wichtig ist bei allen angebotenen Absorbern, dass Prüfzeugnisse zu ihrem Absorptionsgrad vorliegen, aus denen die frequenzabhängige Schallabsorption hervorgeht. Damit lässt sich die Raumakustik und die Nachhallzeit in der Regel gut planen, wenn Erfahrung in der Raumakustik vorliegt.

## 2. Literatur

Literatur zu Raumakustik und Denkmalschutz ist nur in geringem Umfang vorhanden, da es sich bei Denkmalschutzprojekten um sehr individuelle Lösungen handelt, die schwer übertragbar sind.

In [6] wird über die akustischen Eigenschaften von unter Denkmalschutz stehenden Räumen als Klassenzimmer berichtet. Messungen der Nachhallzeiten zeigten für heutige Ansprüche deutlich zu lange Werte. Maßnahmen wie schallabsorbierende Unterdecken oder die (Teil-) Verkleidung von Wandflächen waren aus Denkmalschutzgründen ausgeschlossen. Daher wurden temporär anbringbare schallabsorbierende Platten angefertigt und in einem Raum getestet. Durch Einsatz von 15 dieser Platten konnte die Nachhallzeit in mittleren Frequenzen auf ca. 1 s gemindert, sowie der Sprachübertragungsindex STI von ca. 0,5 auf 0,6 erhöht werden. Auch in [7] wird die Akustik von Klassenzimmern in historischen Gebäuden betrachtet. Es wurde festgestellt, dass die Nachhallzeit in diesen Räumen generell zu lang war und durch Simulation ermittelt, an welchen Positionen Schallabsorber am besten anzubringen wären, um die Akustik in den Klassenräumen zu verbessern. Auch hier wurde festgestellt, dass die Maßnahmen in den einzelnen Räumen individuell zu suchen waren.

Franzen berichtet in [8] von einem EU Projekt zur Implementierung von Energieeinsparmaßnahmen in historischen Gebäuden. Ziel war es zu untersuchen, wie die Lücke zwischen erforderlichen Maßnahmen zum Klimaschutz und dem Erhalt von Kulturdenkmälern erreicht werden kann. Auch für Maßnahmen zur Energieeinsparung wird festgestellt, dass Standardlösungen nur begrenzt angepasst werden können.

Zur Akustik in wichtigen historischen Räumen wie Konzert- und Opernsälen liegen zu deren akustischen Eigenschaften sowohl Sammlungen von Parametern als auch von Audiodaten vor. Einen Überblick hierzu gibt z.B. Brezina [9]. Wie in historischen Opernhäusern akustische Messungen vorzunehmen sind wird von Pompoli beschrieben [10]. Akustische Maßnahmen in anderen historischen Räumen mit großem Volumen werden z.B. von Kamisinski et. al. in [11] beschrieben. Die Akustik von einzelnen herausragenden Räumen wird in einer größeren Anzahl an Literaturstellen thematisiert, z.B. von Vodolo [12] oder von Alvarez-Morales et. al. [1], wobei es hierbei wie von Brezina beschrieben vor allem um die Beschreibung der Akustik der historischen Räume geht.

Insgesamt lässt sich nach dem Literaturstudium festhalten, dass die Raumakustik in historischen Räumen entweder bei Renovierungsarbeiten, bei denen durch die Renovierung die akustischen Eigenschaften der Oberflächen geändert werden, aber vor allem bei Nutzungsänderungen bzw. moderner Nutzung der Räume angepasst werden muss. Dabei ist oftmals die Nachhallzeit zu lang, so dass Maßnahmen zur Reduktion der Nachhallzeiten getroffen werden müssen.

Dies ist in der Regel schwierig und es wird nach individuellen Lösungen gesucht, die mit den Anforderungen an den Denkmalschutz vereinbar sind. Oftmals wird in der Literatur, wie auch in dieser Arbeit, auf mobile und leicht anzubringende Lösungen verwiesen, die einen möglichst geringen Eingriff in die Gebäudestruktur und am besten auch in das Erscheinungsbild des Raumes aufweisen.

### 3. Experteninterviews

Um die Problematik der Akustik und insbesondere der Raumakustik im Denkmalschutz aus verschiedenen Blickwinkeln zu beleuchten und die Erfahrung verschiedener beteiligter Personengruppen (Stakeholder\*innen) im Projekt einbeziehen zu können, wurden insgesamt 10 Experteninterviews geführt. Dabei wurden möglichst verschiedene im Planungs- und Umsetzungsprozess beteiligte Personen befragt. Nicht mit allen Personen, die für ein Interview angefragt wurden, kam ein Gespräch zu Stande. Auf Grund der Pandemiesituation wurden alle Experteninterviews virtuell geführt. In Tabelle 1 sind die Personen mit ihrer Ausbildung, Erfahrung und Tätigkeit beschrieben. In Anhang A1 ist der Fragebogen für die Experteninterviews dargestellt.

Tabelle 1

Für die Experteninterviews befragte Personen\*

Ausbildung	Erfahrung	Tätigkeit
Architekt*in	Langjährige Erfahrung als selbstständiger Architekt mit Bezug zur Denkmalpflege	Beratender Ingenieur
Innenarchitekt*in	Koordination der Sanierung eines denkmalgeschützten Gebäudes	Mitarbeiter in Forschungsinstitut bzgl. Denkmalpflege
Handwerker*in	Langjähriges Interesse und Erfahrung bei der Sanierung von denkmalgeschützten Gebäuden	Leiter des Trachten- und Informationszentrum Oberbayern
Bauingenieur*in	Leitung der baulichen Belange in einem unter Denkmalschutz stehenden Gebäudes der öffentlichen Hand	Referatsleiter Innerer Dienst, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Bauingenieur*in und Master in der Denkmalpflege	Leitung des Bauarchivs, praktische Tätigkeit in der Denkmalpflege mit Querschnittsaufgabe Denkmal	Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Architekt*in, Aufbaustudium Denkmalpflege	Freischaffend mit Schwerpunkt Denkmalpflege	Eigenes Architekturbüro
Architekt*in	Gebietsreferent für Bau- und Kunstdenkmalpflege	Landesdenkmalamt Berlin
Kunsthistoriker*in	Gebietsreferent für Bau- und Kunstdenkmalpflege	Landesdenkmalamt Berlin
Bauingenieur*in	Forschung und Beratung im Bereich Bauphysik mit Erfahrung im Denkmalschutz	Eigenes Ingenieurbüro für Bauphysik
Bauingenieur*in	Forschung , Beratung und Lehre im Bereich des Denkmalschutzes	Professur für Bauingenieurwesen, Studiengangleiter

\* Es wurden sowohl männliche als auch weibliche Experten befragt.

Die Experteninterviews ergaben grundsätzlich, dass die Akustik in denkmalgeschützten Gebäuden ein wichtiges, jedoch auch bei den in der Planung tätigen Personen einen geringen Arbeitsumfang einnehmen. Dagegen haben alle Personen einen Bezug zur Raumakustik und erkennen die Schwierigkeit, Vorträge und Veranstaltungen in Räumen durchzuführen, in denen die Raumakustik nicht an die Nutzung der Räume angepasst ist. Weiterhin wurde teilweise ausgesagt, dass die Raumakustik eine größere Wichtigkeit aufweist als bauakustische Themen wie z.B. der Trittschall. Auch diese Beurteilung ist jedoch nicht durchgängig vorhanden, andere beurteilen bauakustische Fragestellungen und den Schallschutz als wichtiger bzw. öfter vorkommend.

### **3.1 Wichtigkeit der Raumakustik in Bezug auf Denkmalschutz**

Die Wichtigkeit der Raumakustik wird als zusammenhängend mit der Nutzung beurteilt. In Räumen, die zur Sprachkommunikation genutzt werden, wie z.B. Klassenzimmer, wird die Raumakustik als sehr wichtig betrachtet, ebenso in Räumen für Vorträge und auch in Räumen für Empfänge. In anderen Räumen, bei denen die Nutzung weniger durch die Raumakustik eingeschränkt ist, wird die Raumakustik als gleichwertig wie der Schutz des Denkmals betrachtet. Da bei der Sanierung auch andere Themen wie z.B. der Brandschutz und die Wirtschaftlichkeit wichtig sind, wird der Raumakustik oftmals eine geringere Bedeutung zugeschrieben.

### **3.2 Herausforderung bei der Raumakustik im Denkmalschutz**

Den Erhalt des historischen Raumes mit einer (für die jeweilige Nutzung) angepassten Raumakustik zu erreichen ist die wichtigste Herausforderung. Dabei gibt es Schwierigkeiten, qualifizierte Planungsdienstleistungen zu bekommen, da es wichtig ist, dass der Planer oder die Planerin Erfahrung mit Denkmalschutz hat und sich über die verschiedenen oft gegenläufigen Ansprüche verschiedener Aspekte bewusst ist. Da die Ansprüche an die Gebäude bzw. die Räume jeweils individuell sind, d.h. die schützenswerten Eigenschaften des Raumes sowie die Nutzung und auch die Beurteilung der beteiligten Personen unterschiedlich ist, können Lösungen nur individuell und auf Basis von Kompromissen gefunden werden. Diese Kompromisse zu erarbeiten ist eine der wichtigsten Herausforderungen im Denkmalschutz. Dabei müssen die Auflagen der Denkmalpflege mit den Notwendigkeiten der Nutzung und die damit zusammenhängenden physikalischen Notwendigkeiten in Einklang gebracht werden.

### **3.3 Einfluss der Nutzung bei der Betrachtung der Raumakustik im Denkmalschutz**

Die Aussagen zum Einfluss der Nutzung auf die Raumakustik waren einhellig, dass die angestrebte spezifische Nutzung der Räume wesentlich für die Betrachtung der Raumakustik ist. Die Nutzung spielt eine sehr wichtige Rolle beim Erhalt von Denkmälern, denn ohne Nutzung können Gebäude nicht dauerhaft erhalten bleiben. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass oftmals die Nutzung zur ursprünglichen Nutzung deutlich verändert werden muss, um das Gebäude oder den Raum zu erhalten. Jedoch muss sich dann auch die Raumakustik und die Gestaltung des Raumes ändern, was im Gegensatz zur historischen Gestaltung des Raumes steht. Als weiteren Aspekt wurde festgestellt, dass die historische Nutzung im Denkmalschutz selbst einen hohen Stellenwert aufweist, so dass eine Umnutzung schon einen Kompromiss darstellt. Hier zeigt sich wiederum die Notwendigkeit, Kompromisse bezüglich verschiedener Ansprüche an den Raum zu finden.

### **3.4 Wie wird mit Vorschlägen bezüglich der Raumakustik im Denkmalschutz umgegangen?**

Wichtig ist die Prüfung, in wie weit Maßnahmen für die Raumakustik denkmalverträglich sind und ob sie direkt eingesetzt werden können, oder, ob nicht andere alternative Maßnahmen möglich sind. Hierfür ist eine enge

Abstimmung von Nutzenden und Planenden mit den Denkmalbehörden notwendig und eine vertrauensvolle und zielorientierte Zusammenarbeit hilfreich. Die Prüfung und Lösungsfindung ist jedoch immer individuell und daher immer herausfordernd. Kreativität und der Wille zum Kompromiss ist für alle Beteiligten notwendig, um gute Lösungen zu finden.

### **3.5 Wie wird der Denkmalschutz gegenüber einer guten Nutzbarkeit der Räume gewichtet?**

Da beide Aspekte zusammenhängen, wurden zu dieser Fragestellung keine eindeutigen Aussagen gemacht. Jedoch wurde festgestellt, dass es sich immer um ein Abwägen und um individuelle Lösungen handelt. Tendenziell legen die Aussagen im Experteninterview nahe, dass eine Gleichgewichtung angestrebt wird, und dass auch der Nutzungsdruck eine Rolle bei der Gewichtung spielt. Grundsätzlich zeigt sich auch hier die Notwendigkeit zum Kompromiss.

### **3.6 Welche raumakustischen Maßnahmen werden als umsetzbar betrachtet?**

Grundsätzlich werden reversible oder auch temporäre raumakustische Maßnahmen als gut umsetzbar betrachtet. Dabei gibt es Aussagen, dass der Einsatz von modernen Konstruktionen oder Einbauten durchaus als positiv betrachtet werden, wenn sie sich von den historischen Bauteilen deutlich absetzen und die Änderungen sichtbar werden. Andererseits wurde festgestellt, dass die Eingriffe in die Gebäudestruktur möglichst gering sein sollen und gut integrierbare Lösungen bevorzugt werden. Grundsätzliche Aussagen waren Lösungen mit geringem Eingriff wie Akustiksegel, freistehende leichte Wandverkleidungen, transparente Absorber, mikroperforierte Folien etc.

Auch wurde in diesem Zusammenhang erwähnt, dass gegebenenfalls die Möglichkeit besteht, einzelne Räume beispielhaft historisch zu belassen und dafür andere Räume für die moderne Nutzung auszustatten, wobei dann Maßnahmen mit größerem Eingriff möglich sind.

### **3.7 Wie werden Änderungen an Oberflächen beurteilt, die einen Ersatz der historischen Oberflächen darstellen, die aber optisch nicht sichtbar sind?**

Die Beurteilung solcher Maßnahmen, wie auch anderer, kann nur individuell in jedem einzelnen Objekt erfolgen. In Räumen, in denen der Raumeindruck ein wichtiges Kriterium darstellt, sind diese Art von Maßnahmen gegebenenfalls denkbar. Hierbei spielt eine Rolle, welche Aspekte des Raumes unter den Denkmalschutz fallen, d.h. ob historische Oberflächen erhalten bleiben müssen. Da die historische Bausubstanz einen hohen Stellenwert innehat, wurden solche Maßnahmen eher zurückhaltend beurteilt.

### **3.8 Wie werden veränderbare (temporäre) raumakustische Maßnahmen beurteilt und welche werden genannt?**

Grundsätzlich werden solche Maßnahmen als Möglichkeit gesehen, da sie nicht (oder nur sehr wenig) in die Bausubstanz eingreifen. In Räumen, in denen das Erscheinungsbild wichtig ist, werden solche Maßnahmen temporär eher akzeptiert als wenn sie dauerhaft angebracht werden. Als Maßnahmen werden abgehängte Stoffe, Akustiksegel, Akustik-Baffel, Stullelemente im Raum, Vorhänge, Rollos, mobile Absorbersysteme und Akustik-Möbel genannt.



### **3.9 Welche raumakustischen Möglichkeiten werden für den Denkmalschutz in Zukunft gewünscht und benötigt?**

Die Wünsche für zukünftige raumakustische Möglichkeiten orientieren sich an den oben genannten Anforderungen, nämlich, dass Materialien zum einen möglichst natürlich sein sollen und dass sie mit möglichst geringem Eingriff installiert werden können. Weiterhin sollen sich zukünftige Absorber gut in das Erscheinungsbild einfügen können. Eine weitere Nennung waren Schlitzabsorber, die eher tieffrequent hohe Wirkung aufweisen, die zu höheren Frequenzen abnimmt. Weiterhin wurden Absorber genannt, bei denen die Form leicht veränderbar ist und die damit besser an Oberflächen im Raum angepasst werden können. Ein weiteres Thema, das in diesem Zusammenhang genannt wurde, ist die Langlebigkeit und Reinigbarkeit, vor allem von Akustik-Putzen.

### **3.10 Welche raumakustischen Themen sollten in Zukunft beforscht werden?**

Eine Fragestellung, die mehrmals genannt wurde, war die Erforschung der Schallabsorption von historischen Putzen, da hierzu keine Daten vorliegen.

### **3.11 Fazit Experteninterview**

Die durchgeführten Experteninterviews konnten das Projekt sehr bereichern. In den Gesprächen wurden die Aspekte der Raumakustik von sehr verschiedenen Seiten beleuchtet und auch die unterschiedlichen Einstellungen zum Denkmalschutz wurden deutlich. Grundlegend war die Feststellung von allen befragten Personen, dass die Raumakustik und deren Wichtigkeit stark von der Nutzung der Räume abhängt und dass Lösungen dafür jeweils individuell gesucht und gefunden werden müssen. Daher war es Konsens, dass dazu Kompromisse notwendig sind, die die Anforderungen an die Nutzung und damit an die Raumakustik, an den Denkmalschutz, aber auch an andere Aspekte, wie z.B. den Brandschutz, berücksichtigen. Diese müssen von allen Beteiligten erarbeitet werden und führen daher im Idealfall zu einem optimalen Kompromiss verschiedener Ansprüche, nicht zuletzt dem des Denkmalschutzes und der Raumakustik. Die Gewichtung der einzelnen Ansprüche ist jeweils individuell zu finden und beruht auch auf der Kreativität aller Beteiligte

## 4. Reallabore

Da die Problematik der Raumakustik im Denkmalschutz konkret nur individuell für das einzelne Objekt und die darin vorgesehene Nutzung betrachtet werden kann, wurden im Forschungsprojekt neben dem Versuch, generelle Aussagen zu machen drei Reallabore ausgewählt, an denen die Vorgehensweise, Schwierigkeiten und Lösungsmöglichkeiten konkret aufgezeigt und erarbeitet werden sollen. Die betrachteten Reallabore sollten in ihrer Art, Größe und Nutzung unterschiedlich und unterschiedliche Charakteristika bezüglich des Denkmalschutzes aufweisen. Die Suche der Räume wurde durch unsere Kollegen Prof. Dr. Ralf Kilian, Leiter der Kulturerbe-Forschung und Frau Christine Milch vom Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern unterstützt. Mit deren Hilfe konnten die drei Reallabore „Forum Heimat“ im ehemaligen Meierhof des Kloster Benediktbeuern, Franz-Marc-Raum im Kloster Benediktbeuern und der große Sitzungssaal im Schloss Deichmannsau in Bad Godesberg bei Bonn gefunden werden. Die Auswahl der Räume erfolgte in Abstimmung mit dem BBSR. Unterstützt wurde die Untersuchung der Räume als Reallabore durch die im Projekt aktiven Partnerfirmen Heinz Fritz GmbH, Liaver GmbH & Co KG und MBA-Design & Display Produkt GmbH.

Die Planung im Rahmen dieses Forschungsprojekts erfolgte mit Annahmen von Absorptionsgraden für reale Bauteile und soll, soweit möglich, generalisierbare Hinweise geben, in welchem Umfang raumakustische Maßnahmen, beispielhaft anhand der Real-Labore, notwendig sind, um gute raumakustische Bedingungen zu schaffen.

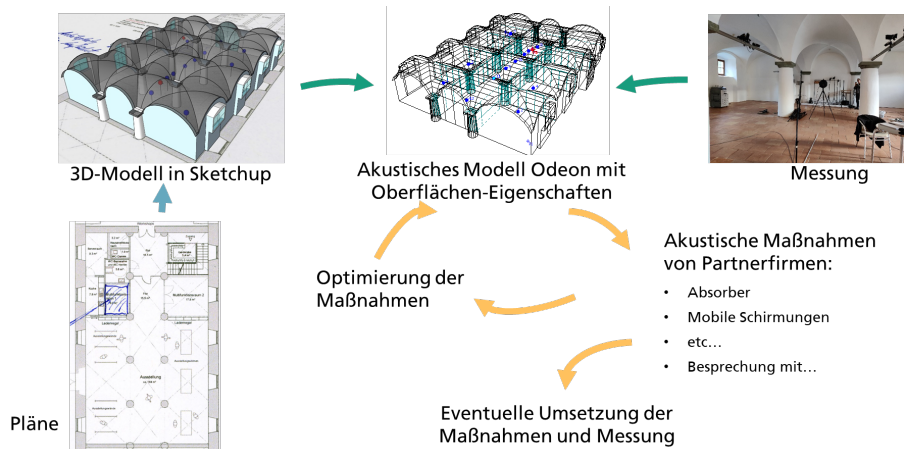
### 4.1 Vorgehensweise

Für die Analyse der raumakustischen Bedingungen und der für eine angepasste Raumakustik notwendigen Maßnahmen wurde für alle drei Reallabore folgende Vorgehensweise angewendet. Nach der Auswahl der Räume wurden Pläne (Grundrisse, Schnitte, Skizzen, Fotos) angefordert. Weiterhin wurden die Nutzenden über die gegenwärtige bzw. zukünftige Nutzung der Räume befragt. Auf Grundlage der Unterlagen wurden für jedes Reallabor ein 3D-Modell in Sketchup© erstellt, das die wesentlichen Oberflächen für eine nachfolgende Raumakustik-Simulation enthält. Dieses Modell wurde im nächsten Schritt in das Raumakustik-Simulationsprogramm Odeon© importiert und mit entsprechenden Eigenschaften der Oberflächen (Schallabsorptionsgrad und Streugrad) versehen. Dies war ausreichend, um eine Raumakustik-Simulation des jeweiligen Raumes durchzuführen. Zur Bestimmung des Ist-Zustandes jedes Raums wurden Messungen in den Räumen durchgeführt. Die verwendete Messtechnik ist in Anlage A beschrieben. Nach der Messung der Räume wurden die Raumakustik-Modelle angepasst, so dass die Annahmen mit den vorgefundenen Bedingungen abgeglichen und die ermittelten Nachhallzeiten der Modelle mit der Realität übereinstimmen. Die Anpassung erfolgte sowohl für vor Ort gefundene Abweichungen der Geometrie als auch für die Annahmen der Absorptionsgrade der Oberflächen. Dabei wurde vor allem die Nachhallzeit als bestimmende Größe gewählt.

Mit dem validierten Modell konnten nun Optimierungsmaßnahmen der Akustik durchgeführt werden mit dem Ziel optimale raumakustische Bedingungen der in den Räumen angestrebten Nutzungen zu erreichen. Dabei wurden sowohl Maßnahmen mit Produkten, die die Partnerfirmen bereitstellen können, als auch Produkte von Fremdfirmen in Betracht gezogen. Die Optimierung der Raumakustik war dabei ein iterativer Prozess, der auch berücksichtigte, welche Art von Maßnahmen in den Räumen aus denkmalschützerischer Sicht möglich bzw. für die zukünftige Nutzung der Räume geplant waren. Neben den Ansprechpartnern der Reallabore wurden auch die Partnerfirmen angesprochen, mit welchen Maßnahmen sie die Optimierung der Reallabore unterstützen können. Als letzter Schritt wurden daraus Maßnahmen identifiziert, die in zwei der drei Reallabore praktisch umgesetzt wurden. Diese beiden Reallabore konnten abschließend nochmals raumakustisch vermessen werden, um die Wirkung der umgesetzten Maßnahmen messtechnisch validieren zu können. In Bild 4 ist die Modellierung und Umsetzung am Beispiel des Forum Heimat grafisch dargestellt.

Bild 4:

Vorgehensweise zur akustischen Simulation und Umsetzung von Maßnahmen am Beispiel des Reallabors Forum Heimat.



Quelle: IBP

Im Folgenden werden die drei Reallabore beschrieben, die geplanten Nutzungsszenarien erklärt sowie die Entwicklung von Maßnahmen und Ergebnisse der Messungen dargestellt.

## 4.2 Reallabor Forum Heimat

### 4.2.1 Überblick

Das Forum Heimat ist ein größerer Raum im ehemaligen Meierhof des Kloster Benediktbeuern. Dieser ebenerdig angeordnete Raum beinhaltete zur früheren Zeit Stallungen. Der Raum weist eine Gewölbedecke mit Kreuzgewölbe auf und hat die Abmessung von ca. 18,4 m x 13,5 m x ca. 3,4 m (mittlere Raumhöhe), und damit ein Raumvolumen von ca. 834 m<sup>3</sup>. Die Gewölbedecke wird von 6 Säulen mit einem Volumen von je ca. 1,63 m<sup>3</sup> getragen. Der Raum im Zustand der ersten Messung ist in Bild 5 gezeigt.

Bild 5:

Reallabor Forum Heimat, Zustand bei der ersten Messung.



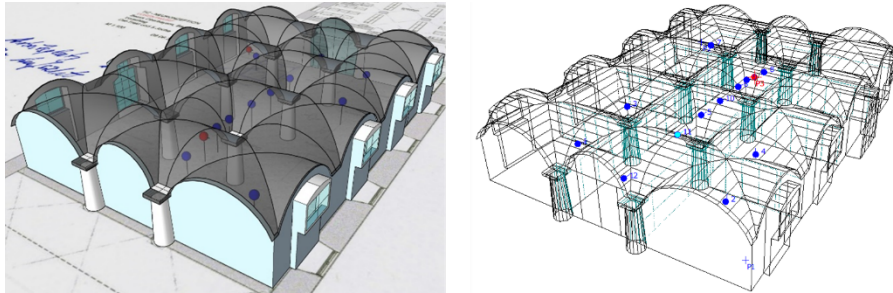
Quelle: IBP

Der Raum besitzt insgesamt sieben Fenster, die in Fensternischen untergebracht sind sowie eine verglaste zweiflügelige Tür zum Innenhof des Gebäudes. Der Raum wurde vor einigen Jahren denkmalgerecht saniert und zum Zeitraum des Projekts vorwiegend als Lagerraum verwendet, soll aber in Zukunft stärker genutzt werden. Der Raum besitzt gestrichene massive Wände, eine massive Gewölbedecke, massive Säulen und einen Fliesenboden.

#### 4.2.2 Raummodell und Bestandmessung

Basierend auf vorhandenen Plänen wurde ein 3D-Modell für die raumakustische Simulation in Sketchup erstellt. Dieses Modell wurde dann in die Raumakustik-Software Odeon importiert. Grafiken beider Modell sind in Bild 6 dargestellt.

Bild 6:  
3D-Modell des Forum Heimat in Sketchup (links) und in Odeon (rechts) für die akustische Simulation des Raumes.



Quelle: IBP

In Bild 6 sind neben den Oberflächen auch die Lautsprecherpositionen (rote Punkte) und die Mikrofonpositionen (blaue Punkte) zu erkennen, an denen Messungen und Berechnungen der Nachhallzeiten durchgeführt wurden. Die Nachhallzeiten stellen die Mittelwerte der gemessenen und simulierten Werte dar.

Am 22.09.2021 wurde die ersten Messungen in Forum Heimat durchgeführt. Der Messaufbau mit Lautsprecher an einer voraussichtlichen Rednerposition und Mikrofon an einer Position im Auditorium ist in Bild 7 dargestellt.

Bild 7:  
Messung im Forum Heimat mit Lautsprecher- und Mikrofonposition für die Nutzung »Vortrag«.

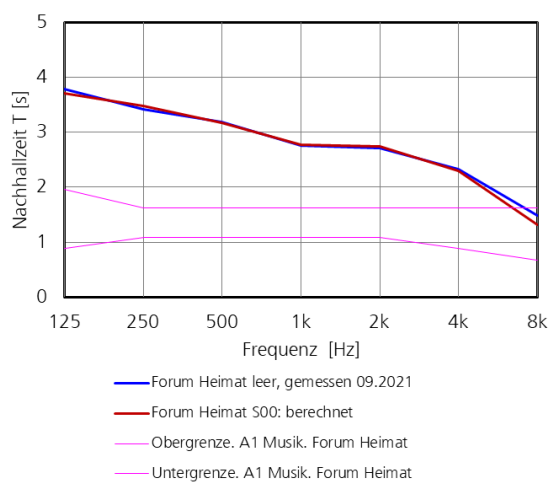


Quelle: BIP

Die akustischen Eigenschaften der bekannten Oberflächen, z.B. Fliesenboden, Leichtbauwände, Verglasung, etc. wurden aus einer Datenbank übernommen. Die Absorption der restlichen Flächen (gestrichene Massivwände, Gewölbe) wurde empirisch angepasst, damit die Nachhallzeit des Ist-Zustandes in der Simulation den Messungen entsprach. Hierbei werden kleinere Anpassungen an die Mittelwerte für diese Art von Materialien vorgenommen, die für die weiteren akustischen Berechnungen und Optimierungen beibehalten werden und die dazu führen, dass die Prognoseberechnungen genauer sind als bei ausschließlicher Verwendung von Datenbank-Werten für die entsprechenden Materialien. Die so ermittelten Nachhallzeiten sind in Bild 8 dargestellt. Zusätzlich wird der Anforderungsbereich für Musik nach DIN 18041:2016 [1] gezeigt. Die mittlere anzustrebende Nachhallzeit für Musik beträgt für diesen Raum 1,4 s, für Sprache bzw. Vortrag beträgt sie 0,9 s.

Bild 8:

Nachhallzeit im Forum Heimat wie vorhanden, Mittelwerte der Messung und der Simulation sowie obere (OG) und untere Grenze (UG) für die Darbietung von Musik nach DIN 18041 [1].



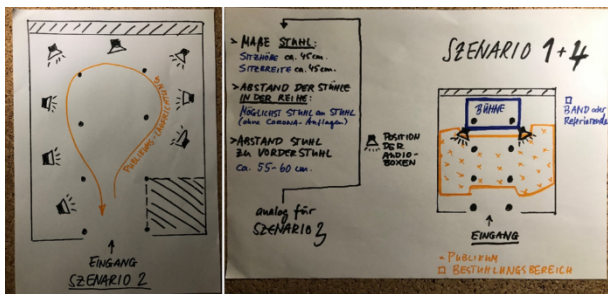
Quelle: IBP

Bild 8 zeigt die erwartete sehr gute Übereinstimmung von simulierter (Kurzbezeichnung dieser Simulation S00) und gemessener Nachhallzeit. Dabei sind insgesamt sehr lange Nachhallzeiten vorhanden, die darauf zurückzuführen sind, dass im Raum fast keine Schallabsorption vorhanden ist. Vor allem im tiefen und mittleren Frequenzbereich fehlen absorbierende Materialien, bei hohen Frequenzen reduziert sich die Nachhallzeit auch durch die Luftabsorption in diesem relativ großen Raum. Als Konsequenz ist der Raum sehr hallig und laut, und es besteht eine sehr schlechte Akustik, so dass sowohl Musik- als auch insbesondere Sprachdarbietungen nicht möglich sind.

#### 4.2.3 Nutzungsszenarien

Zur Definition der Nutzung des Raumes wurde Herr Alexander Wandinger vom Bezirk Oberbayern, Leiter des Zentrums für Trachtengewand, und seine Kollegen gebeten, die geplanten Nutzungen des Raumes anzugeben. Die Nutzungen sind in Bild 9 skizziert.

Bild 9:  
Skizze der zukünftigen Nutzungsszenarien des Forum Heimat.



Quelle: Bezirk Oberbayern

Die Skizzen in Bild 9 zeigen vier verschiedene Nutzungen des Raumes. Weiterhin ist in der linken Skizze zu sehen, dass im Eingangsbereich auf der rechten Seite eine Abtrennung des Raumes durch den Einbau von Leichtbauwänden geplant ist. Aus Gesprächen mit Herrn Wandinger ging hervor, dass auch auf der linken Seite des Raumes eine solche Abtrennung geplant ist. Hier sollen Lagerflächen bzw. Abstellmöglichkeiten geschaffen werden, die in den weiteren Betrachtungen für den Raum berücksichtigt wurden. Aus den Skizzen und Gesprächen gingen diese vier Nutzungsszenarien hervor:

- Szenario 1 – Band Kontext
  - Musik mit elektroakustischer Verstärkung
  - 50 – 100 Personen im Publikum
  - Raumakustische Anforderung DIN 18041: Sprache, Nutzungsart A2 oder A3
- Szenario 2 – Ausstellungskonzept
  - Wiedergabe von Tonträgern oder Sprachinformation
  - 20 – 40 Personen als Wanderpublikum im Raum
  - Anforderung DIN 18041: Sprache A2 oder A3
- Szenario 3 – Volksmusikonzert, Sprecher und Gesang
  - 100+ Personen im Publikum
  - Anforderung DIN 18041: Musik ohne elektroakustischer Verstärkung: A1
- Szenario 4 – Wissenschaftlicher Vortrag, Sprache
  - 50 – 100 Personen im Publikum
  - Anforderung DIN 18041: Sprache A2 besser A3

Aus akustischer Sicht können diese vier Nutzungsszenarien zu zwei Kategorien zusammengefasst werden, nämlich K1 für Szenario 3, Livemusik ohne elektrische Verstärkung (Nutzungsart A1, längere Nachhallzeit), und K2 für Szenario 1 (Musik mit elektroakustischer Verstärkung), Szenario 2 Sprache und Szenario 4 Vortrag bzw. Sprache (kürzere Nachhallzeit). Als Anforderung wird hier Nutzungsart A2 zugrunde gelegt.

#### 4.2.4 Mögliche akustischen Maßnahmen

Die Raumbedingungen im Forum Heimat sind aus raumakustischer Sicht sehr herausfordernd. Da keine absorbierenden Materialien vorhanden sind, ist die Nachhallzeit im Ausgangszustand zwischen 3 und 4s sehr lang. Die Ausgestaltung des Raumes legt jedoch keine absorbierenden Maßnahmen an den Raumbooberflächen nahe, die mit den Anforderungen an den Denkmalschutz direkt kompatibel sind. Daher wurden für den Raum nach einer Besprechung mit den Nutzenden folgende Maßnahmen für die akustische Optimierung definiert:

### Mögliche Einbau-Maßnahmen

- Absorber in Nischen unter den Fenstern (18503)
- Absorber an Kabinenwänden (17250)
- Absorber über Vitrinen (17250)

Die Nummern in den Klammern dienen in der folgenden Grafik der Zuordnung der jeweiligen Absorber. Hierbei gilt anzumerken, dass für den Raum geplant ist, im Eingangsbereich auf der linken und der rechten Seite zwei Kabinen einzubauen, die als Stauraum für die Nutzung des Raumes vorgesehen sind, und die mit Absorbern (an den Kabinenwänden) belegt werden können. Weiterhin ist eine Vitrine im hinteren Raumbereich vorgesehen, über der weitere Absorber angebracht werden können. Die möglichen Einbauten, die zu einem späteren Zeitpunkt umgesetzt werden sollen, sind in Bild 10 dargestellt. Da mit diesen Maßnahmen noch keine ausreichende absorbierende Fläche im Raum vorhanden ist wurden folgende weitere Maßnahmen vorgesehen.

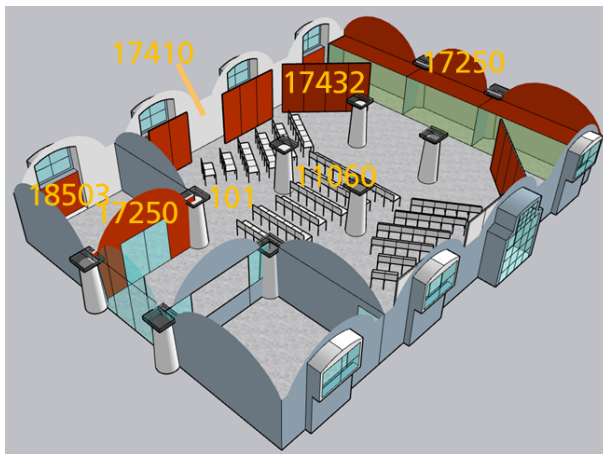
### Mobile Maßnahmen

- Absorbierende Stellwände (einseitig absorbierend mit der Nummer 17432, oder reflektierende Seite zum Raum hin ausgerichtet mit der Nummer 348 in Bild 11)
- Publikum sowie Stühle (11060)
- Mikroperforierte Absorber aus transparentem Plexiglas

In Bild 10 sind die verschiedenen geplanten Maßnahmen für das Forum Heimat dargestellt. Dabei sind die verschiedenen Oberflächen, die z.T. als Absorber dienen, bevorzugt rot dargestellt und über die Nummern zu identifizieren.

Bild 10:

Überblick der akustischen Maßnahmen (die Nummerierung bezeichnet Oberflächen, deren Absorptionsgrade in Bild 11 dargestellt sind) im Forum Heimat, für den geplanten Ausbau des Raumes mit zwei Kabinen (links und rechts vorne) sowie der Vitrine an der Stirnseite.

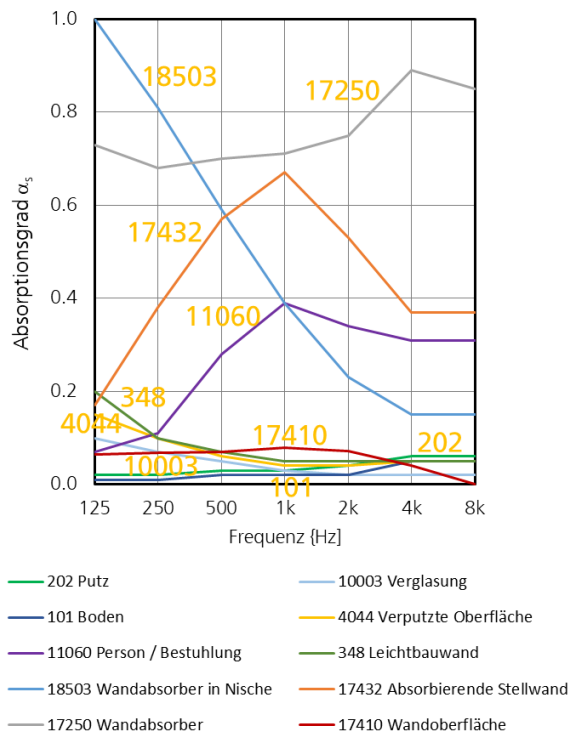


Quelle: IBP

Die Absorptionsgrade der Oberflächen bzw. der akustischen Maßnahmen, die in der Raumakustik-Simulation des Raumes verwendet wurden, sind in Bild 11 dargestellt. In Bild 12 ist die Anordnung der einzelnen Absorber im Raum dargestellt, die Zuordnung kann über die angegebenen Nummerierungen in Bild 11 und Bild 12 erfolgen.

Bild 11:

Überblick über die Absorptionsgrade der in der Odeon-Simulation (S154 in Bild 14) des Raumes verwendeten Materialien.



Quelle: IBP

Bild 12:

Rendering mit Blick in das Raumakustik-Modell mit Bezeichnung einzelner für die Raumakustik-Simulation des Raumes relevanter Oberflächen (Bedeutung der Nummerierung siehe Bild 11).



Quelle: IBP

Für die Simulation des Nutzungs-Szenarium K1 mit längerer Nachhallzeit wurde folgende Oberflächen mit absorbierenden Materialien vorgesehen:

#### Einbau-Maßnahmen (S0)

- Absorber in Nischen unter den Fenstern (18503): ca. 22 m<sup>2</sup>



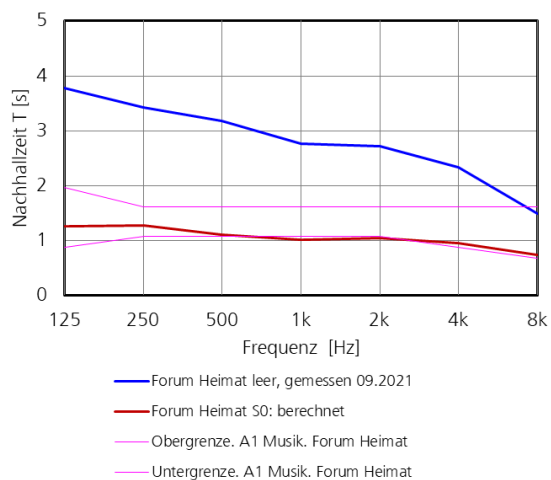
- Absorber an Kabinenwänden und Absorber über Vitrinen (17250): ca. 61 m<sup>2</sup>
- Mobile Maßnahmen

- Absorbierende Stellwände (17432): nicht vorhanden
- Publikum/Stühle (11060): 95 Stück

Wird mit dieser Anzahl an Absorbern die Nachhallzeit im Raum Forum Heimat simuliert, so ergibt sich die Nachhallzeit, die in Bild 13 dargestellt ist.

Bild 13:

Gemessene und berechnete Nachhallzeit für das Nutzer-Szenario K1 (längere Nachhallzeit) sowie Grenzen der Nachhallzeit nach DIN 18041 Nutzungsart A1 (Musik).



Quelle: IBP

Die berechnete Nachhallzeit zeigt mit einer Belegung des Raumes mit 95 Stühlen/Personen eine Nachhallzeit, die an der Untergrenze für Musik bei ca. 1 s liegt. Bei reduzierter Zuschaueranzahl von ca. 40 Stühlen/Personen, d.h. bei einer geringeren Belegung, ergibt sich eine etwas längere Nachhallzeit, die zwischen der oberen und unteren Grenze nach DIN 18041 [1] liegt.

Für das Nutzer-Szenarium K2 für Sprache, mit einer kürzeren Nachhallzeit, ist eine größere Anzahl oder Fläche von Schallabsorbern als für K1 notwendig. Folgende Maßnahmen wurden hierfür vorgesehen:

#### Einbau-Maßnahmen

- Absorber in Nischen unter den Fenstern (18503): ca. 22 m<sup>2</sup>
- Absorber an Kabinenwänden und Absorber über Vitrinen (17250): ca. 61 m<sup>2</sup>

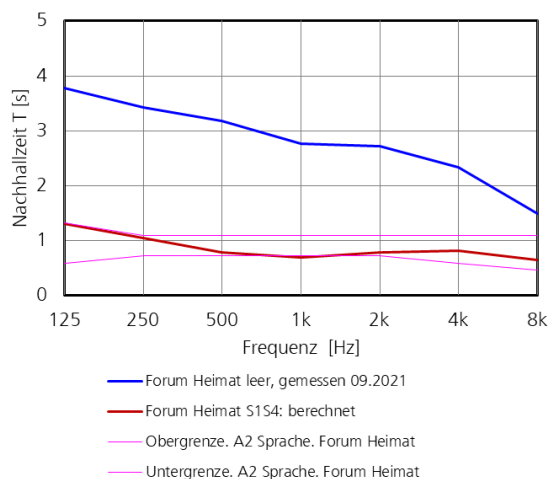
### Mobile Maßnahmen (S1S4)

- Absorbierende Stellwände: 24 Stück (Größe: 1 m x 2,5 m einseitig absorbierend mit der Materialnummer 17432, ca. 60 m<sup>2</sup>, reflektierende Seite mit der Materialnummer 348, s. Bild 11)
- Publikum/Stühle (11060): 95 Stück

Da keine weiteren Wand- oder Deckenoberflächen für schallabsorbierende Maßnahmen zur Verfügung standen, wurden nun absorbierende Stellwände verwendet, die vor den Außenwänden des Raumes aufgestellt wurden. (Anzumerken ist hierbei, dass die Anzahl von 24 Stück Stellwände sehr viele Stellwände bedeutet, die im Raum aufgestellt werden müssen). Die mit diesen Maßnahmen berechnete Nachhallzeit ist in Bild 14 dargestellt.

Bild 14:

Gemessene und berechnete Nachhallzeit für das Nutzer-Szenario K2 (kürzere Nachhallzeit) sowie Grenzen der Nachhallzeit nach DIN 18041 Nutzungsart A2 (Sprache).



Quelle: IBP

Die simulierte Nachhallzeit liegt nun für das angestrebte Nutzer-Szenario K2 im Bereich der Nutzungsart A2 nach DIN 18041 [1]. Die Simulation zeigt, dass eine Nutzung des Raumes für Sprachdarbietungen möglich ist, jedoch ein erheblicher Aufwand an Absorbern, d.h. in den Nischen, an den Kabinenwänden und dem Bereich über der geplanten Vitrine, sowie 24 einseitig absorbierende Stellwände und eine große Anzahl an Publikum/Stühle notwendig ist, um solch kurze Nachhallzeiten zu realisieren.

Als erster Ansatz der raumakustischen Gestaltung des Forum Heimat wurde die Idee verfolgt, die Stellwände flexibel zu gestalten, wobei eine Seite (Oberfläche) der Stellwände absorbierend und die andere Seite reflektierend ausgeführt werden. In der Anwendung sollen für Live-Musik-Aufführungen ohne elektroakustische Verstärkung die reflektierenden Seiten der Stellwände zum Raum hin (zum Zuhörer bzw. Musiker) aufgestellt werden, damit die Nachhallzeit sich verlängert und sich damit mehr nutzbare Reflektionen zu den Zuhörern ergeben. Bei der Sprachanwendung sollen die absorbierenden Seiten zum Raum bzw. den Zuhörern ausgerichtet sein, um die Sprachverständlichkeit zu verbessern. Weiterhin sollen diese variablen Absorber für verschiedene Nutzungsszenarien beliebig aufgestellt werden können, damit eine subjektiv optimale Wirkung erzielt werden kann. Deshalb wurden zunächst einseitig absorbierende Stellwände (mit verschiedenen Absorptionsgraden der beiden Oberflächen) in den ersten Berechnungen für das Forum Heimat verwendet.

Weiterhin haben die Stellwände, Wandabsorber an den Kabinen und über den Vitrinen mehr Absorption bei hohen Frequenzen als bei tiefen. Daher wurde in den Berechnungen die Flächen in den Nischen unter den

Fenstern mit generischen Tiefton-Absorbern (Nummer 18503 in Bild 11, ähnlich zu [14] oder [1]) belegt, um die Nachhallzeit bei tieferen Frequenzen zu reduzieren.

Die Simulationen zeigten aber, dass mit reflektierenden Seiten zum Raum hin ausgerichteten Stellwände die Nachhallzeit in Forum Heimat nicht verlängert wurden. Deshalb wurde später entschieden, bei den Vor-Ort-Untersuchungen beidseitig absorbierende Stellwände zu verwenden. Der Nutzer kann dennoch mit der Anzahl von Stellwände und der Art der Aufstellung die Akustik für die verschiedenen Szenarien anpassen und optimieren. Die Flächen in den Nischen wurden in den späteren Vor-Ort-Untersuchungen mit breitbandig wirkenden Absorbern (Reapor® mit Luftabstand), die vom Projektpartner zur Verfügung gestellt wurden, ausgekleidet.

Für die beiden weiteren Reallabore wurden beidseitig absorbierende Stellwände in der Planung vorgesehen.

#### 4.2.5 Fazit Planung Forum Heimat

Für das Forum Heimat wurden zwei Nutzungsszenarien identifiziert, Live Musik ohne elektroakustische Verstärkung mit etwas längerer Nachhallzeit (K1) und Sprache, Vortrag, Musik mit elektroakustischer Verstärkung etc. mit kürzerer Nachhallzeit (K2). Für zukünftige raumakustische Maßnahmen wurde die Planung aufgegriffen, bei der zwei Kabinen und eine Vitrine im Raum vorgesehen sind. Für fest eingebaute Absorber wurde vorgeschlagen, die Nischen unter den Fenstern, die Kabinenwände und die Wand über der Vitrine mit generischen breitbandig wirkenden Wandabsorbern (Nummer 17250 in Bild 11, z.B. [1]) auszustatten. Mit einer Belegung des Raumes mit 47 Personen / Bestuhlung kann die Anforderung an die Nachhallzeit nach Nutzungsart A1 der DIN 18041 (für K1) eingehalten werden. Mehr Personen oder absorbierende Bestuhlung führt zu etwas kürzeren Nachhallzeiten.

Für das Szenario K2 mit kürzerer Nachhallzeit werden zusätzlich 24 weitere Stellwände (angenommene Abmessung 1 m x 2,5 m, einseitig absorbierend) benötigt. Diese Stellwände sollten für bessere Absorption bei tiefen Frequenzen bevorzugt vor den Wänden des Raumes aufgestellt werden, wie die Vorort-Untersuchungen in 4.2.6 gezeigt haben.

Die konkrete Ausstattung, d.h. die Anzahl und Position der absorbierenden Bauteile kann für die verschiedenen Nutzungen in der Praxis von den Nutzenden selbst eingestellt und optimiert werden. Bei der Ausführung der Einbauten müssen die Absorptionsgrade dieser Bauteile überprüft werden, wenn die Anforderung der Norm erfüllt werden soll.

Die hier erfolgte Planung der Raumakustik basiert auf Annahmen, die bei einer möglichen konkreten Umsetzung überprüft und gegebenenfalls angepasst werden müssen.

#### 4.2.6 Vorort Untersuchung der Maßnahmen

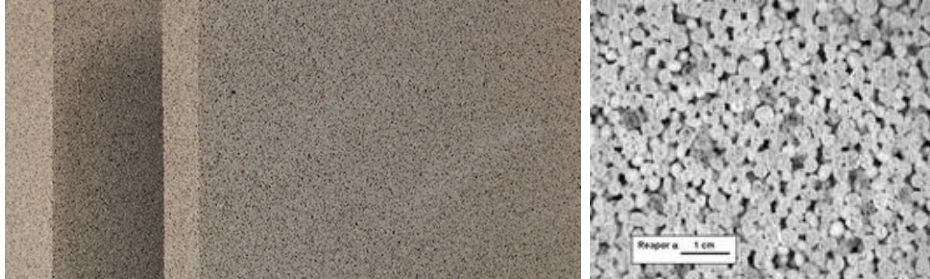
In Kooperation mit den Projektpartnern wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Raumakustik in den Reallaboren thematisiert und wie diese beispielhaft umgesetzt werden können. Alle drei Projektpartner hatten hierzu Ideen und waren in der Lage, Absorber vorzubereiten und für Vorort-Untersuchungen zur Verfügung zu stellen. Für das Forum Heimat konnten drei Maßnahmen vorgesehen werden.

Die erste Maßnahme war die Lieferung und der Einbau von Schallabsorbern aus gesintertem Glasschaum, bestehend aus ca. 48 mm dickem Reapor® der Fa. Liaver. Für den Einbau dieser Absorber wurden im Forum Heimat die Nischen unterhalb der Fenster vorgesehen. Dieser Wandbereich war aus Sicht der Raumnutzung und unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes die einzige Wandoberfläche, bei der sich der Nutzer den Einbau von Schallabsorbern vorstellen konnte. In diesen Nischenbereich sind zur Zeit Elektroinstallationen und auch Wartungsöffnungen für die Fußbodenheizung angebracht, so dass die Verkleidung der Nischen nur provisorisch möglich war. Jedoch ergab sich durch die individuell unterschiedliche Tiefe der Nischen die Möglichkeit, Die Absorber mittels einer Unterkonstruktion aus Holz mit einen Abstand von ca. 80 mm

einzubauen, was die Schallabsorption der porösen Absorber weiter zu tiefen Frequenzen verschob. In Bild 15 ist der Schallabsorber Reapor® dargestellt.

Bild 15:

Fotos von Reapor®, links gesinterte Glasschaumplatte, rechts mikroskopische Aufnahme der Oberfläche.



Quelle: Liaver, <http://www.liaver.com/reapor/reapor-absorberplatte/>

In Bild 16 ist der eingebaute Schallabsorber in einer Wandnische unterhalb eines Fensters gezeigt.

Bild 16:

Foto des Reapor®-Absorbers, eingebaut in einer Wandnische unterhalb eines Fensters im Forum Heimat.



Quelle: IBP

In Bild 16 ist zu erkennen, dass der Einbau der Absorber individuell an die Gegebenheiten der Wandnische erfolgte. Die Absorber sind rückerseitig durch eine Unterkonstruktion mit einem Abstand von ca. 80 mm zur rückerseitigen Wand eingebaut. Die Konstruktion weist eine aus Reapor® gefertigte Deckplatte auf, so dass die Unterkonstruktion nicht sichtbar ist.

Die zweite Maßnahme war die Bereitstellung und Verwendung von schallabsorbierenden Stellwänden der Firma MBA. Stellwände sind eine mobile Maßnahme, können temporär eingesetzt und flexible platziert werden, wobei keinerlei Befestigung oder ähnliches an den Raumbooberflächen notwendig ist. Damit stellen sie eine Maßnahme dar, die in jedem denkmalgeschützten Raum möglich ist. Der Einsatz dieser Stellwände ist in allen drei Reallaboren möglich und wurde in zwei der drei Reallabore praktisch umgesetzt. Eine weitere positive Eigenschaft der verwendeten Stellwände besteht darin, dass die Oberfläche aus mikroperforierter Folie besteht, die bedruckt werden kann. Damit ist es theoretisch möglich, die Stellwände mit einem Abbild der Wand zu bedrucken, vor der sie aufgestellt werden soll. Wird diese Vorgehensweise umgesetzt, verändern die Stellwände den Raumeindruck nur geringfügig, so dass dieser auch beim Einsatz der Stellwände erhalten bleibt. Dies wäre z.B. eine Möglichkeit für das dritte Reallabor, den großen Sitzungssaal im Schloss Deichmannsaue.

Die beidseitig absorbierenden Stellwände von MBA hatten eine Breite von 1,0 m, eine Höhe von 2,5 m und eine Dicke von 0,05 m. Die Stellwände waren mit einer weißen mikroperforierten Folie beschichtet.

Bild 17:

Beidseitig absorbierende Stellwand von MBA im Forum Heimat. Beispielhafte Aufstellung im Eingangsbereich.



Quelle: IBP

Die dritte Maßnahme war die Herstellung eines angepassten absorbierenden Bauteils, das speziell für das Forum Heimat hergestellt wurde. Dabei handelte es sich um einen mikroperforierten transparenten Plexiglas-Absorber der Firma Heinz Fritz GmbH. Die Idee dabei war, die Oberfläche der Säulen im Forum Heimat als Schallabsorber zu nutzen, ohne diese optisch zu verdecken. Beispielhaft wurde hierzu eine der Säulen mit einem Zylinder aus mikroperforiertem Plexiglas eingefasst. Der Zylinder besaß einen Außendurchmesser von 875 mm und eine Höhe von 2,0 m, und war zweigeteilt, so dass er im Raum selbststehend eingesetzt werden konnte. Das Plexiglas hatte eine Wandungsdicke von 6 mm und besaß eine Lochung von 0,8 mm in einem quadratischen Raster von 5 mm x 5 mm. Damit ergaben sich 40.000 Löcher pro m<sup>2</sup> und ein Lochflächenanteil von 2 %. Der mittlere Abstand des Zylinders von der Säule lag bei ca. 100 mm und eine maximale Schallabsorption des mikroperforierten Absorbers bei mittleren Frequenzen um ca. 500 Hz. Der Einsatz von mikroperforierten Plexiglas-Absorbern hat insbesondere in denkmalgeschützten Gebäuden große Vorteile, da sie als transparente Verkleidung eingesetzt werden können. So lassen sich z.B. historisch wertvolle Fresken mit einer Plexiglasverkleidung ausstatten, so dass die dahinterliegende Oberfläche weiterhin betrachtet werden kann, jedoch vor Zugriff geschützt ist. Wenn mikroperforiert, ist die Oberfläche raumakustisch wirksam. Der Absorber stellt dabei einen Resonator dar, bei dem das Absorptionsverhalten gut prognostiziert und eingestellt werden kann. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind die Materialdicke, der Wandabstand und die Ausgestaltung der Lochung. Auch Fensterscheiben können mit dieser Verkleidung versehen und zu Schallabsorbern ausgestaltet werden, wenn dies notwendig ist.

Fotos des schallabsorbierenden Zylinders sind in Bild 18 dargestellt. Die Verkleidung der Säule aus zwei Plexiglas-Halbschalen war selbststehend und wurde lediglich mit etwas Klebeband verbunden.

Bild 18:

Schallabsorbierende mikroperforierte zylindrische Verkleidung einer Säule des Forum Heimat als angepasster Schallabsorber. Links bei der Produktion, rechts als Säulenverkleidung im Forum Heimat.



Quelle: Heinz Fritz GmbH, IBP

Zu einem gemeinsamen Messtermin wurden die Reapor®-Absorber provisorisch in den Wandnischen installiert und die Stellwände sowie die zylindrische Verkleidung der Säule nach Benediktbeuern zum Reallabor Forum Heimat geliefert. In diesem Raum waren damit Messungen der Nachhallzeit möglich, aus denen die vor Ort wirksame Schallabsorption der verschiedenen Schallabsorber ermittelt werden konnte. Die Ergebnisse sollten die Simulation der geplanten Maßnahmen absichern, jedoch auch den Einfluss des Raumes und der vor Ort vorhandenen Randbedingungen auf die Nachhallzeiten und die Raumakustik dokumentieren.

#### 4.2.7 Nachhallzeit bei Einsatz der verschiedenen raumakustischen Maßnahmen

Für den Raum Forum Heimat konnte eine Ausgangsmessung ohne die in den Wandnischen eingebauten Absorber nicht durchgeführt werden, da diese zum Zeitpunkt der Messungen schon installiert waren. Daher wurde die Nachhallzeit aus dem leeren Raum aus der ersten Messung vom 22.09.2021 herangezogen. Lediglich bei 125 Hz wurde die Nachhallzeit an die Messung mit Reapor®-Absorbern durch eine vorab durchgeführte orientierende Messung durch Fa. Laver angepasst, so dass auch bei diesen tiefen Frequenzen konsistente Ergebnisse vorliegen. Dies war notwendig, da die Anzahl der Objekte im Raum (Stühle, Tische etc.) und damit die Schallabsorption bei den Messungen im September 2021 und Mai 2022 insbesondere bei den tiefen Frequenzen unterschiedlich waren. Der Raum im Zustand der Messung ist in Bild 19 gezeigt. Die Nachhallzeit des leeren Raumes, die als Referenzmessung für die Wirkung der Nischenauskleidung aus Reapor® dient, ist in Bild 20 dargestellt.

Bild 19:

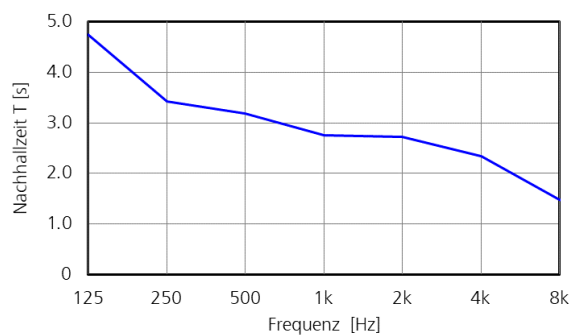
Foto des Forum Heimat in Benediktbeuern.



Quelle: IBP

Bild 20:

Nachhallzeit des leeren Raums Forum Heimat in Benediktbeuern mit Anpassung bei 125 Hz.



— Forum Heimat leer, gemessen 09.2021, 125 Hz angepasst

Quelle: IBP

Als erster Schritt wurde die Nachhallzeit des leeren Raumes, der mit einer Fläche von 22 m<sup>2</sup> Schallabsorbern in den Wandnischen ausgestattet war, untersucht. Die Absorber in den Nischen sind in Bild 21 zu sehen. Die folgenden Messungen im Forum Heimat wurden am 23.05.2022 durchgeführt. Mit den Schallabsorbern in den Nischen unter den Fenstern ergab sich die gemittelte frequenzabhängige Nachhallzeit, die in Bild 22 dargestellt ist.

Bild 21:

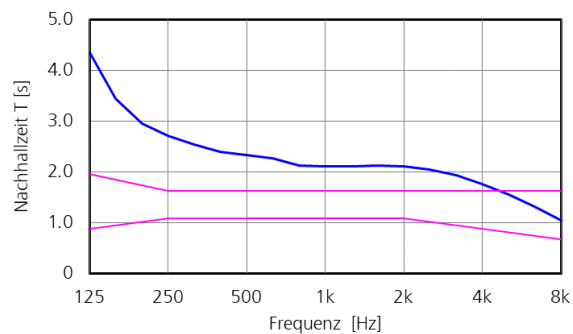
Bild der im Forum Heimat installierten Absorbern in den 7 Wandnischen unter den Fenstern.



Quelle: IBP

Bild 22:

Nachhallzeit im Forum Heimat bei installierten Absorbern in den 7 Wandnischen unter den Fenstern.



- Forum Heimat, gemessen 05.2022 mit Wandabsorbern
- Obergrenze. A1 Musik. Forum Heimat
- Untergrenze. A1 Musik. Forum Heimat

Quelle: IBP

Die Messung zeigt im gesamten Frequenzbereich eine Reduktion der Nachhallzeit, im mittleren Frequenzbereich verringert sich die Nachhallzeit von ca. 3 auf 2 s (Ein direkter Vergleich der Nachhallzeiten ist in Bild 29 gezeigt). Eine Abschätzung der Absorptionsgrade der untersuchten Schallabsorber im praktisch eingebauten Zustand im Forum Heimat erfolgt im Abschnitt 4.2.8.

Als nächster Schritt wurde im Forum Heimat zusätzlich die zylindrische mikroperforierte Verkleidung einer Säule eingebaut, dargestellt in Bild 23. Damit ergab sich die in Bild 24 aufgetragenen Nachhallzeiten.



Bild 23:

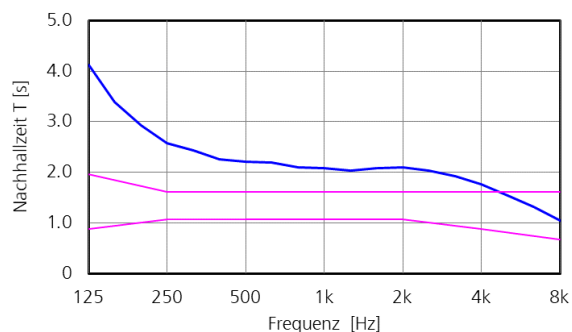
Poröse Absorber installiert in den 7 Wandnischen unter den Fenstern und mikroperforierte Absorber als Säulenverkleidung.



Quelle: IBP

Bild 24:

Nachhallzeit im Forum Heimat bei installierten Absorbern in den 7 Wandnischen unter den Fenstern und der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung.



— Forum Heimat, gemessen 05.2022 mit Wand- und Säulenabsorbern

— Obergrenze. A1 Musik. Forum Heimat

— Untergrenze. A1 Musik. Forum Heimat

Quelle: IBP

Die Messung zeigt vor allem im mittleren Frequenzbereich um 500 Hz eine Reduktion der Nachhallzeit (Vergleich in Bild 29). Die Säulenverkleidung weist im Gegensatz zu den anderen Absorbern lediglich eine Oberfläche von ca. 5,5 m<sup>2</sup> auf, so dass die Wirkung einer Säulenverkleidung relativ gering ausfällt. Theoretisch wäre es jedoch denkbar, dass mehrere der Säulen mit dieser Art Absorber ausgekleidet werden.

Als letzter Schritt wurden nun im Raum zusätzlich 24 beidseitig absorbierende Stellwände von MBA aufgebaut. Hiermit wurde natürlich eine große absorbierende Oberfläche eingebracht, da die Stellwände beidseitig absorbierend ausgestattet sind. Insgesamt wurde damit 120 m<sup>2</sup> absorbierende Oberfläche im Raum hinzugefügt.

Um die Wirkung der Aufstellung der Stellwände näher zu untersuchen wurde die Messung mit zwei verschiedenen Aufstellungen der Stellwände durchgeführt. Zunächst wurden die Stellwände im Raum verteilt aufgestellt. Dabei ergeben die Stellwände eine gewisse Strukturierung des Raumes und könnten so bei einer Ausstellung platziert werden. Die Anordnung der Absorber ist in Bild 25 gezeigt, die gemessene Nachhallzeit ist in Bild 26 niedergelegt (gelbe Kurve in Bild 29).

Bild 25:

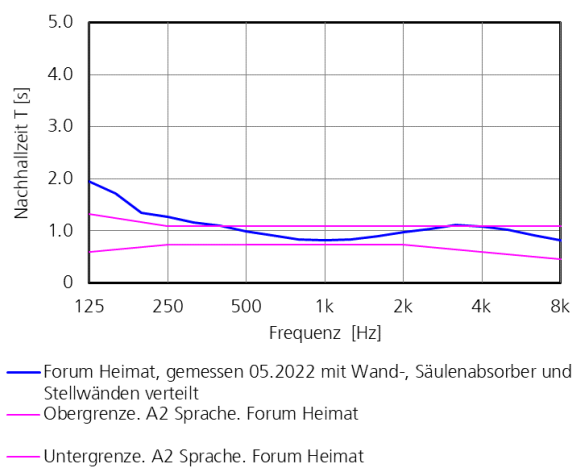
Anordnung der installierten Absorber in den 7 Wandnischen, der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung und den 24 Stellwänden, die im Raum verteilt aufgestellt waren.



Quelle: IBP

Bild 26:

Nachhallzeit im Forum Heimat bei installierten Absorber in den 7 Wandnischen, der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung und den 24 Stellwänden, die im Raum verteilt aufgestellt waren.



Quelle: IBP

Der Einsatz der zusätzlichen 24 Stellwände mit im Raum verteilter Aufstellung zeigt eine deutliche Reduktion der Nachhallzeiten im gesamten Frequenzbereich und ab ca. 400 Hz das Erreichen des Toleranzbereichs der Nachhallzeit für die Nutzungsart A2. Bei tieferen Frequenzen ist die Nachhallzeit noch etwas zu lang und erreicht bei 125 Hz Werte von knapp 2 s.

Bei der zweiten Aufstellung wurden die Stellwände in einen Abstand von ca. 0,6 m vor den Außenwänden des Raumes verteilt. Diese Aufstellung ist in Bild 27 gezeigt, die gemessene Nachhallzeit ist in Bild 28 dargestellt (graue Kurve in Bild 29).

Bild 27:

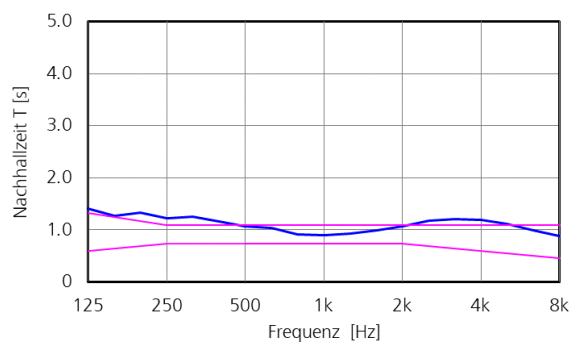
Foto des Forum Heimat mit installierten Absorbern in den 7 Wandnischen, der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung und den 24 Stellwänden, die vor den Wänden des Raumes stehend aufgestellt waren.



Quelle: IBP

Bild 28:

Nachhallzeit im Forum Heimat bei installierten Absorbern in den 7 Wandnischen, der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung und den 24 Stellwänden, die vor den Wänden des Raumes stehend aufgestellt waren.



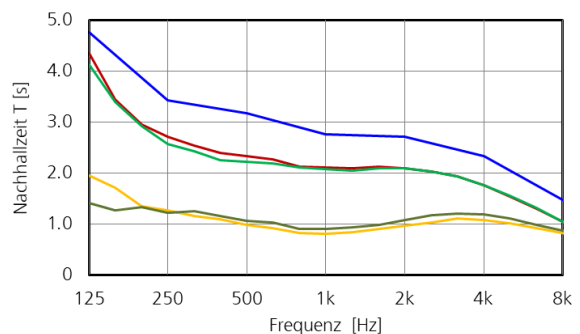
- Forum Heimat, gemessen 05.2022 mit Wand-, Säulenabsorbern und Stellwänden vor Wänden
- Obergrenze. A2 Sprache. Forum Heimat
- Untergrenze. A2 Sprache. Forum Heimat

Quelle: IBP

Die Messungen mit allen drei Raumakustik-Maßnahmen zeigen bei dieser Aufstellung der Stellwände eine sehr gleichmäßige Nachhallzeit, die bei 125 Hz ca. bei 1,3 s und bei mittleren Frequenzen nahe 1 s liegt. Auch bei hohen Frequenzen stellt sich eine Nachhallzeit von ca. 1 s ein.

Bild 29:

Zusammenstellung aller Nachhallzeiten in der Vorort Untersuchung in Forum Heimat.



- Forum Heimat leer, gemessen 09.2021, 125 Hz angepasst
- Forum Heimat, gemessen 05.2022 mit Wandabsorbern
- Forum Heimat, gemessen 05.2022 mit Wand- und Säulenabsorbern
- Forum Heimat, gemessen 05.2022 mit Wand-, Säulenabsorber und Stellwänden verteilt
- Forum Heimat, gemessen 05.2022 mit Wand-, Säulenabsorbern und Stellwänden vor Wänden

Quelle: IBP

Der Vergleich der Messwerte der verschiedenen Absorber-Maßnahmen ist in Bild 29 gezeigt. Die relativ geringe Wirkung des Säulenabsorbers ist darauf zurückzuführen, dass bei der Messung nur ein Säulenabsorber verwendet wurde und damit die Änderung der äquivalenten Absorptionsfläche im Raum recht gering ist. Sollte diese Maßnahme in der Umsetzung vorgenommen werden, so würden in der Regel alle Säulen im Raum damit ausgestattet werden, so dass die Wirkung entsprechend größer wäre. Der direkte Vergleich der Messungen mit Stellwänden zeigt deutlich, dass die Aufstellung vor den Wänden zu einer deutlich erhöhten Absorption bei tiefen Frequenzen führt, so dass die Nachhallzeit sehr gleichmäßig ausfällt.

Die subjektive Bewertung der Raumakustik im Raum war durch den Einsatz der Absorber sehr positiv. Durch den Einsatz der verwendeten Schallabsorber konnten Bedingungen im Raum geschaffen werden, die sowohl für Musik als auch für Sprache geeignet sind und den Nutzenden des Raumes einen Eindruck vermittelten, wie eine gute Akustik im Raum wirkt. Bei dem geplanten Ausbau des Raumes mit zwei Kabinen und mit Vitrinen sowie mit den Wandabsorbern wird das Volumen reduziert und die Absorberfläche durch die Einbauten erhöht. Deshalb werden dann wenige Stellwände für das Erreichen der Anforderungen für Musik bzw. Sprache benötigt.

#### 4.2.8 Berechnung der Absorptionsgrade in Anlehnung an DIN EN ISO 354

Die in den Reallaboren eingesetzten Schallabsorber waren beim Reapor®-Absorber und auch bei der mikroperforierten Plexiglas-Säulenverkleidung individuell angepasste Absorber, die so nicht im Hallraum zu messen sind. Auch die Aufstellung der Stellwände hat einen gewissen Einfluss auf die akustische Wirksamkeit der Stellwände. Daher wurde aus den Messungen der Nachhallzeiten die effektiven Absorptionsgrade der Absorber bzw. der Anordnungen im Reallabor ermitteln. Dies geschah in Anlehnung an DIN EN ISO 354 [18].

Die Vorort bestimmten effektive Absorptionsgrade  $a_{S_E}$  der Absorber bzw. Anordnungen ergab sich nach

$$a_{S_E} = \frac{A_{T_E}}{S}, \quad (2)$$

Mit  $A_{T_E}$  der äquivalenten Absorptionsfläche des Absorbers in  $\text{m}^2$  und  $S$  der Absorberoberfläche. Diese ergibt sich aus der Differenz der äquivalenten Absorptionsfläche  $A_{T_{mit}}$  in  $\text{m}^2$  bei Messung mit dem entsprechenden

Absorber, und der ermittelten äquivalenten Absorptionsfläche bei Messung ohne den entsprechenden Absorber  $A_{T_{ohne}}$ , in  $m^2$ . Damit ergibt sich :

$$A_{T_E} = A_{T_{mit}} - A_{T_{ohne}} \quad (3)$$

Die Größen  $A_{T_{mit}}$  und  $A_{T_{ohne}}$  ergeben sich aus dem Raumvolumen  $V$  in  $m^3$  und der gemessenen Nachhallzeit  $T$  in s ohne Berücksichtigung der Luftabsorption nach

$$A_{T_{mit}} = \frac{0.161V}{T_{mit}}, \quad (4)$$

und

$$A_{T_{ohne}} = \frac{0.161V}{T_{ohne}} \quad (5)$$

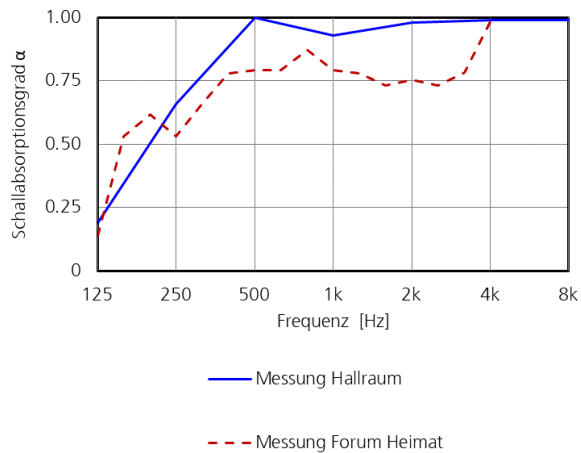
Dabei sind  $T_{mit}$  und  $T_{ohne}$  die Nachhallzeiten mit und ohne der entsprechenden Absorbern. Der Einfluss der Luftabsorption wurde bei der Auswertung vernachlässigt.

### Absorptionsgrade für Reapor®

Der Einbau der Absorber in den Wandnischen des Forum Heimat ist z.B. in Bild 21 zu sehen. Dabei waren die Absorber auf einer Unterkonstruktion aus Holz aufgebracht und mit einem Abstand von ca. 80 mm zur Rückwand platziert. Der Vorort ermittelte Schallabsorptionsgrad, im Vergleich zum Absorptionsgrad des Materials, der im Hallraum ohne Rückvolumen bestimmt wurde, ist in Bild 30 dargestellt. Der Vergleich dieser beiden Messungen zeigt, dass der Aufbau aus Reapor® im Reallabor tieffrequent bei 160 und 200 Hz etwas höhere Absorptionsgrade aufweist, was voraussichtlich auf den Luftabstand des Absorbers zur Rückwand hindeutet. Im mittleren Frequenzbereich von 500 Hz und aufwärts zeigt die Messung im Reallabor mit Werten um 0,75 etwas geringere Absorptionsgrade als die Messwerte aus dem Hallraum. Diese etwas geringeren Werte könnten durch das nicht vollständig diffuse Schallfeld und die nicht gleichmäßige Verteilung der Absorber im Raum (Absorber nur an Seitenwänden in einer Raumdimension verursacht sein. Wichtig ist für die reale Anwendung von Absorbern festzuhalten, dass Messungen der Nachhallzeit vor Ort und eine abschätzende Auswertung aus solchen Messungen Abweichungen von Hallraummessungen aufweisen können. Die Verwendung von Absorptionsgraden aus Hallräumen in reale Situationen führt oftmals zu gewissen Abweichungen der Nachhallzeit. Grund ist das unterschiedliche Schallfeld im realen Gebäude, verglichen zum Schallfeld im Hallraum. Daher muss bei der Planung der Nachhallzeiten mit einer gewissen Toleranz vor Ort gerechnet werden.

Bild 30:

Absorptionsgrad von Reapor®, gemessen Vorort und im Hallraum des IBP.



Quelle: IBP

### Absorptionsgrade für mikroperforierten Plexiglaszylinder als Säulenverkleidung

Wie zuvor in Abschnitt 4.2.8 beschrieben, wurde auch der Schallabsorptionsgrad für den Plexiglaszylinder, der als Säulenverkleidung eingesetzt wurde, ermittelt. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass nur an einer Säule ein Plexiglaszylinder angebracht war, d.h. die Unterschiede der gemessenen Nachhallzeiten waren nicht groß und die Ermittlung der Schallabsorptionsgrade ist entsprechend ungenau. Zusätzlich kommt hinzu, dass die Schallabsorption eines solchen mikroperforierten Absorbers vom Lochdurchmesser und dem Abstand des Absorbers vor der Rückwand abhängt. Beides lässt sich für den gebogenen Absorber nur grob abschätzen. Vergleichend zu dieser Messung wurde der Schallabsorptionsgrad für das Diffusfeld berechnet, in dem der Absorber als ebene Schicht mit einem Abstand von 150 mm vor einer Rückwand angenommen wurde. Der mikroperforierte Plexiglasabsorber und die Säule ist in Bild 31 gezeigt, der ermittelte Absorptionsgrad sowie der berechnete Absorptionsgrad ist in Bild 32 dargestellt.

Bild 31:

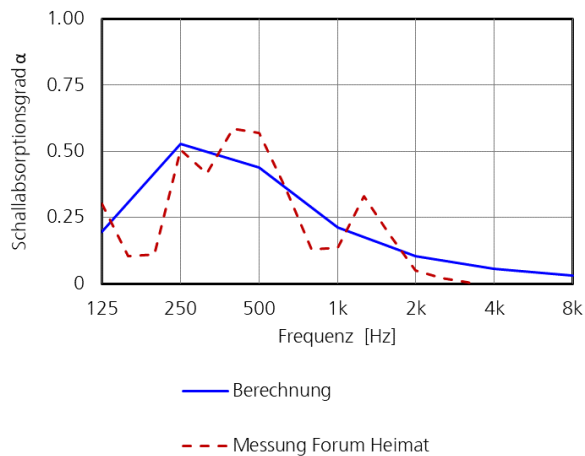
Foto des mikroperforierten Absorber aus Plexiglas in Zylinderform als Verkleidung einer Säule im Forum Heimat in Benediktbeuern.



Quelle: IBP

Bild 32:

Gemessener und berechneter Absorptionsgrad des mikroperforierten Plexiglasabsorbers.



Quelle: IBP

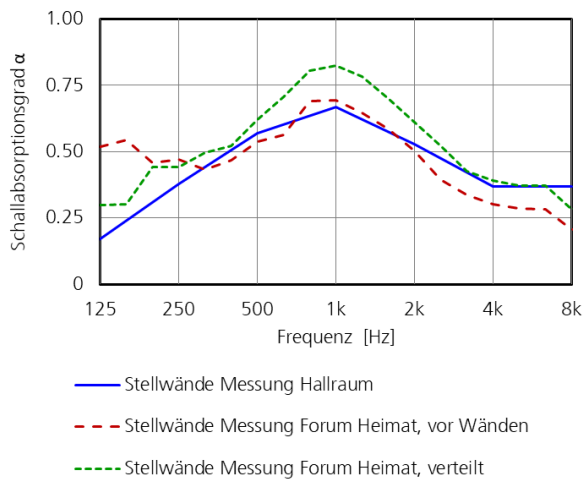
Der Vergleich der Absorptionsgrade in Bild 32 zeigt für die Messung schwankende Werte mit einem Maximalwert von ca. 0,55 bei 400 Hz, die berechneten Werte zeigen einen Maximalwert von ca. 0,5 bei 250 Hz. Der Verlauf beider Kurven ist jedoch recht ähnlich, die gemessenen Werte schwanken um die Werte der Berechnung. Damit lässt sich feststellen, dass die einfache Berechnung Werte liefert, die für eine grobe Abschätzung der Wirkung der mikroperforierten Säulenverkleidung erstaunlich gut ist. Es wurde lediglich mit einem etwas größeren Abstand der mikroperforierten Schicht gerechnet, was durch die Krümmung des Absorbers und der Säule gerechtfertigt erscheint. Der Plexiglasabsorber hat den Vorteil, die Oberflächen von denkmalgeschützten Räumen vor Berührung zu schützen und gleichzeitig zur Absorption im Raum beizutragen. Für die praktische Anwendung kann z.B. der Wandabstand oder das Lochmuster des Absorbers variiert werden, so dass die Absorption nicht auf einen bestimmten Frequenzbereich konzentriert ist und insgesamt eine breitbandigere Absorption erzielt werden kann.

### Absorptionsgrade für mikroperforierte Stellwände

Bei der Auswertung der Absorptionsgrade für die Stellwände im Forum Heimat kann man von einer höheren Genauigkeit ausgehen, da mit einer deutlich größeren Anzahl und Fläche von Absorbern gemessen wurde und deshalb der Unterschied der Nachhallzeiten mit und ohne Stellwände deutlich größer war. Da die Stellwände in zwei verschiedenen Aufstellungen (im Forum Heimat verteilt und am Rand des Raumes aufgestellt) untersucht wurden, liegen zwei Kurven für den Schallabsorptionsgrad der Stellwände vor. Die Aufstellungen der Stellwände sind in Bild 25 und Bild 27 gezeigt. Die gemessenen Schallabsorptionsgrade der Stellwände bei den beiden verschiedenen Aufstellungen ist im Vergleich zu den im Hallraum gemessenen Absorptionsgraden in Bild 33 dargestellt. Die Bezugsfläche war die beidseitige Oberfläche der Stellwände, d.h. pro Stellwand mit den Abmessungen von 1 m x 2,5 m eine Oberfläche von 5 m<sup>2</sup>.

Bild 33:

Gemessener Absorptionsgrad der mikroperforierten Stellwände bei zwei verschiedenen Aufstellungen im Forum Heimat und Vergleich zur Messung im Hallraum.



Quelle: IBP

Der Vergleich der Schallabsorptionsgrade zeigt, dass für die Aufstellung der Stellwände am Rand des Raumes die Kurve etwas flacher ausfällt, d.h. bei tiefen Frequenzen die Schallabsorption etwas höher ist. Bei mittleren Frequenzen werden jedoch etwas geringere Werte erreicht, im Vergleich zu den im Raum verteilten Absorbieren. Im mittleren Frequenzbereich von 315 Hz bis 2 kHz liegen die Werte bei Aufstellung am Rand sehr ähnlich zu den Messwerten im Hallraum. Bei Aufstellung der Stellwände im Raum verteilt werden zwischen 500 Hz und 2 kHz deutlich höhere Absorptionsgrade erreicht, mit maximalen Werten von ca. 0,8 bei 1 kHz. Die Unterschiede sind dadurch zu erklären, dass die Stellwände bei verteilter Aufstellung die mittlere freie Weglänge reduzieren und damit die Nachhallzeit zusätzlich verkürzen, was bei der Aufstellung am Rand des Raumes weniger auftritt. (Die mittlere freie Weglänge ist die Strecke, die die Schallwelle im Raum im Mittel von einer Reflexion zur nächsten Reflexion zurücklegt, in m [17]). Bei Aufstellung am Rand tritt jedoch vor allem bei tieferen Frequenzen um 125 Hz deutlich höhere Absorption auf, was an der flächigen Aufstellung der Stellwände mit einem Abstand von 0,6 m vor den Außenwänden liegt. Grund dafür ist, dass bei einem Wandabstand von  $\frac{\lambda}{4}$ , d.h. von einem Viertel der Wellenlänge  $\lambda$ , vor der Wand die Schallschnelle maximal ist, so dass eine Aufstellung der Stellwände mit diesem Abstand eine hohe Absorption bewirkt. Bei einem Wandabstand von 0,6 m liegt diese Frequenz bei  $f \approx 143$  Hz. Insgesamt ist die Übereinstimmung der Messungen im Forum Heimat mit den Messwerten im Hallraum recht gut. Jedoch zeigt sich auch hier, dass eine 1:1-Übertragung von Messwerten aus dem Hallraum in reale Räume nicht möglich ist. Daher ist zu empfehlen, nach der realen Umsetzung von Maßnahmen eine Messung durchzuführen, die die erzielte Nachhallzeit offen legt und gegebenenfalls danach einzelne Absorber hinzuzunehmen oder zu entfernen, um eine Anpassung an die geplante Akustik und ein Feintuning vorzunehmen.



## 4.3 Reallabor Franz-Marc-Raum

### 4.3.1 Überblick

Das zweite Reallabor, das im Projekt betrachtet wurde, ist der Franz-Marc-Raum. Dies ist ein mittelgroßer Besprechungsraum im Hauptgebäude des Kloster Benediktbeuern im 1. Obergeschoss. Dieser Raum weist historische Fenster mit relativ großen Fensternischen und eine mit Stuck verzierte Decke auf. An den Wänden ist im Deckenbereich ein Stuckfries angebracht. Die Wände haben eine weiß gestrichene glatte Oberfläche, an einer Wand ist ein Druck von Franz Marc aufgehängt. Der Bodenbelag besteht aus einem Holzparkett. Die Abmessungen sind ca. 9,8 m x 5,9 m x 3,8 m, wobei der Raum einen nicht rechteckigen Grundriss aufweist. Das Raumvolumen  $V$  beträgt ca. 220 m<sup>3</sup>. Der Franz-Marc-Raum ist in Bil 34 gezeigt.

Bild 34:

Foto des Franz-Marc-Raum. Zustand des Raumes bei der Messung im Mai 2022 mit Bestuhlung für Besprechung oder Präsentation.



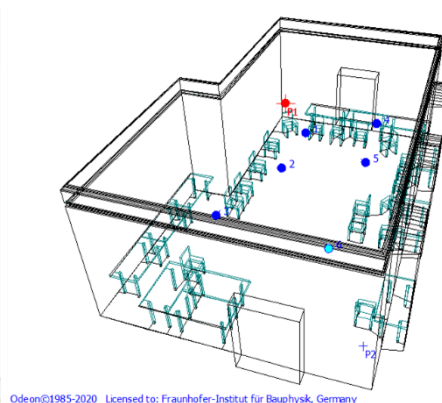
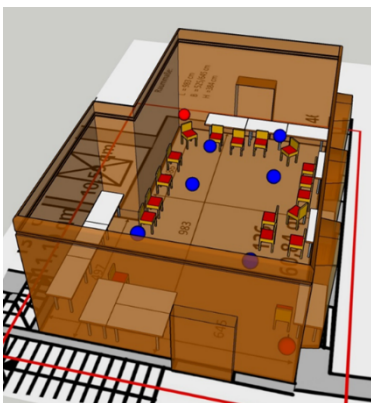
Quelle: IBP

### 4.3.2 Raummodell und Bestandsmessung

Ein 3D-Modell für die raumakustische Simulation wurde basierend auf den Plänen des Raumes erstellt. In Bild 35 ist links das Sketchup-Modell des Raumes und rechts das daraus generierte Raumakustik-Modell mit den verwendeten Quellpositionen (rote Punkte) und den Messpositionen (blaue Punkte) dargestellt.

Bild 35:

3D-Modell des Franz-Marc-Raum in Sketchup (links) und in Odeon (rechts) für die akustische Simulation des Raumes.



Quelle: IBP

In diesem Modell wurde die Bestuhlung wie vorgefunden wiedergegeben. Am 22.09.2022 wurden Messungen im Franz-Marc-Raum durchgeführt, siehe Bild 36. Auch hier wurde die vorgefundene Bestuhlung verwendet. Auf Grundlage dieser Messung wurde die Raumakustik-Simulation in Odeon angepasst, d.h. das Raumakustik-Modell des Raumes wurde mit der Messung kalibriert.

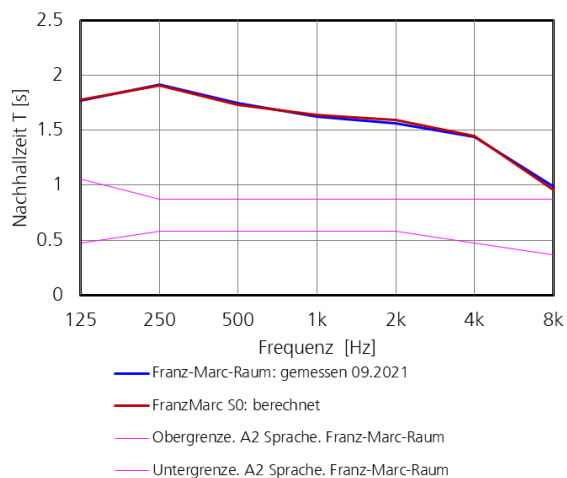
Bild 36:  
Akustische Messungen im Franz-Marc-Raum.



Quelle: IBP

Die akustischen Eigenschaften der bekannten Oberflächen, wie z.B. Parkettfußboden, Verglasung, Tische, Personen/Bestuhlung wurden aus unserer Datenbank übernommen. Die Absorption der restlichen Flächen wurde empirisch bestimmt, damit die Nachhallzeit des Ist-Zustandes der Simulation den Messungen entspricht. Damit können weitere akustische Berechnungen und Optimierungen eine höhere Genauigkeit erreichen. Der Vergleich der gemessenen und berechneten Nachhallzeit als Ausgangszustand ist in Bild 37 gezeigt.

Bild 37:  
Gemessene und simulierte Nachhallzeit im Franz-Marc-Raum bei vorgefundener Ausstattung.



Quelle: IBP

Die Nachhallzeit der Simulation (S0) in Bild 37 zeigt sehr ähnliche Werte wie gemessen. Damit war die Simulation kalibriert, so dass zunächst Maßnahmen für den Raum simuliert und geplant werden konnten. Die Nachhallzeit erreicht bei 250 Hz fast einen Wert von 2 s und ist für die Sprachdarbietung in diesem Raum viel zu lang, da der Raum keine absorbierenden Oberflächen aufweist. Die Anforderung liegt in diesen Raum für Sprache (Nutzungsart A2 nach DIN 18041 [1]) bei 0,7 s.

### 4.3.3 Simulation und Maßnahmen

Zur Verbesserung der Akustik für die Verwendung des Raumes für Sprache (Besprechungen, Vorträge, Diskussionen) wurden folgende akustische Maßnahmen vorgeschlagen. Dabei wurden sowohl Einbau-Maßnahmen berücksichtigt (soweit diese im Denkmalkontext für eine Umsetzung möglich erscheinen), als auch mobile Maßnahmen in Betracht gezogen. Diese sind:

Einbau-Maßnahmen (in Bild 38 dargestellt)

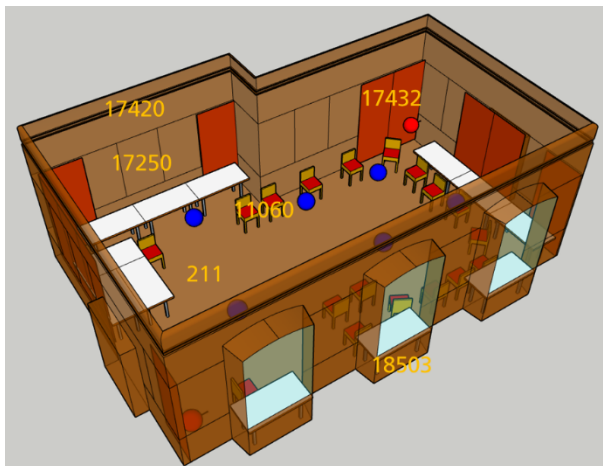
- Absorber in Nischen unter den Fenstern (mit Nummer 18503 in Bild 38 dargestellt und Absorptionsgrad in Bild 39 niedergelegt, ca. 3,8 m<sup>2</sup>)
- Absorber an den Wänden, h = 0,9 bis 2,5 m (Nummer 17250 in Bild 38 und Bild 39, umlaufend, ca. 42 m<sup>2</sup>)

Mobile Maßnahmen

- Absorbierende Stellwände (Nummer 17432 in Bild 38 und Bild 39)
- Publikum/Stühle (Nummer 11060 in Bild 38 und Bild 39)

Bild 38:

Grafik mit Nummerierung (für die Zuordnung der Schallabsorption in Bild 39) der geplanten akustischen Maßnahmen im Franz-Marc-Raum.

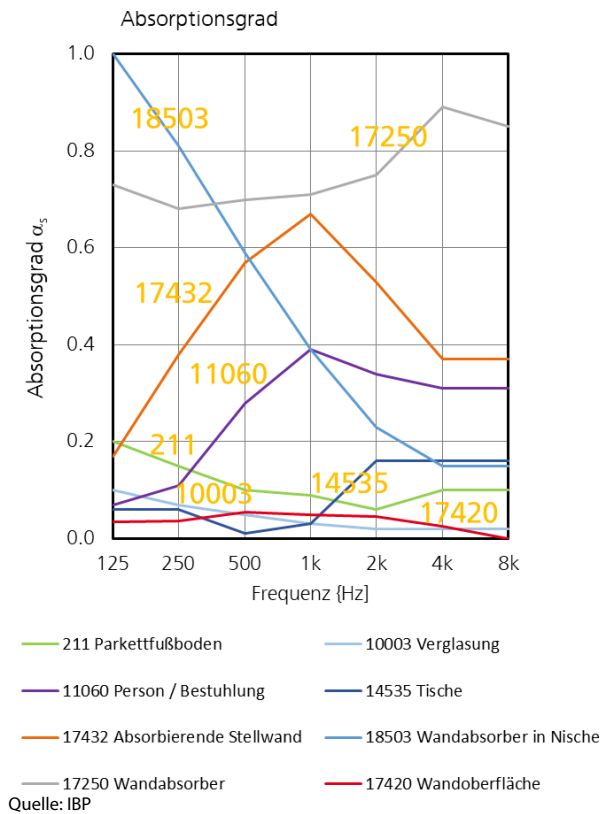


Quelle: IBP

Die für die Simulation des Raumes verwendeten Absorptionsgrade sind in Bild 39 dargestellt.

Bild 39:

Überblick über die Absorptionsgrade der in der Odeon-Simulation des Franz-Marc-Raum verwendeten Materialien.



In Bild 40 sind die raumakustischen Maßnahmen mit einer Darstellung innerhalb des Raumes gezeigt. Hier ist zu erkennen, dass z.B. Wandabsorber auch zwischen den Fenstern auf den Wänden vorgeschlagen werden, um eine entsprechende Nachhallzeit im Raum zu erreichen.

Bild 40:

Ansicht zweier Wände im Franz-Marc-Raum mit Bezeichnung der raumakustischen Maßnahmen (die Bedeutung der Nummerierung siehe Bild 39).



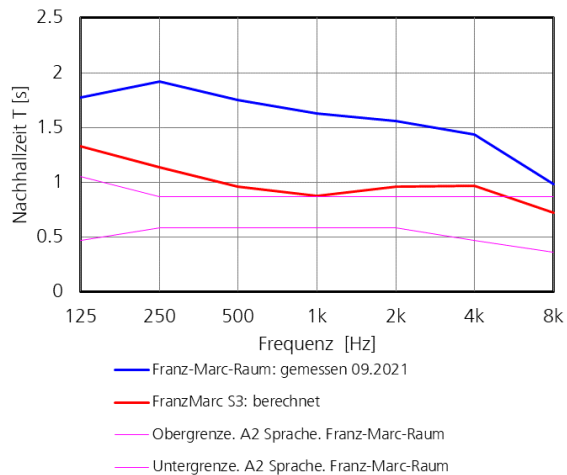
Zur Auslegung des Raumes wurden verschiedene Anordnungen simuliert. Sie zeigen, welchen Umfang an Maßnahmen es bedarf, um die Akustik des Raumes für Sprache zu optimieren.

### Anordnung 1 (S3: ohne Wandmaßnahmen)

Als erste Anordnung wurde eine Variante gewählt, bei der keine Absorber an den Wänden vorgesehen wurden. Für diese Anordnung wurden Absorber in Nischen mit einer Fläche von ca. 3,8 m<sup>2</sup> und 11 beidseitig absorbierende Stellwände (mit Abmessung 1 x 2,5 m, 55 m<sup>2</sup> beidseitig) untersucht. Die simulierte Nachhallzeit ist in Bild 41 im Vergleich zur gemessenen Nachhallzeit dargestellt.

Bild 41:

Gemessene Nachhallzeit und für die Anordnung 1 ohne Wandabsorber simulierte Nachhallzeit im Franz-Marc-Raum.



Quelle: IBP

Die simulierte Nachhallzeit zeigt im tiefen Frequenzbereich längere Werte als die nach DIN 18041 empfohlene Obergrenze, und auch im mittleren Frequenzbereich liegen die prognostizierten Werte bei oder oberhalb der empfohlenen Werte. Für diesen Raum werden daher noch mehr Schallabsorber, z.B. absorbierende Stellwände, benötigt.

### Anordnung 2 (S1: mit Wandmaßnahmen, ohne Nischenabsorber)

Bei dieser Anordnung werden umlaufend Absorber an den Wänden in einem Wandbereich von  $h = 0,9$  bis  $2,5$  m (Absorber Nummer 17250, ca.  $42 \text{ m}^2$ ) betrachtet. Die Anordnung der Absorber im Raum ist in Bild 42 dargestellt. Die simulierte Nachhallzeit ist Bild 43 zu entnehmen.

Bild 42:

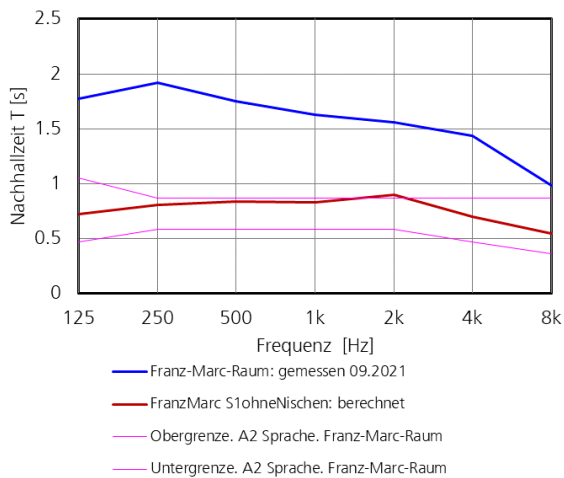
Anordnung 2 mit Wandabsorbern im Franz-Marc-Raum.



Quelle: IBP

Bild 43:

Nachhallzeit der Anordnung 2 mit umlaufenden Schallabsorberrn an den Wänden des Raums, im Vergleich zur gemessenen Nachhallzeit im Ausgangszustand.



Quelle: IBP

Die in Bild 43 dargestellte simulierte Nachhallzeit liegt im gesamten Frequenzbereich zwischen oberer und unterer Nachhallzeitgrenze für Sprache nach DIN 18041 und erfüllt damit diese Anforderung. Nach Aussage des Nutzers wäre es möglich, die Absorber an den Wänden zu montieren. Ob dies praktisch umsetzbar ist, müsste ggf. mit dem Denkmalschutzamt geklärt werden.

#### 4.3.4 Fazit Planung Franz-Marc-Raum

Auf Grund der Nutzung des Franz-Marc-Raumes für Besprechungen, Vorträge und Diskussionen wurde für diesen Raum die Anforderung für die Nutzungsart A2 Sprache nach DIN 18041 [1] angesetzt. Zur Ermittlung von Maßnahmen, die zur Einhaltung der Anforderungen für die Sprachnutzung führen, wurden zwei Anordnungen betrachtet:

- Anordnung 1: Akustische Absorber in den Nischen unter den Fenstern (ca. 3,8 m<sup>2</sup>) und 11 Stellwände (vor den Wänden aufgestellt (ca. 55 m<sup>2</sup> beidseitig) reichen nicht aus, um die Anforderung A2 für Sprache nach DIN 18041 zu erfüllen. Daher sind weitere Absorber (Stellwände) bzw. absorbierende Oberflächen, oder Objekte wie Tische und Stühle notwendig.
- Anordnung 2: Schallabsorber rundum an den Wänden in einem Wandbereich von h = 0,9 bis 2,5 m (ca. 42 m<sup>2</sup>) würden dagegen ausreichen, die Anforderung A2 für Sprache nach DIN 18041 zu erfüllen.

Die Auswahl der vorgeschlagenen Maßnahmen erfolgte nach der Einschätzung der Autoren, welche Maßnahmen im Raum eventuell auch umgesetzt werden können. Dabei ist die Auskleidung der Wände mit Absorberrn eher kritischer zu sehen als der Einsatz von schallabsorbierenden Stellwänden, die als mobile Lösung nicht (direkt) den Denkmalschutz tangiert. Maßnahmen an der Decke wurden nicht betrachtet, da diese mit Stuck verziert ist und aus Denkmalschutzgründen erhalten bleiben sollte.

Die Konfiguration mit Anzahl und Position der Stellwände und der Einsatz von Absorberrn in Nischen und auf Wandflächen kann für die Umsetzung optimiert werden. Werden Einbauten vorgenommen, müssen die Absorptionsgrade dieser überprüft werden. Die Ergebnisse der beiden Anordnungen zeigen beispielhaft, in welchem Umfang Maßnahmen im Franz-Marc-Raum notwendig sind, um die Anforderungen für eine gute Akustik zu erreichen. Konkrete Maßnahmen müssen bei einer möglichen Umsetzung mit der Denkmalbehörde abgestimmt werden.

#### 4.3.5 Vorort Untersuchung der Maßnahmen

Für die Nutzung des Raumes als Reallabor wurden auch im Franz-Marc-Raum messtechnische Untersuchungen durchgeführt. Die Anbringung von Schallabsorbern an den Wänden des Raumes oder in den Nischen unter den Fenstern war in diesem Raum nicht möglich, da dieser Raum zum einen viel benutzt wird und zum anderen der Einbau von Maßnahmen nicht vorgesehen war. Daher wurde der Einsatz der Stellwände untersucht, da diese temporär aufgestellt werden können und sie keinen Eingriff in den Raum darstellen. Auf Grund der in Anordnung 1 simulierten Akustik, 11 schallabsorbierenden Stellwände mit den Abmessungen 1 m x 2,5 m x ca. 0,05 m, wurde diese Konfiguration nun auch messtechnisch untersucht. In Bild 44 ist die Aufstellung der Stellwände im Franz-Marc-Raum gezeigt. Dabei ist anzumerken, dass der Raum mit der ersichtlichen Bestuhlung gemessen wurde, da es sich offensichtlich um eine übliche Bestuhlung des Raumes handelt. Die Stellwände wurden sowohl vor den Wänden als auch in den Fensternischen aufgestellt. Dies erfolgte unter anderem aus Platzgründen. (Die Stellwände waren mit provisorischen Füßen ausgestattet und hatten daher eine relativ große Bodenplatte, die für den täglichen Einsatz voraussichtlich verkleinert oder anders gestaltet sein können).

Bild 44:

Beidseitig absorbierende Stellwände, aufgestellt im Franz-Marc-Raum zur Messung der Nachhallzeit.

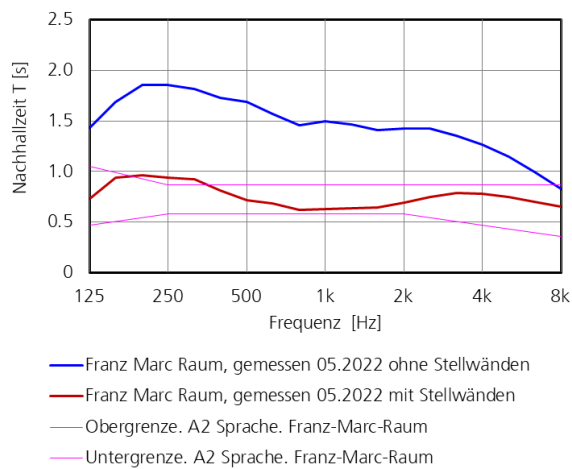


Quelle: IBP

Die Nachhallzeiten im Franz-Marc-Raum, ohne und mit 11 beidseitig absorbierenden Stellwänden, gemessen am 24.05.2022, sind in Bild 45 gezeigt.

Bild 45:

Gemessene Nachhallzeiten ohne und mit 11 Stellwänden im Franz-Marc-Raum und Vergleich zu dem Anforderungsbereich nach DIN 18041.



Quelle: IBP

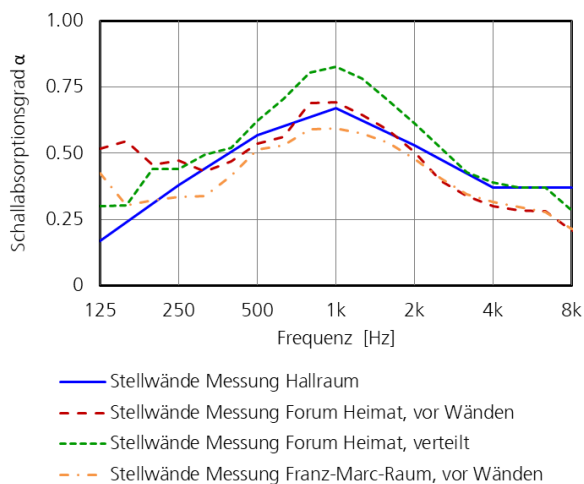
Die obere Kurve in Bild 45 zeigt die gemessenen Nachhallzeiten ohne Stellwände im Franz-Marc-Raum. Die Nachhallzeit ist deutlich länger als die geforderte Nachhallzeit nach DIN 18041 für die Nutzungsart A2 Sprache. Unterschiede zur ersten Messung im Franz-Marc-Raum im September 2021 (siehe z.B. Bild 43) sind auf die Erhöhung der Anzahl der Möblierung (damit mehr Streuung im Raum) zurückzuführen, die die Nachhallzeit im Raum im Vergleich zur ersten Messung etwas reduziert hat. Die Messung mit 11 absorbierenden Stellwänden ergab die rot dargestellte Kurve. Die Nachhallzeiten liegen im tieferen Frequenzbereich bei 250 und 315 Hz etwas über der Anforderung der DIN 18041, jedoch bei höheren Frequenzen im Bereich der Anforderung für Sprache. Die Messung zeigt, dass mit der vorhandenen Möblierung das Aufstellen der 11 beidseitig absorbierenden Stellwände ausreicht, um die Anforderungen für Sprache einzuhalten. Absorber in den Wandnischen, die bei der Simulation berücksichtigt wurden, die aber im Vergleich zu den Stellwänden eine geringe Fläche aufwiesen, sind für eine gute Raumakustik nicht unbedingt notwendig, wenn diese Anzahl von Stellwänden im Raum verwendet wird. Kommen Personen im Raum hinzu, kann die Nachhallzeit noch etwas kürzer werden.

Wie in Abschnitt 4.2.8 beschrieben, konnte aus den Messungen im Franz-Marc-Raum nochmals der Schallabsorptionsgrad der Stellwände bestimmt werden. Dieser ist im Vergleich zum Absorptionsgrad aus dem Forum Heimat und dem Hallraum, in Bild 46 gezeigt.



Bild 46:

Gemessener Absorptionsgrad der mikroperforierten Stellwände bei Aufstellung im Franz-Marc-Raum, bei zwei verschiedenen Aufstellungen im Forum Heimat sowie bei Messung im Hallraum.



Quelle: IBP

Die Bezugsfläche war die beidseitige Oberfläche der Stellwände, d.h. pro Stellwand mit den Abmessungen von 1 m x 2,5 m eine Oberfläche von 5 m<sup>2</sup>. Der Vergleich der Absorptionsgrade in Bild 46 zeigt, dass das Absorptionsvermögen der Stellwände in den drei verschiedenen Situationen der beiden Reallabore einen ähnlichen Verlauf aufweist, der auch gut mit den Werten aus der Hallraummessung (Angabe des Herstellers) korrespondiert. Dennoch wurden leicht unterschiedliche Absorptionsgrade bestimmt, die z.B. bei 1 kHz zwischen 0,55 und 0,8 lagen. Auch tieffrequent streuen die ermittelten Schallabsorptionsgrade, was voraussichtlich an der Aufstellung der Absorber im Schallfeld liegt, wobei die flächige Aufstellung vor der Wand im Forum Heimat hier die höchsten Absorptionsgrade ergab. Bei mittleren Frequenzen von 500 Hz bis 2 kHz weisen die verteilt stehenden Absorber im Forum Heimat die höchste Absorption auf, was vermutlich auf die verkürzten Freie-Weglängen zurückzuführen ist.

Insgesamt zeigt die Analyse der Schallabsorptionsgrade der Stellwände, dass die Messergebnisse aus dem Hallraum eine gute Datengrundlage für die Prognose der Nachhallzeiten in den realen Situationen bietet. Die Schallabsorptionsgrade desselben Aufbaus können jedoch in realen Räumen, wie die hier betrachteten Reallabore, etwas unterschiedlich ausfallen, denn die Wirkung hängt mit dem Schallfeld des Raumes und der Aufstellung im Raum bzw. im entsprechenden Schallfeld ab und kann in der praktischen Situation etwas von der Wirkung im Hallraum abweichen.

#### 4.4 Reallabor großer Sitzungssaal Deichmannsaue

Als drittes Reallabor wurde der große Sitzungssaal im Schloss Deichmannsaue betrachtet. Der Raum besitzt Abmessungen von ca. 16,1 m x 9,9 m x 6,8 m, das Raumvolumen  $V$  liegt bei ca. 1084 m<sup>3</sup>. Der Sitzungssaal ist in Bild 47 dargestellt.

Bild 47:

Foto des großen Sitzungssaals im Schloss Deichmannsaue im Zustand der Messung der Nachhallzeiten.



Quelle: IBP

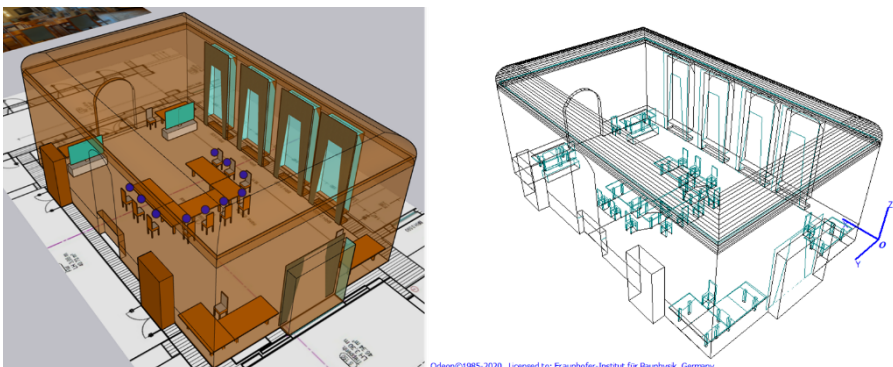
Der große Sitzungssaal hat einen Parkettboden, vier fast raumhohe Fenster, eine historische Wandverkleidung und eine mit Stuck verzierte Deckengestaltung. Dabei weist der Raum einen Deckenfries auf, hinter dem verdeckt eine indirekte Beleuchtung angebracht ist. Weiterhin ist der Übergang von Wandfläche zur Decke, oberhalb des Deckenfries gebogen ausgeführt. Gegenüber der Fassade weist der Raum einen offenen Kamin auf, die Wandfläche darüber ist mit Spiegeln versehen. Der Raum ist mit Heizungselementen ausgestattet, die unterhalb der Fenster hinter einer Holzverkleidung angebracht sind. Die Fenster sowie die verglaste Zugangstür sind mit Vorhängen versehen, die vor einigen Jahren erneuert wurden, deren Auswahl jedoch nach denkmal-schützerischen Kriterien erfolgte und die nicht explizit schallabsorbierend ausgestattet sind. Der Raum steht komplett unter Denkmalschutz, so dass raumakustische Maßnahmen an den Raumbooberflächen nicht umsetzbar sind.

#### 4.4.1 Überblick

Das 3D-Modell für die raumakustische Simulation wurde, basierend auf Plänen vom Architekten, mit Sketchup erstellt. Daraus wurde das Modell für die raumakustische Simulation abgeleitet. Beide Modelle sind in Bild 48 dargestellt.

Bild 48:

3D Modelle des großen Sitzungssaals im Schloss Deichmannsaue, links das Sketchup-Modell, rechts das Odeon Modell für die akustische Simulation.



Quelle: IBP

#### 4.4.2 Raummodell und Bestandmessung

Zum Abgleich des Raumakustik-Simulationsmodells wurde am 05.10.2021 eine raumakustische Messung im großen Sitzungssaal durchgeführt. Der Zustand und die Möblierung zum Zeitpunkt der Messung ist in Bild 49 ersichtlich.

Bild 49:

Bild der Möblierung im großen Sitzungssaal im Schloss Deichmannsau zum Zeitpunkt der Messung (hier ohne Plexiglasschirme).



Quelle: IBP

Die Möblierung zum Zeitpunkt der Messung war relativ wenig umfangreich, es waren lediglich 10 Stühle an einem U-förmigen Tisch aufgebaut. Da zum Messzeitpunkt die Covid-19 Pandemie herrschte waren auf den Tischen zwischen jedem Arbeitsplatz Trennfolien aufgestellt, die in Bild 50 links ersichtlich sind. Die Nutzung des Raumes wurde mit 99% Sprache angegeben, die Anzahl an Personen bei Besprechungen, Vorträgen und Versammlungen variiert von 10 bis ca. 100 Personen (Angabe der Nutzenden). Bei der Messung des Raumes wurden 3 Varianten des Raumes untersucht:

- Variante A1: Vorhänge geöffnet, mit Trennfolien für Corona-Schutz auf den Tischen
- Variante A2: Vorhänge geöffnet, ohne Trennfolien für Corona-Schutz auf den Tischen
- Variante A3: Vorhänge geschlossen (und damit größere Vorhangfläche), ohne Trennfolien für Corona-Schutz auf den Tischen

Die Variante 1 und 3 ist in Bild 50 dargestellt, Variante 2 in Bild 49. Da die dünnen auf den Tischen aufgestellten Trennfolien nur eine temporäre Maßnahme (während der Pandemie) war, wurde die Variante V2 als Ausgangszustand für weitere akustische Simulation verwendet.

Bild 50:

Bilder der gemessenen Varianten im großen Sitzungssaal. Links geöffnete Vorhänge mit Trennfolien auf den Tischen, rechts ohne Trennfolien, jedoch mit geschlossenen Vorhängen.



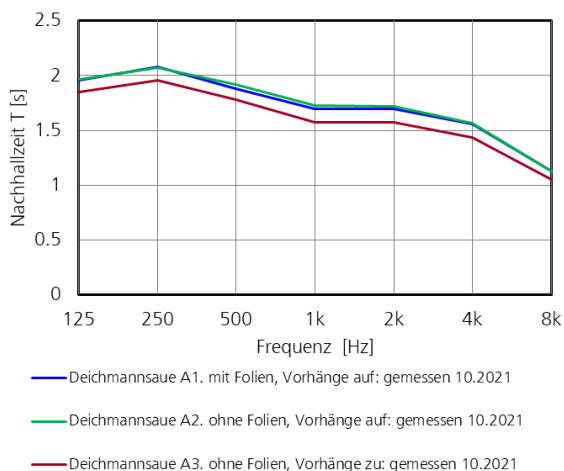
Quelle: IBP

In Bild 50 ist zu erkennen, dass alle Vorhänge geschlossen waren, auch der Vorhang, der die verglaste Eingangstüre abdeckt. Es ist zu erkennen, dass der Vorhang aus relativ schwerem Material besteht und auch zur Verdunklung des Raumes genutzt wird.

Die gemessenen Nachhallzeiten der drei Varianten des großen Sitzungssaals sind in Bild 51 dargestellt.

Bild 51:

Gemessene Nachhallzeit im großen Sitzungssaal bei verschiedenen Varianten.



Quelle: IBP

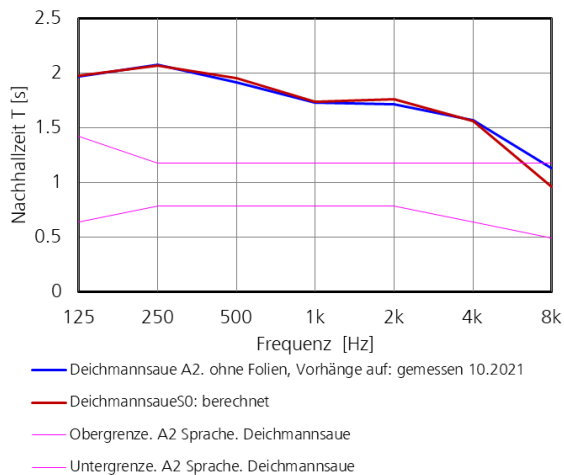
Die Messergebnisse der Nachhallzeiten zeigen Werte von maximal etwas über 2 s bei 250 Hz. Bei tieferen Frequenzen sinkt die Nachhallzeit etwas ab, was voraussichtlich durch die Holzverkleidung der Wandoberflächen verursacht wird. Bei mittleren bis hohen Frequenzen sinkt die Nachhallzeit auf Werte von ca. 1,5 s (bei 4 kHz) ab. Der Vergleich der Varianten zeigt, dass die Trennfolien auf den Tischen keinen Einfluss auf die gemessene Nachhallzeit haben. Jedoch bewirkt das Schließen der Vorhänge eine breitbandige Reduktion der Nachhallzeiten um ca. 0,2 s. Die Messergebnisse der Variante 2 wurde für die Kalibrierung des Raumakustik-Modells und damit für weitere Simulationen verwendet.

Die akustischen Eigenschaften der bekannten Oberflächen, z.B. Parkettfußboden, Verglasung, Person / Bestuhlung, Tische, Vorhänge wurden aus der Datenbank übernommen. Die Absorption der restlichen Flächen wurde empirisch bestimmt, damit die Nachhallzeit des Ist-Zustandes in der Simulation der gemessenen Nachhallzeit entspricht (Kalibrierung des Modells). Für alle weiteren akustischen Berechnungen und Optimierungen

wurden die so ermittelten Absorptionsgrade der Oberflächen verwendet. In Bild 52 ist der Vergleich der gemessenen Nachhallzeit (ohne Trennfolien, mit geöffneten Vorhängen) mit der simulierten Nachhallzeit dargestellt.

Bild 52:

Gemessene und simulierte Nachhallzeit für den großen Sitzungssaal und Vergleich mit der Anforderung für Nutzungsart A2 Sprache nach DIN 18041.



Quelle: IBP

Der Vergleich der Nachhallzeiten in Bild 52 zeigt, dass die Anpassung der Simulation (S0) an die Messung sehr gut gelingt, lediglich bei 8 kHz zeigt die Simulation etwas kürzere Nachhallzeiten, vermutlich wegen der unterschiedlichen Annahme bezüglich der Luftabsorption. Die mittlere Anforderung der DIN 18041 liegt für diesen großen Saal bei knapp unter 1 s. Die Nachhallzeit im Saal ist deutlich zu lang, er ist akustisch nicht für Sprachkommunikation geeignet.

#### 4.4.3 Simulation und Maßnahmen

Auch für den großen Sitzungssaal wurde überlegt, welche akustischen Maßnahmen möglich wären, um die Nachhallzeit des Raumes für Sprachkommunikation einzustellen oder wenigstens eine deutlich kürzere Nachhallzeit zu erreichen. Dabei ist dieser Raum im Vergleich zu den anderen beiden Reallaboren der schwierigste, da er durch seine hohe Decke ein großes Volumen besitzt und da an keinen größeren Oberflächen raumakustische Maßnahmen möglich sind.

Folgende Maßnahmen wurden diskutiert und sind in Bild 53 bezeichnet:

Einbau- bzw. vorhandene Maßnahmen

- Vorhandene Vorhänge vor Fenstern und Eingangstür (8005)
- Absorber unter den Fensternischen: Diese Maßnahme hat eine zu geringe Fläche und wurde daher in den Simulationen vernachlässigt
- Anbringen eines Absorber-Rings oberhalb des Deckenfrieses, wo auch die indirekte Beleuchtung versteckt ist (z.B. aus Reapor®). Auch diese Maßnahme liefert zu wenig absorbierende Fläche (ca. 3 m<sup>2</sup>) und wurde daher in den Simulationen vernachlässigt
- Auskleidung des offenen Kamins mit Schallabsorbieren, z.B. Reapor®. Auch diese Maßnahme hat eine zu geringe Oberfläche, so dass sie bei der Simulation vernachlässigt wurde

- Zusätzliche Vorhänge vor den weiteren Türen des Raumes (8005 z.)
- Absorber hinter den akustisch offenen Verkleidungsöffnungen im Raum verstecken (17250)

#### Mobile Maßnahmen

- Absorbierende Stellwände (17432, beidseitig absorbierend)
- Publikum/Stühle (11060)

Bild 53:

Überblick über mögliche akustische Maßnahmen (Bedeutung der Nummerierung siehe Bild 54) im großen Sitzungssaal.

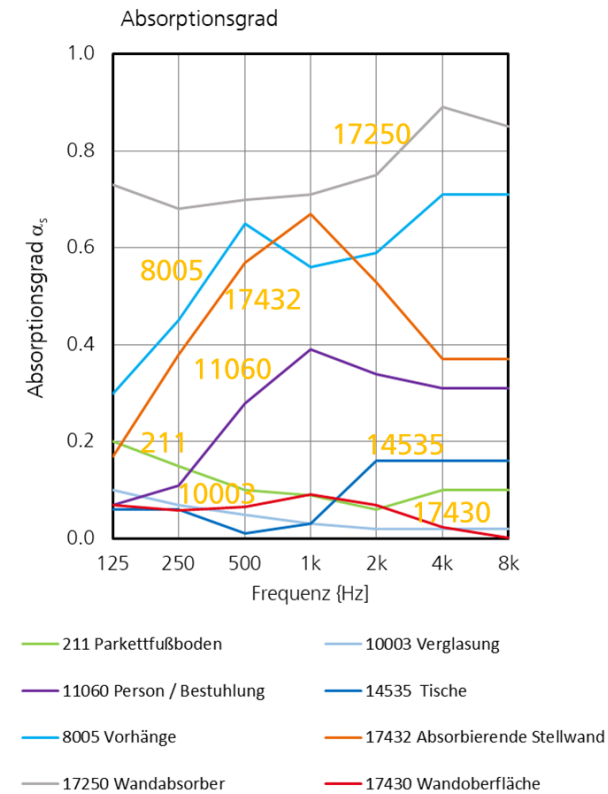


Quelle: IBP

Die verwendeten Absorptionsgrade der Oberflächen bzw. der akustischen Maßnahmen in der Simulation sind in Bild 54 gezeigt.

Bild 54:

Überblick über die Absorptionsgrade der in der Odeon-Simulation des großen Sitzungssaals verwendeten Materialien.



Verschiedene Maßnahmen und Oberflächen mit ihren Bezeichnungen sind in Bild 55 in einem Rendering des Raumes dargestellt.

Bild 55:

Rendering von akustischen Maßnahmen bzw. Oberflächen im großen Sitzungssaal (Bedeutung der Nummerierung siehe Bild 54).



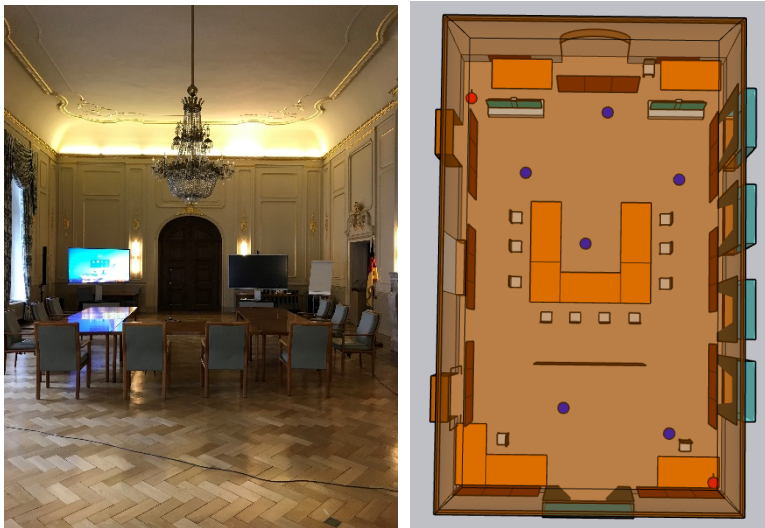
Da die Oberflächen des Raumes auf Grund des Denkmalschutzes nicht geändert werden können und einige kleine Maßnahmen zu geringe Flächen liefern, wurde vor allem mobile Maßnahmen (absorbierende Stellwände) betrachtet. Dabei wurden zwei Varianten des großen Sitzungssaals simuliert, bei denen eine Ausstattung mit Tischen und 10 Stühlen sowie drei weitere Stühle angenommen wurde, wie der Raum zum Messzeitpunkt ausgestattet war, siehe Bild 49 und Bild 50.

### Anordnung 1 (S1)

Hier wurde der Raum mit geöffneten vorhandenen Vorhänge (ca. 32 m<sup>2</sup>) mit 31 schallabsorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig) ausgestattet. In Bild 56 ist die Möblierung und die Draufsicht des simulierten Raumes dargestellt.

Bild 56:

Foto der Möblierung und Draufsicht des Raumes bei Anordnung 1 mit 31 absorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig) im großen Sitzungssaal.

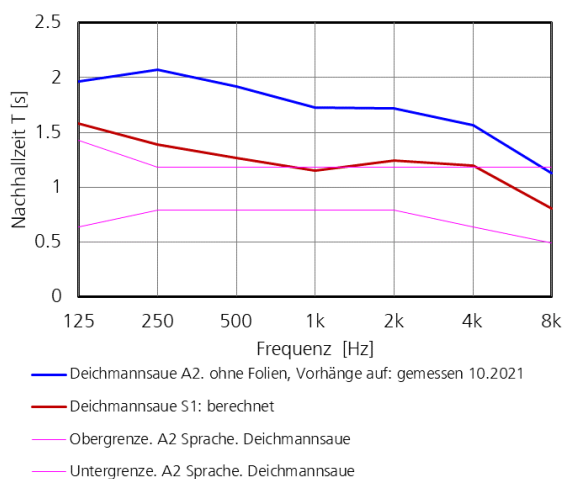


Quelle: IBP

In Bild 57 ist die damit erreichbare Nachhallzeit im großen Sitzungssaal dargestellt.

Bild 57:

Nachhallzeit des Ausgangszustands und der Anordnung 1 mit 31 absorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig) im großen Sitzungssaal sowie Anforderung für Sprache nach Nutzungsart A2 der DIN 18041.



Quelle: IBP

Die prognostizierte Nachhallzeit beim Einsatz von 31 Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig absorbierend) führt bei tiefen Frequenzen zu Werten von ca. 1,5 s (bei 125 Hz), die bei mittleren Frequenzen auf ca. 1,2 s abfällt. Damit liegt die Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen im Bereich der empfohlenen Obergrenze der



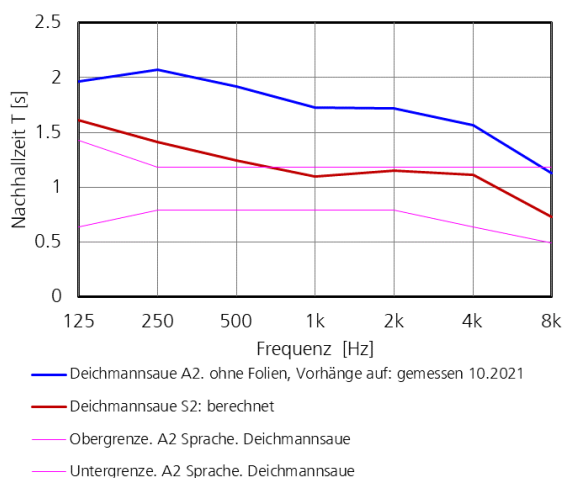
Nachhallzeiten nach DIN 18041. Tieffrequent wird die Anforderung A2 nach DIN 18041 nicht erfüllt. Mehr Stellwände werden gebraucht.

### Anordnung 2 (S2)

Bei dieser Anordnung wird mit den vorhandenen Vorhängen und zusätzlichen Vorhängen (ca. 82 m<sup>2</sup>) mit gleichem Absorptionsgrad gerechnet, wobei in diesem Fall die Vorhänge geschlossen sind. Die zusätzlichen Vorhänge wurden vor den Türen des Raumes vorgesehen, die im Ausgangszustand keine Vorhänge hatten. Weiterhin wurden wieder 31 absorbierende Stellwände (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig) im Raum betrachtet, und zusätzlich Absorber hinter den offenen Wandverkleidungen angenommen (17250 in s. Bild 54, 7,2 m<sup>2</sup>). Die Bestuhlung waren Tische mit 10 Stühlen sowie 3 weitere Stühle. Die simulierte Nachhallzeit für diese Anordnung ist in Bild 58 gezeigt.

Bild 58:

Nachhallzeit des Ausgangszustands und der Anordnung 2 mit 31 absorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig) im großen Sitzungssaal sowie Anforderung für Sprache nach Nutzungsart A2 der DIN 18041.



Quelle: IBP

Auch die in Bild 58 dargestellte Nachhallzeit von Anordnung 2 zeigt noch tieffrequent unter 500 Hz etwas zu lange Nachhallzeiten, verglichen mit der Anforderung nach DIN 18041. Im höheren Frequenzbereich liegen die prognostizierten Werte knapp unter der Obergrenze von 1,2 s. Der Vergleich mit den Nachhallzeiten von Anordnung 1 in Bild 57 zeigt geringe Unterschiede mit etwas kürzeren Nachhallzeiten. Die zusätzliche Fläche der Vorhänge vermindert die Nachhallzeit etwas, dagegen spielt die zusätzliche Ausstattung von Absorbern hinter den offenen Wandverkleidungen mit ihrer geringen Fläche von ca. 7 m<sup>2</sup> keine wesentliche Rolle.

#### 4.4.4 Fazit Planung großer Sitzungssaal

Die Nutzung des großen Sitzungssaals ist nach Angaben der Nutzer zu 99 % Sprache. In der Regel wird der Raum für wichtige Besprechungen mit unterschiedlicher Belegung, aber auch für Vorträge und Versammlungen verwendet. Musikalische Darbietungen kommen so gut wie nie vor. Daher ist das Ziel die Nutzungsart A2 nach DIN 18041 für Sprache

- Anordnung 1: Durch den Einsatz der mobilen Maßnahmen (31 Stellwände, 1 m x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup>, beidseitig absorbierend) wird die Anforderung A2 nach DIN 18041 nicht erfüllen. Da das Volumen des Raum sehr groß ist, kann die Raumakustik im großen Sitzungssaal durch die vorgeschlagenen Maßnahmen lediglich deutlich verbessert werden.

- Anordnung 2: Mit zusätzlichen Vorhängen, die geschlossen berücksichtigt wurden, erfüllt die Nachhallzeit im großen Saal Deichmannsaue die Anforderung A2 nach DIN 18041 ebenfalls nicht in allen Frequenzen. Vor allem tieffrequenz unter 500 Hz sind die Nachhallzeiten noch etwas zu lang.

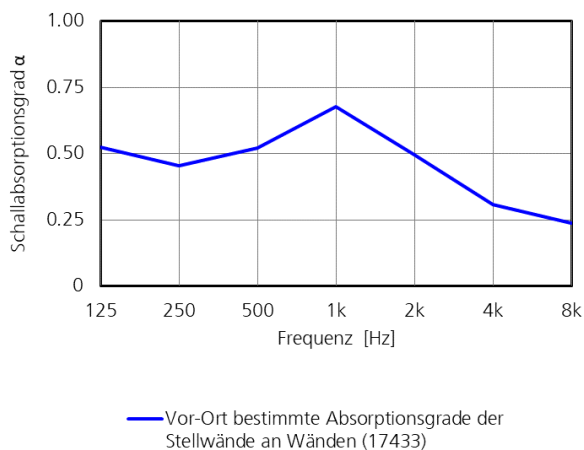
#### 4.4.5 Prognose der Nachhallzeiten mit gemessenen Absorptionsgraden

Da die geplante Aufstellung der Stellwände im Raum ähnlich zu den beiden anderen Räumen war, wurden die Messungen der Absorptionsgrade der vorgeschlagenen Maßnahmen in den beiden Reallaboren Forum Heimat und Franz-Marc-Raum verwendet, um Simulationen für den großen Sitzungssaal im Schloss Deichmannsaue vorzunehmen. Auf Messungen im großen Sitzungssaal mit Stellwänden wurde im Projekt verzichtet, da diese keine weiteren wesentlichen Erkenntnisse versprachen und einen großen zusätzlichen Aufwand bedeutet hätte, der im Rahmen des Projekts nicht mehr umsetzbar war.

Zunächst wurde aus den Messungen in den beiden Reallaboren Absorptionsgrade in Oktavwerten abgeleitet, die als Eingangsgrößen für die Raumakustik-Simulation im großen Sitzungssaal dienten. Diese sind in Bild 59 dargestellt.

Bild 59:

Die Vorort bestimmten Absorptionsgrade von Stellwänden (17433) als Eingangsgrößen für die Simulation des großen Sitzungssaals.

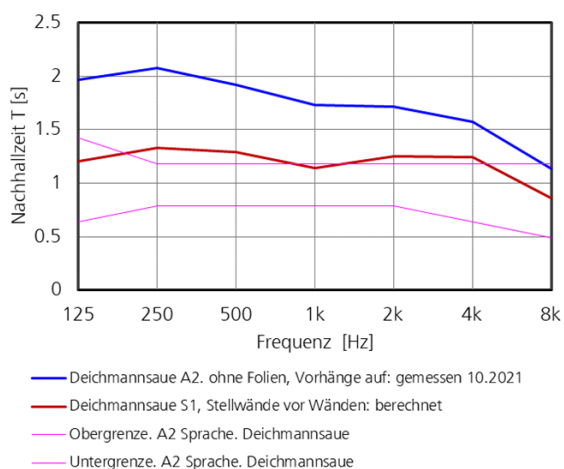


Quelle: IBP

Für die Stellwände wurden die Absorptionsgrade herangezogen, die aus der Messung bei Aufstellung der Stellwände vor den Außenwänden des Forum Heimat ermittelt wurden. Die Anordnung 1 (S1 Stellwände 17433), jedoch mit Absorbieren hinter den offenen Wandverkleidungen (7,2 m<sup>2</sup> mit Materialnummer 17250 in Bild 54), für den großen Sitzungssaal mit vorhandenen geöffneten Vorhängen (ca. 32 m<sup>2</sup>) und 31 Stellwände (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig, Nummer 17433 in Bild 59) und Tische mit 10 Personen (siehe Abschnitt 4.4.3) wurde mit den neu Vorort bestimmten Absorptionsgraden simuliert. Die Nachhallzeiten sind in Bild 60 dargestellt.

Bild 60:

Gemessene und prognostizierte Nachhallzeit im großen Sitzungssaal der Deichmannsaue für Anordnung 1 mit Nischenabsorbern, unter Berücksichtigung der Vorort bestimmten Absorptionsgrade, mit einer Möblierung mit 10 Personen.



Quelle: IBP

Die prognostizierten Nachhallzeiten für Anordnung 1 mit 31 Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig, Nummer 17433 in Bild 59), unter Berücksichtigung der Vorort ermittelten Absorptionsgrade, sind hochfrequent etwas länger als die Anforderung nach DIN 18041 für die Sprache. Tieffrequent sind die Nachhallzeiten jedoch etwas geringer, insgesamt liegen sie an oder etwas über der Obergrenze für Sprache nach Nutzungsart A2. Der Verlauf der Nachhallzeiten ist jedoch über den betrachteten Frequenzbereich relativ gleichmäßig. Daher könnte die raumakustische Situation (noch) akzeptabel sein. Kürzere Nachhallzeiten ergeben sich, wenn die Anzahl der Stellwände weiter erhöht würde.

In der obigen Betrachtung wurde eine Raumbesetzung mit Tischen und 10 Stühlen (mit Personen) angenommen. Die Besetzung des Raumes hat jedoch auch einen gewissen Einfluss auf die Nachhallzeit, so dass für Anordnung 1 mit Nischenabsorbern weitere Simulationen mit größerer Personenzahl durchgeführt wurden. Zunächst wurde die Ausstattung des Raumes nach Anordnung 1 mit Nischenabsorbern und mit 39 Personen simuliert. Die Möblierung ist in Bild 61 dargestellt.

Bild 61:

Foto der Möblierung und Draufsicht des Raumes bei Anordnung 1 mit 31 absorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m<sup>2</sup> beidseitig) und mit 39 Sitzplätzen im großen Sitzungssaal.

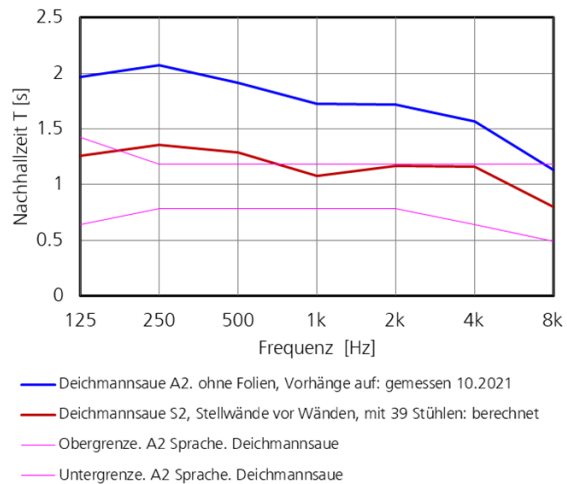


Quelle: IBP

Die gemessene und für diese Möblierung prognostizierte Nachhallzeit ist in Bild 62 dargestellt.

Bild 62:

Gemessene und prognostizierte Nachhallzeit im großen Sitzungssaal der Deichmannsaue für Anordnung 1 mit Nischenabsorbieren, unter Berücksichtigung der Vorort bestimmten Absorptionsgrade und mit einer Möblierung mit 39 Personen.

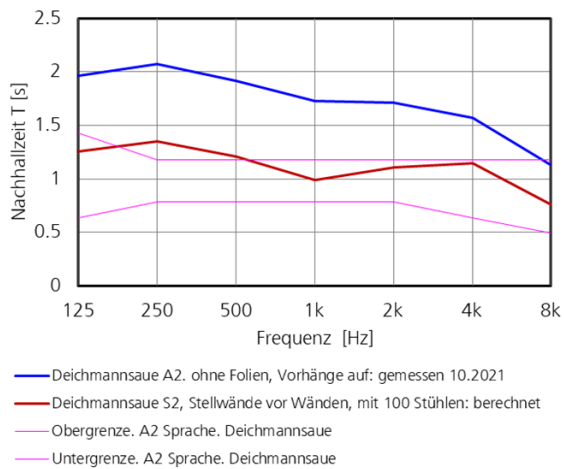


Quelle: IBP

Die Prognose für eine Besetzung von 39 Personen zeigt etwas kürzere Nachhallzeiten, so dass hochfrequent die Obergrenze für A2 gerade eingehalten wird. Bei 250 und 500 Hz ist die Nachhallzeit weiterhin etwas zu lang. Für eine Besetzung mit 100 Personen, jedoch ohne Tische (z.B. Vortrag) ist die prognostizierte Nachhallzeit in Bild 63 gezeigt.

Bild 63:

Gemessene und prognostizierte Nachhallzeit im großen Sitzungssaal der Deichmannsaue für Anordnung 1 mit Nischenabsorbern, unter Berücksichtigung der Vorort bestimmten Absorptionsgrade und mit einer Möblierung mit 100 Personen, jedoch ohne Tische.

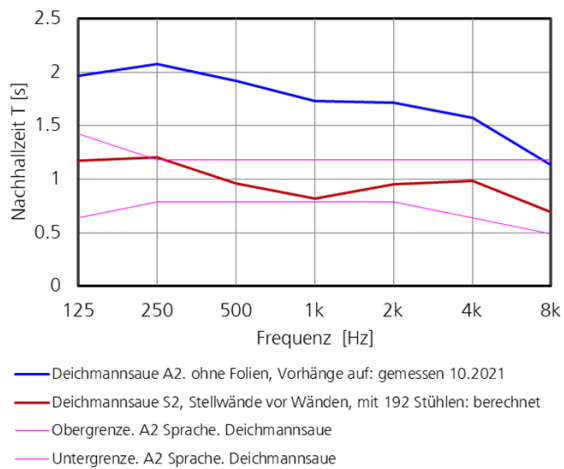


Quelle: IBP

Mit zunehmender Besetzung vermindert sich die Nachhallzeit etwas. Eine weitere Prognose wurde mit einer Besetzung von 192 Personen vorgenommen und ist in Bild 64 dargestellt.

Bild 64:

Gemessene und prognostizierte Nachhallzeit im großen Sitzungssaal der Deichmannsaue für Anordnung 1 mit Nischenabsorbern, unter Berücksichtigung der Vorort bestimmten Absorptionsgrade für die Stellwände, mit einer Möblierung mit 192 Personen ohne Tische.



Quelle: IBP

Wird der Raum von nahezu 200 Personen genutzt, zeigt die Nachhallzeit in Bild 64 Werte, die im gesamten Frequenzbereich zwischen den Grenzen der DIN 18041 für die Nutzungsart A2 liegt.

## 5. Ergebnisse und Bewertung

Jeder Raum, der unter Denkmalschutz steht, ist einzigartig, wird für unterschiedliche Nutzungen verwendet und unterliegt unterschiedlichen Anforderungen des Denkmalschutzes. Oft gibt es wenig Wand- und Deckenfläche, die mit Schallabsorbern ausgestattet werden kann. Daher müssen passende akustische Maßnahmen gefunden werden, um die Raumakustik entsprechend der Nutzung einzustellen. Dabei kann es sein, dass die Anforderungen an die Akustik mit vertretbarem Aufwand nur teilweise oder nur knapp erreicht werden können. Durch geeignete Planung lassen sich jedoch auch denkmalgeschützte Räume akustisch wenigstens deutlich verbessern, und im besten Fall so optimieren, dass gute Bedingungen für ihre Nutzung erreicht werden.

Dabei bringen Maßnahmen an jeder Oberfläche des Raumes, an der absorbierende Materialien angebracht werden können, Beiträge zur Reduktion zu langer Nachhallzeiten. Dazu zählen auch „versteckte Flächen“, wie z.B. Absorber in Nischen oder Öffnungen. Weiterhin können akustische Vorhänge, schallabsorbierende Möblierung und mobile Absorber, wie z.B. absorbierende Stellwände, aber auch abgehängte akustische Baffel oder Segel, Teppichböden und dergleichen zur Reduktion der Nachhallzeit beitragen. In speziellen Situationen können auch transparente oder transluzente Absorber wie z.B. mikroperforierte Plexiglas-Absorber verwendet werden. Sie können denkmalgeschützte Wand oder Deckenoberflächen (mechanisch) schützen und gleichzeitig Schallenergie absorbieren. Allerdings sollten mikroperforierte Absorber so ausgelegt werden, dass sie möglichst breitbandig absorbieren. Eine weitere zumindest theoretische Möglichkeit wäre es, das Raumvolumen in großen Räumen durch transparente Plexiglas-Strukturen akustisch zu verkleinern, um ohne großen Einfluss auf das sichtbare Raumgefühl das wirksame Raumvolumen und damit die Nachhallzeit zu reduzieren. Diese Maßnahme wird in vielen Fällen, wie auch in den hier untersuchten Reallaboren, jedoch nicht möglich sein.

In denkmalgeschützten Räumen, wie dem großen Sitzungssaal, die eine besonders große Raumhöhe aufweisen und damit ein besonders großes Raumvolumen haben, kann es besonders schwierig sein, die Anforderungen der DIN 18041 [1] zu erreichen. Dann sollte zumindest versucht werden, den Anforderungen nahezukommen. Dabei sollte auf eine über den bauüblichen Frequenzbereich möglichst gleichmäßige Nachhallzeit geachtet werden. Auch kann der Toleranzbereich der Nachhallzeit, der in DIN 18041 angegeben wird, erweitert werden. Die damit zusammenhängende Verschlechterung der Akustik kann zum Teil durch organisatorische Maßnahmen versucht werden zu kompensieren. Dies kann z.B. durch Reduktion der Anzahl der Nutzer oder bei Vorträgen durch Einsatz einer elektroakustischen Verstärkung des Redners möglich sein. Solche Maßnahmen müssen jedoch situationsbedingt individuell abgestimmt werden und stellen keine allgemeingültige Lösung dar. Im untersuchten Fall wurde die Problemstellung mit schallabsorbierenden Stellwänden gelöst, die temporär einsetzbar sind und die nicht mit den Oberflächen des Raumes verbunden sind.

Die Schallabsorber wirken Vorort meistens nicht exakt so, wie es die nach Norm im Hallraum gemessenen Angaben suggerieren. Die Positionierung und die Menge der Absorber und deren Einfluss auf das Schallfeld im Raum spielen eine Rolle bei der Wirksamkeit von Schallabsorbern [4]. Deshalb sollte bei der Planung von Raumakustik-Maßnahmen auch deren Verteilung im Raum (siehe auch die Hinweise hierzu in [1]) berücksichtigt werden, damit die geplanten Absorber im Raum maximal wirksam werden.

Es lässt sich insgesamt festhalten, dass für eine gute Raumakustik selbst bei hochabsorbierenden Elementen eine relativ große Menge an absorbierendem Material notwendig ist, um z.B. Bedingungen für gute Sprachverständlichkeit herzustellen. Dies ist erkennbar an der großen Fläche der mobilen Stellwände, die in den Reallaboren eingesetzt wurden.

Die Bewertung der Ergebnisse lässt sich am besten durch das Zitat des Nutzers eines der drei Reallabore beschreiben, der die Umsetzung der Maßnahmen über einen längeren Zeitraum verfolgt hat. Dabei waren die Absorber, zumindest der wesentliche Teil, über einen längeren Zeitraum im Forum Heimat verfügbar und haben in diesem Zeitraum die Raumakustik geprägt. Seine Einschätzung lautete:

»Ausgehend von der ursprünglichen Erfahrung, dass in unserem schallharten barocken Gewölbe, also dem Forum Heimat und Kultur, keine Unterhaltung, Ausstellung oder Vortrag möglich war, bin ich von den Maßnahmen begeistert. Die Raumakustik wurde durch drei unterschiedliche Maßnahmen so positiv beeinflusst, dass ich mir jetzt sicher bin: Das Gewölbe kann durch geeignete Schallabsorber akustisch garantiert in den Griff bekommen werden. Besonders angetan bin ich von der kollegialen Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut und dem professionellen Ablauf des tollen Forschungsprojekts. Danke für die Möglichkeit Akustik in einem denkmalgeschützten Raum besser verstehen zu können«!

Alexander Karl Wandinger,  
Leitung Zentrum für Trachtengewand

## 6. Zusammenfassung

In diesem Forschungsprojekt wurde die Raumakustik in denkmalgeschützten Räumen aus Sicht der Akustik und mit dem Ziel der Darstellung der umsetzbaren Möglichkeiten behandelt. Bezüglich des Zusammenspiels von Akustik und denkmalschützerischen Aspekten wurden die vorhandene Literatur ausgewertet und davon ausgehend Experteninterviews durchgeführt. Die Analyse beider Arbeitsschritte führte zu grundsätzlichen Erkenntnis, dass Lösungen für die Nutzung der Räume in der Regel für jeden Raum individuell gefunden werden müssen, wobei es hierbei um das Zusammenwirken verschiedener Fachleute und der Nutzer und um eine Kompromissfindung geht. Diese gelingt umso besser, wenn sich die beteiligten Personen dieser Notwendigkeit gemeinsam bewusst werden und pragmatische Lösungen anstreben. Die Verfügbarkeit von an sich raumakustisch wirksamen Materialien und Elementen ist in beachtlicher Vielfalt gegeben. Die Informationen dazu sowie ihre fallspezifische Auswahl und Ausgestaltung im jeweiligen Raum stellen jeweils die praktische Aufgabe dar.

Im weiteren Vorgehen des Projekts wurden drei Reallabore gesucht und gefunden, die alle drei verschiedene Raumgrößen, verschiedene Randbedingungen und Nutzungen aufwiesen. Anhand dieser drei Reallabore wurden Lösungsansätze gesucht und mittels raumakustischer Berechnungen und Simulationen gefunden, wobei die Lösungsfindung die Randbedingungen des Denkmalschutzes in den Räumen berücksichtigten. Mit Hilfe der beteiligten Nutzerinnen und Nutzer der Reallabore und der am Projekt beteiligten Firmen konnten Lösungen erarbeitet sowie beispielhaft in den Reallaboren umgesetzt werden. Schwerpunkt der Untersuchungen waren die Reallabore Forum Heimat und Franz-Marc-Raum im Kloster Benediktbeuern. Mit den umgesetzten Lösungen wurden diese beiden Räume messtechnisch nochmals untersucht und die Annahmen der Raumakustik-Simulationen, einschließlich der tatsächlichen Wirkung schallabsorbierender Materialien überprüft. Dabei zeigte sich, wie zu erwarten, dass die Wirkung geringfügig variieren kann, abhängig vom Schallfeld und den räumlichen Gegebenheiten. Die an diesen Beispielen ermittelten Werte wurden zur Überprüfung der Ergebnisse für den großen Sitzungssaal im Schloss Deichmannsaue als drittes Reallabor übertragen und auch für diesen Raum Lösungen gefunden, die zu seiner guten Nutzung führen können.

Die in diesem Projekt verwendeten Schallabsorber stellten die Partnerfirmen des Projekts bereit und sie ermöglichten damit die praktische Betrachtung der Raumakustik und notwendiger Maßnahmen in den Reallaboren. Sie stehen beispielhaft für die Vielzahl an möglichen Raumakustik-Produkten, die gegebenenfalls in denkmalgeschützten Gebäuden eingesetzt werden können und zeigen insbesondere mit den schallabsorbierenden mobilen Stellwänden Lösungen, die in schwierigen Räumen dennoch zu einer guten Raumakustik führen. Wesentlich ist dabei, dass in der Regel größere Flächen bzw. eine größere Anzahl an absorbierenden Elementen notwendig sind, um die Raumakustik deutlich zu verbessern.

Mit dem daraus abgeleiteten und nachfolgend beschriebenen Planungskompodium Raumakustik soll eine Handreichung für die betroffenen Nutzer, Planer, Fachingenieure und Denkmalbehörden sowie alle interessierten Personen und Stakeholder erstellt werden, das aus diesem Bericht ausgegliedert und gesondert herausgegeben werden soll. Damit wird allen beteiligten Personen eine übersichtliche und prägnante Planungshilfe an die Hand gegeben, mit der die Raumakustik von denkmalgeschützten Räumen verbessert und eine gute Nutzung gewährleistet wird. Es trägt so zum Erhalt denkmalgeschützter Räume und Gebäude bei.



## 7. Planungskompodium Raumakustik

Die Raumakustik in denkmalgeschützten Gebäuden und Räumen ist abhängig von der Nutzung und absolut notwendig, um diese dauerhaft zu gewährleisten. Denkmalgeschützte Räume unterliegen einer Vielzahl weiterer Anforderungen wie z.B. dem Brandschutz, Wärmeschutz, Beheizbarkeit, Barrierefreiheit etc. Vor allem Forderungen an die unveränderte bzw. unversehrte Beschaffenheit der Oberflächen und die Gestaltung der Räume bedingen für Raumakustik-Maßnahmen im Denkmalschutz besondere Herausforderungen. Die Lösungsfindung ist in vielen Räumen eine individuelle Aufgabe, die durch Abstimmung mit den zuständigen Behörden bzw. Personen erfolgen muss. Die Übertragung von Lösungen auf andere Räume ist nicht immer möglich und muss individuell geprüft werden. Wird die Raumakustik vernachlässigt oder werden notwendige Maßnahmen nicht umgesetzt, sind Räume nicht oder nur sehr eingeschränkt nutzbar, und deren dauerhafte Nutzung ist fraglich. Damit steht schlussendlich auch der Erhalt der Räume und Gebäude auf dem Spiel.

Daher werden in diesem Planungskompodium generalisierte Aussagen zur Raumakustik im Denkmalschutz zusammengefasst, die den Beteiligten bei der Vorgehensweise der Raumakustik-Planung helfen, eine für die Nutzenden möglichst gute individuelle Lösung zu finden.

### **Vorgehensweise:**

Zunächst muss geklärt werden, welche Nutzung des Raumes vorgesehen ist und ob alternativen Nutzungen für den Raum in Frage kommen. Die Nutzung des Raumes hat dabei einen zentralen Stellenwert, da über längere Zeit betrachtet nur eine sinnvolle Nutzung den Erhalt eines Gebäudes und Raumes sichert. Aus der Nutzung resultieren verschiedene Anforderungen an den Raum, zu denen die Raumakustik gegebenenfalls mit hohem Stellenwert zählt. Ihre quantitative Formulierung erfolgt zumeist in Form der Nachhallzeit mit zugehörigen Toleranzwerten [1] - [3]. In vielen Fällen zeigt sich, dass die vorgefundene Nachhallzeit im Raum für die Nutzung zu lang ist und nicht genügend schallabsorbierende Flächen bzw. äquivalente Schallabsorptionsfläche vorhanden ist, um eine gute Nutzung zu gewährleisten. Im Vordergrund steht damit der Versuch, die äquivalente Schallabsorptionsfläche des Raumes zu erhöhen.

Als nächster Schritt folgt die Abstimmung bzw. die Klärung mit den für den Denkmalschutz zuständigen Behörden oder Personen, welche Anforderungen aus Sicht des Denkmalschutzes an den Raum bestehen, ob diese sich auf den Erhalt von Raumbooberflächen, Materialien, Möbel und Einbauten, Bauteile, den Raumeindruck oder andere Eigenschaften des Raumes beziehen und welche Möglichkeiten bestehen, die Raumakustik an die geplante Nutzung anzupassen.

Mit dieser Information können Konzepte entwickelt werden, wie die Raumakustik konkret gestaltet werden kann. Dafür kann z.B. die akustische Aktivierung bestehender Oberflächen erfolgen, wie

- der Ersatz von Putzoberflächen durch akustisch wirksame (absorbierende) Putze,
- die Hinterlegung von Öffnungen in bestehenden Verkleidungen mit Schallabsorbieren,
- die nachträgliche Öffnung und Hinterlegung von bestehenden Verkleidungen,
- der Einbau von akustisch wirksamen Wand- und Deckenverkleidungen,
- die optisch wenig auffallende transparente Verkleidung von Oberflächen mit mikroperforiertem Plexiglas, das sowohl als Schallabsorber als auch zum Schutz von Oberflächen (z.B. einer Wandbemalung etc.) dienen kann.

Ebenso können zusätzliche Einbauten im Raum vorgenommen werden, die akustische Wirkung haben, wie z.B.

- der Ersatz von bestehenden oder der Einbau von akustisch wirksamen Vorhängen,

- der Einbau von akustisch wirksamen Segeln oder gespannten akustisch wirksamen Textilien oder Folien oder Baffeln,
- der Einbau von akustisch wirksamen Wänden und Abtrennungen oder der Einbau von so genannten Pods, d.h. kleinen freistehenden Raum-in-Raum Lösungen, die auf ihrer Außenseite schallabsorbierende Eigenschaften aufweisen,
- der Einsatz von akustisch wirksamen Möbeln,
- die akustische Abtrennung von Raumbereichen, die zur Reduktion des akustisch wirksamen Raumvolumens bzw. der mittleren freien Weglänge der Schallwellen im Raum führt, und damit die Nachhallzeit verkürzt.

Weiterhin können mobile Maßnahmen in Räumen eingesetzt werden, wobei diese besonders im Denkmalschutz geeignet erscheinen, da sie nicht mit dem Gebäude verbunden sind und gegebenenfalls einfach aus dem Raum entfernt werden können, z.B. der Einsatz

- von akustisch absorbierenden Stellwänden, absorbierenden Aufstellern, textilen absorbierenden Bannern,
- von Absorberblöcken, oftmals mit Stoff überzogen und als Eck- oder Kantenabsorber eingesetzt,
- von Absorberflächen, die z.B. mit Stoff überzogen sind und die temporär in den Raum eingebracht werden können,
- von temporär eingebrachten Teppichen.

Der Einsatz von temporären mobilen Maßnahmen bietet den Vorteil, dass die Akustik damit variabel wird. Für verschiedene Nutzungen des Raumes können mehr oder weniger viele mobile Bauteile im Raum eingesetzt werden, so dass z.B. eine Anpassung an die Wiedergabe von Musik bzw. die Verwendung für Sprachwiedergabe (z.B. Vortrag oder Diskussion) möglich ist. Auch die Positionierung der temporären Absorber kann als Mittel zur (Fein-) Abstimmung der Akustik im Raum eingesetzt werden. So bewirkt die Platzierung von Absorbern in Raumecken eine erhöhte Absorption bei tiefen Frequenzen, die Abtrennung von Bereichen verändert die Nachhallzeit im Raum insgesamt. Damit wird die Gestaltung des Raumes in verschiedenen Dimensionen ermöglicht, z.B. auch der Optik und der Bewegungsführung (z.B. bei Ausstellungen).

Die aus akustischer Sicht ermittelten Maßnahmen müssen mit der zuständigen Denkmalbehörde abgestimmt werden. Daher bedarf es einer Diskussion, welche Ansprüche an den Raum gestellt werden und welche Maßnahmen möglich sind, um die geplante Nutzung zu ermöglichen.

Aus akustischer Sicht sollten die Anforderungen aus den Richtlinien [1] - [3] möglichst vollständig erfüllt werden. Es ist jedoch möglich, von den Anforderungen abzuweichen, d.h. den Toleranzbereich bezüglich der Soll-Nachhallzeit oder des A/V-Verhältnisses (Das Verhältnis von äquivalenter Absorptionsfläche A zum Raumvolumen V) zu vergrößern. Wird dies vorgenommen, so verschlechtern sich die Nutzungsbedingungen mit größer werdendem Toleranzbereich kontinuierlich. Daher ist bei der Ausarbeitung eines Konzepts auch die Seite der Nutzenden mit einzubeziehen und ein gemeinsamer Kompromiss zu finden, der im Idealfall dazu führt, dass die Nutzung nicht zu stark eingeschränkt oder gar verhindert wird. Zu berücksichtigen sind hierbei, z.B. bei Büronutzung, auch die Belegungsdichte von Personen, die Tätigkeit und ihr Störpotential gegenüber anderen Personen im Raum.

Die Verwendung von elektroakustischen Hilfsmitteln, um die Akustik im Raum anzupassen, ist in den meisten Fällen nicht zielführend. Dabei ist eine Verlängerung der Nachhallzeit durchaus möglich, eine Verkürzung jedoch nicht. Für die tägliche Nutzung des Raumes ist eine solche Maßnahme nicht zu empfehlen. Der Einsatz von Elektroakustik, wie z.B. in Kirchen, bei dem für die Zuhörer durch Lautsprecherbeschallung eine erhöhte Sprachverständlichkeit ermöglicht wird, stellt eine besondere Ausnahme dar, die für andere Anwendungen in der Regel nicht hilfreich ist.

Daher wird empfohlen, mit passiven akustischen Maßnahmen – ob temporär oder permanent im Raum installiert – die Raumakustik für eine gute Nutzung der Räume einzustellen. Dies ist sowohl für die Nutzenden als auch für die Betreibenden vorteilhaft. Es sichert den Erhalt denkmalgeschützter Räume und Gebäude und entspricht damit nicht zuletzt den Erfordernissen der Nachhaltigkeit.

## Danksagung

Wir bedanken uns beim BBSR für die finanzielle Unterstützung des Forschungsvorhabens im Rahmen des Zukunft-Bau Forschungsprogramms und bei Herrn Michael Brüggemann für die Begleitung des Projekts, sowie bei den Projektpartnerfirmen Liaver GmbH & Co. KG, Herrn Ronald Tschiersch, Herrn Elmar Tober und Herrn Roland Tober, der MBA Design & Display Produkt GmbH, Herrn Markus Militzer sowie der Heinz Fritz GmbH, Herrn Heinz Fritz für die Unterstützung des Projekts durch ihre Projektbegleitung, Ideen zur Umsetzung und der Ausführung der in den Reallaboren umgesetzten Schallabsorber.

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN 18041:2016: Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung. Beuth Verlag Berlin 2016.
- [2] VDI 2569:2019 Schallschutz und akustische Gestaltung in Büros. Verein Deutscher Ingenieure VDI, 2019.
- [3] ASR A3.7:2021 Technische Regeln für Arbeitsstätten – Lärm, Herausgegeben vom Ausschuss für Arbeitsstätten, ASTA-Geschäftsführung – BAuA, unter [www.baua.de](http://www.baua.de) zu beziehen.
- [4] X. Zhou, M. Späh, K. Hengst, T. Zhang: Predicting the reverberation time in rectangular rooms with non-uniform absorption distribution. *Applied Acoustics* 171 (2001) 107539.
- [5] W. Fasold, E Veres: Schallschutz + Raumakustik in der Praxis. Verlag für Bauwesen Berlin, 1998.
- [6] L. Maffei, G. Iannace, M. Masullo: Are classrooms in historical buildings compatible with good acoustic standards? *Proceedings of Acoustics 08 Paris*, 2008.
- [7] G. Iannace, P. Trematerra, A. Qandil: The acoustic correction of classrooms in historical buildings with numerical simulation. *Proceedings of AIA-DAGA 2013 Merano*, 2013.
- [8] C. Franzen: Denkmalgerechte Implementierung von Energieeinsparmaßnahmen in historischen Gebäuden. Handlungsleitfaden. Abschlussbericht. Forschungsinitiative Zukunft Bau, F2961, 2015
- [9] P. Brezina: Acoustics of historical spaces as a form of intangible cultural heritage. *Antiquity Publications Ltd*, 2012
- [10] R. Pompoli, N. Prodi: Guideline for acoustical measurements inside historical opera houses: Procedures and validation. *Journal of Sound and Vibration* 232 (1), 2000
- [11] T. Kamisinski, A. Kulowski, R. Kinasz: Can historic interiors with large cubature be turned acoustically correct? *Archives of Acoustics*, Vol. 41, Nr.1, 2016.
- [12] V. Vodolo: On the 3D acoustic analysis on UNESCO Sites: The example of San Vitale, Ravenna, Italy. *Journal of Physics: Conference Series*, URICSE IOP Publishing 2019
- [13] L. Alvarez-Morales, M. Lopez, A. Alvarez-Corbacho, P. Bustamente: Mapping the acoustics of Ripon Cathedral. *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Congress on Acoustics ICA 2019 Aachen*
- [14] Verbund-Platten-Absorber VPR, Renz Systeme GmbH, [www.renz-solutions.de](http://www.renz-solutions.de)
- [15] OWA-Wallboard, Odenwald Faserplattenwerk GmbH OWA, [www.owa.de](http://www.owa.de)
- [16] Knauf Cleaneo Wand, Knauf Gips KG, [www.knauf.de](http://www.knauf.de)
- [17] H. Kuttruff: *Room Acoustics*. Fourth Edition Elsevier Science Publishers, 2000.
- [18] DIN EN ISO 354:2003 Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen. Beuth Verlag Berlin 2003.

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Anforderung der DIN 18041 an die Nachhallzeit in Räumen der Gruppe A: A1 Nutzungsart Musik, A2 Sprache/Vortrag, A3 Unterricht/Kommunikation bzw. Sprache/Vortrag inklusiv, A4 Unterricht/Kommunikation inklusiv, A5 Sport. Quelle: Beuth Verlag, Berlin 2016	9
Bild 2:	Anforderung der DIN 18041 an den Verlauf der Nachhallzeit über der Frequenz in Herz. Angabe von T/Tsoll, bezogen auf die in Bild 1 dargestellten Soll-Nachhallzeit für die entsprechende Nutzung und Raumvolumen. Quelle: Beuth Verlag, Berlin 2016	10
Bild 3:	Beispielhafter Verlauf der Schallabsorption von porösen Absorbern und von Resonanzabsorbern.	10
Bild 4:	Vorgehensweise zur akustischen Simulation und Umsetzung von Maßnahmen am Beispiel des Reallabors Forum Heimat.	19
Bild 5:	Reallabor Forum Heimat, Zustand bei der ersten Messung.	19
Bild 6:	3D-Modell des Forum Heimat in Sketchup (links) und in Odeon (rechts) für die akustische Simulation des Raumes.	20
Bild 7:	Messung im Forum Heimat mit Lautsprecher- und Mikrofonposition für die Nutzung »Vortrag«.	20
Bild 8:	Nachhallzeit im Forum Heimat wie vorhanden, Mittelwerte der Messung und der Simulation sowie obere (OG) und untere Grenze (UG) für die Darbietung von Musik nach DIN 18041 [1].	21
Bild 9:	Skizze der zukünftigen Nutzungsszenarien des Forum Heimat. Quelle: Bezirk Oberbayern Forum Heimat, Bezirk Oberbayern, Benediktbeuern	22
Bild 10:	Überblick der akustischen Maßnahmen (die Nummerierung bezeichnet Oberflächen, deren Absorptionsgrade in Bild 11 dargestellt sind) im Forum Heimat, für den geplanten Ausbau des Raumes mit zwei Kabinen (links und rechts vorne) sowie der Vitrine an der Stirnseite.	23
Bild 11:	Überblick über die Absorptionsgrade der in der Odeon-Simulation (S1S4 in Bild 14) des Raumes verwendeten Materialien.	24
Bild 12:	Rendering mit Blick in das Raumakustik-Modell mit Bezeichnung einzelner für die Raumakustik-Simulation des Raumes relevanter Oberflächen (Bedeutung der Nummerierung siehe Bild 11).	24
Bild 13:	Gemessene und berechnete Nachhallzeit für das Nutzer-Szenario K1 (längere Nachhallzeit) sowie Grenzen der Nachhallzeit nach DIN 18041 Nutzungsart A1 (Musik).	25
Bild 14:	Gemessene und berechnete Nachhallzeit für das Nutzer-Szenario K2 (kürzere Nachhallzeit) sowie Grenzen der Nachhallzeit nach DIN 18041 Nutzungsart A2 (Sprache).	26
Bild 15:	Fotos von Reapor®, links gesinterte Glasschaumplatte, rechts mikroskopische Aufnahme der Oberfläche. Quelle: Liaver GmbH & Co KG, Illmenau	28
Bild 16:	Foto des Reapor®-Absorbers, eingebaut in einer Wandnische unterhalb eines Fensters im Forum Heimat.	28
Bild 17:	Beidseitig absorbierende Stellwand von MBA im Forum Heimat. Beispielhafte Aufstellung im Eingangsbereich.	29
Bild 18:	Schallabsorbierende mikroperforierte zylindrische Verkleidung einer Säule des Forum Heimat als angepasster Schallabsorber. Links bei der Produktion, rechts als Säulenverkleidung im Forum Heimat. Quelle: Heinz Fritz GmbH, Herbrechtingen, Fraunhofer IBP	30
Bild 19:	Foto des Forum Heimat in Benediktbeuern.	31

---

Bild 20:	Nachhallzeit des leeren Raums Forum Heimat in Benediktbeuern mit Anpassung bei 125 Hz.	31
Bild 21:	Bild der im Forum Heimat installierten Absorbern in den 7 Wandnischen unter den Fenstern.	32
Bild 22:	Nachhallzeit im Forum Heimat bei installierten Absorbern in den 7 Wandnischen unter den Fenstern.	32
Bild 23:	Poröse Absorber installiert in den 7 Wandnischen unter den Fenstern und mikroperforierte Absorber als Säulenverkleidung.	33
Bild 24:	Nachhallzeit im Forum Heimat bei installierten Absorbern in den 7 Wandnischen unter den Fenstern und der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung.	33
Bild 25:	Anordnung der installierten Absorbern in den 7 Wandnischen, der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung und den 24 Stellwände, die im Raum verteilt aufgestellt waren.	34
Bild 26:	Nachhallzeit im Forum Heimat bei installierten Absorbern in den 7 Wandnischen, der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung und den 24 Stellwänden, die im Raum verteilt aufgestellt waren.	34
Bild 27:	Foto des Forum Heimat mit installierten Absorbern in den 7 Wandnischen, der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung und den 24 Stellwänden, die vor den Wänden des Raumes stehend aufgestellt waren.	35
Bild 28:	Nachhallzeit im Forum Heimat bei installierten Absorbern in den 7 Wandnischen, der Installation des mikroperforierten Absorbers als Säulenverkleidung und den 24 Stellwänden, die vor den Wänden des Raumes stehend aufgestellt waren.	35
Bild 29:	Zusammenstellung aller Nachhallzeiten in der Vorort Untersuchung in Forum Heimat.	36
Bild 30:	Absorptionsgrad von Reapor®, gemessen Vorort und im Hallraum des IBP.	38
Bild 31:	Foto des mikroperforierten Absorber aus Plexiglas in Zylinderform als Verkleidung einer Säule im Forum Heimat in Benediktbeuern.	38
Bild 32:	Gemessener und berechneter Absorptionsgrad des mikroperforierten Plexiglasabsorbers.	39
Bild 33:	Gemessener Absorptionsgrad der mikroperforierten Stellwände bei zwei verschiedenen Aufstellungen im Forum Heimat und Vergleich zur Messung im Hallraum.	40
Bild 34:	Foto des Franz-Marc-Raum. Zustand des Raumes bei der Messung im Mai 2022 mit Bestuhlung für Besprechung oder Präsentation.	41
Bild 35:	3D-Modell des Franz-Marc-Raum in Sketchup (links) und in Odeon (rechts) für die akustische Simulation des Raumes.	41
Bild 36:	Akustische Messungen im Franz-Marc-Raum.	42
Bild 37:	Gemessene und simulierte Nachhallzeit im Franz-Marc-Raum bei vorgefundener Ausstattung.	42
Bild 38:	Grafik mit Nummerierung (für die Zuordnung der Schallabsorption in Bild 39) der geplanten akustischen Maßnahmen im Franz-Marc-Raum.	43
Bild 39:	Überblick über die Absorptionsgrade der in der Odeon-Simulation des Franz-Marc-Raum verwendeten Materialien.	44
Bild 40:	Ansicht zweier Wände im Franz-Marc-Raum mit Bezeichnung der raumakustischen Maßnahmen (die Bedeutung der Nummerierung siehe Bild 39).	44
Bild 41:	Gemessene Nachhallzeit und für die Anordnung 1 ohne Wandabsorber simulierte Nachhallzeit im Franz-Marc-Raum.	45

---

Bild 42: Anordnung 2 mit Wandabsorbern im Franz-Marc-Raum.	45
Bild 43: Nachhallzeit der Anordnung 2 mit umlaufenden Schallabsorbern an den Wänden des Raums, im Vergleich zur gemessenen Nachhallzeit im Ausgangszustand.	46
Bild 44: Beidseitig absorbierende Stellwände, aufgestellt im Franz-Marc-Raum zur Messung der Nachhallzeit.	47
Bild 45: Gemessene Nachhallzeiten ohne und mit 11 Stellwänden im Franz-Marc-Raum und Vergleich zu dem Anforderungsbereich nach DIN 18041.	48
Bild 46: Gemessener Absorptionsgrad der mikroperforierten Stellwände bei Aufstellung im Franz-Marc-Raum, bei zwei verschiedenen Aufstellungen im Forum Heimat sowie bei Messung im Hallraum.	49
Bild 47: Foto des großen Sitzungssaals im Schloss Deichmannsaue im Zustand der Messung der Nachhallzeiten.	50
Bild 48: 3D Modelle des großen Sitzungssaals im Schloss Deichmannsaue, links das Sketchup-Modell, rechts das Odeon Modell für die akustische Simulation.	50
Bild 49: Bild der Möblierung im großen Sitzungssaal im Schloss Deichmannsaue zum Zeitpunkt der Messung (hier ohne Plexiglasschirme).	51
Bild 50: Bilder der gemessenen Varianten im großen Sitzungssaal. Links geöffnete Vorhänge mit Trennfolien auf den Tischen, rechts ohne Trennfolien, jedoch mit geschlossenen Vorhängen.	52
Bild 51: Gemessene Nachhallzeit im großen Sitzungssaal bei verschiedenen Varianten.	52
Bild 52: Gemessene und simulierte Nachhallzeit für den großen Sitzungssaal und Vergleich mit der Anforderung für Nutzungsart A2 Sprache nach DIN 18041.	53
Bild 53: Überblick über mögliche akustische Maßnahmen (Bedeutung der Nummerierung siehe Bild 54) im großen Sitzungssaal.	54
Bild 54: Überblick über die Absorptionsgrade der in der Odeon-Simulation des großen Sitzungssaals verwendeten Materialien.	55
Bild 55: Rendering von akustischen Maßnahmen bzw. Oberflächen im großen Sitzungssaal (Bedeutung der Nummerierung siehe Bild 54).	55
Bild 56: Foto der Möblierung und Draufsicht des Raumes bei Anordnung 1 mit 31 absorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m <sup>2</sup> beidseitig) im großen Sitzungssaal.	56
Bild 57: Nachhallzeit des Ausgangszustands und der Anordnung 1 mit 31 absorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m <sup>2</sup> beidseitig) im großen Sitzungssaal sowie Anforderung für Sprache nach Nutzungsart A2 der DIN 18041.	56
Bild 58: Nachhallzeit des Ausgangszustands und der Anordnung 2 mit 31 absorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m <sup>2</sup> beidseitig) im großen Sitzungssaal sowie Anforderung für Sprache nach Nutzungsart A2 der DIN 18041.	57
Bild 59: Die Vorort bestimmten Absorptionsgrade von Stellwänden (17433) als Eingangsgrößen für die Simulation des großen Sitzungssaals. Quelle: IBP	58
Bild 60: Gemessene und prognostizierte Nachhallzeit im großen Sitzungssaal der Deichmannsaue für Anordnung 1 mit Nischenabsorbern, unter Berücksichtigung der Vorort bestimmten Absorptionsgrade, mit einer Möblierung mit 10 Personen.	59
Bild 61: Foto der Möblierung und Draufsicht des Raumes bei Anordnung 1 mit 31 absorbierenden Stellwänden (1 x 2,5 m, ca. 155 m <sup>2</sup> beidseitig) und mit 39 Sitzplätzen im großen Sitzungssaal.	59



- 
- Bild 62: Gemessene und prognostizierte Nachhallzeit im großen Sitzungssaal der Deichmannsaue für Anordnung 1 mit Nischenabsorbern, unter Berücksichtigung der Vorort bestimmten Absorptionsgrade und mit einer Möblierung mit 39 Personen. 60
- Bild 63: Gemessene und prognostizierte Nachhallzeit im großen Sitzungssaal der Deichmannsaue für Anordnung 1 mit Nischenabsorbern, unter Berücksichtigung der Vorort bestimmten Absorptionsgrade und mit einer Möblierung mit 100 Personen, jedoch ohne Tische. 61
- Bild 64: Gemessene und prognostizierte Nachhallzeit im großen Sitzungssaal der Deichmannsaue für Anordnung 1 mit Nischenabsorbern, unter Berücksichtigung der Vorort bestimmten Absorptionsgrade für die Stellwände, mit einer Möblierung mit 192 Personen ohne Tische. 61

# Anhang

## A.1 Fragebogen für Experteninterview

Das Titelblatt des leitfadengestützten Experteninterviews ist in Bild A1-1 dargestellt.

Bild A1-1:

Titelseite des Fragebogens für das leitfadengestützte Experteninterview.



Stakeholder-Interview mit \_\_\_\_\_  
 am \_\_\_\_\_  
 durchgeführt von \_\_\_\_\_  
 Protokollierung \_\_\_\_\_  
 Leitfadengestütztes Experteninterview  
 Ziel: Einholen von Expertenmeinungen zum Thema Raumakustik im Denkmalschutz  

- - Bedanken
- - Vorstellung eigener Person und Protokollant
- - Datenschutz: Verwendung nur zur Nutzung im BBSR-Projekt Akustik im Denkmalschutz, keine Nennung ihrer Antworten mit Bezug auf Ihre Person
- - Dauer ca. eine Stunde
- - Motivation BBSR-Projekt
- - Ihre persönlichen Meinungen, Einschätzungen und Erfahrungen
- - Haben Sie Fragen

Quelle: IBP

Die Fragen des Experteninterviews sind im Folgenden aufgeführt:

### Grundsätzliches / Einstieg

*Zunächst würden wir Sie bitten, sich kurz vorzustellen. Bitte gehen Sie auch darauf ein, was Ihre Aufgabe bzw. Rolle im Bereich des Denkmalschutzes und Ihr Zuständigkeitsbereich ist?*

*Tangiert Ihre Aufgabe die Akustik in denkmalgeschützten Gebäuden (dG), wenn ja inwiefern?*

*Wenn nein, haben Sie andere Berührungspunkte mit Akustik und wo?*

*Wie groß ist der Umfang Ihrer Tätigkeit bezüglich der Akustik in dG? (anteilig ihrer Arbeitszeit) Haben Sie weitere Kollegen, die sich mit diesem Thema beschäftigen?*

*Welchen Anteil hat dabei die Raumakustik?*

*Haben Sie in den letzten drei Jahren Projekte begleitet, bei denen die Raumakustik eine Rolle gespielt hat? Falls Ja: Um was ging es dabei?*

---

*Wie ist Ihre grundsätzliche Einschätzung zur Raumakustik: in Bezug auf den Denkmalschutz sehr wichtig, wichtig, neutral, wenig wichtig nicht wichtig?*

**Nähere Betrachtung: Inhaltlich**

*Was sind Ihrer Meinung nach die Herausforderungen für die Raumakustik in dG?*

*In wie weit spielt bei der Betrachtung der Raumakustik die spezifische Nutzung der Räume eine Rolle? (Vortrag, Büro, Musik, ...)*

*Wie gehen Sie mit Vorschlägen zur Verbesserung / Anpassung der Raumakustik in dG um?*

*Wie gewichten Sie den Denkmalschutz gegenüber der guten Nutzbarkeit der Räume (Nutzung = Erhalt)?*

*Welche (nachträglichen) raumakustischen Möglichkeiten sehen Sie als umsetzbar an?*

*Welche raumakustischen Maßnahmen sehen Sie als nicht umsetzbar an?*

*Lösungen können so umgesetzt werden, dass Oberflächen verändert werden, aber dennoch eine Rückbaumöglichkeit zum Originalzustand erhalten bleibt. Was ist Ihre Meinung zu dieser Art von Lösungen?*

*Änderungen von Oberflächen (z.B. Ersatz von Putz durch Akustikputz, Änderungen von Holzverkleidungen zur Schallabsorption, Einsatz von mikroperforiertem Plexiglas...) können Lösungen sein, bei denen sich die Optik nicht ändert. Was ist ihre Meinung zu solchen Maßnahmen?*

*Welche veränderbaren (temporären) raumakustischen Maßnahmen sehen Sie als Möglichkeiten zur Gestaltung? (Vorhänge, Stellwände, Rollos, ...)*

**Allgemeines / Ausblick**

*Welche Themen aus dem Bereich der RA im Denkmalschutz sollten aus Ihrer Sicht beforscht werden?*

*Welche raumakustischen Möglichkeiten würden Sie sich für die Zukunft für den Denkmalschutz wünschen? (Produkte?)*

*Gibt es Ihrerseits noch Themen, die wir noch nicht angesprochen haben, die Ihnen aber wichtig erscheinen?*

*Haben Sie noch Fragen?*

*Bedanken, ggf. auf weitere Kontaktaufnahme hinweisen, verabschieden*

## A.2 Angaben zu Messung der Raumakustik

Die Messungen der Raumakustik wurden mit folgenden Geräten durchgeführt:

Tabelle A1:  
Verwendete Geräte für die Raumakustik-Messungen

Gerät	Hersteller	Gerätenummer	Seriennummer
Mikrofon	Brüel & Kjær	4165	1490667
Vorverstärker	Norsonic	1201	18888
Mikrofon	G.R.A.S.	40AF	102513
Vorverstärker	Norsonic	1201	22062
Kalibrator	Larson Davis	CAL 200	19246
Analyser	Norsonic	RTA840	16007
AD-Wandler	Brüel & Kjær	ZED948	26012
Verstärker	Brüel & Kjær	2716	2079666
Dodekaeder	Brüel & Kjær	4296	2088235
Software	Brüel & Kjær	7841	6.0.7493.704

Die Messungen erfolgten mit Sweep-Sine-Signal mit dem Software-basierten Messsystem Dirac Version 6.0.7493.704. Die Messungen ermöglichten die Auswertung von Impulsantworten, aus denen die Ermittlung der Nachhallzeiten erfolgte.