

F 2948

Fabian Schmid, Eva Veres, Walter Haase,
Schew-Ram Mehra, Werner Sobek, Klaus Sedlbauer

**Adaptive Raumakustik und akustische
Konditionierung im Bauwesen (ARAKO)
Adaption der akustisch wirksamen
Parameter von Textil- und
Membransystemen zur Verbesserung
bauakustischer Maßnahmen sowie
zur Steigerung und Anpassung der
Raumakustik und Raumklangqualität**

F 2948

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9496-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Adaptive Raumakustik und akustische Konditionierung im Bauwesen (ARAKO)

Adaption der akustisch wirksamen Parameter von Textil- und Membransystemen zur Verbesserung bauakustischer Maßnahmen sowie zur Steigerung und Anpassung der Raumakustik und Raumklangqualität

Das Forschungsprojekt wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ gefördert.

Dipl.-Ing. Fabian Schmid

Dipl.-Ing. Eva Veres

Dr.-Ing. Walter Haase

Prof. Dr.-Ing. Schew-Ram Mehra

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Jun.-Prof.Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD

Forschungsprojekt:	Adaption der akustisch wirksamen Parameter von Textil- und Membransystemen zur Verbesserung bauakustischer Maßnahmen sowie zur Steigerung und Anpassung der Raumakustik und Raumklangqualität
Förderkennzeichen:	SF– 10.08.18.7- 11.20 / II 3-F20-10-1-038
Förderstelle:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung Referat II3 Deichmanns Aue 31 - 37 53179 Bonn
Mitarbeit:	Dipl.-Ing. Fabian Schmid (ILEK) Dipl.-Ing. Eva Veres (LBP) Dr.-Ing. Walter Haase (ILEK) Prof. Dr.-Ing. Schew-Ram Mehra (LBP) Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek (ILEK) Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer (LBP)
Bearbeitungszeitraum:	September 2011 bis Juni 2014
Berichtszeitraum:	September 2011 bis Juni 2014
Bearbeitungsstelle:	Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) Pfaffenwaldring 7 + 14 70569 Stuttgart Lehrstuhl für Bauphysik (LBP) Pfaffenwaldring 7 70569 Stuttgart
Anmerkung:	Der Abschnitt 2.2 sowie die Kapitel 6 und 7 sind teilweise aus Schmid, F., <i>Die Funktionsintegration als Indikator im Gestaltungsprozess von Leichtbaustrukturen</i> , Dissertation in Vorbereitung, <i>Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren</i> . 2014, Universität Stuttgart entnommen. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Dieser Forschungsbericht umfasst 162 Seiten.

Stuttgart, 02.03.2015

Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung für die Förderung des Forschungsprojektes im Rahmen der Initiative „Zukunft Bau“.

Für die projektbegleitende Beratung, Unterstützung und den inspirierenden Austausch bedanken wir uns beim Fraunhofer Institut für Bauphysik, der Groz-Beckert KG, der GST GmbH, der Lantor GmbH, der LPS GmbH, der Versaidag-Indutex GmbH und bei der Werner Sobek Stuttgart GmbH & Co. KG.

Den Werkstattmitarbeitern des ILEK gilt der Dank für die technische Unterstützung bei den Prüfständen und für die Umsetzung der notwendigen Konstruktionselemente.

Für die Möglichkeit, die prototypischen Lagenaufbauten messtechnisch zu prüfen, danken wir den Mitarbeitern des Fraunhofer Institut für Bauphysik am Standort Stuttgart.

Fabian Schmid, Eva Veres, Walter Haase, Schew-Ram Mehra, Werner Sobek, Klaus Sedelbauer

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	5
2	Problemstellung und Ziele	7
2.1	Schallschutz, Bau- und Raumakustik	7
2.2	Herausforderungen für Planungs- und Entwicklungsprozesse	8
2.3	Adaptive mehrlagige textile Fassaden	9
3	Arbeitsmethodik	10
3.1	Interdisziplinäre Systementwicklung	10
3.2	Modulare Grundkonzeption	10
3.3	Konstruktive und bauphysikalische Materialeigenschaften	10
3.4	Herstellungs- und Fügetechnologie	11
3.5	Adaptionsmethoden	11
4	Arbeitsphasen und Ergebnisse	12
4.1	Recherche (Arbeitsphase 1.1)	12
4.2	Analyse der Recherche (Arbeitsphase 1.2)	12
4.2.1	Systemische Grundlagen	12
4.2.2	Systemaufbauten	13
4.3	Synthese zu akustisch passiv wirkenden Systemlösungen (Arbeitsphase 1.3)	15
4.4	Synthese zu akustisch aktiv wirkenden Systemlösungen (Arbeitsphase 1.4)	18
4.5	Charakterisierung der Systemaufbauten (Arbeitsphase 2)	20
4.5.1	Voruntersuchungen und Charakterisierung	20
4.5.2	Messung der Schalldämmung	25
4.5.3	Diskussion der Messergebnisse	29
4.5.4	Bewertung der Systemvarianten in Bezug auf frühere Untersuchungen	35
4.6	Optimierung der Systemlösung (Arbeitsphase 3)	37
4.7	Dokumentation (Arbeitsphase 4)	37
5	Grundlagen und prinzipielle Gegebenheiten	38
5.1	Akustik / Schallschutz	38
5.1.1	Grundlagen der Schalldämmung ultraleichter Konstruktionen	38
5.1.2	Stand der Forschung	45
5.1.3	Einfluss der Vorspannung	48
5.1.4	Akustische Wirkweise von ultraleichten Fassadenlösungen	48
5.2	Prinzipieller Aufbau und Optimierung von Vliesstoffdämmungen	50
5.3	Erweiterung des Grundprinzips	51
5.4	Anpassungsfähigkeit des Systemaufbaus	51

5.5	Materialvariation bei der dämpfenden Kernlage	52
6	Systematischer Entwurfsprozess	54
6.1	Einleitung	54
6.2	Wechselwirkungen, Synergien und Zielkonflikte	56
6.3	Funktionsintegration	56
6.4	Anwendung von Funktionsintegration im Entwicklungsprozess	59
6.5	Fassaden als Teilsystem von Gebäuden	61
6.5.1	Der Stellenwert der Fassaden und die Entwicklungstendenzen	61
6.5.2	Anforderungen an Fassadensysteme	63
6.5.3	Die Systematik heutiger Fassadensysteme	65
6.6	Leichte, energieeffiziente und herstellbare Fassaden und deren Funktionspotenzial	67
6.6.1	Stoff, Masse, Energie und Information als Faktoren für den Vergleich unterschiedlicher Lösungsansätze	67
6.6.2	Effektive und effiziente ganzheitliche Lösungsansätze für eine ultraleichte Fassade	73
6.6.3	Die Leistungsfähigkeit von textilen Werkstoffen als Flächenelement	75
6.6.4	Potenzial textiler Produktions- und Herstellungsverfahren	75
6.7	Anwendung von Funktionsintegration bei der Systemkonzeption	76
6.7.1	Systemanalyse	76
6.7.2	Systemsynthese	84
6.8	Systemkonzeption	85
6.8.1	Äußeres Deckelement	85
6.8.2	Inneres Deckelement	86
6.8.3	Kernelement	86
6.8.4	Kollektorelement	87
6.9	Systementwicklung und Umsetzung in Sachgesamtheiten	89
7	Prüfung und Validierung der Konzepte anhand der wichtigsten Anforderungen	91
7.1	Leistungsüberprüfung „Wärme und Feuchte“	91
7.2	Leistungsüberprüfung „Bau- und Raumakustik“	98
7.3	Leistungsüberprüfung „Brandverhalten und Brandschutz“	100
7.4	Leistungsüberprüfung „Belichtung“	103
7.5	Witterungseinflüsse	106
7.6	Weitere Anforderungen	106
7.7	Syntheseergebnis und Leistungsfähigkeit	107
8	Zusammenfassung und Ausblick	110
8.1	Zusammenfassung	110
8.2	Fazit	111

9	Literatur	113
10	Anhang	118
10.1	Datenblatt zur Werkstoffcharakterisierung	118
10.2	Datenblatt zur Systemcharakterisierung	121
10.3	Skriptdateien zur Messdatenauswertung der Messungen mit dem Impedanzrohr	126
10.4	Dokumentation der messtechnischen Voruntersuchungen im Impedanzrohr	130
10.5	Übersicht zu den Variantenstudien	136
10.6	Protokolle der messtechnischen Prüfung im Türenprüfstand	138
10.7	Methoden für Systemanalyse, -transformation und -synthese	161

1 Kurzfassung

Die Ziele des Forschungsvorhabens sind die Verifizierung der akustischen Eigenschaften von relevanten Werkstoffen und Systemaufbauten des textilen Bauens, die Optimierung von mehrlagigen passiven Systemaufbauten und die Weiterentwicklung hin zu aktiv wirkenden Fassaden- und Innenwandsystemen. Das Forschungsprojekt konnte die technologischen und funktionalen Möglichkeiten der Schallabsorption, Dämmung und Reflexion bewerten und sie zusammen mit Adaptionsmethoden auf Basis von mehrlagigen textilen Gebäudehüllen zu einer veränderbaren Bau- und Raumakustik zusammenführen. Neben der Verifizierung verwendbarer Werkstoffe, Werkstoffkombinationen sowie der adaptiven Systeme standen die Entwicklung von Lösungsstrategien und die Erstellung von Prototypen für einen optimalen Schallschutz und für eine veränderbare Raumakustik im Mittelpunkt des Projektes. Das Vorhaben erweitert damit die Forschungsprojekte des Themenbereichs der adaptiven textilen mehrlagigen Gebäudehüllen am Institut um einen weiteren relevanten bauphysikalischen Aspekt.

Die Bewertung der akustischen Wirkweise von Werkstoffen und Bausystemen gewinnt zunehmen an Bedeutung, da Lärm einen der größten Umweltbelastungsfaktoren für den Menschen darstellt. Die auditive Wahrnehmung von Räumen rückt damit zunehmend ins Bewusstsein der Nutzer und Planer. Laute Hintergrundgeräusche und akustische Mängel unterstreichen oftmals eine schlechte Verständlichkeit und führen zu wesentlichen Einbußen bei der Raum- und Lebensqualität. Durch die Anpassungsfähigkeit der Bau- und Raumakustik an die jeweilige Nutzungssituation werden zum einen die Störgeräusche und der Lärmpegel gezielt reduziert, zum anderen wird die Sprachverständlichkeit und die Raumklangqualität je nach Anwendungsbereich verbessert. Eine adaptive Raumakustik ermöglicht somit auf die jeweilige Nutzungssituation einzugehen, auf unerwartete Ereignisse zu reagieren oder inszenierte Darbietungen zu unterstreichen.

Begonnen wurde das Projekt mit einer ausführlichen Literatur- und Internetrecherche zu den physikalischen Grundlagen der technischen Akustik, zu potentiellen Werkstoffen für das textile Bauen, zu bereits vorhandenen Systemlösungen in anderen Disziplinen und zu notwendigen Mess- und Bewertungsverfahren für den Bereich der Bau- und Raumakustik.

Bei vorangegangenen Forschungsprojekten wurde im Bereich der ultraleichten, hocheffizienten, textilen Gebäudehüllsysteme geforscht und es wurden im Rahmen der ZukunftBau Forschungsprojekte „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen“ und „Entwicklung leichter Profile und Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen für Anwendungen in der textilen Gebäudehülle und der Fenstertechnik“ Elemente für modulare Gebäudehüll- und Wandaufbauten entwickelt. Die daraus resultierenden konzeptionellen, konstruktiven und bauphysikalischen Erkenntnisse wurden als gegeben vorausgesetzt und dienen somit als Grundlage für die Integration neuer, potentieller Technologien und Systemaufbauten [2, 3].

Aus den Ergebnissen der Recherche und den Erfahrungen aus den vorangegangenen Projekten wurden die zu untersuchenden Werkstoffe und Lagenaufbauten festgelegt. Die Vielzahl an Produkten und die daraus resultierenden Kombinationsmöglichkeiten zwingen zu einer Kategorisierung und Wichtung, um Anforderungen und Schwerpunkte im Forschungsprojekt definieren zu können. Demnach standen die im textilen Bauen bisher verwendeten Werkstoffkombinationen und Systeme an erster Stelle. Dabei handelt es sich um vorgespannte Gewebelagen aus Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe sowie aus Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichtetem Glasfasergewebe. Diese sollten, wie im Bauwesen üblich, immer als äußere Membranlage für den Witterungsschutz und für die Sicherstellung der Tragfähigkeit eingesetzt werden. Die Gewebe für die prototypischen Umsetzungen stammen aus der Produktion der Firma Verseidag-Indutex.

Im Rahmen des Projektes wurde auch die vorgesehene Serienuntersuchung und Charakterisierung von Werkstoffen, Werkstoffkombinationen und akustisch wirksamen Systemlösungen durchgeführt. Das vorhandene Impedanzrohr zur messtechnischen Erfassung der Schallabsorptions- und Reflexi-

onsgrade wurde weiter ausgebaut und die Auswertelgorithmen mit MATLAB, einem numerischen Berechnungsprogramm zur Lösung und Darstellung mathematischer Zusammenhänge, optimiert. Kalibrierung und Vergleichsmessungen wurden durchgeführt. Die Serienprüfung wurde begonnen und die Ergebnisse wurden in die vorhandene Produkt- und Werkstoffdatenbank aufgenommen.

Im weiteren Schritt wurde ein passiv wirkendes Systems als mehrschalige Kombination aus Polyvinylchlorid (PVC) beschichteten Polyesterwebelagen und Polyesterverbundvliesstoffen entwickelt. Der Vliesstoff wurde dabei auf die akustischen und tragstrukturellen Aspekte sowie auf die Herstellbarkeit hin optimiert und in der Zwischen- oder Funktionslage angebracht. Eine textile Deckschicht, bei der die höchst mögliche Masseverdichtung durch den industriellen Vernadelungsprozess umgesetzt werden konnte, wurde mit einer offenporigen Vliesstofflage verbunden, die erfahrungsgemäß als Hohlraumdämpfung geeignet ist. Die entwickelte Vliesstoffkombination wurde im Rahmen des Forschungsprojektes bei der Groz-Beckert KG weiterentwickelt und hergestellt. Hierzu wurde eine Bachelorarbeit an der Hochschule Albstadt-Sigmaringen mit Schwerpunkt der textiltechnischen Entwicklung durchgeführt. Damit konnte der Verbundvliesstoff für erste prototypische Aufbauten, für die Voruntersuchungen und die messtechnischen Prüfungen zur Ermittlung des Schalldämm-Maßes konfektioniert werden.

Die bei den entwickelten passiv wirkenden Systemaufbauten gewonnenen Ergebnisse ermöglichten die Einschätzung, dass deren Wirkweise konsequent in ein aktiv wirkendes System weitergeführt werden kann. Daraufhin wurde im Projektverlauf beschlossen, die messtechnischen Prüfungen des Schalldämm-Maßes für passive und aktive Aufbauten im Türenprüfstand des Fraunhofer Instituts für Bauphysik gemeinsam und damit nach der Entwicklung der aktiv wirkenden Bauelemente durchzuführen. Der Türenprüfstand ist für die Charakterisierung von Türen ausgelegt und kann auch für erste Voruntersuchungen von Fassadenaufbauten verwendet werden. Der Vorteil dabei liegt in den geringeren Abmessungen der Probenaufbauten im Vergleich zum Fassadenprüfstand.

Die Systementwicklung eines akustisch aktiv wirkenden Aufbaus konnte in Zusammenarbeit mit der Global Safety Textiles GmbH durchgeführt werden. Es wurde ein textiles Bauelement entwickelt, welches die flächenbezogene Masse einer Lage im Systemaufbau durch Fluidbefüllung zeitlich variabel erhöhen kann. Das entstandene zweilagige Taschengewebe konnte in ersten Varianten produziert und getestet werden. Auch die Weiterentwicklung und die Konfektionierung für den Türenprüfstand konnten durch diese Zusammenarbeit erfolgreich durchgeführt werden.

Nach Herstellung aller relevanten Bauelemente wurde die messtechnische Prüfung von sieben unterschiedlichen Lagenaufbauten durchgeführt, die passiv wie auch aktiv wirkende Systemkonzepte abdecken. Für die Umsetzungen in exemplarische Fassadendemonstratoren erfolgten danach die Auswertung und die Eingrenzung der zielführendsten Lösungsvarianten.

Abschließend wurden für die ausgewählten Lösungen weitere bauphysikalische Kennwerte ermittelt, um die Leistungsfähigkeit hinsichtlich einer Anwendung als Fassadenlösung übergeordnet einschätzen zu können. Die dafür parallel zum Forschungsprojekt durchgeführte Systemkonzeption und -entwicklung hinsichtlich mehrerer unterschiedlich wirkender Anforderungen konnten anhand des Indikators der Funktionsintegration im Forschungsprojekt und durch die methodische Vorgehensweise im Entwicklungsprozess umgesetzt werden. Die Untersuchungen wurden hinsichtlich der Faktoren Belichtung, Wärme- und Feuchtehaushalt sowie Brandschutz näher untersucht.

Die Arbeiten wurden mit dem Bau von drei Fassadenelementen mit unterschiedlichen Lagenaufbauten abgeschlossen, um unterschiedliche Funktionsbereiche und die schallschutztechnische Leistungsfähigkeit der entwickelten Konzepte zu zeigen.

2 Problemstellung und Ziele

Im Folgenden wird zuerst auf heute wichtige Aspekte des Schallschutzes, der Bau- und Raumakustik eingegangen. Es folgt die Darstellung der Potentiale von textilen Werkstoffen und Systemaufbauten in adaptiven mehrlagigen textilen Gebäudehüllen.

Durch die kombinierte Betrachtung beider Themenfelder wird ein funktionaler und ästhetischer Mehrwert der städtischen Schallschutzmaßnahmen realisierbar und die Umsetzung der adaptiven mehrlagigen textilen Gebäudehüllen weiterentwickelt.

2.1 Schallschutz, Bau- und Raumakustik

Schallschutzmaßnahmen im städtischen Umfeld werden hauptsächlich durch die Reduktion der eigentlichen Lärmquellen, durch die Errichtung von Schallschutzmaßnahmen, die vornehmlich den Lärm durch Reflexion abschirmen und schließlich durch Instandsetzung der bestehenden Bebauung, beispielsweise mit Lärmschutzverglasung oder durch die Grundrissausrichtung bei Neubauten, erreicht. Meist kann eine angemessene Qualität für die Nutzer nur durch Maßnahmen in allen drei Kategorien erreicht werden. Auch wenn die Reduktion der eigentlichen Schallquelle die wohl effektivste Methode zur Lärminderung ist, wird es in Zukunft gerade im städtischen Umfeld durch schallemittierende Infrastrukturen nicht zu einer wesentlichen Reduktion der Schallemission kommen. Um unabhängig von den Schallquellen den Lärmpegel senken zu können sind weitere Maßnahmen zur Lärmbekämpfung notwendig. Hierzu sollten Schallschutzmaßnahmen immer auch mit absorbierendem Charakter ausgeführt werden [4].

Eine Verbesserung der Raumakustik in geschlossenen Räumen wird durch passiv wirkende, schallabsorbierende Decken- und Wandelemente realisiert. Schallabsorption kann im Wesentlichen entweder mithilfe von Resonatoren oder durch poröse Absorber erzielt werden. Somit kann bei halligen Räumen die Nachhallzeit beeinflusst und eingestellt werden. Die Werkstoffeigenschaften der porösen Absorber spielen dabei eine wesentliche Rolle. Typische Materialien sind absorbierende Platten aus Glasgranulat, mineralische Faserdämmstoffe, Polyesterfilz, oder Holzwolle. Wichtigstes Charakteristikum der Werkstoffe für einen effektiven Einsatz als Absorber ist ein optimaler akustischer Strömungswiderstand. Typischerweise sind dies Fasergewirke, Filze und offenporige Schäume [3-6].

Eine Sensibilisierung der Planer bei der Planung und Umsetzung von Gebäuden auf nicht visuell wahrnehmbare Parameter wird mit dem steigenden Anspruch an ökologischer und gesundheitlicher Verträglichkeit in Zukunft verstärkt notwendig werden. Für Planer und Bauschaffende wird die Sensibilisierung für die Zusammenhänge zwischen Material, Konstruktion, Raum und die damit einhergehenden bau- und raumakustischen Folgen von größerer Bedeutung werden [4].

Der Entwicklungsschwerpunkt für absorbierende Schallschutzmaßnahmen im Stadtraum liegt somit bei Systemlösungen, die Materialien mit optimalem akustischem Strömungswiderstand, witterungsgeschützt und ästhetisch anspruchsvoll einsetzen. Die umfassenden methodischen, konzeptionellen, konstruktiven und bauphysikalischen Ergebnisse der vorangegangenen Forschungsprojekte der adaptiven mehrlagigen textilen Gebäudehüllen am Institut bilden dafür eine fundierte Grundlage [3, 6-8].

Für Maßnahmen in Innenräumen von Gebäuden wird der Schwerpunkt auf der Steigerung der Nutzungsqualität mittels adaptiver, akustisch aktiv wirkender Systeme liegen. Eine Anpassung der raumakustischen Eigenschaften an veränderliche Raum- und Gebäudenutzungen erfolgt heute lediglich bei großen Konzert- und Veranstaltungsräumen. Um aber auch den unterschiedlichen Nutzungsvarianten kleinerer und mittlerer Räume gerecht zu werden, bedarf es eines einfachen, akustisch veränderbaren und wirksamen Systems, das auf die zahlreichen Nutzungsweisen von Räumen, auf die wechselnden Umwelteinflüsse und damit verknüpften Lärmimmissionen unmittelbar eingehen kann.

Für die erforderliche akustische Anpassungsfähigkeit und Veränderlichkeit sind textile Werkstoffe aufgrund ihrer Werkstoffeigenschaften und breiten Anwendungsspektren prädestiniert. Darüber hinaus ermöglichen sie es auf einzigartige Weise material- und ressourcensparende Lösungswege zu entwickeln. Sie leisten damit einen wesentlichen Beitrag auf dem Weg hin zum materialsparenden, umweltverträglichen und nachhaltigen Bauen und geben dem Aspekt der auditiven Architektur bei der Bewertung von Raum- und Lebensqualität mehr Gewicht.

Die damit verbundenen, erforderlichen Kompetenzen im Bereich des textilen Bauens, der Adaptivität und Veränderbarkeit von Werkstoffen und Werkstoffeigenschaften sowie von konstruktiven und bauphysikalischen Parametern wurden am Institut stetig ausgebaut. Das Forschungsprojekt „Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen“ zeigt den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung [3, 8].

2.2 Herausforderungen für Planungs- und Entwicklungsprozesse vergleiche [9]

Die Probleme des Schallschutzes sind dabei in komplexe Prozesse der Planer, Kunden und Nutzer eingebunden, die jeweils für sich individuelle Anforderungen und Kriterien definieren. Als übergeordnete Herausforderung für das Bauwesen hat sich für die kommenden Jahrzehnte eine sogenannte nachhaltige Entwicklung von Gebäuden, Bauteilen, Infrastrukturen sowie der zugrundeliegenden Abläufe und Prozesse herausgebildet. Die Bedeutung von Nachhaltigkeit wird mit den Dimensionen der Ökologie, der Ökonomie und des Sozialen beschreibbar und benennt ein Leitbild für eine multidimensionale und multidisziplinäre Entwicklung [10, 11].

Mit diesen epocheprägenden Herausforderungen sind Aufgaben verbunden, die durch Planung, Entwicklung und Gestaltung gelöst werden sollten. Das Planungshandeln ist dabei mit der Komplexität der Prozesse, den multidimensionalen Wirkebenen von Mitteln und Maßnahmen sowie den Interessen der unterschiedlichen Akteure konfrontiert [12].

Lösungen, die unterschiedlichen Anforderungen genügen, sind selbst in vernetzte Wirkweisen eingebunden. Ergänzend werden die Zielvorgaben und die Leistungserfüllung von den beteiligten Disziplinen aus verschiedenen Perspektiven bewertet.

Eine wesentliche Aufgabe im Planungsprozess ist, die Überlegungen, Vorhaben und Handlungen sinnvoll zusammenzuführen und zu koordinieren, um durch das Entwerfen, Entwickeln und Gestalten gesamtheitliche Antworten zu erarbeiten. Dieses Ziel gelingt bisher nur teil- oder phasenweise. Bei Leichtbaustrukturen, wie es textile Gebäudehüllen als masse- und ressourcensparendes Lösungskonzept sind, wird die effiziente, kombinierte Umsetzung der sinnvollsten Maßnahmen und damit die Einbindung unterschiedlichster Disziplinen von großer Bedeutung.

Zum Umgang mit diesen komplexen Verhältnissen wurden in Wissenschaft und Industrie zwar unterschiedliche Modelle als Grundlage für Entwicklung, Bewertung und Entscheidung erarbeitet. Sie systematisieren und verbessern den Prozess einzelner Disziplinen. Hierzu besteht auch eine rege theoretische Auseinandersetzung. Allerdings fehlen eine breite Anwendung und der Transfer des Wissens in die Praxis [10, 12-14].

Das Problem sind somit begrenzt wirksame Methoden, Strategien und Werkzeuge sowie ein fehlender Transfer in die Praxis aufgrund kompliziert und aufwendig anmutender Vorgehensweisen. Damit einhergehend fehlt ein universell verständlicher Leitfaden, der für die gesamte Planung und von den verschiedenen beteiligten Akteuren eingesetzt werden kann.

Durch die Konzeption der Arbeitsphasen im Forschungsprojekt und die begleitende methodische Aufarbeitung der Entwicklungsprozesse, wurde versucht die Forschungs- und Industriepartner für die übergeordnete Zusammenhänge zu sensibilisieren. Es wurde lange an den grundlegenden und prinzipiellen Zusammenhängen gearbeitet, um nicht vorschnell eine exemplarische Lösungsvariante zu bevorzugen und Wissen über bauphysikalische Wirkweisen sowie zu Produktions- und Herstellungsmöglichkeiten frühzeitig in den Gestaltungsprozess einfließen zu lassen.

2.3 Adaptive mehrlagige textile Fassaden

Aktuelle Tendenzen beim Bau von Büro- und Geschäftsgebäuden zeigen, dass Elementfassaden einen fortschrittlichen Lösungsansatz darstellen und die komplexen Anforderungen an sogenannte nachhaltige Gebäude durch anwendungs- und herstellungsbezogene Differenzierung erfüllen. Die Fassaden können mit geringen Anpassungen innerhalb des Produktionsprozesses von Element zu Element in halbautomatisierten Prozessen entwickelt, mit unterschiedlichen Technologien ausgestattet, transportiert und vor Ort in einem Routineverfahren installiert werden. Im Rahmen des Gestaltungsprozesses können einzelne Bauteile der Elementfassade hinsichtlich ihrer Funktionalität und Anordnung, entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen, erweitert, reduziert oder verändert werden [9].

Ergänzend dazu müssen diese Aspekte im Gestaltungsprozess mit den aktuellen Tendenzen eines ressourcen-, energiesparenden und ökologischen Bauens betrachtet werden. Das am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) entwickelte Konzept einer ultraleichten Elementfassade kann verschiedene Anforderungen, wie beispielsweise eine Tragwerksstruktur, ein Versorgungssystem, die Implementierung einzelner Lagen, Schichten und Schalen, Herstellungsprozesse und Verbindungs- und Anschlusssysteme abdecken. Die Komponenten werden dazu in parallel ablaufenden Gestaltungsprozessen entwickelt und zusammengeführt [9].

Mehrlagige textile Gebäudehüllen sind Konstruktionen aus flexiblen Hochleistungsmaterialien, die den äußeren Gebäudeabschluss unter Einhaltung aller konstruktiven, bauphysikalischen und nutzerspezifischen Anforderungen erfüllen. Es handelt sich dabei um ein Fassadenkonzept, dass konsequent die Reduzierung der eingesetzten Ressourcen, die Austauschbarkeit aller Systemkomponenten und anwendungsspezifische Anpassung mittels systematischer Baugruppenmodularität umsetzen soll. Im Rahmen der bisherigen Forschungsprojekte am Institut wurden die konstruktiven, wärme- und feuchte-technischen Grundlagen erarbeitet. Entsprechende Prototypen mit dem Fokus auf Luft-, Feuchte- und Wärmeregulation wurden entwickelt und verifiziert [3, 15].

Das Konzept der adaptiven mehrlagigen textilen Gebäudehüllen verfolgt eine konsequente Reduktion des Ressourcenverbrauchs, die Austauschbarkeit aller Komponenten innerhalb des Systems und die anwendungsspezifische Anpassung an sich ändernde Bedingungen und Anforderungen [9].

Eine konstruktive Basis stellt ein pultrudierter Profilrahmen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) her. In Zusammenarbeit mit dem Faserinstitut Bremen e.V. konnten Geometrien für die erste Generation einer solchen multifunktionalen Rahmenkonstruktion und voll ausgestatteten Fassadenelementen erstellt werden [9].

Die unterschiedlichen Anforderungen einer Fassade können in vielfältiger Weise durch die Nutzung der individuellen Werkstoffeigenschaften und des Systemaufbaus der Rahmenkonstruktion in Kombination mit der textilen Oberflächenstruktur erfüllt werden. Die Hauptaufgabe des Entwurfs ist, aus Werkstoffen notwendige Bauteile herzustellen, die innerhalb der Konstruktion so positioniert sind, dass eine ausreichende Wirkung eintritt, um die relevanten physikalischen, strukturellen und ästhetischen Anforderungen erfüllen zu können. Die Herausforderung, die mit der Entwicklung textiler Gebäudehüllen ersichtlich wird, ist die Notwendigkeit eines Konfliktlösungsansatzes, der zwischen konkurrierenden Anforderungen im Gestaltungsprozess zielsicher vermittelt. Dies führt zwangsläufig zu konträren Zielvorstellungen und Interaktionen zwischen den verschiedenen Bestandteilen des Systems. Die Errichtung einer ausreichenden Balance zwischen Interaktionen und Konfliktlösung ist nur durch einen kontinuierlichen iterativen Gestaltungsprozess möglich [9].

3 Arbeitsmethodik

3.1 Interdisziplinäre Systementwicklung

Die vielfältigen Anforderungen lassen sich auch in der Grundlagenforschung bezüglich der Umsetzbarkeit von ultraleichten Hüllkonstruktionen nur durch eine konsequente Systementwicklung bewerkstelligen. Im Forschungsprojekt konnte dies dank der offenen und motivierten Mitarbeit der Kooperationspartner erreicht werden. So waren die Einzelgespräche mit den Industriepartnern, die Integration in die Systementwicklung und die Optimierung während des Workshops durch die Beteiligung von Architekten Bauingenieuren, Bauphysikern, Maschinenbauern und Textiltechniker sehr befruchtend und weiterführend. Eine Herausforderung stellte zunächst die Aufarbeitung und Relativierung der unterschiedlichen Positionen und Sichtweisen der beteiligten Disziplinen dar, um sie für den Gesamtkontext und den interdisziplinären Ansatz zu sensibilisieren. Die bisherigen Ergebnisse stimmen aber positiv, da einige Aspekte, die vor Beginn des Forschungsprojektes nicht in Betracht gezogen werden konnten, nun in die Projektentwicklung integriert sind. Ein Aspekt war beispielsweise die Auswirkung der Eigenschaften der standardisiert verfügbaren Vliesstoffherstellung auf die Gesamtkosten oder auch die Rolle der Handhabbarkeit beim Installationsprozess bezüglich der Ablösecharakteristik unterschiedlicher textiler Funktionslagen vom Trägerwerkstoff. Auch für die Entwicklung und Optimierung der aktiv wirkenden Systemlösungen konnte dieser Weg weiter umgesetzt werden. Hierbei wurde die Expertise der Global Safety Textiles GmbH (GST GmbH) integriert. Durch einen mehrgliedrigen, iterativen Prozess konnte ein aktiv wirkendes Systemelement entwickelt und hergestellt werden.

3.2 Modulare Grundkonzeption

Die Systementwicklungen auf Basis einer modularen Grundkonzeption zu erarbeiten hat sich im ersten Teil des Forschungsprojektes bereits bewährt. So konnten unterschiedliche Teilaspekte, wie beispielsweise die Anforderungen an das Systemprofil, die Ausformung und Konzeption einzelner Lagen oder die Herstellungsprozesse, Fügungen und Anschlussfähigkeiten parallel entwickelt und ständig aufeinander abgestimmt werden.

3.3 Konstruktive und bauphysikalische Materialeigenschaften

Die Serienuntersuchungen zu den akustisch veränderbaren Materialeigenschaften konnten mittels des in [16] beschriebenen Impedanzrohrs des Instituts durchgeführt werden. Die Planung und der Aufbau erfolgte in Anlehnung an die DIN 10534 [17]. Die Auswertelgorithmen konnten mit MATLAB, einem numerischen Berechnungsprogramm zur Lösung und Darstellung mathematischer Zusammenhänge, optimiert werden. Damit ist eine schnellere Messwerterfassung und Auswertung möglich geworden. Im letzten Schritt vor der Serienprüfung der textilen Werkstoffe wurden Referenzmessungen anhand eines Vliesstoffes durchgeführt, um vorhandene Unregelmäßigkeiten der Messparameter aufzudecken, diese gegebenenfalls zu verbessern und für die Einschätzung der Ergebnisse bewusst zu machen.

Die Skriptdateien zur Ermittlung der Kalibrierfunktion und der akustischen Reflexions- und Absorptionskoeffizienten sind im Anhang 1 abgedruckt.

Die Ergebnisse der Serienuntersuchung wurden in die vorhandene Werkstoff- und Produktdatenbank für textile Werkstoffe eingepflegt. Die Datenbank vereint physikalische, chemische sowie für die Konstruktion, Fügung und das Recycling relevante Kriterien für textile und folienbasierte Werkstoffgruppen und Produkte. Sie umfasst bisher 145 Produkte und 7 Werkstoffkategorien. Mit den Messungen

der akustischen Absorption- und Reflexionskoeffizienten konnten 35 Datensätze erweitert werden. Dabei wurde jeweils eine csv-Datei (Comma-Separated Values) mit den numerischen Daten, sowie ein Diagramm im pdf-Format als grafische Darstellung hinterlegt. Ein stetiger Ausbau mit weiteren Werkstoffen und die Erweiterung mit weitreichenderen Werkstoffkategorien und -kriterien sind geplant.

3.4 Herstellungs- und Fügetechnologie

Das Technologie- und Entwicklungszentrums (TEZ) der Groz-Beckert KG konnte bereits in den frühen Bearbeitungsphasen des Projektes integriert werden. Damit ist es bei der grundlegenden Konzeption von passiv wirkenden Systemlösungen gelungen das Wissen und die Herausforderungen, die aus den Herstellungs- und Produktionsverfahren resultieren, mit zu beachten. Als zielführend wurden die Vernadelungstechnik und die maschinelle Vliesstoffherstellung erörtert. Außerdem konnte im weiteren Schritt auf die Erfahrungen der Global Safety Textiles GmbH (GST GmbH) im Bereich der dynamisch wirkenden Airbag-Technologien zurückgegriffen werden.

3.5 Adaptionismethoden

Aus den Voruntersuchungen und den Abstimmungen mit dem Lehrstuhl für Bauphysik (LBP) der Universität Stuttgart hat sich eine Eingrenzung der erfolgsversprechenden Einflussfaktoren zur akustischen Konditionierung und damit zur Steuerung der Anpassungsfähigkeit ergeben.

Bei den strukturellen Anpassungen werden in erster Linie die Massebeaufschlagung der Konstruktion und die Variation des Abstands des entwickelten, mehrschaligen Aufbaus sinnvolle Anknüpfungspunkte bilden. Inwieweit das Vorspannniveau der textilen Lagen als kontrollierbare Einflussgröße für die Anpassung der akustischen Wirkweise eingesetzt werden kann, war erst nach den Messungen des Schalldämm-Maßes im Türenprüfstand abzuschätzen. Bisherige Untersuchungen waren mehrdeutig. Zum einen wurden positiv wirkende Effekte beschrieben. Andere Untersuchungen deuteten wiederum auf keinen ausreichend nutzbringenden Effekt und auf negative Einflüsse hin.

4 Arbeitsphasen und Ergebnisse

4.1 Recherche (Arbeitsphase 1.1)

Zu folgenden Kategorien wurde die primäre und sekundäre Literatur recherchiert, zusammengetragen und in ZOTERO-Datenbanken strukturiert abgelegt:

- Adaptionismethoden
- Automobilindustrie
- Bau- und Raumakustik
- Elektroakustik
- Herstellungs- und Produktionsverfahren
- Luft- und Raumfahrttechnik
- Materialien
- Messtechnik
- Normen
- physikalische Grundlagen
- Psychoakustik und Wahrnehmung
- Technologien und Systemlösungen
- urbaner Kontext

Die Produktdatenbank des ILEK wurde mit herstellerunabhängigen Angaben zu Werkstoffkategorien und Materialien erweitert.

Aus den Erfahrungen der vorangegangenen Projekte, der Diskussion mit dem Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart (LBP) und den vorhandenen Voruntersuchungen wurden Funktions- und Anwendungsbeschreibungen für Materialien, Werkstoffe, Systeme und für Adaptionismethoden verfasst. Diese dienten als Grundlage für die Erstellung einer Bewertungsmatrix für Systemlösungsansätze und für die Optimierung der später entwickelten Lagenaufbauten.

4.2 Analyse der Recherche (Arbeitsphase 1.2)

4.2.1 Systemische Grundlagen

Auf Grundlage der Recherche wurde für die Serienuntersuchungen der Werkstoffe und Materialien die Impedanzrohrmethode als sinnvoll bestätigt. Die Serienuntersuchung von textilen Werkstoffen und die Einarbeitung in die institutsinterne Datenbank wurden begonnen.

Für die passiv und aktiv wirkenden Systemlösungen ist die Messung einzelner Werkstoffe nicht aussagekräftig. Die Charakterisierung des Schalldämm-Maßes für ganze Lagenaufbauten beispielsweise im Türenprüfstand ist hier vorzuziehen. Über den Lehrstuhl für Bauphysik (LBP) der Universität Stuttgart konnte die Prüfung der Konstruktionen beim Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) vorbereitet und durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Recherche flossen auch in zwei Dokumente zur Charakterisierung von Werkstoffeigenschaften und zur Charakterisierung von Systemlösungen (siehe Anhang 10.1 und 10.2) ein. Die Erhebungsbogen dienen zur Verifizierung der jeweiligen Eigenschaften und können mittels der gewichteten Bewertungsmatrix zu aussagekräftigen Vergleichen herangezogen werden.

4.2.2 Systemaufbauten

Der Mehrlagenaufbau wurde bei der Systementwicklung aus den physikalischen, werkstoffspezifischen und konstruktiven Grundlagen heraus im Rahmen der vorangegangenen Forschungsprojekte als sinnvolle Konfiguration ermittelt [2-5, 15, 16, 18].

In Abbildung 1 sind die Systeme in übergeordnete Kategorien zusammengefasst und dargestellt. Das zweilagige System ohne Kernabsorber wurde durch den einfachsten Aufbau als Ausgangsbasis für die Vergleichsmessungen verwendet. Lagen bezeichnen dabei konstruktiv entkoppelte Elemente; Schichten bezeichnen konstruktiv gekoppelte und physikalisch, chemisch sowie biologisch wirkende Elemente; Schalen bezeichnen konstruktiv entkoppelte und physikalisch, chemisch sowie biologisch wirkende Elemente.

Bei der Integration eines Kernabsorbers wurde auf die entkoppelte Variante Bezug genommen, da aus Vorgängerprojekten des LBP abschätzbar war, dass eine flächige Verbindung einer Decklage zur darunterliegenden, schweren Lage keine wesentlichen Unterschiede in der Schalldämmung und -dämpfung zur Folge hat. Auch wenn diese Lagen nicht flächig verbunden sind, wirken sie aus akustischer Sicht wie eine Schale. Aus konstruktiver Sicht können somit einfachere Anbindungen an den Rahmen und bei den innenliegenden Lagen kleinere Vorspannungen realisiert werden. Eine weitere Notwendigkeit ergibt sich durch die akustisch wirkenden Schalen für die Rahmenkonstruktion. Diese muss gewährleisten, dass die einzelnen Schalen voneinander entkoppelt (im Rahmenprofil zueinander gedämpft) angebracht werden können, um Schwingungsübertragungen zwischen den Schalen zu minimieren [19].

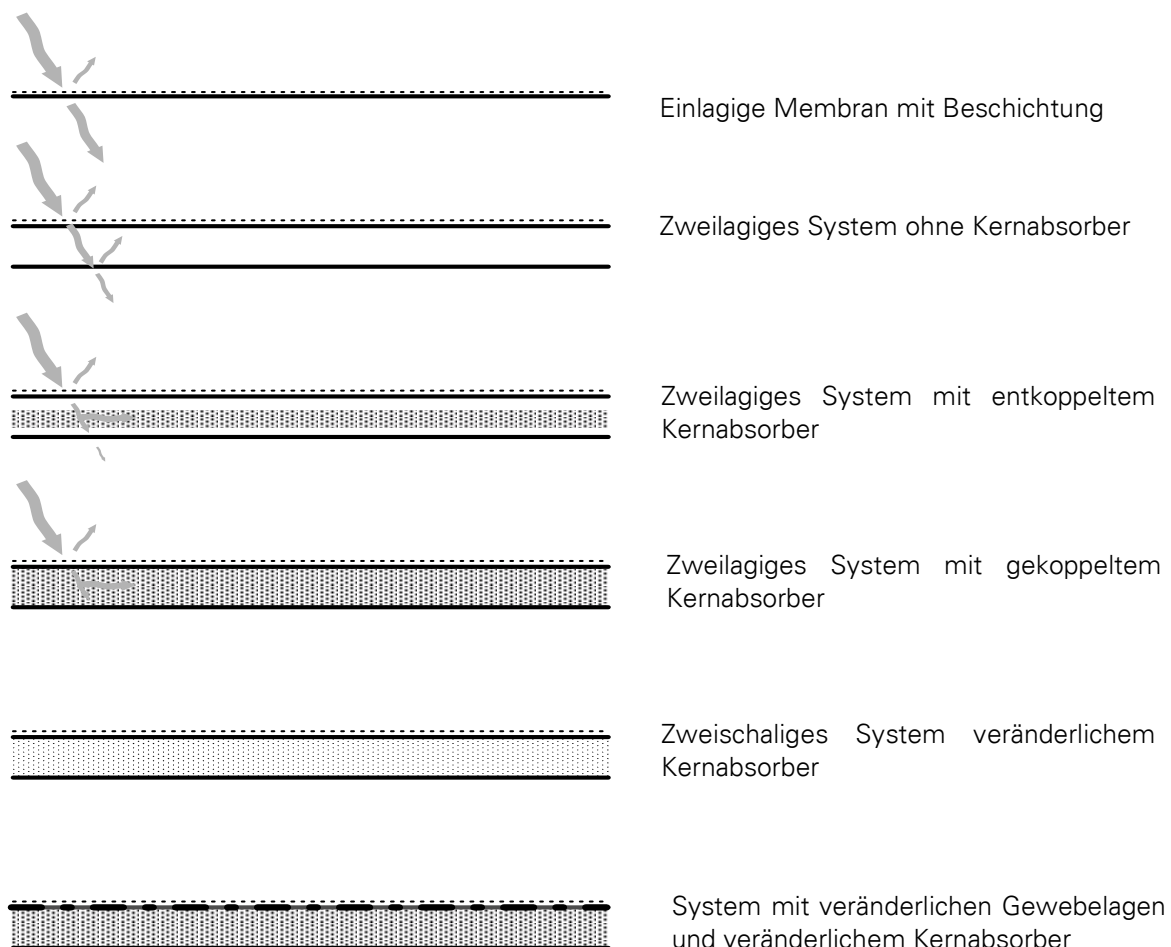


Abbildung 1: Kategorisierte Systemaufbauten

Auf Basis der Voruntersuchungen wurden zuerst 3 Varianten für multifunktional ausgerichtete Systemlösungen konzeptionell als Ausgangsbasis für eine Systemsynthese entworfen. Zu jeder Variante wurden anhand vergleichbarer Aufbauten oder Systeme im Bauwesen die möglichen Leistungsspektren zu einzelnen Funktionen abgeschätzt. Die entstandenen Datenblättervorlagen zur Charakterisierung sind im Anhang 10.1 und 10.2 abgedruckt. Mit dem Fokus auf akustisch passiv wirkende Systeme wurde in einer ersten Entwurfsiteration diskutiert, welches System für die weitere Bearbeitung den größtmöglichen Nutzen bringen könnte und in Prototypen realisierbar ist. Auf dieser Basis wurden die herstellbaren Systemkomponenten mit dem Technologie- und Entwicklungszentrum (TEZ) der Groz-Beckert KG abgestimmt und für die Produktion vorbereitet.

Mit diesen Einschätzungen und Expertisen wurden die zu verwendenden Werkstoffe festgelegt. Demnach standen für die äußere Membranlage die im Bauwesen bisher verwendeten Systeme an erster Stelle. Diese stellt den Witterungsschutz sicher und wird für die Lastabtragung des Systems bei Wind- und Schneelasten eingesetzt. Verwendet wurde dabei eine Gewebelage aus Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe. Die Gewebe stammen aus der Produktion der Firma Versaidag-Indutex.

Im weiteren Schritt war der prinzipielle Aufbau der Kernlagen zu definieren. Aus den Variantenstudien ergab sich als leistungsfähigste Lösung eine Schichtung in Anlehnung an in der Raumakustik typisch verwendeten Platten-, Helmholtz- sowie Breitband-Resonatoren (vgl. Abbildung 2 und 3). Kernkomponenten sind zwei oder drei Platten mit unterschiedlichen flächenbezogenen Massen sowie offenporige, dämpfende Zwischenschichten. Der prinzipielle Aufbau einer solchen mehrschaligen Konstruktion versprach durch die Variierung der massereichen Lagen mittels textiler Werkstoffe, beschwerenden Zusatzschichten oder Inlays sowie durch die gezielte Wahl einer dämpfenden Zwischenschicht die praktikabelste und erfolgversprechendste Lösung zu sein. Darüber hinaus können perforierte Vorsatzlagen für die Anwendung im Innenraum befestigt werden, um Schallabsorptionsmaßnahmen in Form eines Breitband-Resonator umzusetzen. In Hinblick auf die aktiv veränderlichen Systemaufbauten bot sich die Möglichkeit der Variierung der flächenbezogenen Masse, des Abstandes sowie der Vorspannung an. Das System stellte sich in der Entwicklung als universell anpassbar und erweiterbar heraus.

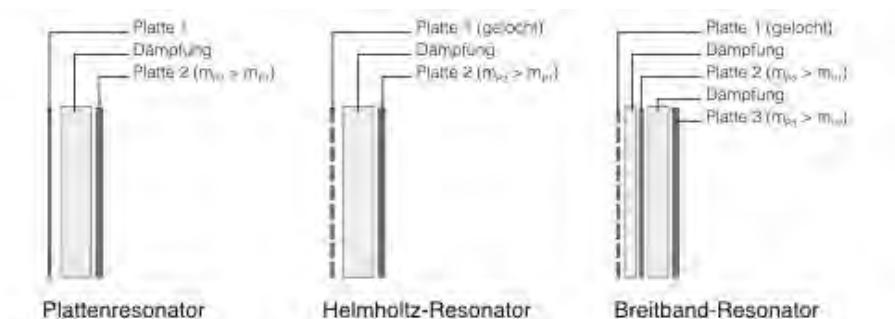


Abbildung 2: Resonatorsysteme mit geschlossener, gelochter und kombinierter Vorsatzschale

Für den Schritt der Materialisierung der Kernlagen war zudem von Bedeutung, dass ein Mindestmaß an Wärmedämmung und die Möglichkeit der Durchlüftung sichergestellt werden muss, um ausfallendes Tauwasser abführen zu können. Schaumwerkstoffe wurden deshalb für die weitere Untersuchung vorerst ausgeschlossen. Faserwerkstoffe und -bauteile werden in bereits gebauten Referenzprojekten erfolgreich verwendet. Zudem standen über das TEZ die Produktionsanlagen für Vliesstoffe, Gewebe oder Gewirke zur Verfügung. Aus produktionstechnischer Sicht war es sinnvoll, auf das Material Polyester als günstiges und standardisiertes verwendetes Material zurückzugreifen. Dies ermöglicht zudem einen sortenreinen Lagenaufbau mit großem Potential hinsichtlich der Recyclingbarkeit und der Recyclingfähigkeit.

Abbildung 3 zeigt ein Polyestergewebe und einen -vliesstoff, die als Ausgangsbasis für die Werkstoffentwicklung dienen.

Wesentliche Parameter, deren Einfluss auf die Schalldämmung mehrlagiger textiler Systemaufbauten in der weiteren Entwicklung geklärt werden muss, sind der Einfluss des verwendeten Rahmensystems, die Umsetzbarkeit von zusätzlicher Beschwerung sowie die Variabilität und Stabilität des Vorspannniveaus.

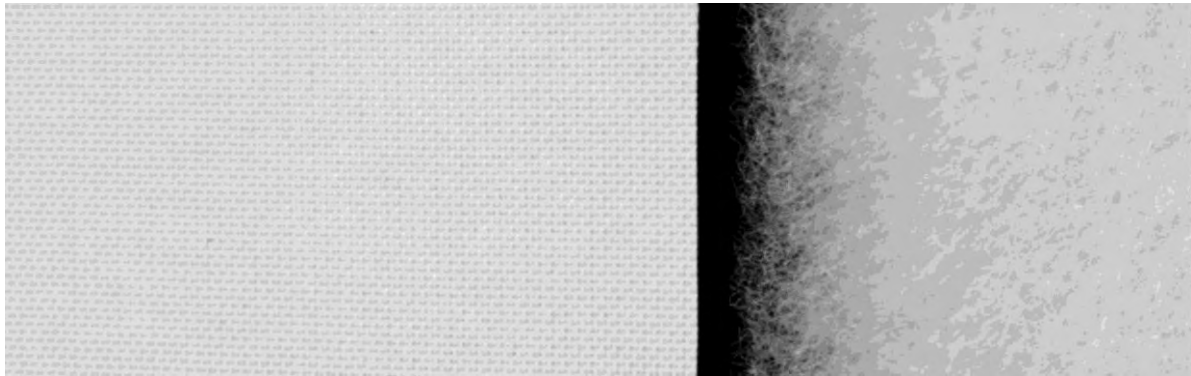


Abbildung 3: Polyestergewebe und Polyestervliesstoff (Fotos: ILEK / F. Schmid)

4.3 Synthese zu akustisch passiv wirkenden Systemlösungen (Arbeitsphase 1.3)

Als akustisch passiv wirkende Systeme werden alle werkstoffbasierten Lösungen bezeichnet, die für eine spezifische Aufgabe (Absorption, Dämmung, Reflexion oder Diffusion) ausgelegt sind und mit einem funktionalen Zustand darauf eingehen.

Aus den Vorentwürfen, den Variantenstudien und der Einschätzung zur Herstellbarkeit wurde ein zweischichtiger, vernadelter Lagenaufbau entwickelt, der die akustische Leistungsfähigkeit (Schalldämmung) eines rein textilen Aufbaus demonstrieren soll und vielseitig in den zweischaligen Systemaufbauten Anwendung finden kann.

Als Grundlage wurden produktionstechnische Randbedingungen, eine sinnvoll eingeschätzte, akustisch wirksame Tiefe des Lagenaufbaus von 150 mm und die konstruktiven Anforderungen und Dimensionen eines Systemprofils zur Halterung beachtet.

Die Einschätzung eines akustisch wirksamen Lagenaufbaus resultierte in einem mehrschichtigen und mehrschaligen Aufbau. Die zwei begrenzenden äußeren Schichten sollen dabei als massekonzentrierte Schalen mit möglichst hoher flächenbezogener Masse wirken. Aus produktionstechnischer Sicht wurde eine flächenbezogene Masse von 1,5 bis 2,0 kg/m² als realisierbar angesetzt. Eine offenporige Füllung dient im Zwischenraum der Reduktion der dynamischen Steifigkeit und dem Ausschluss von Stehwellen und Interferenzen. Diese offenporige Füllung wird ebenfalls als Vliesstoff (Polyester) ausgeführt und mit dem massekonzentrierten Trägergewebe durch Vernadeln verbunden.

Als verwendetes Trägergewebe der massekonzentrierten Schicht eignet sich ein Drehergewebe, dessen Kett- und Schussfäden verschiebungsfrei in Position gehalten werden. Die Anzahl der Vernadelungsprozesse zum Erreichen der geforderten flächenbezogenen Masse wurde auf eine, in Bezug auf die Produktionswerkzeuge, schädigungsarme Produktion abgestimmt, um die Tragfähigkeit des Materials nicht überproportional zu senken.

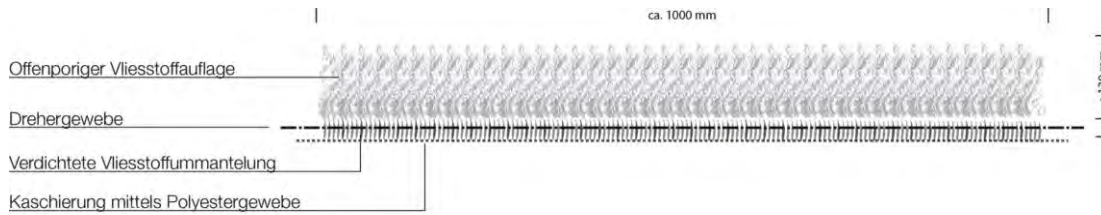


Abbildung 4: Systematischer Aufbau des Vorproduktes für die Anwendung in textilen Gebäudehüllen

Der entwickelte Lagenaufbau kann als Ausgangs- beziehungsweise Vorprodukt für verschiedene, akustisch passiv wirkende Systeme dienen und ist damit "universell" einsetzbar. Hierbei sind insbesondere mehrschalige Aufbauten aus zwei gespiegelten Schichten mit luft- und feuchtedichten Deckschichten sowie mehrschaliger Aufbauten aus zwei gespiegelten Schichten mit beschwerenden Deckschichten interessant. Eine Übersicht zu den beschriebenen Möglichkeiten ist in Abbildung 5 gezeigt.

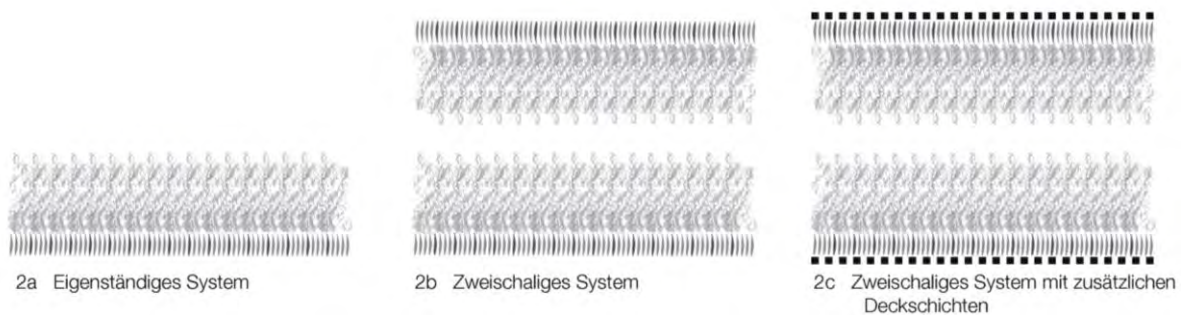


Abbildung 5: Mögliche Systemkombinationen unter Verwendung des entwickelten Vorprodukts

Mit dem produzierbaren Verbundvliesstoff konnten somit erste prototyphafte Lagenaufbauten in Modellstudien realisiert werden.

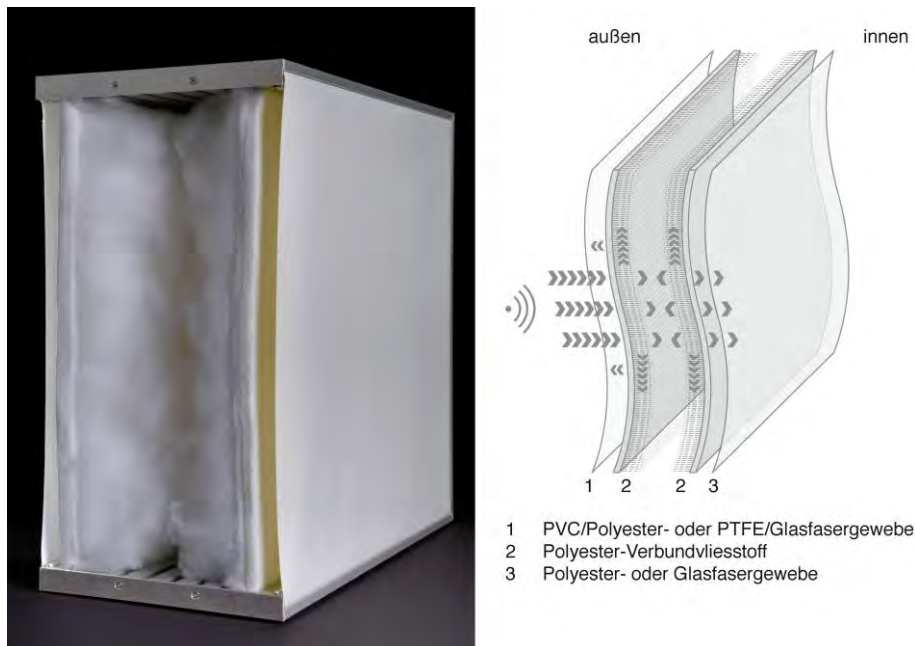


Abbildung 6: Systemaufbauten mit zwei Kernlagen aus Polyester-Verbundvliesstoff (Foto: ILEK / G. Metzger)

In der weiteren Betrachtung der Thematik soll in nachfolgenden Projekten die Ausweitung der Untersuchungen erfolgen. Hierbei dient der entwickelte Verbundvliesstoff als Basis für die Validierung des Einflusses der flächenbezogenen Masse, des Abstandes und der Vorspannung auf das Schalldämm-Maß eines damit ausgerüsteten Fassadenelementes mit Rahmensystem.

In Abbildung 7 sind die sechs hierzu entwickelten Systemaufbauten im Schnitt gezeigt.

Basis für den ersten Systemaufbau waren bisherige zweilagige Konstruktionen. Hierbei werden zwei, in der Baupraxis übliche, Polyvinylchlorid (PVC) beschichtete Polyestergewebe verwendet und im Abstand von 250 mm mit der üblichen Vorspannkraft von 0.4 – 0.8 kN/m gespannt. Der Systemaufbau stellt damit den Vergleichsaufbau für die bisherigen ungedämmten textilen Aufbauten dar.

Im zweiten Aufbau wird der entwickelte Verbundvliesstoff an beiden, weiterhin vorhandenen Polyvinylchlorid (PVC) beschichteten Polyestergeweben angebracht. Der Aufbau wirkt dadurch im akustischen Sinn als zweischaliges System. Die verdichtete Vliesstoffbahn erhöht die schwingende Masse, die lockere Vliesstofffüllung die Dämpfung zwischen den schwingenden Lagen.

Das dritte System zeichnet sich durch eine weitere Erhöhung der flächenbezogenen Masse in jeder äußeren Decklage aus. Hierzu wurden zusätzliche Beschwerungen in Form von Metall- und Glas-Inlays angebracht.

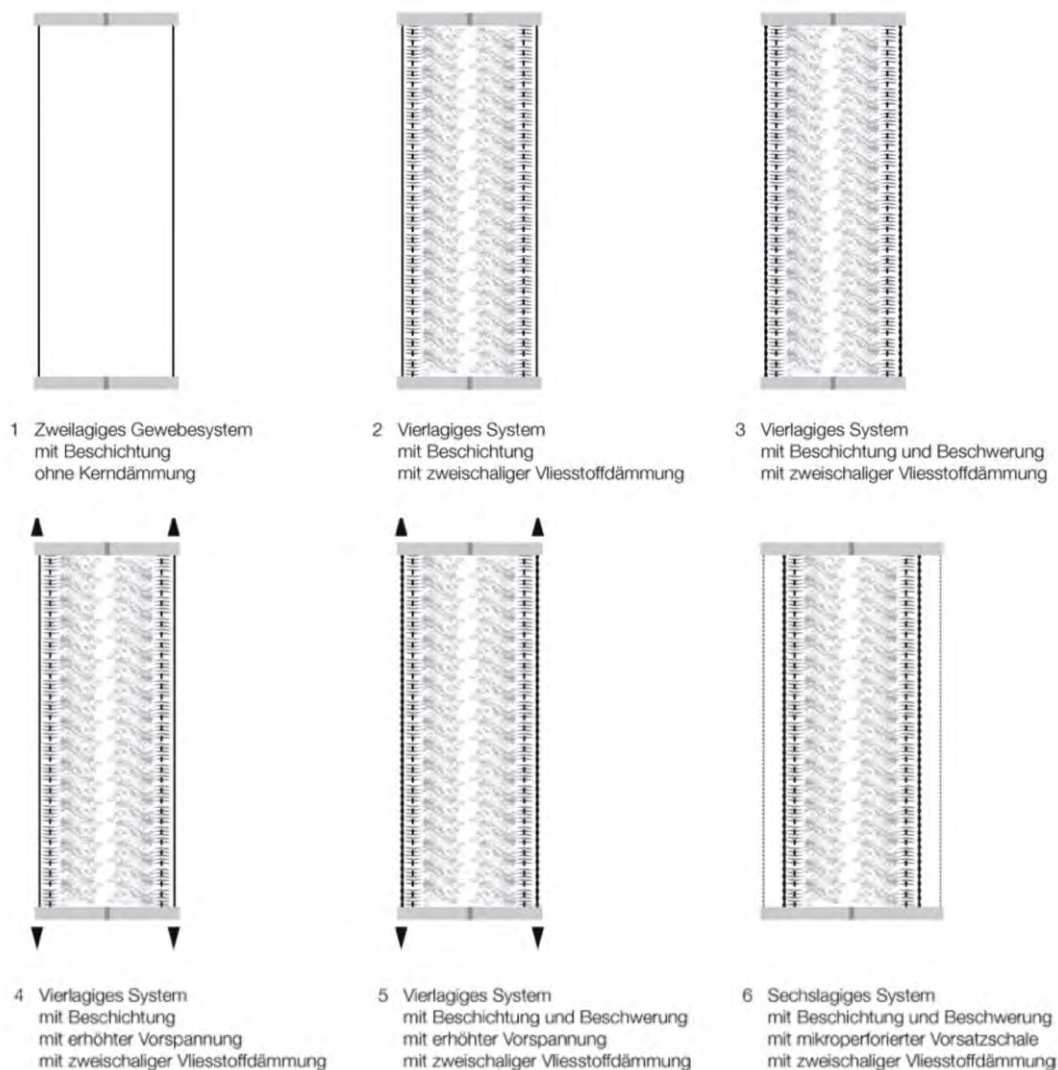


Abbildung 7: Prinzipielle Lagenaufbauten 1 - 6

Im vierten System wird der Aufbau 2 mit einem erhöhten Vorspannniveau, welches dem 4-fachen der üblichen Vorspannkraft entspricht, beaufschlagt. System 5 kombiniert dies wiederum mit zusätzlicher Erhöhung der flächenbezogenen Masse.

Als letzte untersuchte Variante wird in dieser Messserie vor das System 3 eine zusätzliche, mikroperforierte Polyestergewebelage angebracht. Durch die Überlagerung von beschwerten Platten-schwingern, Dämpfung im Zwischenraum und zusätzlicher mikroperforierter Vorsatzlage wird die Wirkweise der Kombination aus drei grundlegend akustisch wirksamen Systemen für Schalldämmung und -dämpfung ermittelt.

4.4 Synthese zu akustisch aktiv wirkenden Systemlösungen (Arbeitsphase 1.4)

Als akustisch aktiv wirkende Systeme werden alle werkstoffbasierten Lösungen bezeichnet, die für mehrere Aufgaben (Absorption und Schalldämmung, Reflexion und Diffusion) ausgelegt sind und mit unterschiedlichen werkstoffspezifischen Zuständen darauf eingehen können.

Erste Konzepte zur Umsetzung einer Anpassungsfähigkeit der Masse und des Abstandes konnten mit dem Kooperationspartner GST GmbH auf die Realisierbarkeit hin geprüft und in Prototypen umgesetzt werden.

Nach der Auswertung der Messergebnisse, die im Türenprüfstand des Fraunhofer IBP ermittelt wurden, stellte sich die Befüllung mit Wasser als beschwerendes Fluid als realisierbare und funktionsintegrierende Variante heraus. Neben der akustischen Leistungsfähigkeit der Lösung ist hinsichtlich einer Realisierbarkeit in Fassaden weitere Forschung und Entwicklung notwendig. Die Steuerung und Regelungstechnik sowie die Einbettung der Zu- und Ableitungen, die Beständigkeit und Dichtigkeit sind dabei näher zu untersuchen.

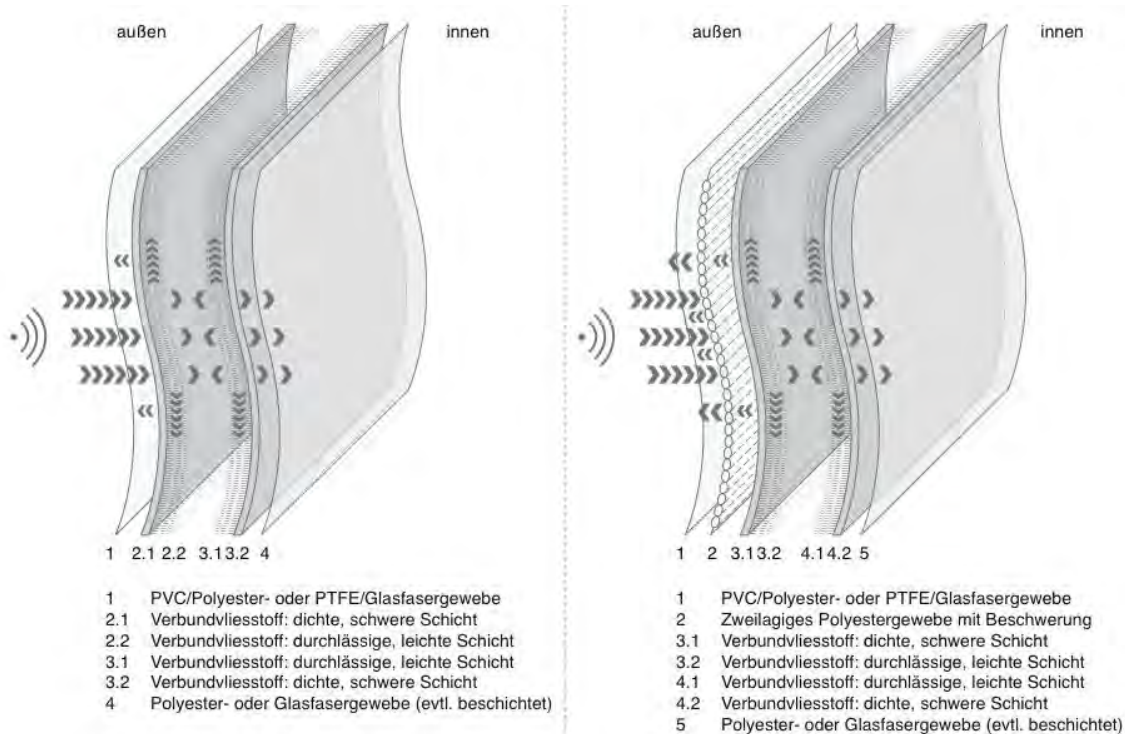


Abbildung 8: Passiv (links) und aktiv (rechts) wirkende Systemaufbauten

Um die Anpassungsfähigkeit des Reflexions- beziehungsweise Absorptionsgrades von mehrlagigen textilen Gebäudehüllen zu demonstrieren, sollte das passiv wirkende System erweitert werden. Erste Voruntersuchungen mit der GST GmbH wurden hierzu unternommen. Ziel war die Erarbeitung eines zweilagigen, abgesteppten Taschensystems, welches zur Variierung der flächenbezogenen Masse als zusätzliches Element vor den als „Platte“ wirkenden, schweren Verbundvliesstoff befestigt werden kann.

Die Variabilität der Menge des Füllmediums und Fülldruckes ermöglicht das Schwingungsverhalten der Lage und das Reflexionsverhalten (dem Stadtraum oder dem Innenraum zugewendeten) zu beeinflussen. Abbildung 8 zeigt die systematische Erweiterung von bisherigen mehrlagigen Systemen mit einfacher Dämmschicht zu dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen passiv wirkenden System (vgl. Abbildung 7 – Lagenaufbau 2) und zu einem aktiv veränderlichen Systemaufbau (vgl. Abbildung 7 – Lagenaufbau 3).

Um die Herstellbarkeit, Funktionalität und Anwendbarkeit zu prüfen wurden erste Elementmuster hergestellt. Abbildung 10 zeigt den Querschnitt des gesteppten zweilagigen Gewebes (vgl. Position 2 nach Abbildung 8). Die sich abzeichnende Rillenstruktur des befüllten Gewebes ist in Abbildung 9 dargestellt. Die daraus resultierende, schallstreuende Wirkung wurde in den Vorentwicklungen als förderlich eingeschätzt.

Nachdem erste Ergebnisse zum Durchflussverhalten und zur Dehnung beim Einbau in einen Systemrahmen vorlagen, konnte ein erstes prüfbares Element in der Größe von 50 bis 100 cm hergestellt und mit Wasser als Fluid befüllt werden. Abbildung 11 gibt einen Eindruck von dem mit Wasser gefüllten und dem entleerten Zustand.



Abbildung 9: Polyestergewebe: Außenansicht in gefülltem Zustand (Foto: ILEK / F. Schmid)

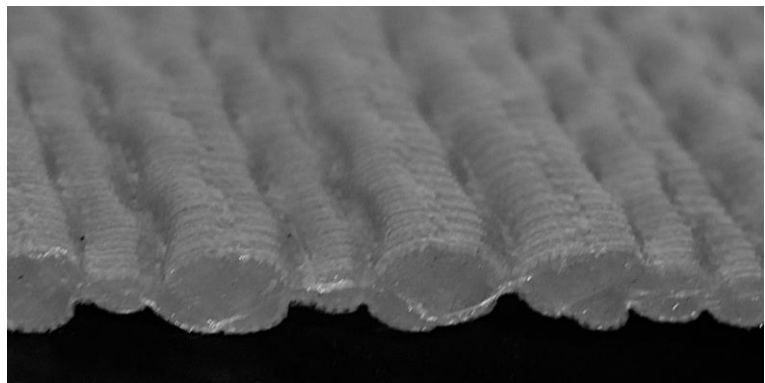


Abbildung 10: Konfektioniertes, zweilagiges Polyestergewebe mit Füllung (Foto: ILEK / F. Schmid)

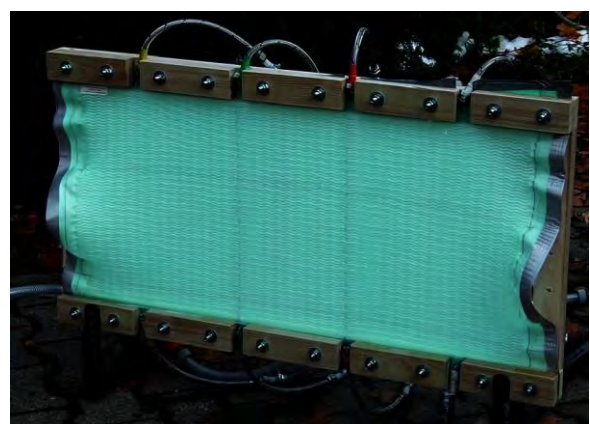
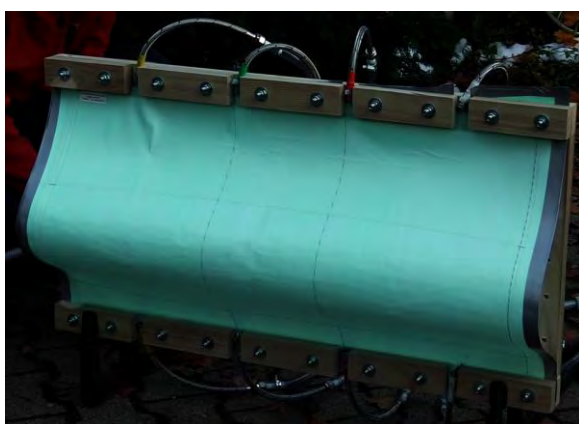


Abbildung 11: Schaltzustände des akustisch aktiv wirkenden Systems: entleert (links) – gefüllt (rechts) (Fotos: ILEK / F. Schmid)

4.5 Charakterisierung der Systemaufbauten (Arbeitsphase 2)

4.5.1 Voruntersuchungen und Charakterisierung

Die Charakterisierung der Systemlösungen wurde auf zwei Ebenen realisiert. Neben der Serienprüfung im Impedanzrohr wurden die prinzipiell erarbeiteten Systemlösungen im Türenprüfstand hinsichtlich der Schalldämmung validiert.

Um die Leistungsfähigkeit der Ansätze für akustisch passiv und aktiv wirkende Systemaufbauten abschätzen zu können wurden auch die Lagenaufbauten 1 bis 3 (vgl. Abbildung 7) im Impedanzrohr vermessen. Als Ausgangsbasis für die Untersuchung wurde das akustisch passiv wirkende System, welches in Abbildung 7 als Lagenaufbau 2 beschrieben ist und als Kernmaterial lediglich den entwickelten Verbundvliesstoff in gespiegelter Anordnung verwendet, mit einem Gewebe und einem Vliesstoff aus den Voruntersuchungen verglichen. Abbildung 12 zeigt den Verlauf der Absorptionsgrade. Die breitbandigere Absorption des passiv wirkenden Gesamtsystems im Gegensatz zu den Einzelwerkstoffen bestätigt die positive Auswirkung der Systementwicklung in Anlehnung an die Platten, Helmholtz- und Breitband-Resonatoren.

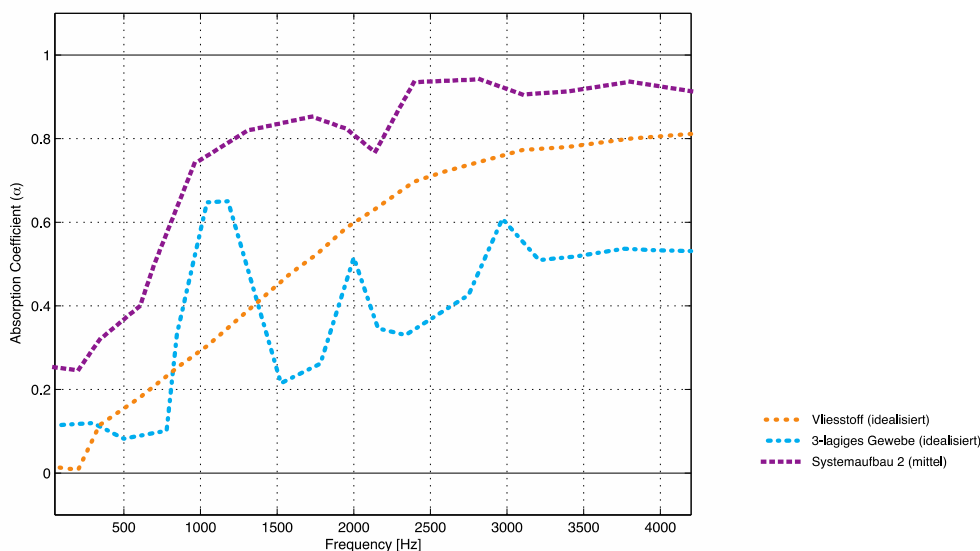


Abbildung 12: Vergleich des Lagenaufbaus 2 (vgl. Abbildung 7) zu einem Gewebe und Vliesstoff bei geschlossenem Rohrabschluss

Darüber hinaus wurden Proben aus dem zweilagigen Taschensystem aus Abschnitt 4.4 mit Silikon als ähnliches, aber einfacher zu handhabendes Füllmedium verwendet. Zwei Lagen dieses Taschensystems wurden als zusätzliche Beschwerung vor den jeweiligen Verbundvliesstoffen eingesetzt. Abbildung 9 zeigt eines der befüllten zweilagige Polyestergewebe im Schnitt.

Um die Wirksamkeit der erhöhten Reflexion durch die gefüllten Taschen abschätzen zu können wurden beide Systemaufbauten bei offenem Rohrabschluss vermessen. Da die Schallenergie somit nicht am schallharten Rohrabschluss reflektiert werden kann, handelt es sich bei der gemessenen Reflexion lediglich um den Anteil, der vom Systemaufbau reflektiert wird. Dadurch lässt sich eine Aussage über das höhere beziehungsweise niedrigere Reflexionsvermögen der vermessenen Proben treffen. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse und das reduzierte Absorptionsvermögen und damit den höheren Reflexionsanteil des Systemaufbaus mit beschwerendem Taschengewebe.

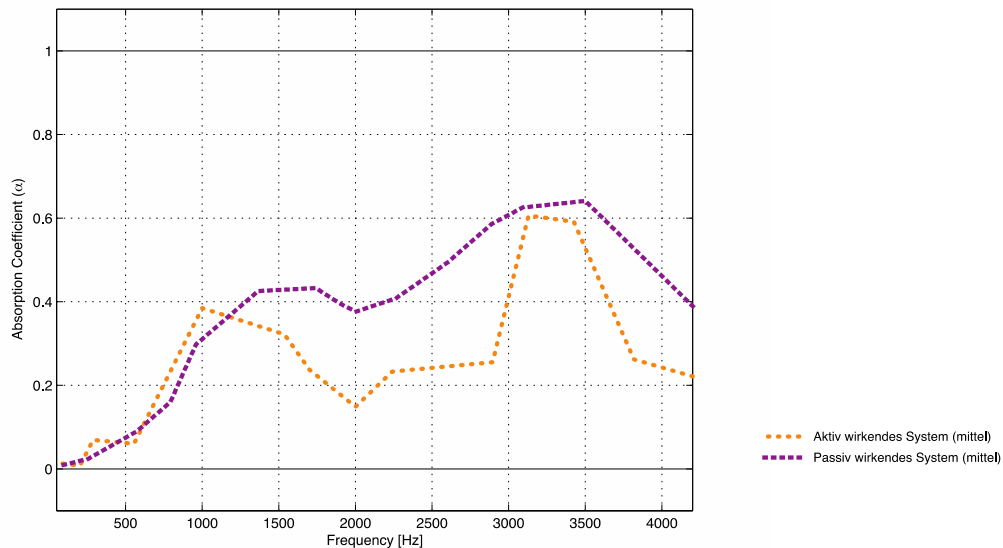


Abbildung 13: Vergleich des passiv und aktiv wirkenden Systemaufbaus (vgl. Abbildung 8) bei offenem Rohrabschluss

Da in den vermessenen Systemaufbauten lediglich das variabel befüllbare Taschengewebe eingesetzt wurde, lässt sich theoretisch jeder Reflexionsgrad zwischen den ermittelten Messwertverläufen vom aktiv zum passiv wirkenden Systemaufbau durch die Füllmenge im Taschengewebe einstellen. Systemaufbauten, die mit diesem Wirkprinzip weiterentwickelt wurden, können so auf eine Absorption der Schallenergie im Stadtraum (innere Lage gefüllt und beschwert) ausgerichtet werden. (vgl. Systemskizzen in Abbildung 14)

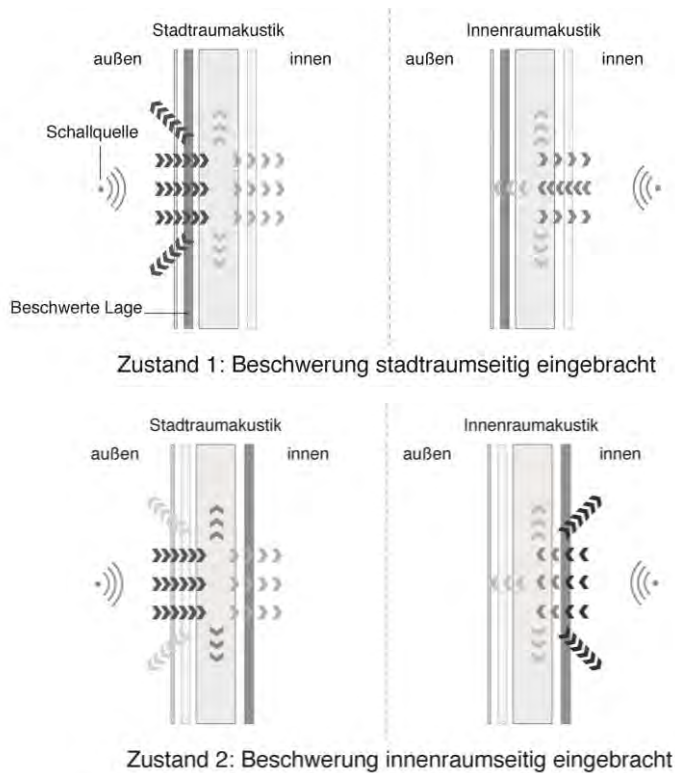


Abbildung 14: Systemskizzen zur Variabilität des Reflexionsverhaltens

Es kann aber in gleicher Weise der umgekehrte Fall eingestellt werden, indem die äußere Lage wesentlich beschwert wird, um das eintreffende Schallfeld hauptsächlich zu reflektieren. Damit verbunden erhält man die Möglichkeit die Raumakustik des direkt angrenzenden Raumes durch das Reflexions- und Schwingungsverhalten der innenliegenden Schicht zu variieren.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit dem Impedanzrohr und die theoretischen Erkenntnisse bestätigen, dass ein Konzept zur Anpassung der akustischen Wirkweise durch leichte, textile Bauteile umgesetzt werden kann.

Die Messung des Schalldämm-Maßes beim Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) bestätigte durch die Charakterisierung der unterschiedlich ausgerüsteten Lagenaufbauten das Prinzip der massevariablen, schwingenden, biegeweichen Platten in einem mehrschaligen Aufbau.

Allerdings sind durch die Anpassungsfähigkeit weitere Bauteile und Wirkbeziehungen in den Aufbau integriert worden, die hinsichtlich ihrer Verlässlichkeit und der Einbindung in das Rahmenprofil näher untersucht werden müssen.

Aus den Voruntersuchungen wurden folgende Lagenaufbauten für die Weiterentwicklung und die Prüfung im Türprüfstand zusammengestellt. Die Anordnungen sind in den Systemskizzen in Abbildung 15 bis Abbildung 21 dargestellt.

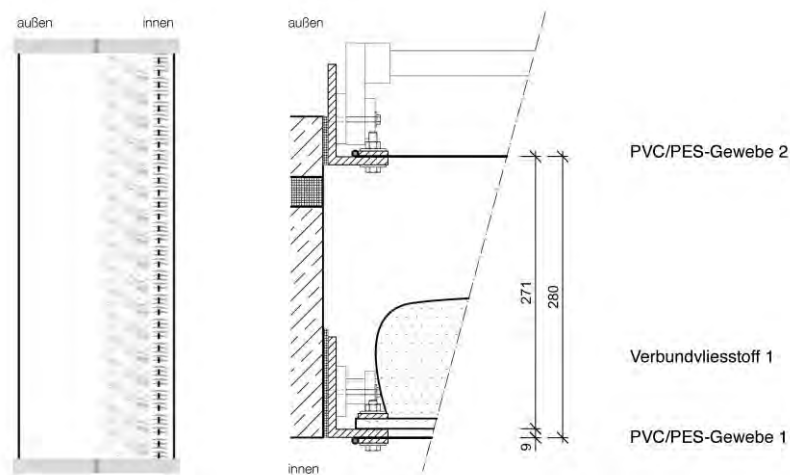


Abbildung 15: Systemskizzen und Schnitt des Prüfaufbaus A1

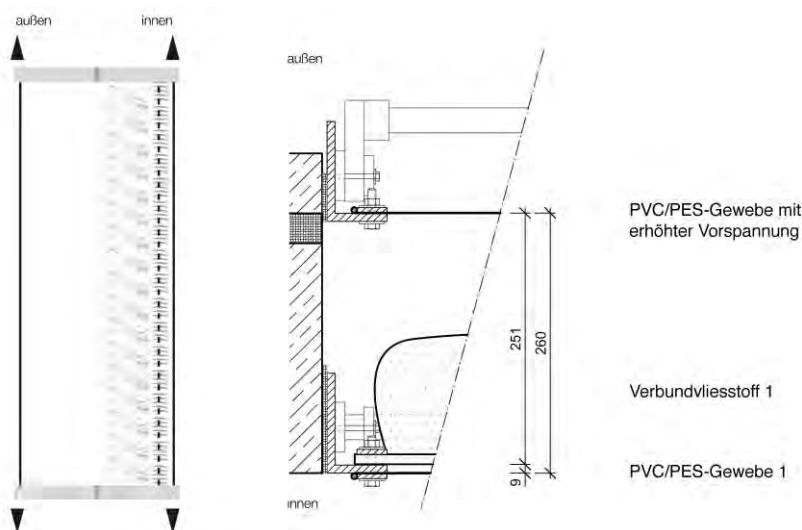


Abbildung 16: Systemskizzen und Schnitt des Prüfaufbaus A2 – wie A1; mit erhöhter Vorspannung

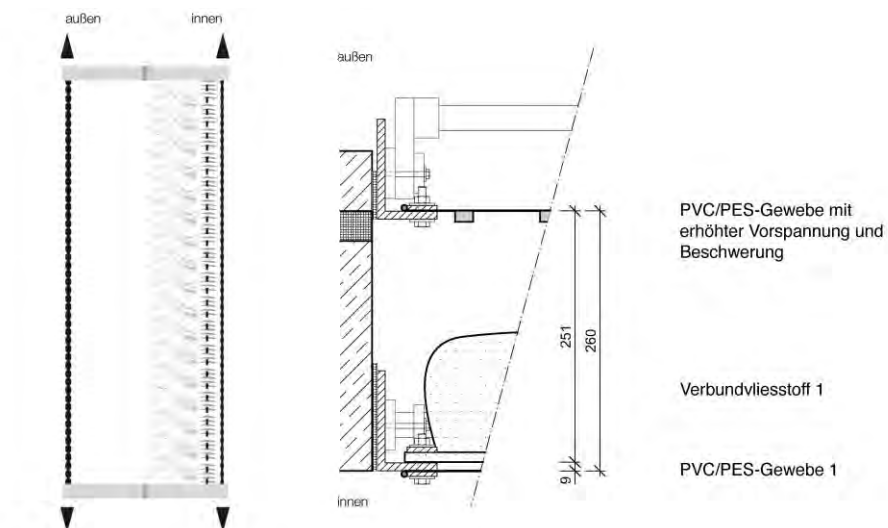


Abbildung 17: Systemskizzen und Schnitt des Prüfaufbaus A3 – wie A2; mit beschwertem Deckgewebe

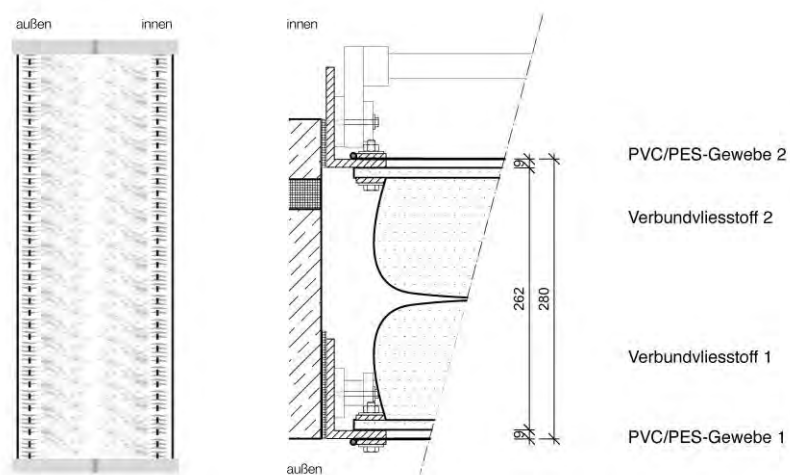


Abbildung 18: Systemskizzen und Schnitt des Prüfaufbaus B1

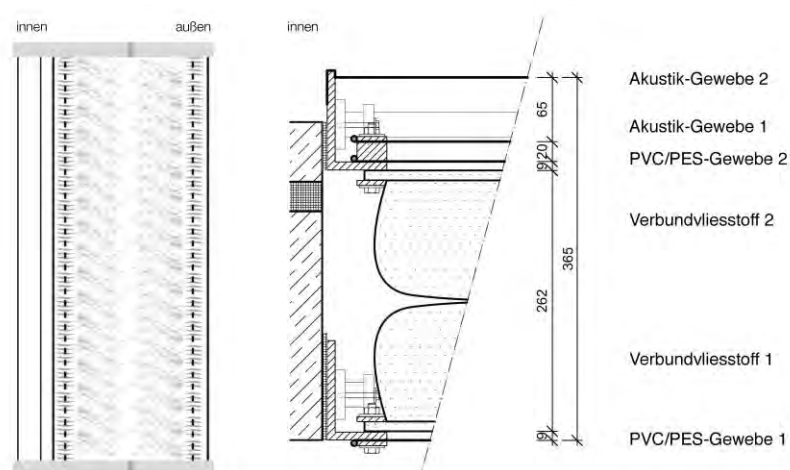


Abbildung 19: Systemskizzen und Schnitt des Prüfaufbaus B2 – wie B1; mit mikroperforierten Vorsatzgewebe

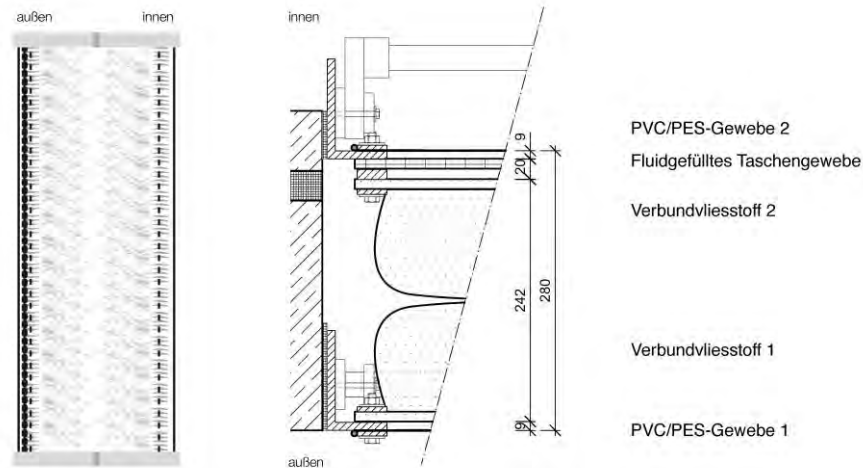


Abbildung 20: Systemskizzen und Schnitt des Prüfaufbaus C – wie B1; mit fluidgefülltem Taschengewebe

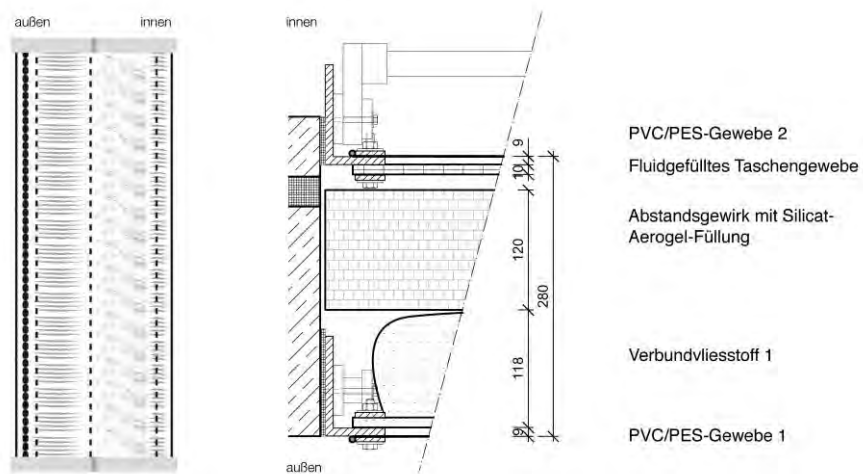


Abbildung 21: Systemskizzen und Schnitt des Prüfaufbaus D – wie B1; mit Aerogel-Lage

Die detaillierte Beschreibung der Bauelemente mit Angaben zu Gewicht, Volumen und Materialaufbau ist in Tabelle 1 bis Tabelle 4 ausgeführt.

Tabelle 1: Aufbau des Deckgewebe

Typ:	Verseidag-Indutex B1015
Material:	Polyester
Beschichtung:	PVC
Flächenbezogene Masse:	630 g/m ²
Höchstzugkraft Kette/Schuss:	2800/2500 (N/5 cm)
Einbau:	Kettrichtung: vertikal; Schussrichtung: horizontal
Vorspannkraft:	≥ 480 N/m bzw. ≥ 980 N/m

Tabelle 2: Aufbau des gradierten Verbundvliesstoffs

Typ:	Gradierter Verbundvliesstoff (Projektentwicklung im TEZ der Groz-Beckert KG)
Material:	Polyester
Herstellung:	Nadelvliesstoff
Flächenbezogene Masse:	4500 g/m ²

Tabelle 3: Aufbau des gefüllten Taschengewebes

Typ:	Jaquard-Gewebe (GST GmbH)
Material:	Polyester
Beschichtung:	Folienkaschierung
Innere Abdichtung:	Acrylharz-Titandioxid-Emulsion
Befüllung:	Wasser
Sonstiges:	Einbau auf Metallgewebe zur Stabilisierung; Schutztasche aus PVC-Folie
Flächenbezogene Masse gesamt:	18.000 g/m ²
Gewicht Taschengewebe:	1.280g/m ²
Gewicht Fluid:	15.070 g/m ²
Gewicht Metallgewebe:	650 g/m ²
Gewicht Schutztasche:	1.000 g/m ²
Schichtdicke gesamt:	18 mm
Schichtdicke Taschengewebe:	15 mm

Tabelle 4: Aufbau des Aerogel im Abstandsgewirk

Typ Abstandsgewirk:	Hightex; Zellner GmbH
Material Abstandsgewirk:	Polyester
Hersteller Aerogel:	Cabot AG
Material Aerogel:	Silikat-Aerogel
Flächenbezogene Masse gesamt:	11.800 g/m ²
Gewicht Silicat-Aerogel:	3.300 g/m ²
Gewicht Polyester-Gewirke	7.600 g/m ²
Gewicht PVC-Folien:	900 g/m ²
Schichtdicke gesamt:	120 mm (Toleranz ± 10 mm)
Schichtdicke Abstandsgewirk:	2 x 30 mm, 2 x 20 mm, 2 x 10 mm

4.5.2 Messung der Schalldämmung

Die Schalldämmung wurde jeweils in Anlehnung an DIN EN ISO 10140 Teil 1 [86] und DIN EN ISO 10140 Teil 5 [87] für die Terzmittenfrequenzen von 50 Hz bis 5000 Hz gemessen. Die Messungen fanden im Türprüfstand des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Stuttgart statt. Der Prüfstand besteht aus zwei voneinander durch eine Trennfuge akustisch entkoppelten Räumen, die zudem noch durch eine umlaufende Fuge vom übrigen Bauwerk entkoppelt sind (Abbildung 22 und 23). Die zweischalige, hochschalldämmende Trennwand zwischen den beiden Räumen des Türprüfstandes besitzt eine Prüföffnung von 1,00 m x 2,00 m. Um den Einfluss des Nischeneffekts zu vermindern, verfügt die Prüföffnung über abgeschrägte Kanten. Die geometrischen Daten des Prüfstandes gibt Tabelle 5 wieder.

Tabelle 5: Geometrische Daten des Türprüfstandes im Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart

Raum	Abmessungen			
	Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Volumen [m ³]
Senderraum	5,00	4,00	3,08	61,6
Empfangsraum	4,75	3,75	3,08	54,9

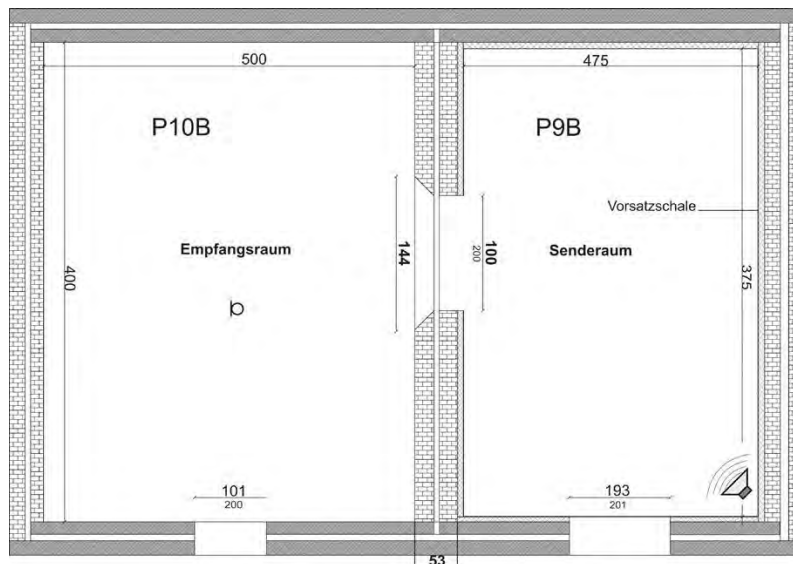


Abbildung 22: Grundriss des Türprüfstandes [88]

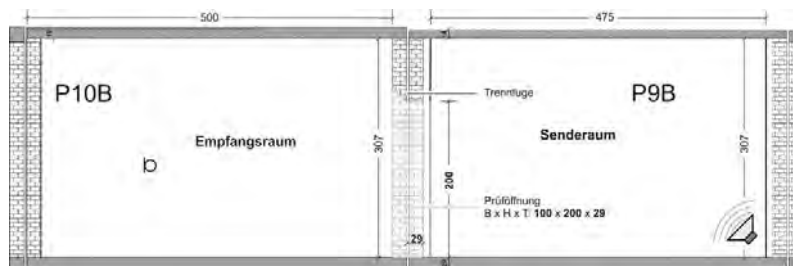


Abbildung 23: Längsschnitt des Türprüfstandes [88]

Das Schalldämm-Maß wird mit den in den beiden Prüfräumen gemessenen Schalldruckpegeln mithilfe der folgenden Gleichung frequenzabhängig ermittelt [89]:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Hierbei sind

- L_1 Schallpegel im Senderraum [dB]
- L_2 Schallpegel im Empfangsraum [dB]
- S Fläche des Bauteils [m^2]
- A Äquivalente Schallabsorptionsfläche des Empfangsraumes [m^2]

Die Ermittlung der Einzahlangaben, wie das bewertete Schalldämm-Maß R_w und die Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} , erfolgt nach DIN ISO 717-1 [90].

Der Einbau der Prüfelemente in die Prüföffnung des Türprüfstandes erfolgte durch die am ILEK entwickelte Vorspanneinrichtung. Sie ermöglicht die Befestigung der Gewebelagen am Rahmen mit einer biaxialen Vorspannung von bis zu 2,5 kN/m (Abbildung 24 + 25). Tabelle 6 weist die Flächenanteile durch die Konstruktionsteile bei den Messungen aus.

Tabelle 6: Flächenverteilung der Konstruktionselemente bei der Messung im Türenprüfstand im Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Stuttgart

Konstruktionselement	Fläche	
	absolut [m^2]	anteilig [%]
Membranaufbau	1,626	82,53
Hydraulikzylinder	0,062	3,15
Membranaufbau	0,282	14,32
Hydraulikzylinder	1,970	100,00



Abbildung 24: Eingebaute Gewebeprobe im Türenprüfstand [1]

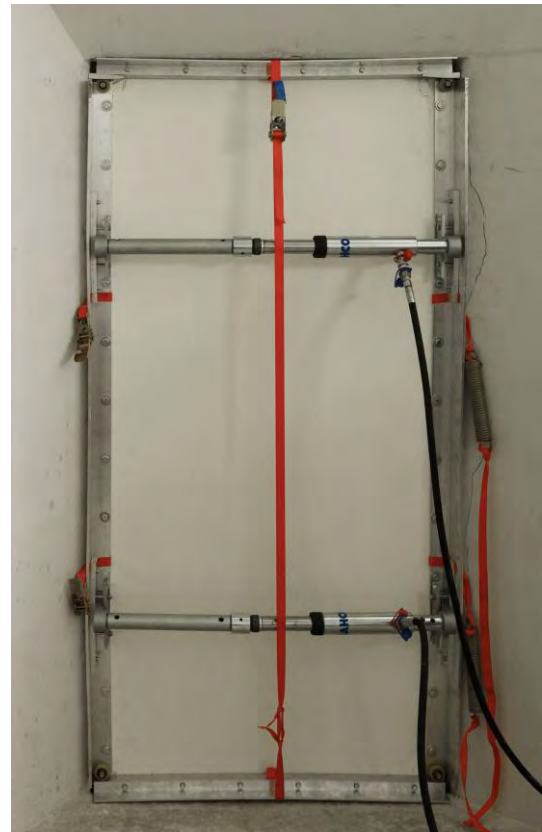


Abbildung 25: Vorspanneinrichtung [1]

Insgesamt wurde die Schalldämmung von sieben Varianten gemessen (siehe Prüfberichte in den Anlagen 10.6). Die flächenbezogene Masse der untersuchten Varianten inkl. der einzelnen Schichten und der Beschwerungen sind Tabelle 7 zu entnehmen. Tabelle 8 enthält die geometrischen Daten sowie die Angaben zur angewendeten Vorspannung.

Der erste Systemaufbau A1 (siehe Abbildung 15) bestand aus zwei PVC-beschichteten Polyestergerweben mit einer Verbundvliesstofflage. Die Ausgangs-Variante A1 knüpft an die Versuche in [70] an und wurde im Rahmen des Vorhabens mit erhöhter Vorspannung A2 (siehe Abbildung 16) sowie mit Vorspannung und mit zusätzlicher Beschwerung A3 (siehe Abbildung 17) untersucht. Der zweite Systemaufbau B1 (siehe Abbildung 18) wurde durch einen weiteren gradierten Verbundvliesstoff sowie in Variante B2 (siehe Abbildung 19) mit einer zweilagigen mikroperforierten Vorsatzschale ergänzt. Der Systemaufbau B1 wurde weiterentwickelt und durch ein fluidgefülltes Taschengewebe an einer Membranlage ergänzt (vergleiche Abschnitt 4.4), so entstand der Systemaufbau C (siehe Abbildung 20). Der vierte Systemaufbau D (siehe Abbildung 21) ersetzt den in Variante C verwendeten Verbundvliesstoff durch ein mit Silikat-Aerogel gefülltes Abstandsgewirk.

Die Ergebnisse der gemessenen Schalldämm-Maße in Abhängigkeit von der Frequenz sowie die entsprechenden bewerteten Schalldämm-Maße als Einzahlangaben sind in Tabelle 9 zusammengestellt. Die Spektrum-Anpassungswerte nach [90] enthält zusätzlich Tabelle 10. Die einzelnen Kurvenverläufe sind in den Prüfberichten grafisch dargestellt.

Tabelle 7: Zusammenstellung der flächenbezogenen Massen der untersuchten Systemaufbauten

Schichten und Komponenten	Systemaufbauten						
	A1	A2	A3	B1	B2	C	D
	flächenbezogene Masse [kg/m^2]						
Deckgewebe 1	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Verbundvliesstoff 1	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Summe der 1. Schale	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13	5,13
	flächenbezogene Masse [kg/m^2]						
Verbundvliesstoff 2	—	—	—	4,5	4,5	4,5	—
Aerogel im Abstandsgewirk	—	—	—	—	—	—	11,8
Fluidgefülltes Taschengewebe	—	—	—	—	—	18,0	18,0
Deckgewebe 2	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
Mikroperforiertes Gewebe	—	—	—	—	0,22	—	—
Punktuelle Beschwerung	—	—	1,95	—	—	—	—
Summe der 2. Schale	0,63	0,63	2,58	5,13	5,35	23,13	30,43
	flächenbezogene Masse [kg/m^2]						
Gesamtkonstruktion	5,76	5,76	7,71	10,26	10,48	28,26	35,56

Tabelle 8: Zusammenstellung der geometrischen Daten und der Vorspannung der untersuchten Systemaufbauten

Merkmal	Systemaufbauten						
	A1	A2	A3	B1	B2	C	D
Schalenabstand innen [mm]	271	271	271	262	262	242	242
Füllgrad [%]	< 50	< 50	< 50	> 90	> 90	> 90	> 90
Dicke der Konstruktion [mm]	280	280	280	280	> 300	280	280
Vorspannung [N/m]	480	980	980	480	480	480	480

Tabelle 9: Zusammenstellung der gemessenen Schalldämm-Maße in Abhängigkeit von der Frequenz, sowie der bewerteten Schalldämm-Maße der verschiedenen Systemaufbauten

Frequenz [Hz]	Messergebnisse						
	A1	A2	A3	B1	B2	C	D
	Schalldämm-Maß [dB]						
50	12,2	11,6	13,4	-1,6	15,1	17,8	19,6
63	13,5	13,5	16,3	11,1	15,2	15,4	19,1
80	12,1	12,6	15,0	8,3	15,0	15,3	18,8
100	9,9	8,5	10,6	7,70	12,3	13,4	18,8
125	8,9	8,5	14,4	14,9	12,9	13,5	18,7
160	10,2	10,7	13,1	17,1	17,6	18,3	22,5
200	12,1	10,0	12,5	21,2	19,5	20,2	24,4
250	16,4	14,1	14,9	23,1	24,2	25,0	28,4
315	19,0	16,5	16,5	23,9	25,6	26,5	30,9
400	19,3	16,9	17,9	26,3	26,0	29,1	34,6
500	22,6	20,4	20,9	25,2	27,3	31,6	38,7
630	22,9	22,1	22,8	25,1	27,4	32,8	42,5
800	23,3	24,8	25,5	27,2	30,6	35,7	46,7
1000	26,2	26,6	27,0	29,7	36,2	37,6	49,5
1250	30,6	29,9	30,4	33,8	42,8	41,0	53,3
1600	33,5	32,6	33,0	38,5	47,0	43,7	55,5
2000	38,1	36,9	37,5	40,2	53,0	47,4	59,9
2500	43,4	42,2	42,9	42,5	58,3	51,9	61,0
3150	48,8	47,1	47,9	44,6	64,4	54,8	67,5
4000	53,9	52,0	52,8	45,0	68,3	59,4	71,4
5000	58,4	56,6	56,8	49,6	68,2	63,6	73,0
R _w	25	24	25	30	32	34	39

Tabelle 10: Zusammenstellung der Spektrum-Anpassungswerte für die Norm-Frequenzbereiche

Frequenzbereich $[Hz]$	Spektrum-Anpassungswerte $[dB]$													
	A1		A2		A3		B1		B2		C		D	
	C_{tr}	C	C_{tr}	C	C_{tr}	C	C_{tr}	C	C_{tr}	C	C_{tr}	C	C_{tr}	C
100–3150	-1	-5	-1	-5	-1	-4	-1	-6	-1	-6	-2	-7	-1	-6
100–5000	0	-5	0	-5	0	-4	0	-6	0	-6	-1	-7	0	-6
50–3500	-1	-5	-1	-5	-1	-4	-2	-10	-2	-7	-2	-7	-2	-8
50–5000	0	-5	0	-5	0	-4	-1	-10	-1	-7	-1	-7	-1	-8

4.5.3 Diskussion der Messergebnisse

Die erzielten bewerteten Schalldämm-Maße liegen in einem Wertebereich zwischen 24 dB und 39 dB. Die geringste Schalldämmung wies die Aufbauvariante A2 auf. Dieses Ergebnis weicht allerdings von den Ergebnissen der Varianten A1 und A3 mit jeweils R_w = 25 dB geringfügig ab. Diese Aufbauvarianten basieren auf einem zweischaligen Systemaufbau aus zwei PVC-beschichteten Polyestergeräten sowie einer Verbundvliesstoffeinlage (Variante A1). Variante A2 unterscheidet sich von Variante A1 lediglich durch eine erhöhte Vorspannung. Variante A3 erhält zusätzlich eine Beschwerung. Die Beschwerung wird mittels Maschinenmutter (M20 und M24) realisiert, die auf die äußere Gewebeeinlage punktförmig befestigt werden. Außerdem erhält Variante A3 gegenüber Variante A1 eine erhöhte biaxiale Vorspannung. Die genauen Werte sind Tabelle 8 zu entnehmen. Nicht nur die bewerteten Schalldämm-Maße sondern auch die gemessenen Frequenzverläufe liegen dicht beieinander. Es zeigt sich, dass bei dieser einfachen Konstruktion weder die erhöhte Vorspannung der Schalen, noch die geringfügige zusätzliche Beschwerung einer Schale akustisch wirksam ist. Die Vorspannung wirkt

sich sogar auf die Schalldämmung negativ aus. Grafisch zeigt Abbildung 26 den Einfluss der Vorspannung und der Beschwerung auf die vorgespannten Membranen. Dargestellt sind in Abbildung 26 (links und rechts) auch die Kurven nach Gleichung (10) (entsprechend der flächenbezogenen Masse der Gesamtkonstruktion). Die gemessenen Schalldämm-Maße liegen im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1600 Hz bei allen drei Konstruktionsvarianten unterhalb der Werte, die theoretisch für eine gleichschwere einschalige biegeeweiche Platte zu erwarten wären. Diese Ergebnisse, dass die gemessenen Schalldämmungen teilweise niedriger liegen, als die nach Massegesetz für eine gleichschwere einschalige Wand berechneten Werte, zeigen eine gute Übereinstimmung mit den in [70] gewonnen Erkenntnissen.

Der Verlauf der Kurve A1 in Abbildung 26 im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 315 Hz zeigt zunächst einen typischen „Resonanzeinbruch“ zweischaliger Konstruktionen. Da die dynamische Steifigkeit des Verbundvliesstoffs als Füllmaterial nicht bekannt ist, würde sich die Resonanzfrequenz der Konstruktion nach Gleichung (15) unter Annahme einer vollständigen Luftfüllung zu 150 Hz errechnen. Bei einer Hohlraumfüllung (Verbundvliesstoff) mit einer höheren dynamischen Steifigkeit als bei einer reinen Luftschicht müsste die Resonanzfrequenz sogar etwas höher liegen. Außerdem zeigt die Schalldämmkurve bei mittleren Frequenzen nicht den typischen Anstieg, wie in Abbildung 26 links durch die gestrichelte Kurve angedeutet wird. Deshalb lässt sich der Einbruch der Schalldämmung im Terzband von 125 Hz nicht eindeutig auf die Masse-Feder-Resonanz der Schalen zurückzuführen.

In der Schalldämmkurve der Variante A1 in Abbildung 26 sind weitere (kleinere) Einbrüche bei 400 Hz und eine Oktave höher bei 800 Hz zu erkennen. Sie können nicht auf Hohlraumresonanzen zurückgeführt werden, weil der Hohlraum durch den Verbundvliesstoff bedämpft ist. Die erste Hohlraumresonanz der zweischaligen Konstruktion würde ohne Füllung gemäß Gleichung (19) bei 630 Hz liegen.

Charakteristisch ist dabei, dass die Schalldämm-Kurven bis 800 Hz in ihrem Verlauf eher dem Verhalten gleich schwerer einschaliger Bauteile ähneln. Die Luftschicht scheint sich in akustischer Hinsicht nicht wie eine Feder, sondern eher wie eine biegeeweiche Platte zu verhalten, so dass eine starre Kopplung zwischen den Schalen besteht. Dieses Verhalten wurde bereits in [91] entdeckt und beschrieben. Oberhalb von 800 Hz ist in der Schalldämmkurve der Variante A1 ein steiler Anstieg zu beobachten, wie er bei zweischaligen Konstruktionen nach dem Resonanzeinbruch üblich ist. Dieses Verhalten lässt vermuten, dass das äußere PVC-beschichtete Deckgewebe 1 mit dem Verbundvliesstoff 1 ein resonanzfähiges System bildet. Da bei dieser Variante der Verbundvliesstoff nur einlagig ist und keine Horizontalkraft erfährt, bleibt zwischen diesen beiden Lagen konstruktionsbedingt ein Luftspalt von 9 mm Dicke frei. Nach Gleichung (16) errechnet sich die dynamische Steifigkeit dieser Luftschicht zu 15,8 MPa/m. Die Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems, das das Deckgewebe 1 und der Verbundvliesstoff 1 bilden, liegt dementsprechend rechnerisch bei 800 Hz. Bei einer vollständigen Füllung des Zwischenraumes mit einer zweiten Lage Verbundvliesstoff (Variante B1 + B2) und durch die anderen Schichten (Variante C und D) tritt dieser Resonanzeffekt nicht mehr auf. Das Fehlen dieses Einbruchs lässt sich dadurch erklären, dass die Lagen bei der vollständigen Füllung des Hohlraums vermutlich einander berühren.

In Abbildung 26 links ist im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 630 Hz eine deutliche Verschlechterung des Schalldämm-Maßes durch die erhöhte Vorspannung zu erkennen (A2). Im rechten Diagramm kann zwar infolge der Beschwerung einer der beiden Schale eine Verbesserung im Frequenzbereich zwischen 50 Hz 200 Hz beobachtet werden, der ungünstige Einfluss der Vorspannung wird jedoch nicht kompensiert (A3).

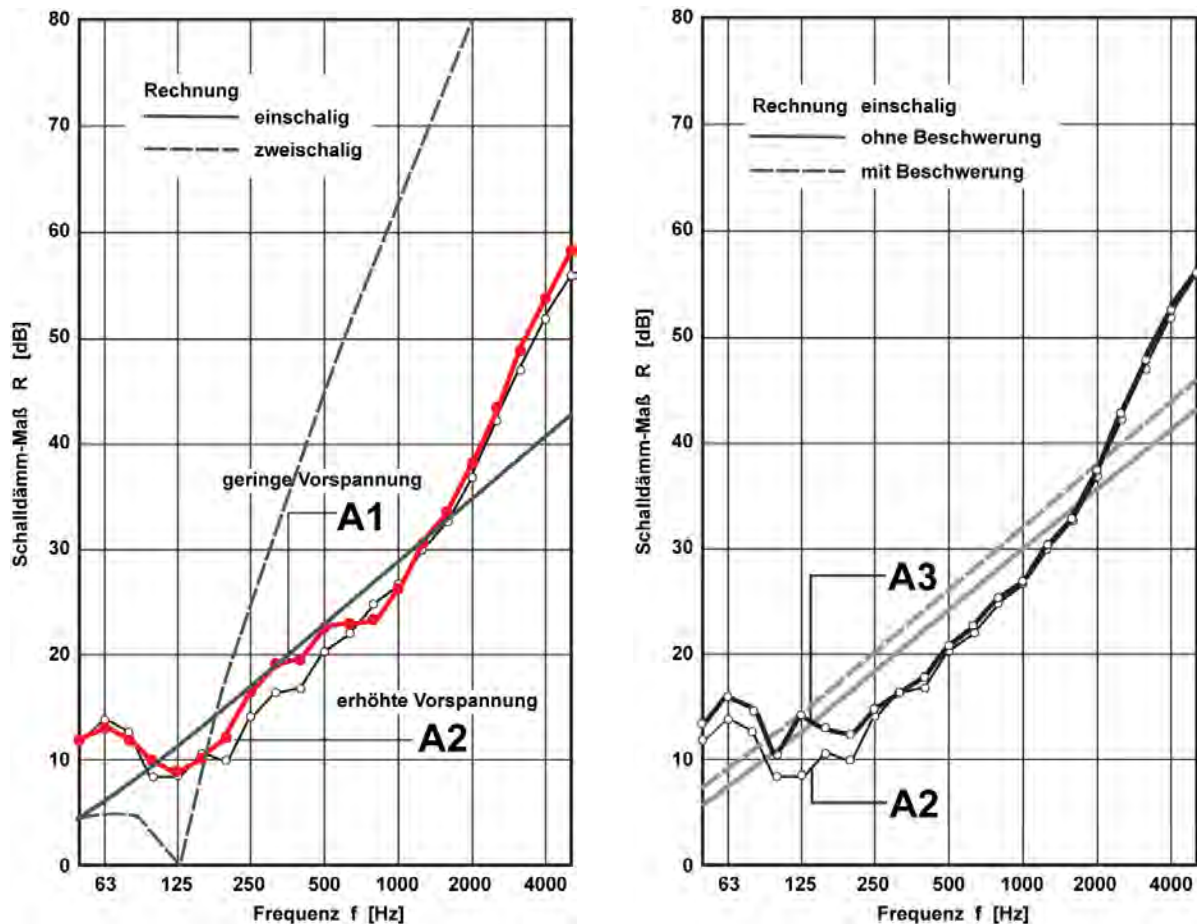


Abbildung 26: Gemessene Schalldämm-Maße in Abhängigkeit von der Frequenz bei den Varianten A1, A2 und A3
 Links: Einfluss der Vorspannung
 Rechts: Einfluss der Beschwerung einer der zusätzlich vorgespannten Membrane
 Grau: theoretischer Verlauf des Schalldämm-Maßes für eine gleichschwere einschalige biegeweiße Platte nach Gleichung (10)
 theoretischer Verlauf des Schalldämm-Maßes für eine (gestrichelt) zweischaliger Konstruktion nach Gleichung (17).

Da die Systemvariante A1 nur einseitig eine Schicht aus dem Verbundvliesstoff enthält und dadurch die niedrigste flächenbezogene Masse aller Varianten besitzt, kann durch die Verdopplung der Verbundvlieseinlagen eine wesentliche Verbesserung der Schalldämmung erzielt werden. Mithilfe der Variante B1 wird dieser Effekt in Abbildung 27 links demonstriert. Der Einsatz der zweiten Verbundvlieseinlage bewirkt zunächst eine Erhöhung der flächenbezogenen Masse der zweiten Schale um das 8-fache von 0,63 kg/m² auf 5,13 kg/m² (Tabelle 7). Die Gesamtmasse der Konstruktion wird dadurch nahezu verdoppelt. Dadurch ergibt sich im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 2000 Hz eine Verbesserung der Schalldämmung im Mittel von 5 dB. Das bewertete Schalldämm-Maß verbessert sich ebenfalls um 5 dB. Diese Verbesserung entspricht dem Zuwachs, der sich aufgrund der Massezunahme errechnet:

$$\Delta R = 20 \lg \frac{m(B_1)}{m(A_1)} = 20 \lg \frac{10,26}{5,76} = 5,0 \text{ dB} \quad (2)$$

mit

$m(B_1)$ flächenbezogene Masse der Variante B₁ [kg/m²]

$m(A_1)$ flächenbezogene Masse der Variante A₁ [kg/m²]

Eine weitere Verbesserung der Schalldämmung konnte mithilfe zweier zusätzlicher, außenseitig aufgebrachter Schichten aus mikroperforierten Gewebelagen erzielt werden. Wie in Abbildung 27 rechts dargestellt, verlaufen die Schalldämmkurven der Varianten A1 und B2 beinahe vollkommen parallel zueinander. Die Einbrüche, die bei der Variante A1 sichtbar sind, erscheinen im Kurvenverlauf der Konstruktion B2 ebenfalls, jedoch um einen Terz tiefer. Die geringste Verbesserung tritt bei 63 Hz (1,7 dB) und die größte bei 3150 Hz (15,6 dB) auf. Die mittlere Verbesserung des Schalldämm-Maßes beträgt 8 dB. Das bewertete Schalldämm-Maß wird um 7 dB auf $R_w = 32$ dB erhöht. Diese Verbesserung lässt sich allerdings nicht mehr durch die Massezunahme erklären, sie würde analog zur Gleichung (2) nur 5,4 dB betragen:

$$\Delta R = 20 \lg \frac{m(B_2)}{m(A_1)} = 20 \lg \frac{10,76}{5,76} = 5,4 \text{ dB} \quad (3)$$

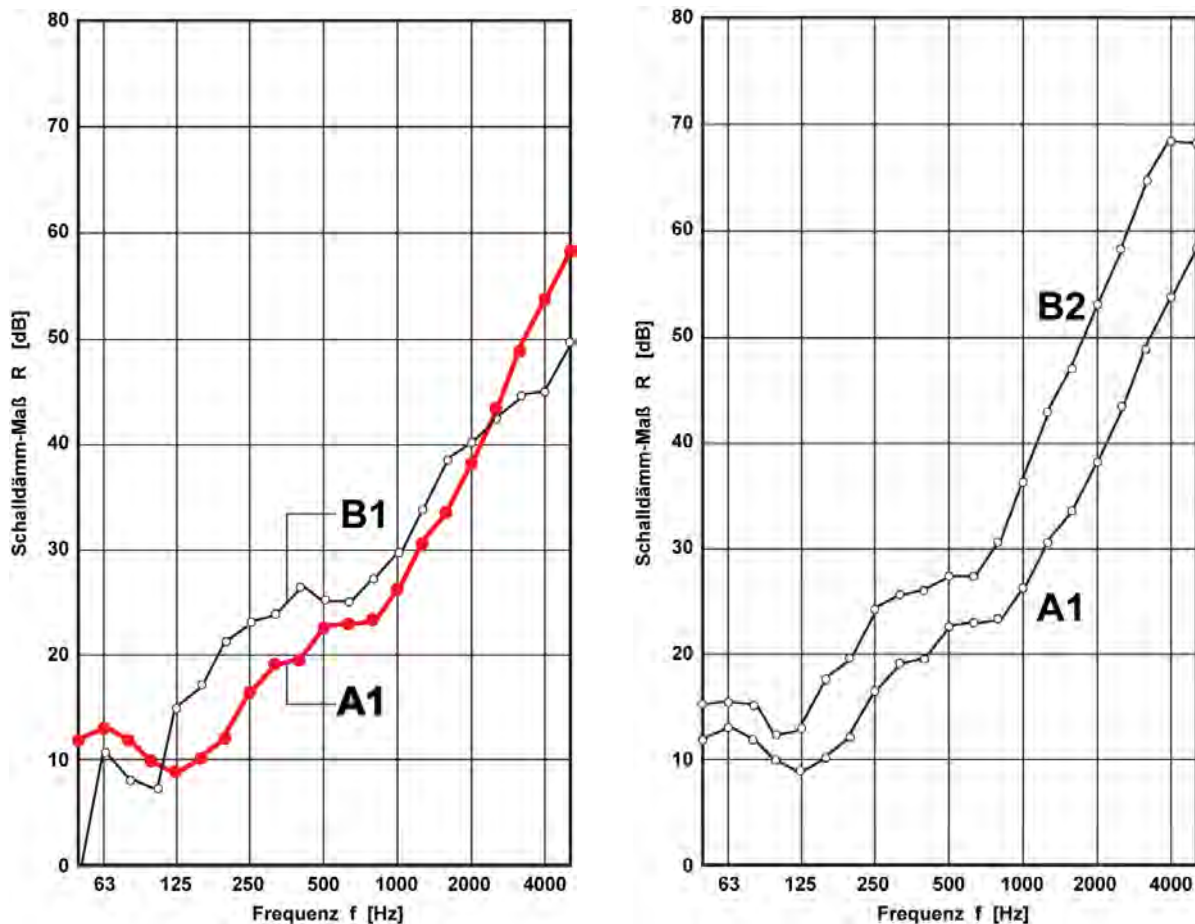


Abbildung 27: Gemessenes Schalldämm-Maß in Abhängigkeit von der Frequenz bei den Varianten A1, B1 und B2
 Links: Einfluss der Verdoppelung der Verbundvlieseinlage
 Rechts: Einfluss der Verdoppelung der Verbundvlieseinlage und einer zusätzlichen Lage aus einem mikroperforierten Akustikstoff

Die Systemaufbauten Variante B1 und B2 unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, dass Variante B2 auf einer Seite zwei zusätzliche Schichten aus dem mikroperforierten Akustikgewebe enthält. Dadurch wird eine Verbesserung des bewerteten Schalldämm-Maßes um 2 dB erzielt. Diese Verbesserung scheint zunächst gering zu sein, im Frequenzverlauf ist jedoch ein deutlicher Unterschied zwischen dem akustischen Verhalten dieser beiden Konstruktionen zu erkennen (Abbildung 28 links). Bei

125 Hz und 200 Hz treten geringfügige Verschlechterungen der Schalldämm-Maße (-2,0 dB bzw. -1,7 dB) auf. Der Einbruch bei 630 Hz bleibt bei der Variante B2, wenn auch etwas schwächer, dennoch erhalten. Die Verbesserung des Schalldämm-Maßes ist frequenzabhängig (Abbildung 28 rechts) und beträgt im Mittel 7,3 dB. Oberhalb von 500 Hz nimmt sie mit zunehmender Frequenz mit ca. 6 dB/Oktave zu.

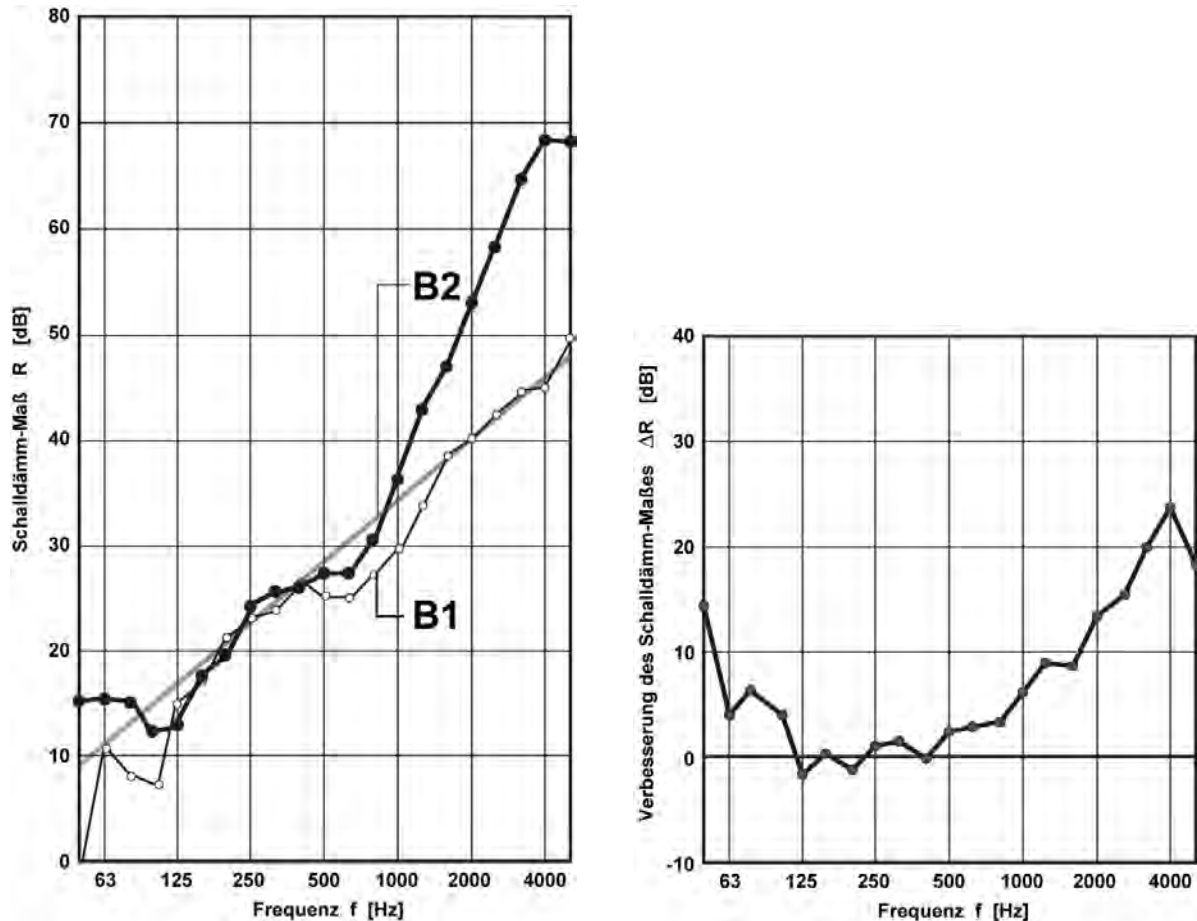


Abbildung 28: Gemessene Schalldämm-Maße (links) und Verbesserung des Schalldämm-Maßes (rechts) in Abhängigkeit von der Frequenz bei den Varianten B1 und B2
 Grau: theoretischer Verlauf des Schalldämm-Maßes für eine gleichschwere einschalige biegeweiße Platte nach Gleichung (10)

Die Erhöhung der flächenbezogenen Masse um rund 18 kg/m^2 durch das mit Flüssigkeit gefüllte Ta-schengewebe beim Systemaufbau C führt zu einer weiteren Steigerung der Schalldämmung gegen-über der Variante B1 (Abbildung 29 links). Diese Variante erzielt ein bewertetes Schalldämm-Maß von $R_w = 34 \text{ dB}$, das um 4 dB höher ist, als der Einzahlwert der Variante B1. Die mittlere Verbesserung beträgt für diese Variante 6,7 dB (Abbildung 29 rechts).

Wenn die Variante C als eine zweischalige Konstruktion mit den flächenbezogenen Massen der Scha-len von $5,13 \text{ kg/m}^2$ und $23,13 \text{ kg/m}^2$ (siehe Tabelle 7) betrachtet und der Verbundvliesstoff mit einer geringen dynamischen Steifigkeit von ca. $2,5 \text{ MN/m}^3$ angesetzt werden, würde die Resonanzfrequenz rechnerisch bei 123 Hz liegen. Dies würde dem Einbruch bei 125 Hz entsprechen. Der Verlauf der Schalldämmkurve zeigt dennoch nicht den erwarteten steilen Anstieg, wie bei zweischaligen Kon-struktionen üblich.

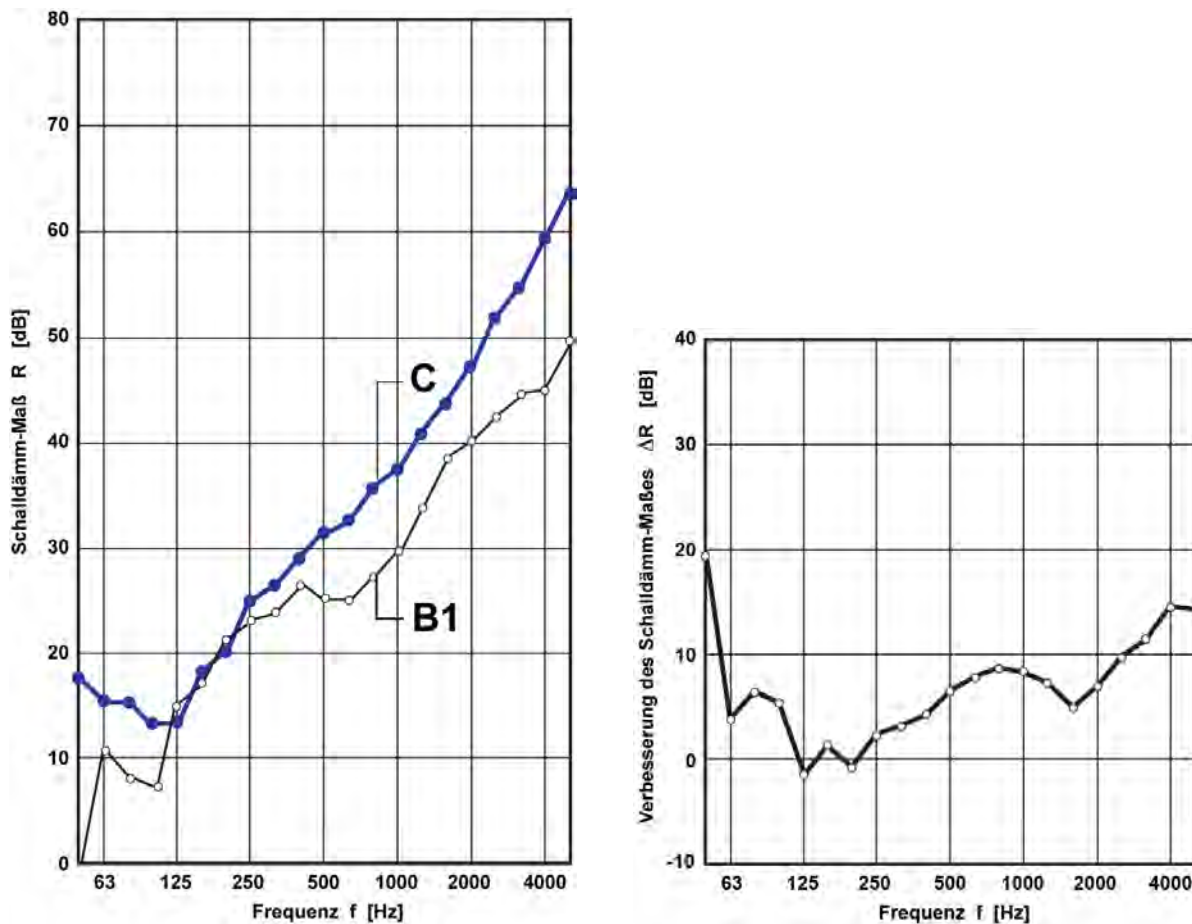


Abbildung 29: Gemessene Schalldämm-Maße (links) und Verbesserung des Schalldämm-Maßes (rechts) in Abhängigkeit von der Frequenz bei den Varianten B1 und C

Die Verwendung des Silikat-Aerogel gefüllten Abstandsgewirkes in Systemaufbau D zeigt eine weitere deutliche Verbesserung des Schalldämm-Maßes im gesamten Frequenzbereich gegenüber Variante C (Abbildung 30 links). Der Aufbau D erreicht somit ein bewertetes Schalldämm-Maß von $R_w = 39$ dB. Dieser Einzahlwert ist um 5 dB höher, als der von Variante C. Die mittlere Verbesserung beträgt 7,7 dB und zeigt im gesamten Frequenzbereich positive Werte.

Auch bei dieser Konstruktion scheint der Resonanzeinbruch, wie bei allen anderen Varianten im Terzband 125 Hz zu liegen. Die flächenbezogene Masse einer Schale wird gegenüber der Variante C weiter erhöht ($30,43 \text{ kg/m}^2$). Gleichzeitig wird der Hohlraum jedoch halbiert. Rechnerisch würde sich eine Resonanzfrequenz von 170 Hz ergeben. Auch bei dieser Konstruktion bleibt der Verlauf der Schalldämmkurve „flacher“ als erwartet.

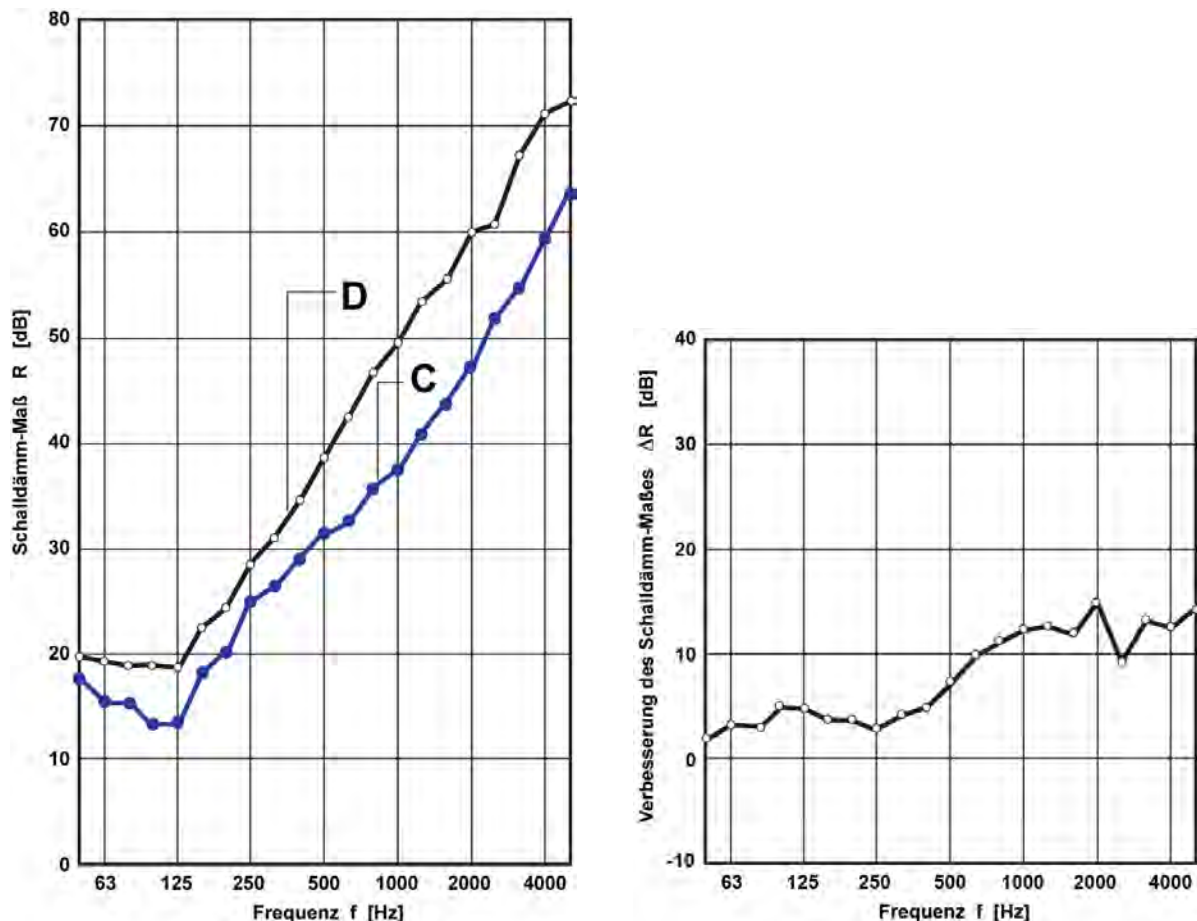


Abbildung 30: Gemessene Schalldämm-Maße (links) und Verbesserung des Schalldämm-Maßes (rechts) in Abhängigkeit von der Frequenz bei den Varianten C und D

4.5.4 Bewertung der Systemvarianten in Bezug auf frühere Untersuchungen

Die Systemvariante A1 – als Ausgangsvariante – entspricht im Wesentlichen dem Aufbau zweischaliger ultraleichter Membrankonstruktionen, wie sie früher in [70] untersucht wurden. Ein vergleichendes Beispiel der erzielten Schalldämm-Maße ist in Abbildung 31 links grafisch dargestellt. Die Messungen sind im selben Prüfstand unter ähnlichen Randbedingungen durchgeführt worden. Die zu vergleichende Konstruktion (K300/S33) besitzt eine geringere flächenbezogene Masse ($1,9 \text{ kg/m}^2$) jedoch einen etwas größeren Schalenabstand (300 mm) als die Variante A1. Die Vergleichskonstruktion hat ein bewertetes Schalldämm-Maß von 28 dB. Variante A1 ist zwar vorteilhafter bei tieferen Frequenzen, ab 315 Hz erleidet aber die Schalldämmkurve der Variante A1 im Gegensatz zu der Vergleichskonstruktion Einbrüche, die den Verlauf der Schalldämmung auch bei höheren Frequenzen beeinträchtigen. Auffällig ist, dass die Schalldämmkurven beider Konstruktionen ab 800 Hz bis 3150 Hz mit einem konstanten Abstand von ca. 15 dB und einer Steigung von etwa 12 dB/Oktave parallel zueinander verlaufen.

In der im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Messserie erzielt die Systemvariante D das höchste bewertete Schalldämm-Maß von $R_w = 39 \text{ dB}$. Dieser Wert liegt um 9 dB höher, als das bewertete Schalldämm-Maß einer vergleichbaren Konstruktion nach [70] mit ähnlicher Geometrie und mit etwa gleichem Füllungsgrad. Die Flächenbezogene Masse der Variante D ist jedoch um einen Faktor von 6,8 größer. Aufgrund dieses Masseverhältnisses wäre allerdings nur eine Verbesserung der Schalldämmung um 5,7 dB zu erwarten. Das höhere bewertete Schalldämm-Maß der Variante D ist durch ihr günstigeres Verhalten bei tiefen Frequenzen zu begründen. Abbildung 31 rechts zeigt den

Verlauf der Schalldämmung beider Konstruktionen. Variante D erzielt im Frequenzbereich bis 630 Hz ein höheres Schalldämm-Maß als die Vergleichskonstruktion K300/S80 nach [70]. Das Bewertungsverfahren nach [90] berücksichtigt diese schalltechnische Eigenschaft der Variante D bei der Bildung der Einzahlangabe positiv. Im schalltechnischen Verhalten aller untersuchten Konstruktionsvarianten tritt jeweils ein Einbruch bei ca. 125 Hz auf, der jedoch mit zunehmender Frequenz nicht von einem steilen Anstieg der Schalldämmung gefolgt wird. Dies weist darauf hin, dass die Schalldämmung der Konstruktionen möglich-erweise nicht nur von der flächenbezogenen Masse der Schalen und dem Schalenabstand bzw. der Hohlraumbedämpfung, sondern auch von anderen Parametern abhängt. Die Ergebnisse können vor allem durch die Einbaubedingungen, z.B. durch den Befestigungsmechanismus beeinflusst sein.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Schalldämm-Maße aller im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Konstruktionen weder den typischen einschaligen noch den zweischaligen Verlauf zeigen. Charakteristisch ist dabei, dass die Schalldämm-Kurven bis 800 Hz in ihrem Verlauf eher dem Verhalten gleich schwerer einschaliger Bauteile ähneln. Die Luftschicht, bzw. die Hohlraumfüllung zwischen den beiden äußeren Schalen scheint sich in akustischer Hinsicht nicht wie eine Feder, sondern eher wie eine biegeweichere Platte zu verhalten, so dass eine starre Kopplung zwischen den Schalen besteht. Dieses Verhalten wurde bereits in [91] entdeckt und beschrieben. Dort wurde der Effekt insbesondere dann beobachtet, wenn eine oder beide Schalen eine geringere flächenbezogene Masse aufwiesen. Im Vergleich dazu zeigen die aktuellen Versuchsergebnisse den oben beschriebenen Effekt auch dann (Variante C und D), wenn die flächenbezogene Masse der Schalen wesentlich erhöht wird.

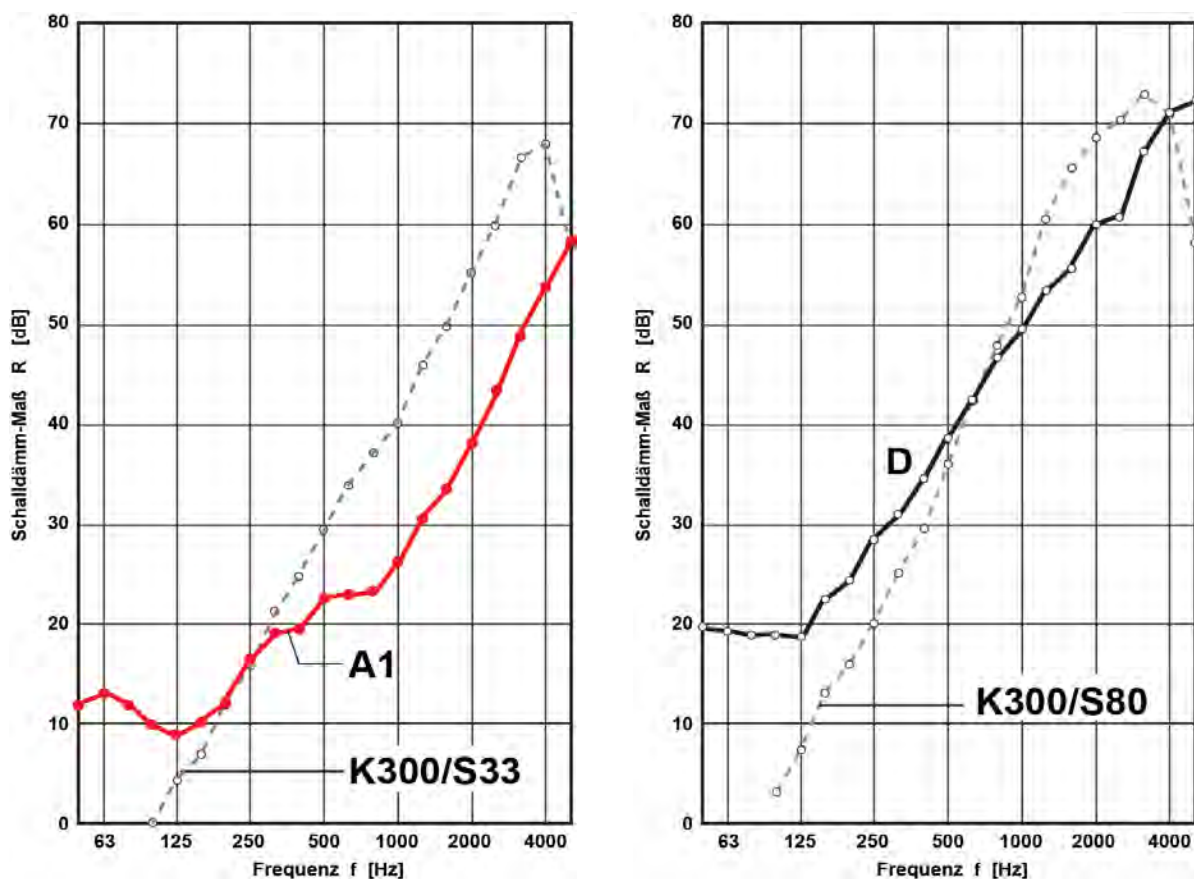


Abbildung 31: Gemessene Schalldämm-Maße in Abhängigkeit von der Frequenz bei den Varianten A1 bzw. D im Vergleich mit ähnlichen zweischaligen Konstruktionen nach [70]

- Links: Variante A1 und eine Konstruktion aus Folien mit einem Schalenabstand von 300 mm und einem Füllungsgrad von 33 %
 Rechts: Variante D und eine Konstruktion aus Folien mit einem Schalenabstand von 300 mm und einem Füllungsgrad von 80 %.

4.6 Optimierung der Systemlösung (Arbeitsphase 3)

Nach Abschluss der Messreihe im Türenprüfstand und nach der Auswertung der Ergebnisse wurden die unterschiedlichen Lösungen hinsichtlich weiterer Anforderungen an Fassaden untersucht. Damit konnte für die prinzipiellen Funktionsbereiche einer Fassade (transparent, transluzent und opak) eine übergeordnete Einschätzung zur Leistungsfähigkeit dieser masse- und ressourcensparenden sowie anpassungsfähigen Lösungskonzepte erarbeitet werden. Die Untersuchungen wurden mit Simulationen zur Wärme- und Feuchteproblematik, zur Belichtung und zum Brandschutz durchgeführt. Insbesondere für den Aspekt des Brandschutzes konnten prinzipielle Lösungen ermittelt werden. Eine messtechnische Prüfung war im Rahmen des Forschungsprojektes nicht möglich. Diese Untersuchungen müssen folgen, da sowohl interessante werkstoffimmanente, als auch anlagentechnische Lösungskonzepte im Forschungsprojekt aufgezeigt werden. Diese Lösungsansätze führen die Funktionsintegration und die aktive Beeinflussung von wechselnden Randbedingungen und Anforderungen in einem Gesamtkonzept weiter.

Nach der Einordnung von zielführenden Lösungen wurden diese in prototypische Fassadenelemente umgesetzt. Abbildung 80 auf Seite 109 zeigt die drei Module für einen transluzenten, opaken und transparenten Fassadenabschnitt.

4.7 Dokumentation (Arbeitsphase 4)

Zur Dokumentation der Arbeitsergebnisse wurden während der Projektlaufzeit mehrere Zeitschriftenartikel und Konferenzbeiträge verfasst und publiziert. Zudem wurden die Ergebnisse in Ausstellungen gezeigt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die Ergebnisse sind zudem in diesem Bericht und in der beigelegten DVD aufbereitet und dokumentiert.

- Schmid, F.; Haase, W.; Sobek, W. et al. (2014): Schallschutz und akustische Wirkweise bei mehrlagigen textilen Fassadensystemen, in: Bauphysik 01/2014.1.
- AFBW-Kongress 'Faserbasierte Werkstoffe in Bau und Architektur' Kongress der Allianz faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg (AFBW) im Haus der Wirtschaft, Stuttgart, 2013
- Schmid, F.; Haase, W.; Sobek, W. (2013): Textile and Film Based Building Envelopes – Lightweight and Adaptive, in: Structural Membranes 2013. VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures. Munich.
- 'Textile Composites and Inflatable Structures' (Structural Membranes 2013; München) – Paper und Vortrag zu 'Textile and Film Based Building Envelopes – Lightweight and Adaptive'
- Vortrag zu 'Textiles Bauen oder Klasse statt Masse?!' auf der Tagung 'Energieeffizientes Bauen und Sanieren: innovative Technologien und neues Baurecht' des Oberösterreichischen Energiesparverbandes und des Ökoenergie-Clusters (Juni 2013)
- 'Design zählt 2013 – Textil.Mode.Design' des Design Center Stuttgart im Haus der Wirtschaft, Stuttgart
- Haase, W.; Klaus, T.; Freitag, C. et al. (2012): Textile Werkstoffe für die Anwendung in adaptiven Gebäudehüllen, in Kettenwirkpraxis

5 Grundlagen und prinzipielle Gegebenheiten

5.1 Akustik / Schallschutz

5.1.1 Grundlagen der Schalldämmung ultraleichter Konstruktionen

Folien und textile Membrane haben bis vor wenigen Jahren kaum Verwendung zur Schalldämmung gefunden, da sie wegen ihrer geringen flächenbezogenen Masse hierfür als ungeeignet angesehen wurden. [60] In der Forschung waren Sie vor allem auf dem Gebiet der Schallabschirmung und des mobilen Schallschutzes Gegenstand der Untersuchungen [61, 62], weil dort eine relativ niedrige Schalldämmung der Konstruktion ausreichend ist, um die gewünschte Abschirmwirkung zu erzielen. Beispielsweise haben Messungen nach [63] gezeigt, dass leichte aufblasbare Wände massiven Schallschirmen hinsichtlich ihrer Einfügungsdämpfung unter üblichen Einsatzbedingungen kaum nachstehen.

Der Wunsch durch den Einsatz von Folien und Membranen höhere Schalldämm-Maße zu erzielen und weitere Anwendung dieser Baumaterialien zu ermöglichen, gab der Forschung neuen Antrieb. Es sollen anhand technischer und konstruktiver Möglichkeiten und der bisherigen Erfahrungen neue Ansätze gesucht werden, wie die Schalldämmung von ultraleichten Konstruktionen weiter verbessert werden kann.

Aus akustischer Sicht werden im Rahmen dieser Arbeit Konstruktionen als „ultraleicht“ bezeichnet, deren flächenbezogene Masse unter 10 kg/m^2 liegt und sie im Wesentlichen aus extrem biegeweichen Schichten bzw. Schalen, wie Folien und Membrane, bestehen. Die typischen Materialkenngrößen von Folien und Membranen sind in Tabelle 11 wiedergegeben [64].

Tabelle 11: Zusammenstellung der typischen Materialkenngrößen von „ultraleichten“ Folien und Membranen in Anlehnung an [5]

Material	Intervall	Kenngrößen				
		Dicke [mm]	Rohdichte [kg/m ³]	Flächenbezogene Masse [kg/m ²]	Zugfestigkeit [N]	E-Modul [MN/m ²]
Folien	Min.	0,08	1100	0,1	70	6
	Mittel	0,4	1600	0,7	650	110
	Max.	1,0	2600	1,1	800	280
Membrane	Min.	0,2	900	0,2	1400	800
	Mittel	0,9	1350	1,2	9000	1000
	Max.	1,5	2200	1,9	20500	4000

Trifft Schall auf ein Trennbauteil, wie in Abbildung 32 schematisch dargestellt, so wird ein Teil der auftretenden Schalleistung reflektiert. Der nicht reflektierte Anteil dringt in die Konstruktion ein und wird absorbiert. Abbildung 32 verdeutlicht, wie an der Absorption mehrere Schallübertragungsvorgänge beteiligt sind. Ein Teil der eindringenden Schalleistung im Bauteil wird durch Reibung in Wärme umgewandelt. Dieser, als Dissipation bezeichneter Vorgang, ist in offenporigen Stoffen ausgeprägt. Der Rest der in die Konstruktion eingedrungenen Schalleistung wird in den Nachbarraum oder ins Freie übertragen [65]. Beschrieben werden diese Vorgänge durch den Schallabsorptionsgrad

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_1} = \frac{W_1 - W_{refl}}{W_1} \quad [-] \quad (4)$$

und den Transmissionsgrad

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad [-] \quad (5)$$

bzw. mit Nebenwegübertragung

$$\tau' = \frac{W_2 + W_3}{W_1} \quad [-] \quad (6)$$

Den Zusammenhang zwischen Schallabsorption und Transmission geben die folgenden beiden Gleichungen an:

$$\alpha = \frac{W_{diss}}{W_1} + \tau \quad [-] \quad (7)$$

bzw.

$$\alpha = \frac{W_{diss}}{W_1} + \tau' \quad [-] \quad (8)$$

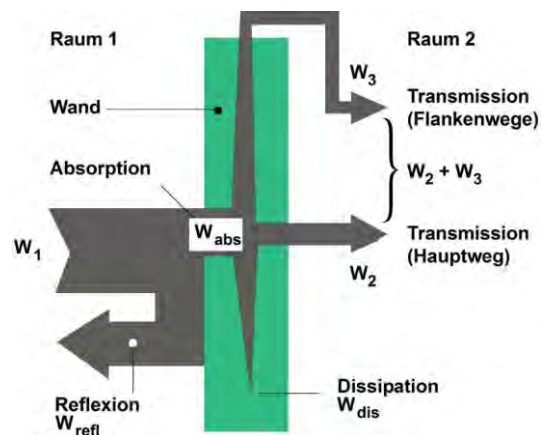


Abbildung 32: Schematische Darstellung der Schallübertragung durch ein Trennbauteil

Für ultraleichte Konstruktionen, ohne zusätzliche poröse Schichten und nennenswerte innere Dämpfung, besteht die Schallabsorption im Wesentlichen durch Schalltransmission. Je mehr Schallenergie in den Nachbarraum übertragen wird, umso geringer ist die Schalldämmung der Konstruktion.

Die kennzeichnende Größe für die Schalldämmung ist das Schalldämm-Maß R [66], das als logarithmisches Verhältnis der auf ein Bauteil auftreffenden zu der von ihm durchgelassenen Schallleistung definiert ist:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} = 10 \lg \frac{W_1}{W_2} \quad [\text{dB}] \quad (9a)$$

Beim Vorhandensein von Nebenwegen wird entsprechend das Bau-Schalldämm-Maß R' angegeben:

$$R' = 10 \lg \frac{1}{\tau'} = 10 \lg \frac{W_1}{W_2 + W_3} \quad [\text{dB}] \quad (9b)$$

5.1.1.1 Schalldämmung verlustfreier dünner Platten

Für die verlustfreie unendlich große dünne Platte errechnet sich das Schalldämm-Maß nach [67,68] zu:

$$R = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot f \cdot m'}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot \cos \delta \right)^2 \right] \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

mit

f	Frequenz [Hz]
m'	flächenbezogene Masse der Platte [kg/m^2]
ρ_0	Dichte der Luft $1,21 \text{ kg/m}^3$
c_0	Schallgeschwindigkeit in der Luft [m/s]
δ	Schalleinfallswinkel [°]

Das Massegesetz (Gleichung (10)) ist in Abbildung 33 für einschalige leichte Bauteile mit verschiedenen flächenbezogenen Massen bei einem Schalleinfallswinkel von $\delta = 45^\circ$ dargestellt. Gemäß Abbildung 33 kann durch die Verdoppelung der Masse theoretisch eine Verbesserung der Schalldämmung um 6 dB erwartet werden.

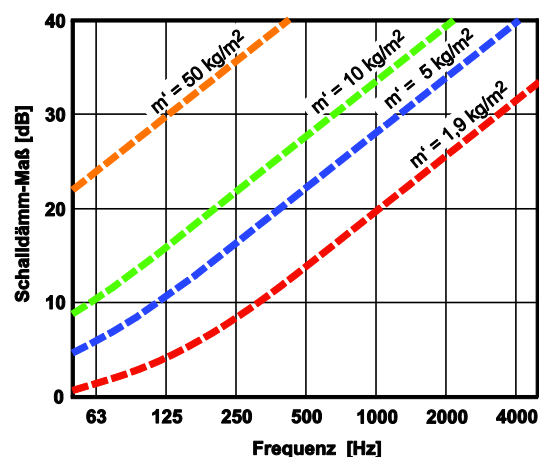


Abbildung 33: Schalldämm-Maß einschaliger Trennbauteile unterschiedlicher flächenbezogener Masse bei einem Schalleinfallswinkel von $\delta = 45^\circ$

Das Massegesetz nach Gleichung (10) gilt für Bauteile in der Praxis, wie in Abbildung 34 dargestellt, nur in einem eingeschränkten Frequenzbereich zwischen dem Bereich der Eigenschwingungen des Bauteils (Platteneigenfrequenzen f_n) und dem Koinzidenzbereich bzw. dem Bereich der Spuranpassung. Beide Effekte führen in der Regel zu einer Verschlechterung der Schalldämmung von einschaligen Bauteilen in ihrem Einflussbereich.

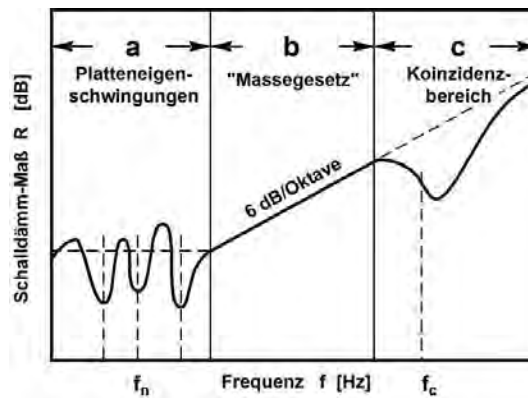


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Schalldämmung einschaliger Bauteile in Abhängigkeit von den Frequenzbereichen. [65]

5.1.1.2 Eigenschwingungen

Stimmt die Biegewellenlänge oder ihre ganzzahlige Mehrfache im plattenförmigen Bauteil mit den Abmessungen derselben Platte überein, so entstehen Plattenmoden, d.h. stehende Wellen als „Platteneigenschwingungen“. Die Eigenfrequenzen $f_{n,B}$ einer ebenen, an den Rändern „aufgestützten“ Platte errechnen sich unter Berücksichtigung der Biegesteife der Platte nach [69]:

$$f_{n,B} = \frac{\pi \cdot d}{2} \sqrt{\frac{E}{12 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot \left[\left(\frac{n_x}{a} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{b} \right)^2 \right] \quad [\text{Hz}] \quad (11)$$

Dabei sind

- d Dicke [m]
- E E-Modul [Pa]
- ρ Rohdichte [kg/m^3]
- ν Poissonsche Querkontraktionszahl [-]
- n_x, n_y Natürliche ganze Zahlen 0, 1, 2, 3, ...
- a, b Seitenlängen der Platte [m]

Eine Membran, wie eine Saite auch, erhält ihre Steifigkeit nur unter Vorspannung. Die Eigenfrequenz einer quadratischen eingespannten Platte lässt sich nach [70] berechnen zu:

$$f_{nS} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S}{\rho \cdot d}} \cdot \left[\left(\frac{n_x}{a} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{b} \right)^2 \right] \quad [\text{Hz}] \quad (12)$$

mit

- S Vorspannung [N/m]

Wenn in Gleichung (11) oder (12) typische Materialkennwerte von Folien und Membranen [71] sowie übliche Bauteilabmessungen eingesetzt werden, liegen die errechneten Eigenfrequenzen für die ersten Moden unterhalb des in der Bauakustik interessierenden Frequenzbereiches.

5.1.1.3 Koinzidenzeffekt

Wie der Abbildung 34 entnommen werden kann, ist auch die Lage der Koinzidenzgrenzfrequenz [66] zur Beurteilung Schalldämmung eines einschaligen plattenförmigen Bauteils von großer Bedeutung. Der Koinzidenzeinbruch entsteht, wenn die Schallgeschwindigkeit in der Luft und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle im Bauteil übereinstimmen. Die Koinzidenzgrenzfrequenz errechnet sich aus:

$$f_g = \frac{c_0^2}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}] \quad (13)$$

Dabei sind

$$c_0 = \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T} \quad [\text{m/s}] \quad (14)$$

κ	Adiabatexponent [-] (für Luft: $\kappa = 1,4$)
R	Gaskonstante [J/kgK] (für Luft: $R = 290 \text{ J/kgK}$)
T	Absoluttemperatur [K]
d	Dicke [m]
E	E-Modul [Pa]
ρ	Rohdichte [kg/m ³]
ν	Poissonsche Querkontraktionszahl [-]

Bei typischen Folien und textilen Membranen liegt die Koinzidenzgrenzfrequenz außerhalb des bauakustisch relevanten Frequenzbereiches und wird daher nicht näher betrachtet!

5.1.1.4 Zweischalige Konstruktionen

Werden zwei ebene Materialschichten durch eine elastische Zwischenschicht oder ein Luftpolster voneinander getrennt, entsteht ein schwingungsfähiges Masse-Feder-System, d.h. eine zweischalige Konstruktion. Mit zweischaligen Bauteilen lassen sich, wie in Abbildung 35 schematisch dargestellt, wesentlich höhere Schalldämmungen erzielen, als mit einer einschaligen Konstruktion gleicher flächenbezogenen Masse. Diese Verbesserungen treten allerdings erst oberhalb der sogenannten Resonanzfrequenz der Konstruktion auf.

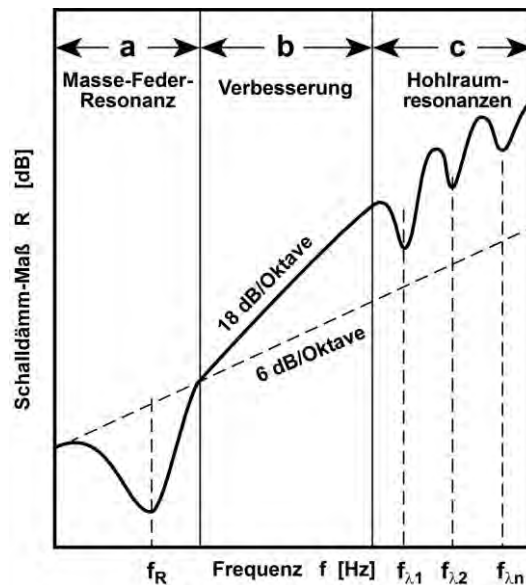


Abbildung 35: Prinzipieller Verlauf des Schalldämm-Maßes zweischaliger Bauteile in Abhängigkeit von der Frequenz [65]

5.1.1.5 Resonanzfrequenz

Die schalltechnische Wirksamkeit von zweischaligen Trennbauteilen hängt wesentlich von der Lage der Resonanzfrequenz der Konstruktion (Masse-Feder-Resonanz) ab. Sie wird wie folgt errechnet:

$$f_R = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{s' \cdot \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [\text{Hz}] \quad (15)$$

mit

- s' dynamische Steifigkeit der Schicht zwischen der beiden Schalen [Pa/m]
- m'_1 flächenbezogene Masse einer Schale [kg/m²]
- m'_2 flächenbezogene Masse der anderen Schale [kg/m²]

Wenn Luft als Zwischenschicht vorgesehen ist, errechnet sich die dynamische Steifigkeit der Luftschicht in Abhängigkeit vom Schalenabstand zu:

$$s' = \frac{\rho_0 \cdot c_0^2}{d_L} \quad [\text{Pa/m}] \quad (16)$$

mit

- ρ_0 Dichte der Luft 1,21 kg/m³
- c_0 Schallgeschwindigkeit in der Luft [m/s]
- d_L Schalenabstand [m]

Aus dem Diagramm in Abbildung 36 kann die Resonanzfrequenz von symmetrisch aufgebauten zweischaligen Konstruktionen in einfacher Weise abgelesen werden.

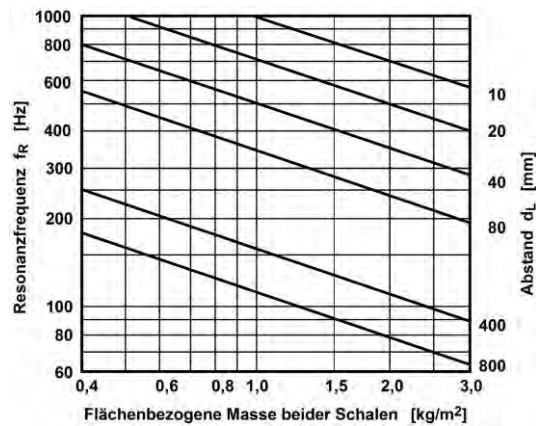


Abbildung 36: Resonanzfrequenz von ultraleichten zweischaligen Konstruktionen aus gleichdicken Schalen in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse beider Schalen und dem Schalenabstand. Der Zwischenraum ist mit Luft gefüllt

Das Schalldämm-Maß einer zweischaligen Konstruktion kann unter Berücksichtigung der Resonanzfrequenz nach [8] berechnet werden zu:

$$R = 10 \lg \left\{ 1 + \left[\frac{\pi \cdot f \cdot (m'_1 + m'_2)}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot \cos \delta \cdot \left(1 - \frac{f^2}{f_R^2} \right) \right]^2 \right\} \quad [\text{dB}] \quad (17)$$

mit

- f Frequenz [Hz]
- m'_1 flächenbezogene Masse einer Schale [kg/m^2]
- m'_2 flächenbezogene Masse der anderen Schale [kg/m^2]
- ρ_0 Dichte der Luft $1,21 \text{ kg/m}^3$
- c_0 Schallgeschwindigkeit in der Luft [m/s]
- δ Schalleinfallswinkel [$^\circ$]
- f_R Resonanzfrequenz [Hz] nach Gleichung (15) oder Abbildung 36

Unterhalb der Resonanzfrequenz liefert Gleichung (17) das Massegesetz mit

$m' = m'_1 + m'_2$, während sich bei hohen Frequenzen die doppelwandtypische Steigung mit 18 dB/Oktave ergibt.

5.1.1.6 Hohlraumresonanzen

Im Hohlraum zwischen den beiden Schalen treten je nach Schalenabstand bei höheren oder bereits bei mittleren Frequenzen Hohlraumresonanzen auf, welche auf die Eigenschwingungen des Hohlraumes zurückzuführen sind. Bei den Eigenfrequenzen f_n des Rechteckraumes, bei dem wenigstens eine Raumabmessung ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt, bildet sich in dieser Richtung eine "stehende Welle" aus:

$$f_n = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{a} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{b} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{d_L} \right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (18)$$

mit

- a, b Länge und Breite des Raumes, d.h. des Bauteils [m]
- d_L Schalenabstand [m]
- n_x, n_y, n_z natürliche ganze Zahlen 1, 2, 3, ...

Bei zweischaligen Bauteilen ist der Fall $n_x = n_y = 0$ von besonderer Bedeutung. Hierfür gilt, dass der Schalenabstand ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge des Luftschalls ist. Das bedeutet für die Eigenfrequenzen $f_{\lambda n}$, dass

$$f_{\lambda n} = \frac{c_0}{2} \cdot \frac{n_z}{d_L} \quad [\text{Hz}] \quad (19)$$

ist. Gemäß Abbildung 35 treten bei diesen Einbrüche in der Schalldämmung auf. Sie können zwar in der Praxis durch Füllung des Zwischenraumes mit einem porösen Material verringert werden, dennoch soll dieser Effekt bei der Dimensionierung von Konstruktionen berücksichtigt werden. Abbildung 37 zeigt, wie sich die Resonanzfrequenz nach Gleichung (15) und die Frequenz der ersten Hohlraumresonanz nach Gleichung (19) in Abhängigkeit des Schalenabstandes zueinander verhalten. Die konstruktive Aufgabe besteht darin, den Schalenabstand so zu wählen, dass die positive Wirkung der Zweischaligkeit auf die Schalldämmung der Konstruktion für einen möglichst breiten Frequenzbereich genutzt werden kann.

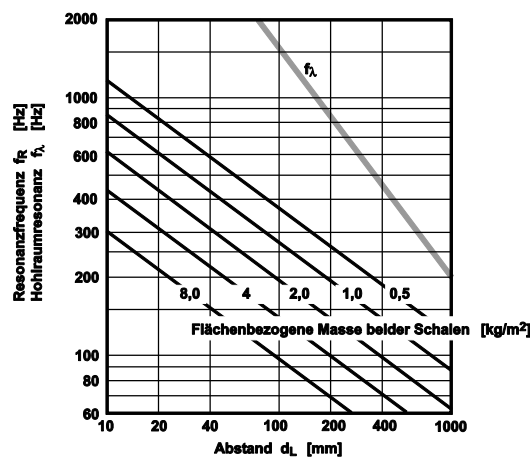


Abbildung 37: Resonanzfrequenz von ultraleichten zweischaligen Konstruktionen aus gleichdicken Schalen in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse beider Schalen und dem Schalenabstand. Der Zwischenraum ist mit Luft gefüllt

5.1.2 Stand der Forschung

Wie die unter 5.1.1 beschriebenen Grundlagen zeigen, sind die

- flächenbezogene Masse
- zweischalige Konstruktionsweise und
- Bedämpfung des Hohlraums von zweischaligen Konstruktionen

die wesentlichen Einflussparameter auf die Schalldämmung von ultraleichten Konstruktionen. Bereits 1959 wurde in [72] die Schalldämmung leichter homogener einschaliger dünner Wände mit zusätzlicher Massenbelegung experimentell untersucht. Dabei wurde das Schalldämm-Maß einer dünnen Aluminiumfolie mit 9000 Gewichten pro m^2 beklebt. Es wurde beobachtet, dass das gemessene Schalldämm-Maß bei tiefen Frequenzen oberhalb, bei höheren Frequenzen jedoch unterhalb der theo-

retisch nach dem Massegesetz zu erwartenden Werte lag. Eine Vielzahl von weiteren Arbeiten, z.B. [73, 74], befassten sich ebenfalls mit der Verbesserung der Schalldämmung rechteckiger, dünner und kleinformatiger Membrane durch Beschwerung. Es wurde gezeigt, dass eine zusätzliche Massenbelegung die Schalldämmung der Membranen in bestimmten Frequenzbereichen verbessert. Die Verbesserung wurde aufgrund von Mess- und Rechenergebnissen nicht auf die Erhöhung der flächenbezogenen Masse zurückgeführt, sondern auf die Interferenz von Eigenmoden der Grundkonstruktion und auf die der durch die Massenbelegung unterteilten Membranen. Die gemessenen Schalldämm-Maße nach [74] liegen höher als die durch Erhöhung der flächenbezogenen Masse nach dem Massegesetz zu erwartenden Werte. In der Arbeit [75] werden Gültigkeit und Wirkungsweise dieses Effektes auch bei mehrschaligen Konstruktionen überprüft. Bei beschwerten Membrankonstruktionen wurde im Vergleich zu unbeschwerten Konstruktionen eine Verbesserung des Schalldämm-Maßes von 5 bis 11 dB festgestellt.

Die Verbesserung der Schalldämmung dünner Folien durch gitterartig angeordneten Massepunkte entsprechend [76] wurde in [77] theoretisch untersucht. Zur Veranschaulichung des dabei auftretenden Effektes gibt [77] eine Näherungsformel für den Transmissionskoeffizienten T^0 zur Berechnung der Schalldämmung inhomogener dünner Platten mit Vorspannung an:

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} = 10 \lg \frac{1}{|T^0|^2} \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

mit

$$T^0 = \frac{1}{1 - j \frac{\pi \cdot f \cdot m'_1}{\rho_0 \cdot c_0} - j \frac{\pi \cdot f \cdot m'_2}{\rho_0 \cdot c_0} \cdot \frac{1}{(1 - jM)}} \quad [-] \quad (21)$$

$$M \approx \frac{4 \cdot m_2}{2\pi \cdot \frac{2 \cdot \rho_0}{\sqrt{\left(\frac{f}{c_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{a}\right)^2}} + j \left(\frac{B}{f^2} \frac{(2\pi)^2}{a^4} + \frac{S}{f^2} \frac{1}{a^2} - m_1 \right)} \quad [-] \quad (22)$$

f	Frequenz [Hz]
m'_1	Flächenbezogene Masse der unbeschwerten Schale [kg/m ²]
m'_2	Flächenbezogene Masse der punktförmigen Beschwerung [kg/m ²]
ρ_0	Dichte der Luft 1,21 kg/m ³
c_0	Schallgeschwindigkeit in der Luft [m/s]
B	Biegesteife der unbeschwerten Schale [Nm]
S	Vorspannung [N/m]
a	Gitterkonstante, Abstand der punktförmigen Massen [m]

Ein Beispiel für die Anwendung der Gleichungen (20) bis (22) zeigt Abbildung 38. Zum Vergleich sind die Verläufe nach dem Massegesetz für homogene Folien mit und ohne Beschwerung eingezeichnet. Wie von den japanischen Arbeiten [73, 74 und 75] her zu erwarten, bildet sich ein resonanzartiger Verlauf aus, der auch an das Verhalten sogenannter „interner“ Resonatoren [78] erinnert, bei denen einzelne Massepunkte durch eine elastische Lagerung in eine Trägerplatte eingebettet sind. Bei tiefen Frequenzen (unter 100 Hz) bewegen sich Folie und Zusatzmassen synchron, während oberhalb der Resonanz (ab etwa 630 Hz) näherungsweise das Massegesetz für die unbeschwerte Folie gilt. Dazwischen entsteht ein Maximum der Schalldämmung, bei dem Folie und Zusatzmassen gegenphasig schwingen.

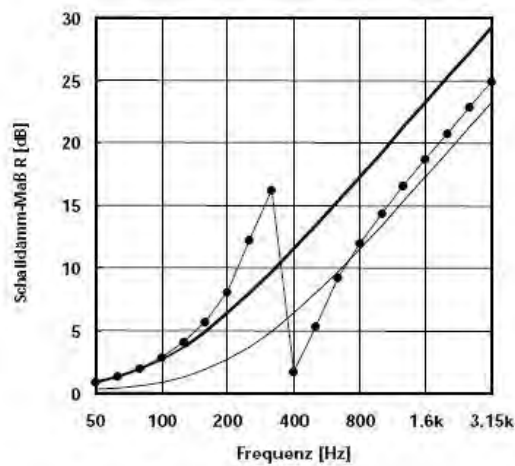


Abbildung 38: Berechnetes Schalldämm-Maß [70] in Abhängigkeit von der Frequenz. Dargestellt sind die Ergebnisse für eine Folie ($m_1 = 0,6 \text{ kg/m}^2$) mit $S = 1 \text{ kN/m}$ und zusätzlichen, 6 g schweren Punktmassen ($m_2 = 0,6 \text{ kg/m}^2$) bei senkrechtem Schalleinfall. Die Punktmassen bilden ein quadratisches Gitter mit der Gitterkonstante 0,1 m. Zum Vergleich sind die Berechnungen für die unbeschwerte und beschwerte Folie nach dem Massegesetz eingezeichnet.

Abbildung 39 stellt die nach [70] gemessenen bewerteten Schalldämm-Maße R_W einschaliger Folien- und Membrankonstruktionen in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse grafisch dar. Die graue Kurve stellt eine Näherungsfunktion der gemessenen bewerteten Schalldämm-Maße dar, die durch die folgende Formel beschrieben wird:

$$R_W = 14 \lg(m') + 14,7 \quad [\text{dB}] \quad (23)$$

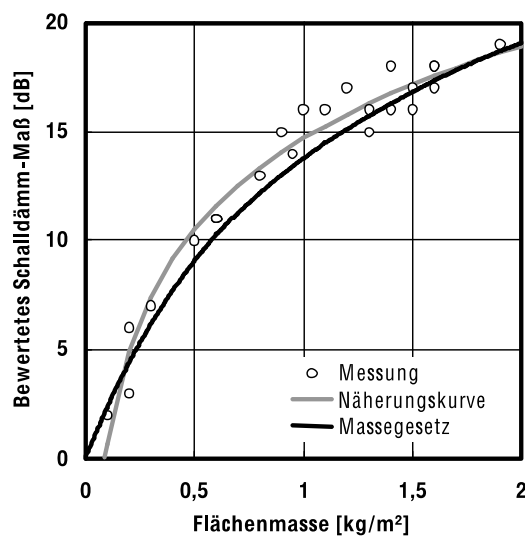


Abbildung 39: Bewertetes Schalldämm-Maß von einschaligen Folien- und Membrankonstruktionen in Abhängigkeit von der flächenbezogenen Masse. [70]

Der Einfluss der flächenbezogenen Masse und des Schalenabstandes auf die Schalltransmission und Schallabsorption von doppelschaligen Membrankonstruktionen wurde in [75 und 79] untersucht. Unter Variation der flächenbezogenen Massen von $0,5 \text{ kg/m}^2$ bis $3,3 \text{ kg/m}^2$ bei einem Schalenabstand von 0,5 m haben rechnerische und messtechnische Untersuchungen gezeigt, dass bei den untersuchten Varianten im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 4000 Hz Luftschalldämm-Maße von 10 dB bis 40 dB erreicht werden können.

Eine Reihe weiterer Untersuchungen [80, 81 und 82] befasste sich mit der Fragestellung, wie die Schalldämmung leichter Konstruktionen aus Folien und Membranen verbessert werden kann. [70] Dort konnte auch der Einfluss einer Hohlraumbedämpfung experimentell nachgewiesen werden. Abbildung 40 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse an zweischaligen Konstruktionen mit unterschiedlichen Schalenabständen und Füllungsgraden des Hohlraums. Es wurden dabei bewertete Schalldämm-Maße zwischen 15 dB und 30 dB gemessen.

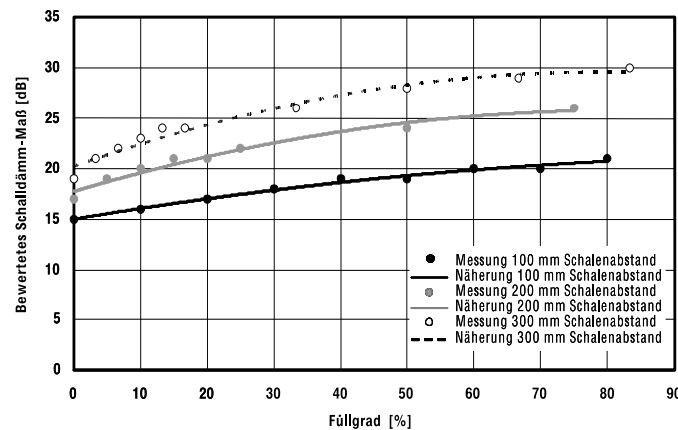


Abbildung 40: Bewertetes Schalldämm-Maß zweischaliger Konstruktionen in Abhängigkeit vom Füllgrad des mit offenzelligem Schaumstoff bedämpften Hohlraums für die Schalenabstände von 100 mm, 200 mm und 300 mm. Die drei dargestellten Linien stellen für den jeweiligen Schalenabstand eine Näherungskurve dar [70].

5.1.3 Einfluss der Vorspannung

Theoretisch wurde der Einfluss einer Vorspannung auf die Schalldämmung in [67, 83] beschrieben. Neuere Untersuchungen [70, 84] zeigen, dass eine Vorspannung erst bei sehr hohen Werten (von ca. 250 kN/m) eine nennenswerte Verbesserung der Schalldämmung bewirken kann, da sonst ein ähnlicher Einbruch, wie bei der Koinzidenz auftritt. In [85] wurde dieser Effekt mithilfe von Simulationen nachgewiesen.

In [75] wurde der Einfluss der Vorspannung auf unbeschwerte und beschwerte Membranen messtechnisch untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorspannung das Schalldämm-Maß von unbeschwerten Folien nur unwesentlich beeinflusst, bei beschwerten Folien jedoch eine Verbesserung der Schalldämmung hervorruft.

5.1.4 Akustische Wirkweise von ultraleichten Fassadenlösungen

Lärm stellt einen der größten Umweltbelastungsfaktoren dar. Zugleich lässt sich die auditive Wahrnehmung aber nicht „abschalten“, weswegen die akustische Dämmung von Räumen zunehmend ins Bewusstsein der Planer und Nutzer rückt. Visuell nicht wahrnehmbare Einflüsse werden zusammen mit der steigenden Nachfrage an nachhaltigen, ökologischen und gesundheitsfördernden Gebäuden zukünftig bedeutsamer [20]. Störende Hintergrundgeräusche und akustische Mängel unterstreichen oftmals eine schlechte Verständlichkeit und führen zu wesentlichen Einbußen bei der Raum- und Lebensqualität. Die Beziehungen zwischen Material, Konstruktion, Raum und die daraus resultierenden Konsequenzen für Konstruktion und Akustik werden für Designer und Planer von größerer Bedeu-

tung bei der Anwendung von angebotenen Produkten und Systemlösungen, um qualitativ hochwertige Räume erschaffen zu können [19].

Für die Untersuchungen und Entwicklungen des Forschungsprojektes war es deshalb wichtig, anhand von exemplarischen Systemaufbauten die akustische Wirkweise zu untersuchen und die vorangegangenen Entwicklungstendenzen sowie einen wirtschaftlichen Herstellprozess mit einzubeziehen. Dies konnte durch die am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren vorhandenen Erfahrungen mit den konstruktiven Anforderungen, dem Anwendungsbezug und einer stringenten Konzeptentwicklung sowie durch die Vorarbeiten am Lehrstuhl für Bauphysik mit dem theoretischen Hintergrund und der messtechnischen Expertise, erfolgen. Ergänzt wurde diese Zusammenarbeit durch eine enge und frühzeitige Integration von Herstellern aus der Textilindustrie, um so eine integrierte Systementwicklung mit frühzeitiger Aufdeckung von Einschränkungen durch die Materialwahl und das Herstellungsverfahren einbinden zu können.

Als Ausgangspunkt im Entwicklungsprozess wurden demnach die im textilen Bauen bisher verwendeten Werkstoffe und Systemaufbauten diskutiert. Dabei handelt es sich um vorgespannte Gewebelagen aus Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetem Polyestergewebe sowie aus Polytetrafluorethylen (PTFE) beschichtetem Glasfasergewebe. Diese sollten, wie im Bauwesen üblich, als äußere Membranlage für den Witterungsschutz und für die Sicherstellung der Tragfähigkeit gegenüber Wind- und Schneelasten eingesetzt werden [3, 15].

Für den Aufbau der Zwischenlagen war das erforderliche Mindestmaß an Wärmedämmung aus den vorangegangenen Projekten definierbar. Die Möglichkeit der Durchlüftung der einzelnen Lagen war zudem sicherzustellen, da eventuell ausfallendes Tauwasser abgeführt werden muss, um Schäden an der Konstruktion zu verhindern [4].

Die bei Haase et al. zusammengefassten Bauwerke mit mehrlagigen Membrankonstruktionen verwenden dabei als entkoppelte Kernlage häufig Vliesstoffe, um Wärmedämmung und Entfeuchtung zu realisieren [21]. Eine Weiterentwicklung dieses Bauelementes war somit die erste zu untersuchende Variante. Damit wurde auch die Möglichkeit einer akustischen Optimierung der existierenden Systemaufbauten abschätzbar.

Die zusätzliche Beschwerung der äußeren und inneren Schichten erweiterte die Untersuchung des prinzipiellen Lagenaufbaus. Im weiteren Entwicklungsprozess wurde die Integration einer Hochleistungswärmedämmschicht aus Aerogel untersucht, da bei Haase et al. und bei Cremers et al. diese für transluzente und hochdämmende Aufbauten als sinnvoll erörtert wurde [3, 22].

Aus den Ergebnissen von Mehra et al. konnte das bauakustische Verhalten mehrlagiger leichter Aufbauten aus der Theorie dünner Platten abgeleitet werden [19]. Basis für den in Variantenstudien ausgewählten Systemaufbau waren deshalb akustisch zweischichtig wirkende Konstruktionen der Platten-, Helmholtz- und Breitbandresonatoren.

Wichtigstes akustisches Charakteristikum vieler textiler Werkstoffe, die bisher in mehrlagigen textilen Aufbauten als Wärmedämmung eingesetzt werden, ist ein optimaler Strömungswiderstand [23]. Damit sind sie für den Einsatz zur Dämpfung der entstehenden Luftzwischenräume prinzipiell geeignet. Ebenfalls gute Wirksamkeit ist bei der Verwendung von Aerogelen zu erwarten, da sie ein hohes akustisches Absorptionsvermögen aufweisen [22]. Eine Aussage über die akustische Wirkweise unterschiedlicher Materialien allein genügte für die Untersuchung im Forschungsprojekt jedoch nicht. Um eine Einschätzung zur Wirksamkeit der mehrschichtigen Systemaufbauten zu geben, waren die Materialien als Teil eines Bauelementes und als gesamtheitlicher Systemaufbau zu untersuchen.

Aus produktionstechnischer Sicht war es für die Vliesstoffentwicklung sinnvoll, auf das feuerhemmende Material Trevira CS (Polyesterfaser) als günstiges und auf den zur Verfügung stehenden Maschinen standardisiert verarbeitetes Material zurückzugreifen. Die Verwendung von Polyesterwerkstoffen ermöglicht zudem die Entwicklung sortenreiner Schichtaufbauten mit Vorteilen hinsichtlich der Rezyklierbarkeit und der Recyclingfähigkeit. Die Produktionsweise des Vernadelns ermöglichte es, einen im Querschnitt zweischichtigen Aufbau als ein Bauelement herzustellen.

Silicat-Aerogel stand als besser wärmedämmende Materialalternative für die Anwendung als Kernlage zur Verfügung. Die konstruktive Einbindung in den Systemaufbau konnte entweder mittels Vernadelungstechnik in einen Vliesstoff als Trägermaterial erfolgen oder alternativ durch die Befüllung eines Abstandsgewirkes oder einer Faltstruktur. Untersuchungen zum akustischen Verhalten von Aerogelen als Additive in Vliesstoffen sind bei Gries bereits gegeben. [24] Untersuchungen zur Befüllung von Faltstrukturen wurden am ILEK ebenfalls durchgeführt. Die Erreichbarkeit einer höheren Transluzenz, eine bessere Trennbarkeit der verwendeten Materialien, einen höheren Volumenanteil an Aerogel als leistungsfähigere Wärmedämmung und die fehlenden Untersuchungen zur akustischen Wirkweise dieser Komponenten/Materialkombination, ergaben den Ausschlag, diese Variante der Befüllung des Abstandsgewirkes weiterzuverfolgen.

5.2 Prinzipieller Aufbau und Optimierung von Vliesstoffdämmungen

Aus den systemtheoretischen Überlegungen zu den zweischaligen, dünnen Konstruktionen resultierte für eine erste Weiterentwicklung von Vliesstoffen, dass die zwei begrenzenden äußeren Flächen der Vliesstofflage als massekonzentrierte "Platten" mit möglichst hoher flächenbezogener Masse auszuführen sind. Aus produktionstechnischer Sicht wurde eine flächenbezogene Masse von $2,0 \text{ kg/m}^2$ bei einer Dicke von 10 mm als realisierbar eingeschätzt. Vliesstoffe mit einer vergleichbaren flächenbezogene Masse werden für die Papierindustrie bereits hergestellt. Bisherige Vliesstoff-Dämmungen, die in mehrlagigen textilen Systemaufbauten verwendet werden, weisen Bauteildicken von 100 bis 200 mm mit einer flächenbezogenen Masse von $2,5 - 5,0 \text{ kg/m}^2$ auf [3]. Mit der dichteren Ausführung der beiden begrenzenden Flächen erhöht sich zwar die flächenbezogene Masse des neuen Bauelementes, die Verwendung von zusätzlichem Material erfolgt jedoch an den aus akustischer Sicht sinnvollsten Stellen. Einen negativen Einfluss auf das Wärmedämmverhalten konnte in der Anpassung des Vliesstoffquerschnitts durch die Simulation von Klaus et al. nicht nachgewiesen werden [25]. Das damit fortgeführte Bauelement besteht somit aus drei Schichten, zwei massekonzentrierten Deckschichten und einer offenporigen Füllung. Diese Füllung wirkt dabei durch eine geringe dynamische Steifigkeit reduzierend auf stehende Wellen und auf Interferenzen akustisch günstig, sowie durch die niedrige spezifische Wärmeleitfähigkeit wärmetechnisch dämmend.

Die Produktion eines solchen geschichteten Verbundvliesstoffaufbaus wird dabei durch zwei gleiche Bauteile erreicht. Durch mehrfache, schichtweise Vernadelung lässt sich die Kombination aus dämpfendem, offenporigen Füllstoff und der massekonzentrierten Trägerschicht in einem Bauteil herstellen (vgl. Abbildung 4). Die Anwendung als Bauelement erfolgt dann durch die gespiegelte Anordnung zweier Bauteillagen im Systemaufbau. Die Untersuchungen und Entwicklung zur Herstellbarkeit wurden in Zusammenarbeit mit dem Technologie- und Entwicklungszentrum der Groz-Beckert KG durchgeführt.

Für den ersten prinzipiellen Systemaufbau resultiert hieraus, dass als äußerste, wetterzugewandte Lage (Deckgewebe) ein Polyvinylchlorid (PVC) beschichtetes Polyestergewebe verwendet wird. Die Lage wird mit der im Bauwesen üblichen Vorspannkraft von $0,4 - 0,8 \text{ kN/m}$ in den Konstruktionsrahmen eingebaut. Im Abstand von 250 mm verläuft die innere raumabschließende Gewebelage. Der Abstand wurde aufgrund der Entwicklungsergebnisse aus dem Forschungsprojekt zur Entwicklung von Systemprofilen für mehrlagige textile Gebäudehüllen [2] gewählt. Als Kernlage werden zwei Bauteillagen des entwickelten Verbundvliesstoffes spiegelsymmetrisch, mit den massekonzentrierten Trägerschichten von der Spiegelachse entfernt, eingebracht. Sie werden im Systemprofil entkoppelt zu den jeweiligen Gewebelagen eingebaut. Eine flächige Verbindung des Verbundvliesstoffes mit den Deckgeweben wurde ebenfalls geprüft. Aufgrund der Austauschbarkeit, der unterschiedlichen konstruktiven Anforderungen und der Expertise des LBP aus Vorgängerprojekten war jedoch ersichtlich, dass eine Kopplung keinen wesentlichen Einfluss auf die Schalldämmung zur Folge hat [19]. Aus konstruktiver Sicht können somit einfachere Anbindungen an die Unterkonstruktion sowie im gesamten Kernlagenaufbau kleinere Vorspannungen und damit längere geometrische Haltbarkeiten realisiert

werden. Die sich ergebenden luftdurchströmten Abstände zwischen Deckgewebe und Verbundvliesstoff sowie zwischen den beiden Verbundvliesstofflagen können zur Ablüftung von möglichem Kondensat verwendet werden. Abbildung 6 zeigt die damit resultierende Weiterentwicklung der bisherigen Vliesstoffdämmung hin zum prinzipiellen Systemaufbau mit zwei Verbundvliesstoffen.

5.3 Erweiterung des Grundprinzips

Das grundlegende Prinzip einer resonanzfähigen zweischaligen Konstruktion ermöglicht die Variation der beschwerten Lagen, um die Schalldämmung des Lagenaufbaus zu erhöhen. So könnte durch das Vernadeln schwerer Fasern oder durch die zusätzliche Integration von Kunststoff, Metall- oder Glasteilen eine weitere Steigerung der flächenbezogenen Masse der außenliegenden Lagen erreicht werden.

Die zusätzliche Vernadelung von beispielsweise Silikat-Aerogel als Additiv erweitert die wärmetechnische Leistungsfähigkeit des geschichteten Vliesstoffaufbaus und führt zu einer höheren Schalldämmung.

Perforierte Gewebe haben ebenfalls Einfluss auf die raumakustische Wirkweise. Diese können als inneres Deckgewebe vor dem beschriebenen Systemaufbau angebracht werden. Das System wird so zu einem Schallabsorber erweitert. Die Gestaltung und Planung von Innenräumen wird mit den beiden letztgenannten Erweiterungen mit ausdifferenzierten Einstellmöglichkeiten für die Raumakustik durch transluzente Fassadenpaneele ergänzt.

5.4 Anpassungsfähigkeit des Systemaufbaus

Im interaktiven Entwicklungsprozess zwischen ILEK, LBP und den Industriepartnern wurde als aussichtsreichste Erweiterung des prinzipiellen Systemaufbaus eine weitere, flächige Beschwerung der äußeren und inneren Lagen eingeschätzt. Um neben der Wirksamkeit der zusätzlichen flächigen Beschwerung auch die akustische Anpassungsfähigkeit eines solchen Systemaufbaus zu demonstrieren, wurde ein ergänzendes Bauelement in Zusammenarbeit mit der Global Safety Textiles GmbH entwickelt. Diese Systemerweiterung wird zwischen dem Deckgewebe und dem Verbundvliesstoff im Systemaufbau eingebaut. Das entstandene zweilagige, abgesteppte Taschensystem, welches durch eine variable Fluidfüllung zur Einstellung der flächenbezogenen Masse vor dem Verbundvliesstoff wirkt, wurde als Prototyp hergestellt und getestet. Die Variabilität der Menge des Füllmediums und des Fülldruckes ermöglicht das Schwingungs- und Reflexionsverhalten der Lage zu beeinflussen.

Abbildung auf Seite 19 zeigt den Querschnitt des gesteppten zweilagigen Gewebes. Die sich abzeichnende Rillenstruktur des befüllten Gewebes ist ebenfalls dargestellt. Die daraus resultierende streuende Wirkung wurde in den Vorentwicklungen für die Raumakustik als förderlich eingeschätzt, weshalb die Montage dieses Bauelementes sowohl dem Stadtraum als auch dem Innenraum zugewandt erfolgen kann. Durch eine beidseitige Verwendung kann schließlich eine umfassende Beeinflussung der Raum- sowie Stadtraumakustik erfolgen.

Die Veränderlichkeit der akustischen Verhaltensweisen von Lagenaufbauten ist insbesondere bei ultraleichten Konstruktionen sinnvoll, da somit durch die zeitlichen und räumlichen Veränderungen durch die Systemgestaltung auf das städtische oder innenräumliche Umfeld eingegangen werden kann. Diese Anpassung erfolgt durch die Variation der befüllbaren Schichten. So kann die Schallenergie in einem städtischen Umfeld reduziert werden, wenn die zum Innenraum gerichtete Schicht reflektierend wirkt und die dem Stadtraum zugewandte Schicht entleert ist. Das System kann aber auch umgekehrt eingestellt werden, vor allem um den raumakustisch wirkenden, absorbierenden Flächenan-

teil des Innenraumes zu erhöhen. In diesem Fall wäre die Schicht zum Außenraum hin befüllt und beschwert, die Schicht in Richtung Innenraum wäre entleert. In der Verbindung mit einem automatischen Steuerungssystem kann so die Raumakustik des Innenraums je nach Nutzung und die Stadtraumakustik je nach Lärmpegel durch die Anpassung des Reflexions- beziehungsweise Absorptionsverhaltens des Systemaufbaus eingestellt werden.

Abbildung 41 zeigt den Systemaufbau mit zwei aktivier- und steuerbaren, fluidbefüllten Schichten, von denen je eine sowohl dem Innen- als auch dem Stadtraum zugewandt ist.

Als weiteren synergetischen Effekt kann die Fluidfüllung als Medium einer solarthermischen Anlage dienen. Das Taschengewebe wird hierbei neben der akustischen Funktion des Reflektors als thermischer Kollektor verwendet [26]. Das Kreislaufsystem und der Fluidspeicher wären in diesem Fall an die Sollwerte zur Einstellung der thermischen Behaglichkeit des Innenraums und an die Grenzwerte zur Vermeidung von Oberflächenkondensation im Systemaufbau auszulegen [9].

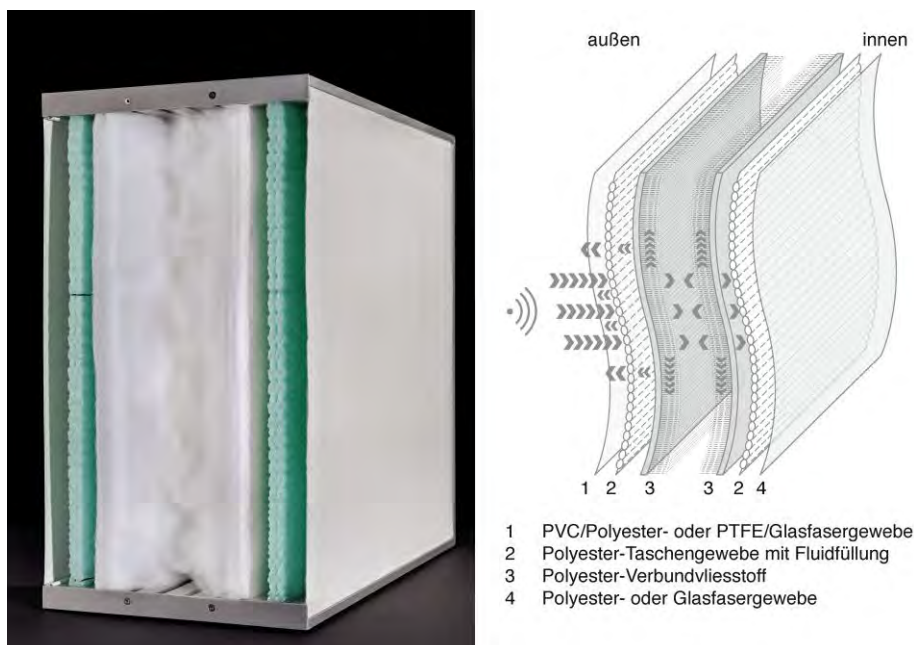


Abbildung 41: Systemaufbauten mit integrierten, fluidgefüllten Taschengeweben (Foto: ILEK / G. Metzger)

5.5 Materialvariation bei der dämpfenden Kernlage

Um den oben beschriebenen Vorteil des Silicat-Aerogels als hochisolierende und transparente, thermische Dämmschicht nutzen zu können, wurde in der letzten Iteration der Systementwicklung der Verbundvliesstoff durch eine Aerogel-Lage ersetzt. Der prinzipielle Aufbau bleibt dabei durch zwei eingesetzte, verwendete Taschengewebe erhalten. Die Halterung des als Granulat vorliegenden Aerogels erfolgte in einem 120 mm dicken Abstandsgewebe, welches von PVC/Polyestergeweben ummantelt war. Abbildung 42 zeigt den daraus resultierenden fünfflagigen Aufbau.

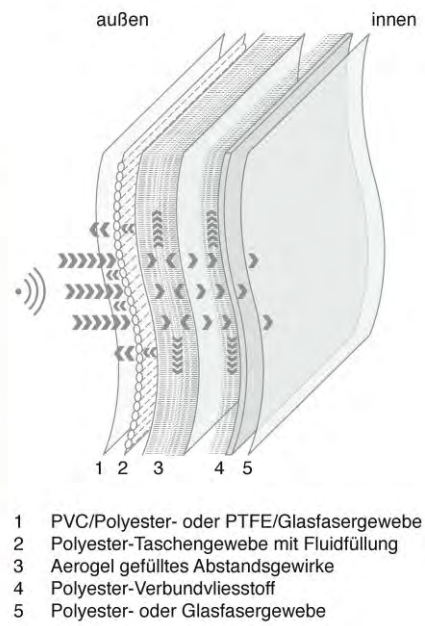


Abbildung 42: Passiv und aktiv wirkende Systemaufbauten [26]

6 Systematischer Entwurfsprozess

6.1 Einleitung

Die Systemsynthese beschreibt den Teil der Entwurfs- und Entwicklungsarbeit im Planungsprozess, indem aus den Ergebnissen der Systemanalyse eine zielgerichtete Lösung erarbeitet wird. Die Lösung bietet für das Planungsproblem verschiedene prognostizierte Handlungsempfehlungen, Charakterisierungen, Beschreibungen und Maßnahmen an. Die Systemsynthese als Prozessbestandteil und die daraus entwickelte Systemlösung sind grundlegend für die Umsetzung in Bauteile, Aufbauten und Produkte.

Die Systemsynthese wird als Teil des Planungsprozesses selbst von vielen Aspekten beeinflusst und hat im Umkehrschluss Auswirkungen auf den Prozess und auf die Prozessergebnisse. Diese komplexen Abläufe und Zustände zu verstehen, zu beherrschen, im Prozess zu nutzen, weiterzuentwickeln oder zu erschaffen, erfolgt durch das Verständnis von Zusammenhängen, Wechselwirkungen, Perspektiven und Bewertungsvariablen.

Fachliches Wissen über einzelne Aspekte und ein gesamtheitliches Verständnis der Aufgaben sind für einen zielgerichteten, qualitativen Lösungsansatz wesentlich. Um in mehreren Iterationen zu sinnvollen und überprüfbaren Lösungsvarianten zu gelangen, werden Kreativitätstechniken und -methoden sowie die Analyse quantifizierbarer Faktoren umgesetzt. Aufarbeitung und Ergänzung von Wissensbestandteilen, Analysen um Informationslagen zu erweitern, ergänzen diesen Prozess und verdichten die Lösungen zu schlüssigen Konzepten, denen logische Systeme zugrunde liegen.

Konzepte und Systeme müssen wiederum in die vorhandenen Konstrukte und Denkmuster sinnhaft eingebettet sein. Schließlich erfolgt in Iterationen

- die Prüfung der Aspekte, Wechselwirkungen und Auswirkungen,
- die Anpassung und Verbesserung,
- die Aufarbeitung der Nachteile und Zielkonflikte,
- die Abwägung zwischen erarbeiteten Varianten,

um die Lösung mit dem größten Potenzial zu identifizieren. Reproduzierbare Berechnungen und Messungen auf wissenschaftlicher, mathematischer Basis sind Grundlage für eine erste objektivierende Einschätzung [27].

Mathematik und Technikwissenschaft stellen die Schnittfläche zur Etablierung naturwissenschaftlicher Maßnahmen zur Verfügung. Philosophie und Technikwissenschaften fügen die Etablierung ethisch, moralischer Maßnahmen für die Diskussion bereit. Die Technikwissenschaften, und damit alle Ingenieurwissenschaften, sind das Bindeglied für eine fachübergreifende System- und Systemsynthese [27].

Die Ergebnisse einer Systemsynthese sind wesentlich für die Ausprägung und Umsetzung von Konzepten nach Gesichtspunkten der Systemtheorie. Die Synthetisierung ist das Umkehrproblem der Analyse, durch die vielen Möglichkeiten jedoch erheblich aufwendiger und anspruchsvoller in der Umsetzung [28].

Der Entwurfs- und Entwicklungsprozess im Forschungsprojekt wurde strukturiert durchgeführt sowie mit ausgewählten Methoden bearbeitet und begleitet. Nachfolgende Tabelle führt die Arbeitsphasen auf und ordnet die angewandten Methoden und Werkzeuge zu. Eine ausführliche Katalogisierung der Methoden ist bei Lindemann enthalten [12].

Tabelle 12: Strukturierung und methodische Bearbeitung

Arbeitsphasen	Methode	Werkzeug
Analyse		
Themenstellungen offen in alle Richtungen erarbeiten	Recherche	Internetsuche Datenbankrecherche am ILEK Recherche eigener Unterlagen
Strukturierung der Recherche	Mind-Maps	Diagramm-/Grafikprogramm
Sortierung der Informationen	Analyseplanung	Mind-Map, Literaturrecherche
Aufbereitung der Informationen	ABC-Analyse	Tabellenkalkulation
	Datenbanken	Zotero-Literaturverwaltung, ILEK-Werkstoffdatenbank
	Text- und Trendanalyse	Textverarbeitung, Diagramm-/Grafikprogramm
	Pamphlets, Mind-Maps	Diagramm-/Grafikprogramm
Zielplanung		
Bedingungen und Anforderungen	Auflistung	Tabellenkalkulation
	Anforderungslisten	Tabellenkalkulation
Parameter untersuchen	Anforderungslisten	Tabellenkalkulation
Kriterien definieren	Anforderungslisten	Tabellenkalkulation
Systembeschreibungen erstellen	Funktionsmodelle	Diagramm-/Grafikprogramm
Entwurf/Konzeption		
Variantenbildung	Brainstorming	Einzelarbeit, disziplinübergreifende Gruppe
	Delphi-Analyse	Expertisen abfragen, filtern, einarbeiten
Systemdefinition		
Systembeschreibung erstellen	Funktionsmodelle	Diagramm-/Grafikprogramm
Umsetzung vorbereiten	Delphi-Analyse, Anforderungslisten, Effektexpertisen	Disziplinübergreifender Workshop
Funktionsanalyse	Morphologischer Kasten, Effektsammlung	Tabellenkalkulation
Leistungsprognose		
Zielerfüllung	Delphi-Analyse	Expertisen abfragen, filtern, einarbeiten
Folgenabschätzung	Delphi-Analyse	Expertisen abfragen, filtern, einarbeiten
Systemüberarbeitung		
Anpassung der Systembeschreibung	Funktionsmodelle	Diagramm-/Grafikprogramm
Aufarbeitung von Wechselwirkungen	Funktionsmodelle	Diagramm-/Grafikprogramm
Varianteneingrenzung	Nutzwertanalyse	Tabellenkalkulation
Umsetzung		
Übersetzung in Bauelemente	Abstraktion und Konkretisierung	Skizzen, Schemazeichnungen, Prinzipmodelle
Zusammenführen der Ergebnisse	Bericht	Textverarbeitung, Tabellenkalkulation, Diagramm-/Grafikprogramm
Entwicklung		
Herstellung von Mustern	Anpassung standardisierter Produktionsprozesse	Maschinen, Industriepartner
Prüfen der Muster	div. Testverfahren	Iterative Verbesserung
Verbesserung des Bauelementeentwurfs	Algorithmisches Auswahlverfahren	Tabellenkalkulation
Herstellen weiterer Muster	Anpassung standardisierter Produktionsprozesse	Maschinen, Industriepartner
Herstellen und Prüfen der Musteraufbauten	div. Testverfahren	Iterative Verbesserung
Dokumentation		
Zusammenführen der Ergebnisse	Bericht	Textverarbeitung, Tabellenkalkulation, Diagramm-/Grafikprogramm

6.2 Wechselwirkungen, Synergien und Zielkonflikte

Systeme bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten und Relationen. Den Verbindungen liegen spezifische Abhängigkeiten und Wirkzusammenhänge zugrunde, welche als Wechselwirkungen bezeichnet werden. Mit zunehmender Komplexität von Systemen werden diese Bezüge unüberschaubar, da die netzwerkartige Verbundenheit der Komponenten zu multidimensionalen Zusammenhängen und Abläufen führt. Komplexe Systeme werden in einer verkürzten Beschreibung mit einem chaotischen Verhalten charakterisiert, obwohl sie bei genauerer Betrachtung ebenfalls determiniert sind. Allerdings erscheinen die Ergebnisse und Effekte, die aus dem Verhalten eines solchen Systems abgelesen werden können, als indeterminiert. Ähnliche Verhältnisse und nicht ähnliche Einwirkungen führen bei diesen komplexen Systemen beispielsweise trotzdem zu gleichen Effekten [29].

Was bei der Betrachtung von Wechselwirkungen ergänzend von Belang wird, ist die Frage der Rückbezüglichkeit, der Lokalität und der zeitlichen Varianz. Alle drei Aspekte können dämpfend oder verstärkend auf die Verknüpfung wirken, so dass erst durch das Einbeziehen dieser Attribute eine Abschätzung hinsichtlich positiver Effekte und Synergien oder negativer Effekte und Zielkonflikte gegeben werden kann. Als Rückbezüglichkeit wird die Rückkopplung zwischen Komponenten beschrieben. Diese können direkt oder indirekt, das heißt über andere Komponenten hinweg, erfolgen [30].

Beim Planungshandeln und im Umgang mit komplexen Systemen gibt es Fehleinschätzungen, die in der menschlichen Wahrnehmung begründet sind. Durch die gedankliche Linearisierung von komplexen Zusammenhängen werden diese vereinfacht und handhabbar, dadurch wird der Sachverhalt perspektivisch eingegrenzt. Das Wirkungsnetz wird auf eine Wirkungskette reduziert [31]. Zudem sind Eingriffe in vernetzte Systeme immer mit Folgen verbunden. Diese können offensichtlich und direkt oder erst zeitverzögert, an anderen Stellen und durch nicht als Kausalität erkannte Wirkbeziehungen eintreten.

Zielkonflikte existieren dann, wenn Zielvorstellungen unterschiedlicher Aspekte nicht zugleich erfüllt werden können. Für den Planungsprozess, die Bewertung und die Entscheidungsfindung ist es wichtig, durch ein methodisches Vorgehen die entsprechenden Zielkonflikte offenzulegen, um sie einschätzen, lösen oder tolerieren zu können [32].

6.3 Funktionsintegration

Systemstrukturen und die darin angelegten Attribute haben für die Abläufe und die Umsetzung von Effekten erheblichen Einfluss. Komponenten und Relationen vereinen eine Vielzahl von Attributen, die für unterschiedliche Effekte verwendet werden. Funktionsintegration dient der Vereinfachung der Systemstruktur. Umgesetzt werden kann diese Reduktion durch Funktionsvereinfachungen [33]. Funktionsintegration kann folgende Auswirkungen ermöglichen [34]:

- reduzierte Masse
- niedrigere Produktions-, Herstellungs- und Montagekosten
- geringerer Materialeinsatz
- niedrigere Logistikkosten
- reduzierte Anzahl an Bauteilen und –elementen

Dem gegenüber stehen meist [34]:

- komplexere Geometrien
- aufwendigere Fertigungsverfahren
- steigende Wechselwirkungen

Eine Einordnung, ob und in welchem Umfang Funktionsintegration vorhanden oder notwendig ist, kann nur über eine klare Definition der Systemgrenzen und der Perspektive einer jeweiligen Betrachtung erfolgen.

Aus der Einbettung in vergleichbare Systemumgebungen lassen sich auch die Grenzen von Funktionsintegration beschreiben. Vorausgesetzt es handelt sich um dasselbe Bezugssystem, lassen sich die Trennung der Funktionen und die Funktionsinklusion definieren. Bei der Trennung der Funktionen werden diese in unterschiedlichen Komponenten und in der Systemstruktur veranlagt. Die Funktionsinklusion integriert mehrere Funktionen in einer Systemkomponente und macht eine Differenzierung aus der Bezugsperspektive nicht möglich oder notwendig. Der Unterschied zwischen den Niveaus ist fließend.

Als Erwartungs- und Leistungstendenz wird für die Trennung der Funktionen eine deutlichere Abgrenzung der anzuwendenden Effekte in Teile und Teileverbände notwendig. Die Systemgestaltung wird dadurch eindeutiger und ist mit weniger Wechselwirkungen behaftet. Dies kann bei der Dimensionierung zu geringer anzunehmenden Sicherheitsfaktoren führen. Als Nachteil wird die Vielzahl der Teile und der daraus resultierende größere Bauraum beschrieben [34]. Übersetzt man die Trennung der Funktionen in eine relativistische Funktionsdarstellung, so wird in einem System mit jeder Funktion gleichzeitig ein weiteres Element eingeführt. Abbildung 43 zeigt anhand einer schematischen Systemdarstellung zwei Subfunktionen, die in einer Komponente k_n integriert sind.

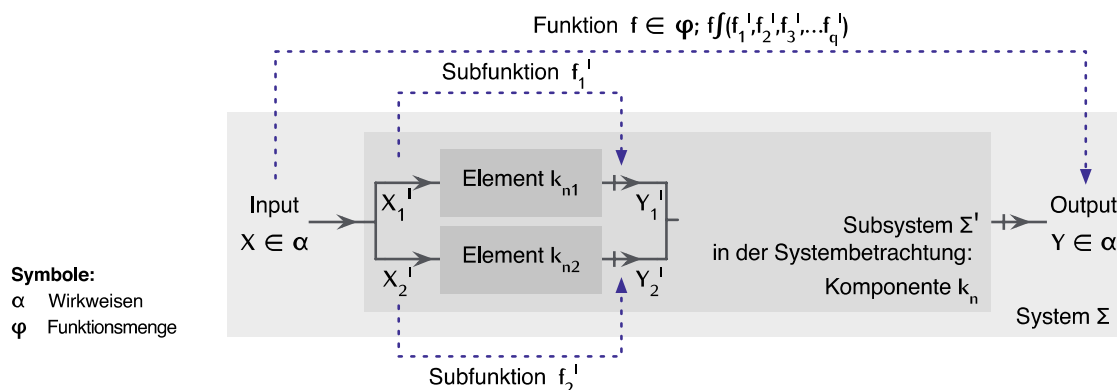


Abbildung 43: Funktionsintegration in strukturaler und funktioneller Darstellung

Das Gestaltungshandeln transferiert die identifizierten Synergien und die aufgedeckten Zielkonflikte in Konzepte und Lösungsvarianten. Zielkonflikte müssen dabei ausgeschlossen werden, Synergien für effektive und effiziente Lösungen genutzt werden. Legt man das systemtheoretische Verständnis zugrunde, ermöglichen Struktur- und Funktionsmodelle die Offenlegung und Diskussion der Wechselwirkungen. Jede Wechselwirkung resultiert im Ergebnis in Zustandsänderungen des Systems. Die zugrundeliegende Struktur wirkt entweder dämpfend oder verstärkend.

Ziel für das Strukturmodell ist, synergetische Funktionen so zu kombinieren, dass sie als Subsystem begriffen werden können und für den eigentlichen Ablauf unter den betrachteten Systemgrenzen keine Rolle spielen. Sie werden zum Schwarzen Kasten. Für Funktionskombinationen, aus denen Zielkonflikte folgen, besteht die Möglichkeit, die Systemstruktur deutlicher ausdifferenzieren, stärker zu hierarchisieren oder die Funktionen eindeutiger voneinander zu trennen. Dies kann durch räumliche oder zeitliche Trennung erfolgen.

Als Gestalter muss man sensibel mit den Wirknetzen umgehen, um im jeweiligen Einzelfall die relevanten Subsysteme zu identifizieren und die enthaltenen Komponenten und Relationen in die Systembetrachtung mit einzubeziehen. Funktionsintegration kann mit unterschiedlich klassifizierten Funktionen bewusst oder unbewusst in einem System angewendet werden. Abbildung 44 führt die verschiedenen Typen auf und zeigt ein zugehöriges relationsorientiertes Funktionsmodell.

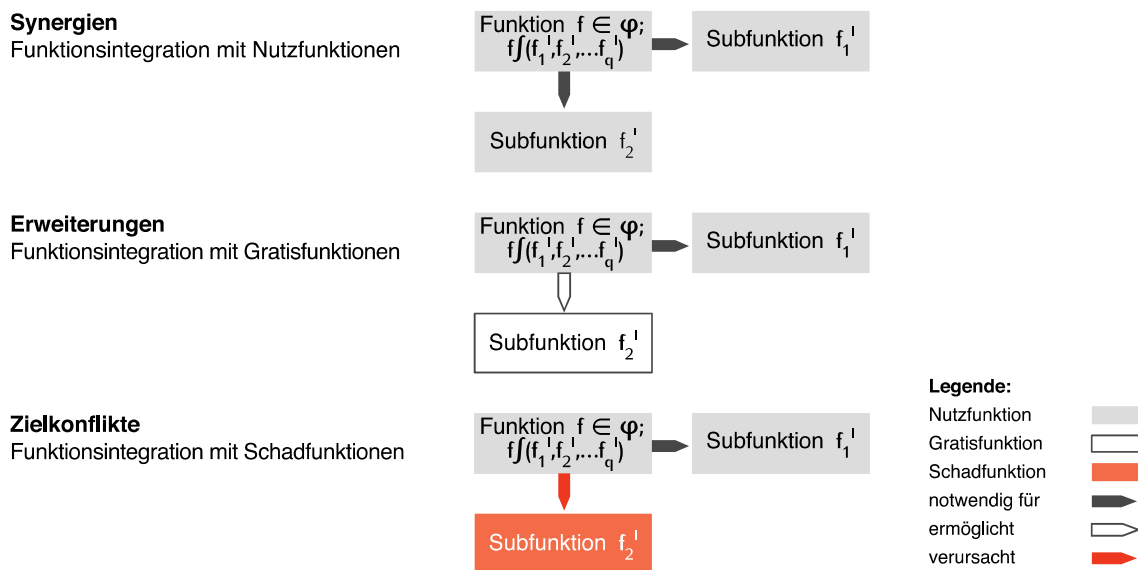


Abbildung 44: Typen von Funktionsintegration im relationsorientierten Funktionsmodell

Funktionsintegration optimiert dabei das Verhältnis aus Bauteilen einer Sachgesamtheit zu Funktionen in äquivalenten Systemgrenzen. Da technische Systeme nach Funktionen definiert und Kosten meist mit der Anzahl und der Dimension der eingesetzten Bauteile korrelieren, spiegelt höhere Integration von Funktionen in Bauteile und Sachgesamtheiten immer auch eine Verknüpfung mit der Kosten-Nutzen Relation wider [35].

Als sehr enge Definition von Funktionsintegration mit dem Quotient aus der Anzahl der Funktionen zur Anzahl der Bauteile lassen sich Rückschlüsse auf das Integrationsniveau und damit auf die Kosten-Nutzen Relation ziehen. Da bei der Analyse zahlreicher Systeme und Sachgesamtheiten ersichtlich ist, dass eine Eindeutigkeit der Teileanzahl und mehr noch eine Eindeutigkeit der Funktionsanzahl nicht klar ermittelbar ist, muss die erwähnte Definition um die Bedingung von gleich gewählten Systemgrenzen erweitert werden [36].

Abbildung 45 zeigt die von Roth bekannte Grafik zu Sachsystemen. Sie ist mit dem erweiterten Spektrum möglicher Integrationsniveaus ergänzt. Eine Korrelation zur Wirtschaftlichkeit wurde nicht nachvollzogen, da sie anwendungs- und systembezogen bewertet werden muss.

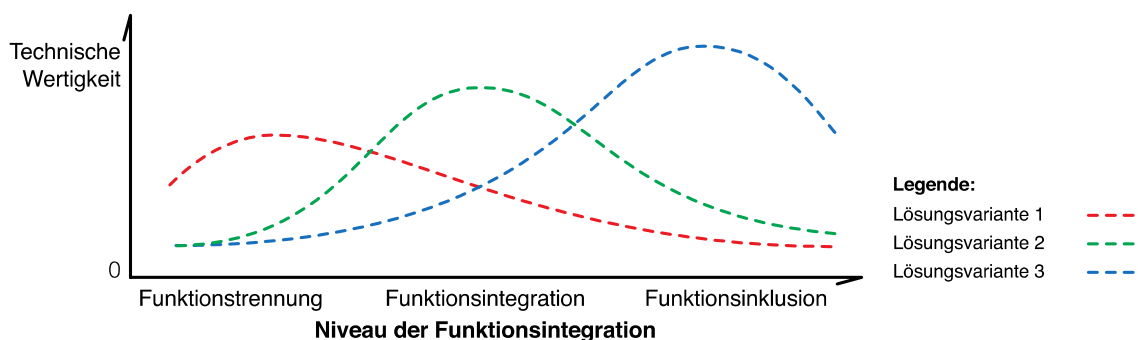


Abbildung 45: Tendenzen für den Verlauf der technischen Wertigkeit bei Funktionstrennung, -integration und -inklusion [35]

Bei der Funktionsintegration sind höhere Integrationspotenziale auch Risiken verbunden. Diese sind mit den zusätzlichen Wechselwirkungen und den resultierenden Zielkonflikten begründet. Die ungünstige Gestaltung, teurere Herstellungsverfahren oder schlechtere Wartungseigenschaften machen das Potenzial der Vereinfachung und der Kostenreduktion oftmals zunichte oder nicht klar identifizierbar. Am Ende liegt es in der Verantwortung der Akteure, wie und in welchem Umfang die gesetzten Ziele erreicht werden [36].

6.4 Anwendung von Funktionsintegration im Entwicklungsprozess

Um Funktionen zu integrieren, bieten sich zwei Möglichkeiten an. Die passive Aufwertung eines Bauteils erweitert die Funktionalität durch die Ausschöpfung der Eigenschaften. Im Herstellungsprozess kann die Werkstoffeigenschaft verändert und angepasst werden, ohne weitere Teile oder Teileverbände hinzufügen zu müssen.

Die Unterscheidung zwischen Eigenschaften und Funktionen lässt sich am Beispiel der Fertigung eines Werkstückes verdeutlichen. Das Werkstück sollte als Eigenschaft spannbar sein, das Spannen als Funktion wird jedoch von der Fertigungseinrichtung übernommen. Hieraus wird auch ersichtlich, dass die Funktionen und Eigenschaften in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen eines Bauteils ausdifferenziert beschrieben werden müssen. Eine Möglichkeit ist nun, die Eigenschaften zu Funktionen aufzuwerten. Wenn das Werkstück beispielsweise selbst die Funktion des Spannens übernehmen kann, übernimmt es zumindest Teilfunktionen für die Fertigung. In diesem Fall kann die Reduzierung der Anzahl der Teile – ein Merkmal von Funktionsintegration – nur durch ein erweitertes Bezugssystem, nämlich unter Einbeziehung der Betrachtung der Fertigungseinrichtung, vollzogen werden [36].

Eine weitere Möglichkeit stellt die aktive Aufwertung dar. In den Bauelementen wird hierzu zeitliche oder räumliche Veränderlichkeit oder Anpassungsfähigkeit umgesetzt. Eine Fußbodenheizung ist hierfür ein einfaches Beispiel. Der Fußboden wird als Konstruktion und als zeitlich steuerbare Wärmequelle genutzt.

Analysen zur Funktionsintegration und zu Umsetzungsmethoden zeigen, dass integrale Lösungen meist bei mobilen Leichtbaustrukturen zur Anwendung kommen und auf konstruktive Funktionen konzentriert sind. Wichtigste funktionale Aspekte sind bisher die Erleichterung der Montage sowie die Reduzierung von Masse und Material. Die Reduktion der Kosten ist indifferent nachgewiesen. Durch geringere Stückzahlen, reduzierten Materialverbrauch und geringeren Montageaufwand ist eine Kostensenkung zu erwarten, die allerdings mit dem Mehraufwand bei den Fertigungsverfahren zu vergleichen ist [36].

Um Funktionsintegration im Entwurfs- und Entwicklungsprozess systematisch nutzen zu können, helfen die katalogisierten Methoden zur Funktionsintegration [36]. Relevant für die durchgeführte Entwicklung ist die Methode nach Crull, bei der Gruppen von Systemkomponenten mit gleichen grundlegenden Faktorbezügen untersucht werden, um ungenutzte Eigenschaften zu identifizieren. Diese Möglichkeiten beeinflussen wiederum die Weiterentwicklung der Systemstrukturen.

Funktionsintegration kann so als Innovationstreiber durch die Erweiterung der Funktionen eines Systems oder einer Baugruppe genutzt werden. Die Erweiterung von Teilfunktionen der eingesetzten Komponenten erhöht auch das Niveau der Funktionsintegration des Gesamtsystems und erweitert dessen Gesamtfunktion. Hierzu muss eine weitere Iteration der Anforderungsneuformulierung und eine Weiterentwicklung von Systemkomponenten stattfinden. Erst damit können aus Gratisfunktionen die beabsichtigten Soll-Funktionen werden. Dieser Aufwand des Aufarbeitens der prinzipiellen Konzepte und neuen Systemkonfigurationen resultiert in innovativen Ergebnissen [36].

Durch das Verschieben von Produkt- und Systemwissen in frühere Planungs- und Entwicklungsphasen wird es ermöglicht, das Potenzial der Funktionsintegration schon in der prinzipiellen, konzeptionellen Ausrichtung eines Entwurfsprozesses einzubinden. So werden bereits Komponenten definiert, die ähnliche oder gleiche Teillösungen oder Teilfunktionen erfüllen. Mit der intuitiv-methodischen Arbeitsweise wird eine zügige und zielführende Bearbeitung und Umsetzung erreicht.

Die Einbeziehung unterschiedlicher Perspektiven und Dimensionen ist dabei von äußerster Wichtigkeit, um die Zusammenhänge polydirektional, dimensionsübergreifend und holistisch aufarbeiten zu können. Die Konzentration auf lediglich eine Dimension, beispielsweise auf kleine und leichte Lösungsansätze zur Reduktion des Material- und Energieverbrauchs, verhindert die Einbeziehung von übergeordneten Effekten und Abläufen, die beispielsweise durch steigende Produktions- und Absatzzahlen oder durch ein verändertes Nutzungsverhalten einen sogenannten „rebound effect“ zur Folge hat [37]. Der Effizienzgewinn auf einer unteren Systemebene wird somit durch den Mengeneffekt auf einer übergeordneten Systemebene eventuell überkompensiert. Erst die Einbeziehung weiterer Dimensionen, wie beispielsweise der Lebensdauer, der Austauschbarkeit von Komponenten und die Preisstruktur ermöglichen es dimensionsübergreifend eine Ressourcenreduktion zu realisieren [32].

Die Einschätzung, in welchem Umfang Funktionsintegration bei der Umsetzung in Maßnahmen und Effekte anzustreben ist, kann über einen Vergleich der Leistungserfüllung für die relevanten Kriterien erfolgen. Abbildung 46 zeigt einen Vergleich von sechs alternativen Kriterien, deren Zielerfüllung bezogen auf das Integrationsniveau unterschiedlich eingeschätzt wird. Das Niveau der Zielerfüllung muss anhand quantifizierbarer Zielwerte oder bewerteter Kriterien erfolgen.

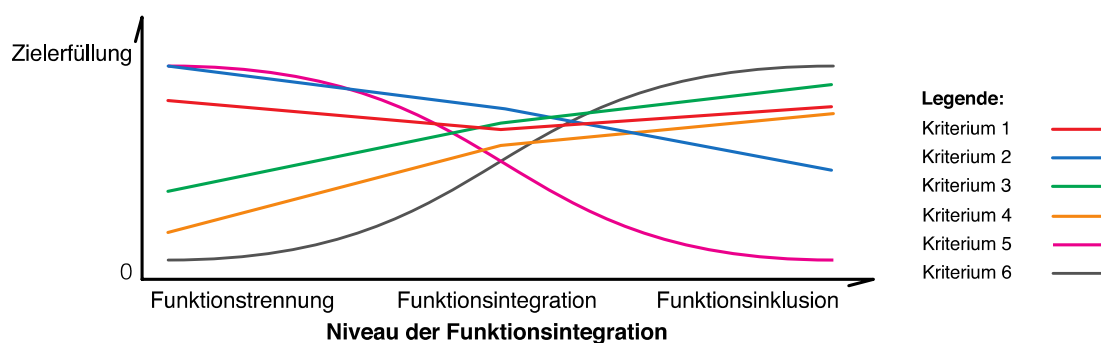


Abbildung 46: Einschätzung der Leistungserfüllung bei der Funktionsintegration

Die Umsetzung in Effekte kann in passiver oder aktiver Weise erfolgen. Um abschätzen zu können, ob eine Veränderlichkeit und Anpassungsfähigkeit notwendig wird, ist ein Vergleich der unterschiedlichen Kriterien bezogen auf die grundlegenden Faktoren von Bedeutung. Ergeben sich gleiche Zielwerte für die jeweiligen Faktoren, können die Kriterien im gleichen Element umgesetzt werden. Gibt es unterschiedliche Zielwerte, ist eine zeitliche oder räumliche Entkopplung oder die Anpassungsfähigkeit notwendig. Abbildung 47 zeigt den Vergleich der sechs Kriterien anhand der Relevanz der jeweils wirkenden grundsätzlichen Faktoren Stoff/Masse, Energie und Information. Als Tendenz lassen sich beispielsweise Kriterium 3 und 4 durch die hauptsächlich relevante Masse im gleichen Element umsetzen.

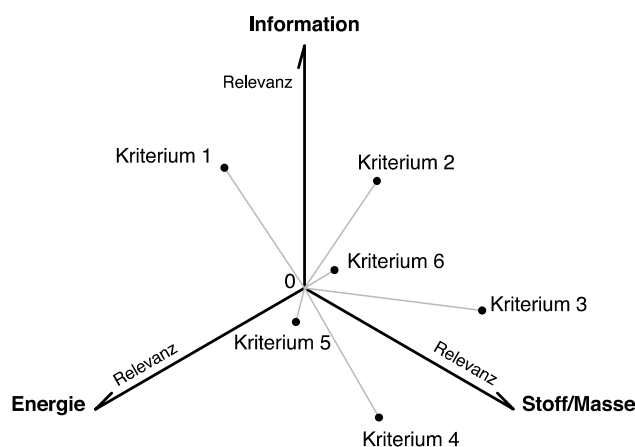


Abbildung 47: Kriterieneinordnung im Faktorendiagramm zur Einschätzung von Integrationspotenzialen

6.5 Fassaden als Teilsystem von Gebäuden

6.5.1 Der Stellenwert der Fassaden und die Entwicklungstendenzen

Die Gesamtheit von außenliegenden Wänden wirken als Teilsystem von Gebäuden an der Schnittstelle zwischen außen und innen. Als Trenn- und Filterschicht müssen sie auf wechselnde Gegensätze einwirken und verschiedenen Anforderungen in qualitativ guter oder hochwertiger Ausführung gerecht werden. Der Schutz vor Umwelteinflüssen, Sicherheitsaspekte, Schall- und Wärmedämmung, Ästhetik wie auch die Beachtung konstruktiver Gegebenheiten und geringe Aufwendungen für die Instandhaltung während der Nutzungsdauer sind essentielle Funktionen, die gleichzeitig zu erfüllen sind [38]. Der Einfluss des Fassadenaufbaus auf steigende Behaglichkeitsansprüche, einer gesundheitsverträglichen Ausführung und qualitativen Ausgestaltung erweitern die genannte Funktionalität.

Darüber hinaus müssen Funktionen, die während der Produktion, des Transports und für die Trennung der Teile am Ende des Lebenszyklus relevant werden, mit betrachtet werden. Fassaden sind für eine Nutzungsdauer von 30 bis 50 Jahren auszulegen und in dieser Zeit vielen wechselnden Beanspruchungen beständig ausgesetzt. Während dessen müssen sie für den Innenraum gleichbleibend komfortable Bedingungen sicherstellen und ihre gestalterische und technische Ausführung qualitativvoll erhalten [38].

Die Gestaltung von Gebäuden in ihrer Nutzung und Entwicklung leitet sich von den klimatischen Bedingungen und den daraus resultierenden Notwendigkeiten ab [38]. Zudem lassen sich aus der Geometrie und den Schnittstellen jeweils außen- beziehungsweise innenraumorientierte Bedingungen beschreiben. Neben den resultierenden räumlichen Zusammenhängen ist das Zusammenwirken mit den Eigenschaften der Fassadestruktur verknüpft. Abbildung 48 führt die Ein- und Auswirkungen beider Fassadenseiten und die resultierenden Attribute der Konstruktion auf.

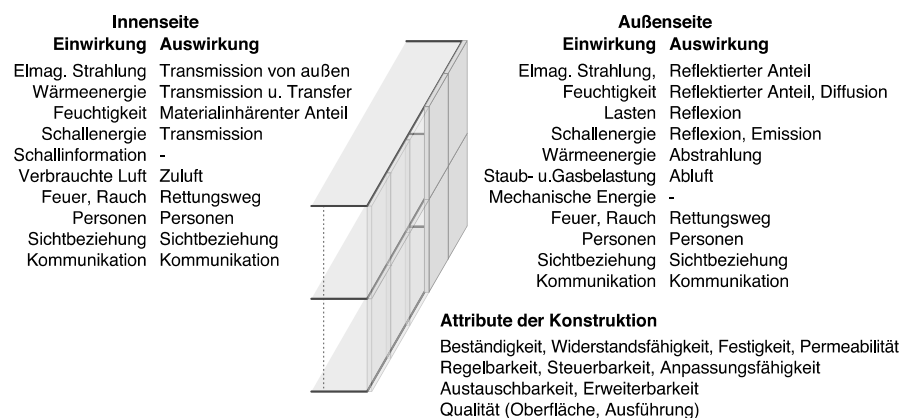


Abbildung 48: Einflüsse bei Fassadensystemen und ihre geometrische Ordnung

Unter den klimatischen Einflüssen sind das örtliche Klima und Wetter, die verfügbaren Ressourcen und die lokalen Gegebenheiten ausschlaggebend [38]. Neben den technischen Einflussgrößen wird die Gestaltung der Fassade hauptsächlich von weichen Faktoren, wie die gesellschaftlichen, lokalen Gegebenheiten, ästhetische Absichten und Vorstellungen geprägt und als maßgebliches Kommunikationsmedium genutzt. Eine Fassade kommuniziert immer die Standpunkte, Werte sowie Absichten der Akteure und ist Teil des gesellschaftlichen Diskurses über Werte und Ziele [38].

Aus diesen vielfältigen Eigenschaften und der Entwicklungsgeschichte von Fassaden ist abzuleiten, dass über die Zeit zunehmend nutzungsspezifische Elemente in der Fassade integriert wurden. Ende des 19. Jahrhunderts, mit Verwendung von Metallwerkstoffen in Tragwerken, wurde eine Trennung von konstruktiven und funktionalen Aspekten vollzogen. Die Desintegration der konstruktiven Aufga-

ben umgeht den wesentlichen Zielkonflikt zwischen Tragwerk und Belichtung [38]. Von der Integration der Heizungskamine in südenglischen Reihenhäusern über die Anordnung von Radiatoren an den Fenstern und expressiven, technisierenden Fassaden wie am Centre Pompidou bis hin zu Lüftungs- und Installationsanlagen in elementierten Fassaden, wurde Funktionsintegration mit unterschiedlichen Intentionen und Zielsetzungen umgesetzt [39]. Diese Entwicklung geht einher mit der Zunahme von spezifisch entwickelten und integrierten Elementen des Maschinen- und Anlagenbaus bis hin zu kompletten Gebäudeentwürfen, die als eigenständiger Maschinen- und Anlagenbau aufgefasst werden können. Für die Systembeschreibung von Fassaden verschieben sich dadurch die Haupt- und Nebenfunktionen zu anlagentechnischen Funktionen.

Abbildung 49 übersetzt die Zusammenhänge zwischen Lastabtrag, Belichtung, Beleuchtung und Zugänglichkeit in ein Zielerfüllungsdiagramm. Das Beschreibungsumfeld wird durch die Flächenelemente und die Schichtung von Lagen begrenzt. Die Betrachtung von Rahmen und Randabschlüssen werden als Schnittstelle zwischen System und Umgebung betrachtet. Als Zielkonflikt lässt sich daraus Folgendes ableiten: je mehr transluzente und transparente Flächen integriert werden, desto nutzbringender ist die Trennung von konstruktiven und bauphysikalischen Funktionen. Wird die Systembetrachtung auf die dahinter liegende Raumnutzung erweitert, wird eine andere Einschätzung über die Leistungsfähigkeit anhand des Niveaus der Funktionsintegration die Folge sein. Die Bewertung ist daher wesentlich von den in einer Systemanalyse identifizierten Kriterien und der Systemabgrenzung abhängig.

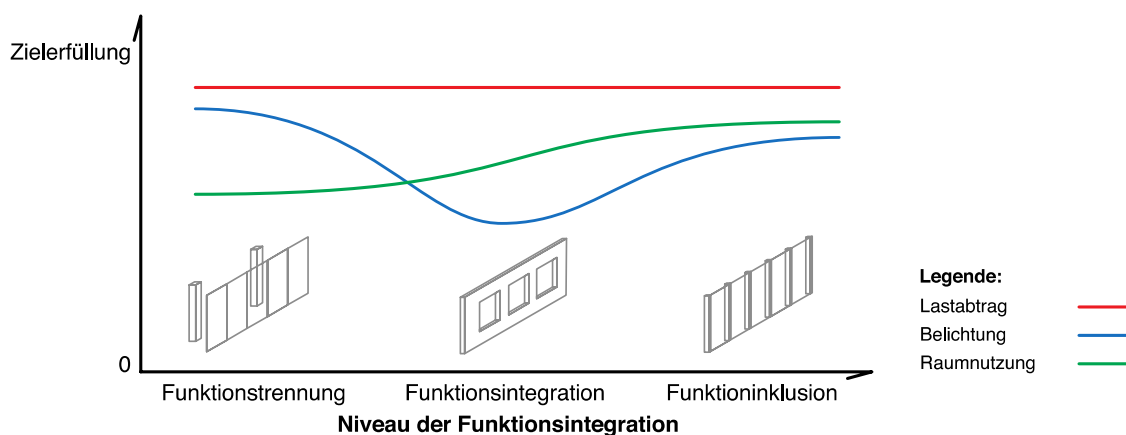


Abbildung 49: Erfüllbarkeit der Funktionen Lastabtrag und Belichtung

Fassadenkonstruktionen, die elementierte Baugruppen einsetzen, sind am weitesten integrationsfähig, wenn bauphysikalische, nutzungsspezifische und ästhetische Kriterien die größte Relevanz zugeordnet und die Fassadenfläche als primäres System behandelt wird. Je mehr die Hauptfunktion des Witterungsschutzes durch Nebenfunktionen der Bauphysik, der Nutzung und der Ästhetik ergänzt wird, desto relevanter sind technische Aspekte aus den Disziplinen des Maschinen- und Anlagenbaus, der Werkstofftechnik, der Herstellungs- und Montagetechnik, der Simulationstechnik und Prognostik bei der Systembetrachtung. Für den Entwurf der Fassade resultiert die notwendige Betrachtung der Komponenten Konstruktion, Herstellung, Lagerung, Aufbau, Wirkzusammenhänge, Regelung und Anpassung [40].

Die Überlagerung von Perspektiven und der Abgleich von Anforderungen ist für eine wirtschaftliche Planung, Umsetzung und Nutzung zu beachten und in die Systembeschreibungen mit einzubeziehen. Passive und aktive Komponenten, Materialien, Bauweisen, Fertigungsmethoden, Halbzeuge sowie Planungs-, Fertigungs- und Montageprozess müssen aufeinander abgestimmt werden. Digitale Planungs- und Herstellungsmethoden helfen dabei. Sie ermöglichen die Informationsverarbeitung und Automatisierung von Abläufen [41, 42].

Nutzerspezifische Planung und Anfertigung werden mit präzisen, vektorbasierten Parametern in einem wirtschaftlichen und dynamischen Prozess gesteuert und erstellt. Das Ziel, individuelle Einzelserien oder -stücke mit reproduzierbaren Strukturen zu erstellen, wird damit erreichbar [40]. Diese automatisierten Prozesse helfen, die individualisierte Gestaltung bei reduziertem Materialeinsatz in zielführende Konstruktionen umzusetzen [38].

Die zugrundeliegenden gestalterischen Problemstellungen, die hierdurch erarbeitet und gelöst werden, sind die Verfügbarkeit der richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt im Prozess, eine einheitliche Informationsgrundlage und die Vereinfachung der Kommunikation zwischen Planungs- und Umsetzungsphasen. Die Weiterentwicklung von Sachgesamtheiten und Prozessen bedingen sich dabei gegenseitig.

Für die vorliegende Abhandlung war es deshalb relevant, sowohl die Anwendung bei der Weiterentwicklung einer exemplarischen Sachgesamtheit als auch das Eingreifen in den konkreten Entwurfs- und Entwicklungsprozess umsetzen zu können. Je weiter allgemeine technische Problemstellungen durch das Abbilden und Lösen mit Algorithmen in zufriedenstellendem Umfang umgesetzt werden können, desto mehr kann die Arbeit auf relevante Problemstellungen konzentriert werden, die durch Diskussion, Bewertung und Entscheidung sowie durch intuitives Denken und Handeln gelöst werden müssen. Die automatisierten Abläufe bei Planung und beim Bau erhöhen den Grad der Integration und Automation im Prozess und führen damit zu höher integrierten Lösungswegen. Integration ist und wird daher bei automatisierten Abläufen sowie bei intuitivem Planungshandeln zunehmend von Bedeutung sein [40].

6.5.2 Anforderungen an Fassadensysteme

Herzog et al. ordnen die Anforderungen an Fassaden aus Sicht der planenden Akteure nach primär, sekundär und tertiär relevant. Übergeordnet werden die unterschiedlichen Anforderungen nach den phänomenologischen Eigenschaften in konstruktiv, bauphysikalisch, nutzungsspezifisch und ästhetisch eingeteilt. Auch eine Einordnung bezogen auf die Effektwirkung nach physikalischen, chemischen und biologischen Wechselwirkungen ist in Bezug auf die Systemkonzeption für resultierende Werkstoffeigenschaften sinnvoll.

Fassaden müssen als Hauptfunktion den Schutz vor Umwelteinflüssen erfüllen. Die wichtigen Aspekte sind der Schutz vor Witterung und damit Regen, Wind, Feuchtigkeit aber auch Sonneneinstrahlung, UV-Strahlung sowie chemische Beständigkeit gegenüber sauren und basischen Lösungen, die auf die Oberflächen einwirken [40]. Die Umwelteinflüsse sind durch die Planung nicht beeinflussbar, da sie durch den ortsspezifischen Kontext und die dortigen Bedingungen definiert sind. Sie unterscheiden sich in der Art und Intensität nach Region und Kontinent sowie nach dem Mikroklima [38]. Die sorgfältige Analyse dieser Umgebungsbedingungen stellt für die Bewertung der Anforderungen die Grundlage dar. Die Merkmale und Eigenschaften werden dabei in Attribute der Systemumgebung transferiert. Aus diesem erarbeiteten Wissen wird die Erfüllbarkeit der sekundären Aspekte und der Nebenfunktionen beeinflusst und für den Planungsprozess abschätzbar.

Die Qualität des Innenraumkomforts, die von den Außenwänden beeinflusst wird, setzt sich aus den vorhandenen Ausprägungen der Umwelteinflüsse sowie aus den bauphysikalischen und nutzungsspezifischen Anforderungen der Fassadenkonstruktion zusammen. Diese bauphysikalischen Anforderungen werden durch den Konstruktionsaufbau beeinflusst und wirken sich in spezifische Charakteristiken des gesamten Gebäudes wie Energie-, Wärme- und Ressourcenverbrauch aus. Die nutzungsspezifischen Anforderungen werden durch die definierte Raumnutzung und durch das Nutzerverhalten beeinflusst. Eine korrekte Strukturierung des Systems hinsichtlich der bauphysikalischen und nutzungsspezifischen Aspekte und eine ausgewogene Gestaltung ist für die Umsetzung von Mitteln in Form von Konstruktionen, für die Funktionsweise dieser Konstruktionen und für die Verhinderung von Schädigungen an den Konstruktionen von Relevanz [40].

Der Innenraumkomfort ist ein wichtiger Teil, der mit dem Begriff Raumqualität beschriebenen Ausprägungen von Räumen. Eine anschauliche Definition von Raumqualität vorausgesetzt, wird von einer guten Raumqualität gesprochen, wenn der Raum die Ansprüche und Funktionen für Gebrauch, Wohlbefinden und Komfort erfüllt. Diese Qualitäten sind wesentlich von den Raumbegrenzungen, der Raumgeometrie und der Einrichtung abhängig. Die Einschätzung der Raumqualität erfolgt daher unter diesen Aspekten und damit verbundenen Kriterien. Fassaden müssen als Raumbegrenzung, die zusätzlich den Umwelteinflüssen unterliegen, erhöhten Anforderungen gerecht werden. Sie sind großen Differenzen und Unterschieden, die zwischen Umwelteinflüssen und Innenraumkomfort entstehen, ausgesetzt. Im Umkehrschluss können aber auch Eigenschaften der Umwelteinflüsse in Maßnahmen für den Innenraumkomfort transferieren und genutzt werden.

Die relevanten Anforderungen und Zielgrößen, werden anhand von Parametern während des Planungsprozesses definiert. Die Lösungsvarianten entstehen durch Vergleich und Bewertung von geeigneten Maßnahmen und Mitteln, die in mögliche Konstruktionen umgesetzt werden können. Diese sind in Bezug auf die Fassaden der Werkstoff, die Werkstoffkombination, die Konstruktionsweise, die Fügung, der Ablauf der Herstellung sowie die Umsetzungsart von Effekten, die zwischen äußeren und inneren Gegebenheiten vermitteln [38].

Die Wahl der zielführendsten Systemkonfiguration und der endgültigen Fassadenkonstruktion hat dabei wesentlichen Einfluss auf langfristige Aspekte der Nutzung, des Energie- und Stoffverbrauchs. [38] Diese Auswirkungen haben im Rückschluss wiederum Einfluss auf den Planungsprozess. Sie beschreiben Aspekte, die in Bezug auf Herstellung, Montage, Transport oder Energie- und Stoffverbrauch sowie Rezyklierbarkeit diskutiert werden [40].

Die klimatischen Bedingungen und die Behaglichkeitsansprüche resultieren aus dem physikalischen Zusammenwirken zwischen Innen, Außen und der Konstruktion. Die Beanspruchungen sind dabei konstruktiv, physikalisch, chemisch und biologischer Ausprägung. Beispiele sind Temperatur-, Feuchtigkeits- und Druckdifferenzen. Chemische oder biologische Beanspruchungen folgen aus Feuchtigkeitsablagerungen, -einschluss oder Kälte und zeigen sich durch Algen- oder Schimmelpilzwachstum. Um diese Beanspruchungen auszuschließen ist eine Erfüllung der bauphysikalischen Anforderungen notwendig.

Maßnahmen wie beispielsweise Dehnungsfugen, flexible Anschlüsse oder Beschichtungen lösen einen Teil dieser Anforderungen. Andere Situationen sind durch die Gestaltung des Teileverbands bereits vor dem Entstehen auszuschließen [38]. Die Gestaltung ist hinsichtlich konstruktiver Anforderungen des Fassadentypus, des Fassadenaufbaus und der Bauweisen, hinsichtlich physikalischer, chemischer und biologischer Anforderungen des thermischen Schutzes, des Feuchte-, Schall-, Brand- und Rauchschutzes sowie der Tageslichtnutzung und dem Sonnen- und Blendschutz zu überprüfen [38] Dabei werden die Eigenschaften der jeweiligen Konstruktionsvarianten mit existierenden Prüfmethoden verifiziert, um sie zu vergleichen und die Funktionalität abschätzen zu können.

Fassaden prägen neben den bisher beschriebenen Eigenschaften wesentlich die Gestalt, den Charakter und den Ausdruck eines Gebäudes. Diese Anforderung kann – je nach dem Verständnis der Akteure im Planungsprozess – über alle vorgenannten Anforderungen als Hauptfunktion und primärer Aspekt gesehen werden. In Einzelfällen sicherlich eine richtige und notwendige Entscheidung. Für den Großteil der baulichen Maßnahmen werden die Akteure die Gestalt des Gebäudes aus einem iterativen, verdichtenden Prozess entwickeln, der optimalerweise die oben genannten Anforderungen mittels charakterstiftenden Maßnahmen und Mittel durch das Gebäude erfüllt [40].

Tabelle 13 führt eine Auswahl von Anforderungen, Kriterien, Maßnahmen, Mitteln, Effekten und Faktoren auf, die eine Strukturierung und Beschreibung von Attributen einer Systembeschreibung ermöglichen.

Tabelle 13: Auswahl von Anforderungen an Fassaden (phänomenologisch geordnet)

Kriterium	Maßnahme/Mittel	Effekt	EF	SF
Schutz vor Umwelteinflüssen				
Standsicherheit		Dimensionierung	S,M	-
	Mechanische Beanspruchung	Dimensionierung	E	S
Schallschutz	Mechanische Beanspruchung	Vorbeugung	E	S,M,I
	Lärm	Konstruktionsweise	E	S,M
Staubschutz	Staubbelastung	Regulierung	S	S,E,I
	Gasbelastung		S	S
	Strahlung und Wellen		E	S,M
Leistungsfähigkeit		Ressourcenverbrauch	S,M	I
rechtliche Bedingungen		Konformität	I	-
Witterungsschutz	Winddichtigkeit	Windwiderstand	E	S,M
	Temperatur		E	M,I
	Strahlung		E	S
	Luftfeuchtigkeit		S	S,I
Ressourcenverbrauch	Ressourcenreduktion	Konstruktionsweise	S,M	S,M,I
	lokale Ressourcennutzung	Art der Umsetzung	S,M,E	S,M,I
	Recyclingfähigkeit	Art der Umsetzung	S,M	S,M,I
Energieverbrauch	Energiereduktion	Konstruktions-/Nutzungsweise	E	E,I
	Regenerative Energienutzung	Art der Umsetzung	E	E,I

Abkürzungen: EF Einflussfaktor; SF Schutzfaktor; S Stoff; M Masse; E Energie; I Information

6.5.3 Die Systematik heutiger Fassadensysteme

Fassaden werden heute nach ihrem Konstruktionsprinzip klassifiziert und in tragende und nichttragende Systeme unterteilt [40]. Die Systematik der nichttragenden Systeme hat sich dabei erst durch die im industriellen Maßstab mögliche Verwendung von Metallwerkstoffen entwickelt. Durch die differenzierte Erfüllung der Funktion des Lastabtrags konnten sekundäre und tertiäre Anforderungen durch die Fassadenfläche umfassender integriert werden. Beide prinzipiellen Konstruktionsprinzipien verwenden zur Funktionserfüllung verschiedene Lagen, Schichten und Schalen. Um den unterschiedlichen Anforderungen zugleich gerecht zu werden, ist die Variation in der Fassadenebene und die Schichtung möglich. Abbildung 50 zeigt diese Prinzipien in schematischen Darstellungen. Weitere Unterschiede der Konstruktionsprinzipien sind insbesondere in der Bauweise vorhanden. Die nichttragenden Systeme zeichnen sich durch einen höheren Grad der Herstellung in Differenzialbauweise aus. Dies führt tendenziell zu höheren Herstellungskosten, erfüllt die Anforderungen hinsichtlich Wartung und Instandhaltung sowie Auseinanderbau, Weiterverwendung und Materialrückgewinnung besser.

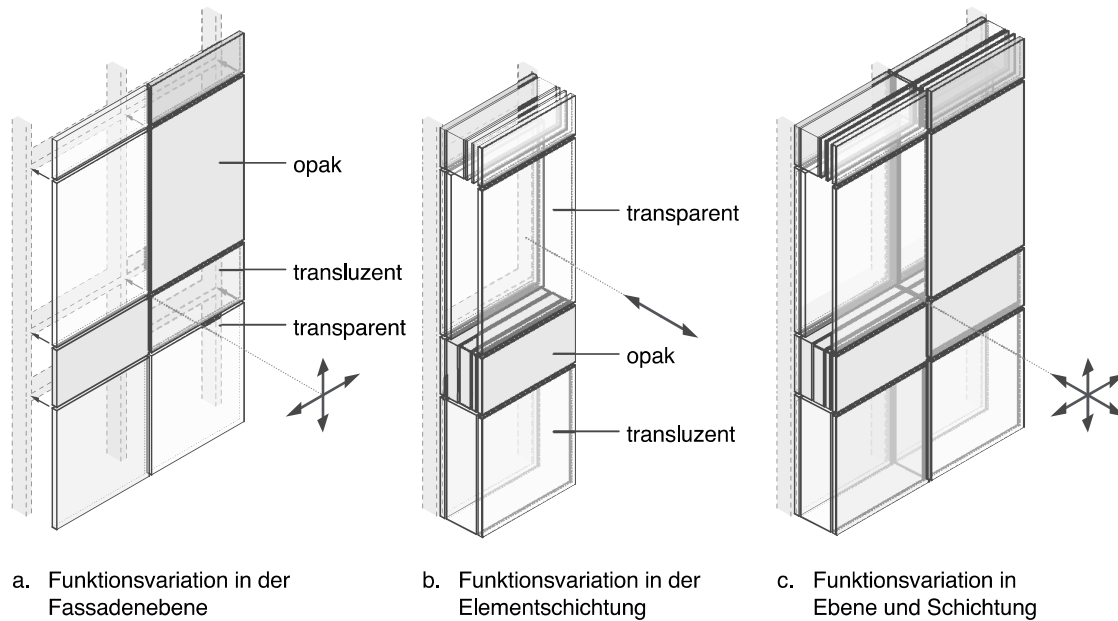


Abbildung 50: Funktionsprinzipien von Fassaden und deren prinzipieller Aufbau [38]

Mit der Umsetzung des Lagenkonzepts können Fassadenflächen und -teile sehr ausdifferenziert weiterentwickelt werden. Unterschiedliche Schichten können hinsichtlich ihrer Relevanz für einzelne Kriterien und hinsichtlich der Umsetzung der relevanten Faktoren verbessert werden. Das Tragverhalten oder die Dämmwirkung können unabhängig von der Oberflächengestaltung und der anwendungsbezogenen Aufteilung optimiert werden [40].

Je nach Systematik sind bei tragenden Prinzipien die Verbundbausysteme und Massivbausysteme mit Vorsatzschale zu unterscheiden. Die nichttragenden Prinzipien lassen sich in Pfosten-Riegel-Fassaden, Elementfassaden und Structural Glazing-Fassaden einordnen.

Je nach Perspektive werden unterschiedliche Zusammenhänge abgegrenzt und bewertet. Ein Verbundbausystem ist beispielsweise durch seine bautechnische Ausführung mit Verklebung der unterschiedlichen Lagen und der Anpassung des Zuschnitts vor Ort aus der Perspektive als Sachsystem eng verknüpft. Eine Elementfassade ist aus dieser Perspektive weniger eng verknüpft, da sich theoretisch die Einzelteile ohne großen Aufwand wieder trennen lassen.

Entgegengesetzte Tendenzen sind beim Perspektivenwechsel zu den Aspekten der Abstimmung im Planungsprozess und bei der Umsetzung festzustellen. Elementfassaden sind hier eng verknüpft, da bei der Planung beispielsweise eine Ordnung festgelegt werden muss, die den Rohbau, die Tragelemente und die Raumaufteilung aufeinander abstimmt [40]. Auch bei der Herstellung ist eine enge Verknüpfung für die Systemstrukturierung abzuleiten, da meist ein Hersteller alle Komponenten zusammenführt. Die vollständig vorbereiteten Fassadenelemente werden im Planungsprozess auf den individuellen Einsatzort ausgelegt, industriell produziert und zusammengesetzt, auf der Baustelle mittels Konsolen montiert, justiert und angeschlossen. Durch diese prinzipielle Trennung von Lastabtrag und Raumbildung können die Module und Komponenten nach unterschiedlichen Lebenszyklen ausgetauscht werden [38]. Bei Verbundsystemen sind weniger enge Abstimmungen hinsichtlich der geometrischen Ordnung notwendig und auch die Montage vor Ort erfolgt durch viele Hersteller sequentiell mit wenigen Schnittstellen. Tabelle 14 zeigt diesen Vergleich der unterschiedlichen Perspektiven und gewichtet die jeweiligen Anforderungen entsprechend.

Als leistungsfähig wird eine Fassade bewertet und beschrieben, wenn sie die Anforderungen und Bedingungen gleichermaßen erfüllen kann. Dabei sind klimabedingte, konstruktive und ästhetische Aspekte gemeint. Insbesondere die klimabedingten Aspekte sind durch individuelle Nutzungsmuster

unterschiedlich bewertet. Eine notwendige Beeinflussung des Raumklimas wird daher oftmals erst im Gebrauch ersichtlich. Der Umfang des Mehraufwands an technischer Gebäudeinstallation kann damit nur durch die richtige Planung und Umsetzung, mit der Kenntnis der physikalischen Grundprinzipien, sowie durch die Vermittlung der Verwendungsweise an die Nutzer erfolgen [38].

Aus den Projektanalysen zu den einzelnen vorgenannten Kategorien lassen sich für Fassaden niedrige Investitionskosten als wichtige Anforderung und eine Tendenz zu den günstigeren tragenden Prinzipien, wie beispielsweise Verbundsysteme, ableiten. Werden hingegen die Betriebs- und Rückbaukosten als wichtige Anforderungen mitbetrachtet, ist für eine umfassende Erfüllung aller Anforderungen die Tendenz zu nichttragenden Prinzipien und im Speziellen zu Elementfassaden sinnvoll. Die Katalogisierung von leistungsfähigen Fassadenlösungen sowie die ausführliche Wichtung von Anforderungen und die Ableitung der Kriterien ist in Abschnitt 6.6 ausgeführt.

Tabelle 14: Exemplarischer Vergleich der Perspektiven hinsichtlich einer Hierarchisierung von Anforderungen bezogen auf Gebäude

Anforderungen	Akteure/Perspektiven					
	Nutzer	Investor	Fachplaner	Hersteller	Behörde	Gesellschaft
Behaglichkeit	1	2	1	-	-	-
Brandschutz	2	2	1	-	-	-
Rechtliche Bedingungen	2	1	3	2	1	-
Ökonomische Bedingungen	3	1	3	2	-	-
Ökologische Bedingungen	3	3	2	2	3	2
Städtebauliche Gestaltung	-	3	1	-	2	1
Witterungsschutz	-	-	1	-	-	-
Schutz v. Umwelteinflüssen	-	-	1	-	-	-
Herstellbarkeit	-	-	2	1	-	-

Abkürzungen: 1 primär; 2 sekundär; 3 tertiär; - nicht bewusst/Transfer zu anderen Akteuren

6.6 Leichte, energieeffiziente und herstellbare Fassaden und deren Funktionspotenzial

6.6.1 Stoff, Masse, Energie und Information als Faktoren für den Vergleich unterschiedlicher Lösungsansätze

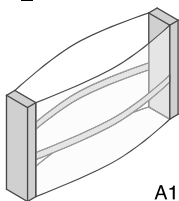
Die Frage nach den leistungsfähigsten Fassadenlösungen kann nicht pauschal beantwortet werden, da unterschiedliche Anforderungen und Bedingungen bei der spezifischen Anwendung zu unterschiedlichen Lösungsvarianten führen. Beim Transfer der Zusammenhänge in einem Systemvergleich ist es daher sinnvoll, die Betrachtung auf das Flächenelement zu beschränken. Struktur, Funktionen und Attribute dieser Aufgabenstellung sind umfangreich und für eine Aussage, ob Funktionsintegration als Indikator im Gestaltungsprozess zielführend eingesetzt werden kann, ausreichend [3, 43]. Die Wahl und die Gestaltung der Unterkonstruktion oder Rahmenkonstruktion ist bei der konkreten Anwendung näher zu untersuchen. Der Vergleich von möglichen Lösungen für Flächenelemente hinsichtlich des Einsatzes von unterschiedlichen Werkstoffen und deren Leistungsfähigkeit zeigt, dass die Systematisierung des Lagenaufbaus sowie die räumliche und zeitliche Differenzierung der Funktionalität wichtige Indizien für die Gestaltung der Fassadenflächen sind. Um eine vergleichbare Bewertung vorbereiten zu können, wurden die Kriterien, Einfluss- und Schutzfaktoren sowie zugehörige Effekte aufgearbeitet.

Der verwendete Stoff, die eingesetzte Masse, die benötigte Energie und die notwendige Information (beispielsweise bezogen auf die Herstellung oder die Steuerung im Betrieb) stellen übergeordnete Vergleichswerte und Gestaltungshinweise dar. Je weniger Masse in einer Sachgesamtheit verbaut werden muss, umso geringer sind die konstruktiven Folgeaufwendungen bei Montage, Demontage und Transport. Zugleich reduziert sich die Dimensionierung der Halterung, Anbringung und Unterkonstruktion. Auf der anderen Seite muss eine leichtere Fassadenlösung die gleichen physikalischen Funktionalitäten gewährleisten, da sonst beispielsweise der Gewinn an Masseinsparungen durch zusätzliche Aufwendungen für die Raumklimatisierung kompensiert werden muss. Ein geringeres Wärmedämmvermögen würde zusätzliche technische Geräte zur Beheizung notwendig machen, die wiederum mit in die vergleichende Betrachtung der Systeme einbezogen werden müssten. Ähnliche Ambivalenzen gibt es bei der Thematik der eingesetzten Energie. Je weniger Energie für den Betrieb zur Klimatisierung aufgewendet werden muss, umso besser wird die jeweilige Variante bewertet. Wird dies jedoch nur durch verwendete Werkstoffe und Konstruktionsweisen möglich, die bei der Herstellung und Rückführung unverhältnismäßig hohen Energieeinsatz erfordern und zu negativen, ökologischen Folgen führen, ist dies ebenfalls in einer gesamtheitlichen Bewertung für die Lösungen nicht zielführend.

Vergleicht man die Funktionalisierung von existierenden Fassadenlösungen und die Aufteilung in der Fläche, so sind transparente, transluzente sowie opake Flächen zu unterscheiden. Anhand dieser drei prinzipiellen Funktionsbereiche können die existierenden Lösungen hinsichtlich der Einflüsse und der umgesetzten Effekte verglichen werden.

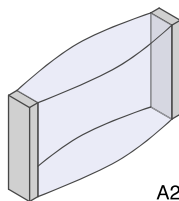
Abbildung 51 zeigt ausgewählte Lösungsvarianten für transparente Fassadenbereiche in schematischen Skizzen, die mit einer Kurzbeschreibung zur jeweiligen Wirkweise ergänzt sind. Tabelle 15 ordnet den ausgewählten, relevanten Einflüssen die Lösungsvarianten anhand der wirkenden Effekte zu.

A_Kunststoffe



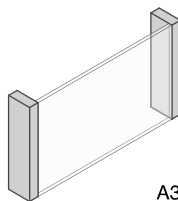
A1

Folienstruktur:
mechanisch gespannt
ein-/mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
ein-/mehrschalig (ph; ch; bi.)
belüftet



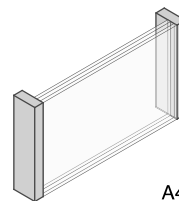
A2

Folienstruktur:
pneumatisch gespannt
(Zwischenraumaktivierung)
mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph.); belüftet



A3

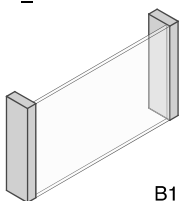
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



A4

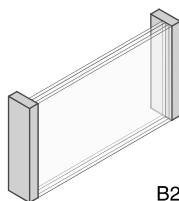
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.)

B_Glaswerkstoffe



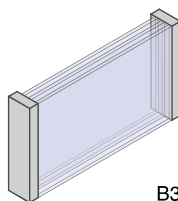
B1

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



B2

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.)
Zwischenraumaktivierung



B3

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
mehrlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.)
Zwischenraumaktivierung

Abbildung 51: Auswahl transparenter Lösungsvarianten

Tabelle 15: Einflüsse, Effekte und Attribute der transparenten Lösungsvarianten

Einfluss	Lösungsvariante	Effekt
Wärme/Feuchte	A1, A3, B1	keine Maßnahme
	A2, B2	Belüftung/Beheizung des Luftzwischenraums
	A4, B3	Entkopplung zweier Schalen/Scheiben/Platten, isolierendes Vakuum, isolierendes Edelgas
Bauakustik	A1, A3, B1	keine Maßnahme, Reflexion vorhandener Masse
	A2, B2	Plattenresonator
	A1, A2, A4, B3	Plattenresonator, Kerndämpfung (tlw. durch Vakuum-, Edelgasfüllung)
Brandschutz	alle	Werkstoffeigenschaft
Belichtung	alle	Werkstoffeigenschaft
Witterung	alle	Werkstoffeigenschaft

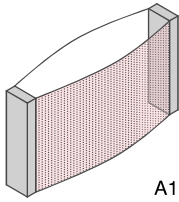
Die dominierende Funktion dieser transparenten Lösungen ist die notwendige Blickbeziehung. Hinzu kommen die bauphysikalischen Anforderungen der Wärmedämmung und der Akustik. Als Faktoren für eine erfolgreiche Funktionserfüllung lassen sich somit Masse, Stoff und Energie eingrenzen. Existierende Lösungen werden mit zwei Werkstoffarten erreicht: die Verwendung von Glas beziehungsweise von Kunststoffen. Die ambitionierten bauphysikalischen Anforderungen können nur durch Anwendung von systemrelevanten Effekten erreicht werden. Durch die Eigenschaften eines Vakuums oder einer Edelgasfüllung zwischen zwei Scheiben wird die Wärmetransmission reduziert. Die damit ausgebildeten Platten wirken als Resonanzsystem zur Reduktion der Schalltransmission. Glas ist der Werkstoff mit dem größten Marktanteil für transparente Funktionsbereiche. Kunststoff wird in Form von Platten, Folien und Geweben dagegen hauptsächlich für die Überdachung oder Abtrennung von großen Flächen mit wenig konstruktiven Mitteln eingesetzt, um bei möglichst großen Spannweiten, mit minimalem Materialeinsatz die maximale Transparenz zu erreichen. Die Erfüllung der Wärmedämmung und der Akustik tritt in diesem Fall in den Hintergrund.

Nimmt man aus dem Anforderungskatalog die Durchsichtigkeit zur Erfüllung der Blickbeziehungen heraus, so bieten transluzente Lösungen mit der Hauptfunktion der Belichtung mittels natürlichem Licht mehr Umsetzungsmöglichkeiten. Weitere Materialien, die insbesondere die bauphysikalischen Anforderungen besser erfüllen, andere Konstruktionsweisen und Systemzusammensetzungen, die durch die reduzierten optischen Anforderungen umgesetzt werden können, bieten Potenziale für leichtere, ressourcensparende und funktionalere Lösungen an. Wichtige Werkstoffe sind hier wiederum Glas und Kunststoffe. Sie werden allerdings durch eine größere Varianz bei der Herstellung beispielsweise als Schüttgut, Schaum, Gewebe oder Vliesstoff einsetzbar.

Abbildung 52 zeigt ausgewählte Lösungsvarianten für transluzente Fassadenbereiche in schematischen Skizzen und ergänzten Kurzbeschreibungen. Tabelle 16 führt wiederum Einflüsse, Lösungsvarianten und wirkende Effekte zusammen.

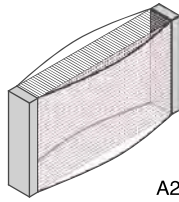
Noch weiter reichen die Möglichkeiten bei blickdichten, geschlossenen Bereichen. Die Beispiele in der Praxis zeigen für diese Funktionsbereiche die größte Vielfalt. Da weder Lichttransmission noch Sichtbeziehung gegeben sein muss, ermöglicht dies die größte Varianz an Werkstoffen und Konstruktionsweisen. Die meisten Beispiele der Praxis sind mehrlagig und mehrschalig ausgeführt. Zur Anwendung kommen bei tragenden und sichtbaren Elementen meist Beton-, Metall-, Holz- und Tonwerkstoffe. Abbildung 53 zeigt ausgewählte Lösungsvarianten für opake Fassadenbereiche in schematischen Skizzen. Entsprechende Kurzbeschreibungen sind ebenfalls ergänzt. Tabelle 17 führt Einflüsse, Lösungsvarianten und wirkende Effekte zusammen.

A_Kunststoffe



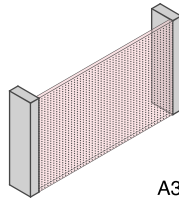
A1

Folien-/Gewebestruktur:
mech./pneum. gespannt
ein-/mehrlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi; be-
druckt, gestrahlt, geätzt)
ein-/mehrschalig (ph; ch; bi.)



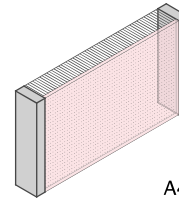
A2

Folien-/Gewebestruktur:
mech./pneum. gespannt
mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi; trans-
luzente Lage)



A3

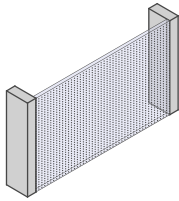
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi; be-
druckt, gestrahlt, geätzt)
einschalig (ph; ch; bi.)



A4

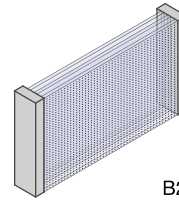
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
mehrlagig (konstr.)
ein- oder mehrschichtig
mehrschalig (ph; ch; bi; trans-
luzente Lage)

B_Glaswerkstoffe



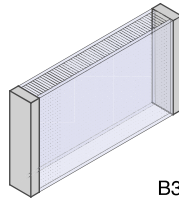
B1

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi; be-
druckt, gestrahlt, geätzt)
einschalig (ph; ch; bi.)



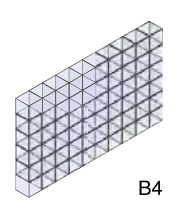
B2

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
mehrlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi; be-
druckt, gestrahlt, geätzt)
mehrschalig (ph; ch; bi.)



B3

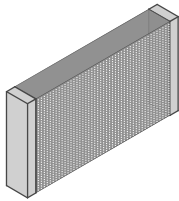
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi; trans-
luzente Lage)



B4

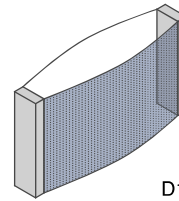
Gefügestruktur:
flächig gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi;
transluzente Lage)
mehrschalig (ph; ch; bi.)

C_Betonwerkstoffe



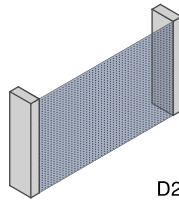
C1

Plattenstruktur:
linear, punktuell, flächig gelagert
ein-/mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi;
perforiert mit Glas-/PES-Fasern)
einschalig (ph; ch; bi.)



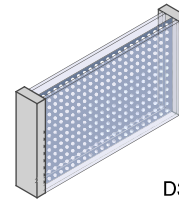
D1

Folien-/Gewebestruktur:
mech. gespannt
ein-/mehrlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi;
perforiert durch Fügung/Lochung)
ein-/mehrschalig (ph; ch; bi.)



D2

Gewebe-/Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi;
perforiert Streckung/Lochung)
einschalig (ph; ch; bi.)



D3

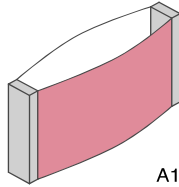
Gewebe/Platte in A2, A4, B3
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi;
perforiert Streckung/Lochung)
einschalig (ph; ch; bi.)

Abbildung 52: Auswahl transluzenter Lösungsvarianten

Tabelle 16: Einflüsse, Effekte und Attribute der transluzenten Lösungsvarianten

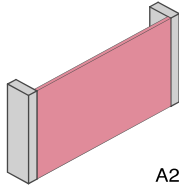
Einfluss	Lösungsvariante	Effekt
Wärme/Feuchte	A1, A3, B1, C, D1 – D3	keine Maßnahme
	A2, B3	Belüftung/Beheizung des Luftzwischenraums
	A4, B2	Entkopplung zweier Schalen/Scheiben/Platten, isolierendes Vakuum, isolierendes Edelgas
	B4	Werkstoffeigenschaft
Bauakustik	A1, A3, B1, B4, C, D1 – D3	keine Maßnahme, Reflexion über verfügbare Masse
	A2, B3	Plattenresonator
	A4, B2	Plattenresonator, Kerndämpfung (tlw. durch Vakuum-, Edelgasfüllung)
Brandschutz	alle	Werkstoffeigenschaft
Belichtung	alle	Werkstoffeigenschaft
Witterung	alle	Werkstoffeigenschaft

A_Kunststoffe, Glaswerkstoffe



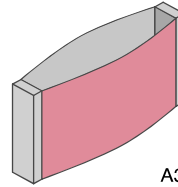
A1

Folien-/Gewebestruktur:
mech./pneum. gespannt
ein-/mehrlagig (konstr.)
mehrschichtig (bedruckt, gefärbt)
ein-/mehrschalig (ph; ch; bi.)



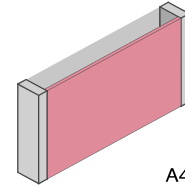
A2

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
ein-/mehrschalig (ph; ch; bi.)



A3

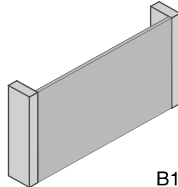
Folien-/Gewebestruktur:
mech./pneum. gespannt
ein-/mehrlagig (konstr.)
mehrschichtig (bedruckt, gefärbt)
mehrschalig (ph; ch; bi.,
Dämmung)



A4

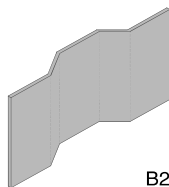
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.
Dämmung)

B_Metallwerkstoffe



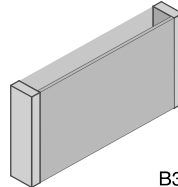
B1

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



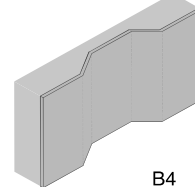
B2

Plattenstruktur (umgeformt):
einlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi.)
ein-/mehrschalig (ph; ch; bi.)



B3

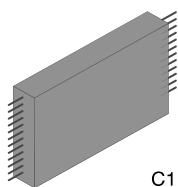
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.
ergänzte Dämmung)



B4

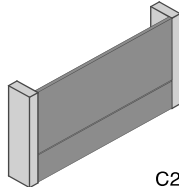
Plattenstruktur (umgeformt):
einlagig (konstr.)
mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.
ergänzte Dämmung)

C_Betonwerkstoffe



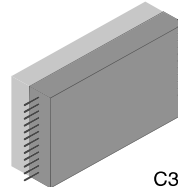
C1

Plattenstruktur:
linear, punktuell, flächig gelagert
ein-/mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



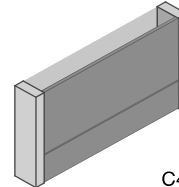
C2

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



C3

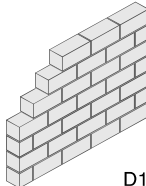
Plattenstruktur:
linear, punktuell, flächig gelagert
ein-/mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.
ergänzte Dämmung)



C4

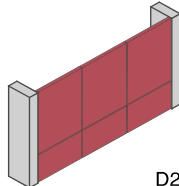
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.
ergänzte Dämmung)

D_Ton-/Keramikwerkstoffe



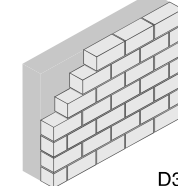
D1

Gefügestruktur:
flächig gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



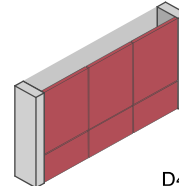
D2

Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



D3

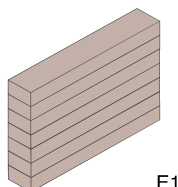
Gefügestruktur:
flächig gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.
ergänzte Dämmung)



D4

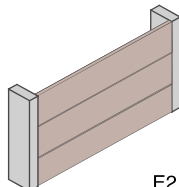
Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.
ergänzte Dämmung)

E_Holzwerkstoffe



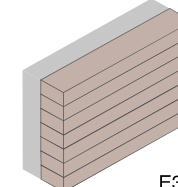
E1

Gefügestruktur:
flächig gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



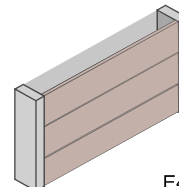
E2

Leisten-/Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
ein-/mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.)



E3

Gefügestruktur:
flächig gelagert
einlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
mehrschalig (ph; ch; bi.
ergänzte Dämmung)



E4

Leisten-/Plattenstruktur:
linear, punktuell gelagert
ein-/mehrlagig (konstr.)
ein-/mehrschichtig (ph; ch; bi.)
einschalig (ph; ch; bi.
ergänzte Dämmung)

Abbildung 53: Auswahl opaker Lösungsvarianten

Tabelle 17: Einflüsse, Effekte und Attribute der opaken Lösungsvarianten

Einfluss	Lösungsvariante	Effekt
Wärme/Feuchte	A1, A3, B1, B2, C1, C3, D1, D3	keine Maßnahme
	A2	Belüftung/Beheizung des Luftzwischenraums
	A4, B2, B4, C2, C4, D2, D4	zusätzliche Dämmung
Bauakustik	A1, A3, B1, B2, C1, C3, D1, D3	keine Maßnahme, Reflexion über verfügbare Masse
	A2	Plattenresonator
	A4, B2, B4, C2, C4, D2, D4	Plattenresonator, Kerndämmung
Brandschutz	alle	Werkstoffeigenschaft
Belichtung	alle	Werkstoffeigenschaft
Witterung	alle	Werkstoffeigenschaft

Um die Funktionsweise für die einzelnen Einflüsse beschreiben zu können, wurden relationsorientierte Funktionsmodelle erstellt. Für alle Lösungsvarianten der drei Funktionsbereiche wurden die zugrundeliegenden Effekte in Morphologischen Kästen den jeweiligen Funktionsstrukturen zugeordnet. Durch Abstraktion und Konkretisierung wurden die Effektesammlungen ergänzt. Effektekombinationen von typischen konventionellen Lösungen wurden farblich hervorgehoben. Die ausführlichen Graphen und Matrizen sind in Abschnitt 6.7 detailliert aufgeführt.

Als weitere Untersuchung wurden die unterschiedlichen Funktionsbereiche und herkömmlichen Lösungen anhand des Primärenergiebedarfs (PEI), des Treibhauspotenzials (GWP) und der typischen flächenbezogenen Masse verglichen. Diese drei Zielwerte ermöglichen die Einschätzung hinsichtlich der ökologischen Bedingungen und Anforderungen. Tabelle 18 zeigt die Zuordnung für die untersuchten, typischen Lagenaufbauten.

Tabelle 18: Werkstoffe, eingesetzte Masse und ökologische Kennwerte von Lagenaufbauten für Fassadenflächenelemente

Lagenaufbau	Masse (m) kg/m ²	Primärenergie- einsatz (PEI) MJ/m ²	Treibhauspo- tenzial (GWP) kg · CO ₂ eq./m ²
PVC/PES Gewebe: Zwei Lagen mit 120 mm Abstand, mechanische Belüftung	1,5 - 4	390 - 450	42 - 54
PVC/PES Gewebe, Polyesterfaservliesstoff (200 mm), PVC/PES Gewebe	4,5 - 13	500 - 580	49 - 64
Trapezblech, Polyester-Extruderschäum-Dämmung (XPS, 200 mm), Trapezblech	25 - 42	1300 - 1450	60 - 70
3-fach Isolierverglasung mit Argonfüllung	18 - 36	900 - 1220	40 - 60
ETFE-Folienkissen: Zwei Lagen ETFE-Folie, mechanische Belüftung	0,2 - 0,7	1500 - 1800	80 - 110
ETFE-Folie, transparente Wärmedämmung (200 mm), ETFE-Folie	3 - 20	2000 - 2200	90 - 120
ETFE-Folie, Aerogel gefülltes Abstandsgewirk (200 mm), ETFE-Folie	12 - 40	2400 - 2800	82 - 115
KS-Mauerwerk (240 mm), WDVS (200 mm) mit Putz und Anstrich	340 - 540	1500 - 1800	110 - 120

Als optimalste, weil effektivste und effizienteste Lösung ist aus den tendenziellen Voruntersuchungen und Vergleichen derjenige Aufbau zu wählen, der mit der geringsten Masse und der geringsten Energie die jeweiligen Zielwerte noch erfüllt. Stehen sich zur Erfüllung der Zielwerte entsprechend gleiche Faktoren entgegen, ist zu prüfen, ob diese durch den Lagen-, Schichten-, Schalenaufbau gelöst wer-

den können. Ist dies nicht möglich, sind die Faktoren in der Fläche zu verteilen, was systemtheoretisch eine Auslagerung in das Umfeld bedeutet.

Als weiteres Entwurfsprinzip kann die zeitliche Varianz eingesetzt werden, indem das System anpassungsfähig ausgeführt wird. Die effektivste und effizienteste Lösung für Flächenelemente einer Fassade und für Leichtbaustrukturen allgemein, stellt folglich die minimal notwendige Masse, mit der minimal möglichen Energie und dem geringsten Informationsaufwand zum entsprechenden Zeitpunkt am notwendigen Ort im Raum zur Verfügung.

Aus den Ergebnissen der Recherche und der Analyse wurden Bedingungen und Anforderungen in nachfolgender Tabelle zusammengeführt und gewichtet. Nachfolgende Wichtung dient der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Lösungsvarianten und der vergleichenden Einordnung über die unterschiedlichen Kriterien hinweg.

Tabelle 19: Anforderungsbereiche, Wichtung und Ableitung der Kriterien

Anforderungsbereich	Gewicht des Anforderungsbereich	Anforderungen 1. Ebene	Wichtung der Anforderung für Fassadenflächen	Gewicht in Bezug auf die Gesamtsumme
Technische Funktionalität	0,61	Witterungsschutz	180	0,06
		Schutz vor Umwelteinflüssen	360	0,11
		Standicherheit	20	0,01
		Zugangskontrolle	0	0,00
		Brand-/Katastrophenschutz	360	0,11
		Behaglichkeit	700	0,22
		Gestaltung/Konstruktion	180	0,06
		Versorgungsinfrastruktur	40	0,01
		Toleranzen	0	0,00
		gesetzliche Regelungen		
		verwaltungstechnische Regelungen	60	0,02
		verbandsspezifische Vorgaben		
		Summe	1900	Anteil 0,61
Ästhetik	0,10	Kunden- und Nutzerakzeptanz	0	0,00
		Gestaltung/Konstruktion	300	0,10
		Toleranzen	0	0,00
		Städtebauliche Einbindung	0	0,00
		Summe	300	Anteil 0,10
Ökologie	0,19	Reduzierung des Ressourcenverbrauchs	240	0,08
		Reduzierung des Energieverbrauchs	120	0,04
		Umweltverträglichkeit	240	0,08
		Summe	600	Anteil 0,19
Wirtschaftlichkeit	0,11	Herstellungsaufwand	10	0,00
		Betriebs-/Nutzungsaufwand	80	0,03
		Wartung	100	0,03
		Herstellung	120	0,04
		Fertigung	10	0,00
		Montage	10	0,00
		gesetzliche Regelungen		
		verwaltungstechnische Regelungen	10	0,00
		verbandsspezifische Vorgaben		
		Summe	340	Anteil 0,11
			Gesamtsumme	3140
Anmerkung: * insb. Akustik ** insbesondere Belichtung und Wärme/Feuchte *** insb. Konstruktive Einbindung				

6.6.2 Effektive und effiziente ganzheitliche Lösungsansätze für eine ultraleichte Fassade

Elementfassaden sind aus den aktuellen Entwicklungstendenzen [2] beim Bau von Büro- und Geschäftsgebäuden ein fortschrittlicher Lösungsansatz, der die komplexen Anforderungen an nachhaltige Gebäude durch anwendungs- und herstellungsbezogene Differenzierung erfüllt [3, 24, 38, 43]. Die Fassaden können mit geringen Anpassungen innerhalb des Produktionsprozesses von Element zu Element in halbautomatisierten Prozessen entwickelt, mit unterschiedlichen Technologien ausgestattet, transportiert und vor Ort in einem Routineverfahren installiert werden [24]. Im Rahmen des Gestaltungsprozesses können einzelne Bauteile der Elementfassade hinsichtlich ihrer Funktionalität und

Anordnung, entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen, erweitert, reduziert oder verändert werden.

Ergänzt werden diese Aspekte im Gestaltungsprozess der adaptiven mehrlagigen Gebäudehüllen mit der Leistungsfähigkeiten hinsichtlich der Faktoren Masse und Energie, die den aktuellen Tendenzen eines ressourcen-, energiesparenden und ökologischen Bauens widerspiegeln. Das am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) entwickelte Konzept einer ultraleichten Elementfassade kann verschiedene Anforderungen, wie beispielsweise eine Tragwerksstruktur, ein Versorgungssystem, die Implementierung einzelner Lagen, Schichten und Schalen, Herstellungsprozesse, Verbindungs- und Anschlusssysteme abdecken. Die Komponenten werden dazu in parallel ablaufenden Gestaltungsprozessen entwickelt und zusammengeführt.

Das Konzept der adaptiven mehrlagigen textilen Gebäudehülle verfolgt eine konsequente Reduktion des Ressourcenverbrauchs, die Austauschbarkeit aller Komponenten innerhalb des Systems und die anwendungsspezifische Anpassung an sich ändernde Bedingungen und Anforderungen. Entsprechend konzeptionelle Prototypen, Simulationen und experimentelle Untersuchungen mit Schwerpunktsetzungen auf die Luftregulierung, den Feuchtigkeitsabtransport und das Wärmegleichgewicht wurden bei Haase et al. entwickelt, charakterisiert und verifiziert [16]. Ähnliche Untersuchungen mit variierenden Zielsetzungen sind bei Knippers et al. aufgeführt [22]. Bei der Aufarbeitung der bauphysikalischen und materialspezifischen Prinzipien wurde eruiert, dass die Elementierung konsequent mit der Verwendung mehrerer leichter und biegeweicher Schichtaufbauten sinnvoll ergänzt werden kann.

Konstruktive Basis stellt ein pultrudierter Profilrahmen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) her. Abbildung 54 zeigt die Geometrie und die Funktionen der Rahmenkonstruktion [2].

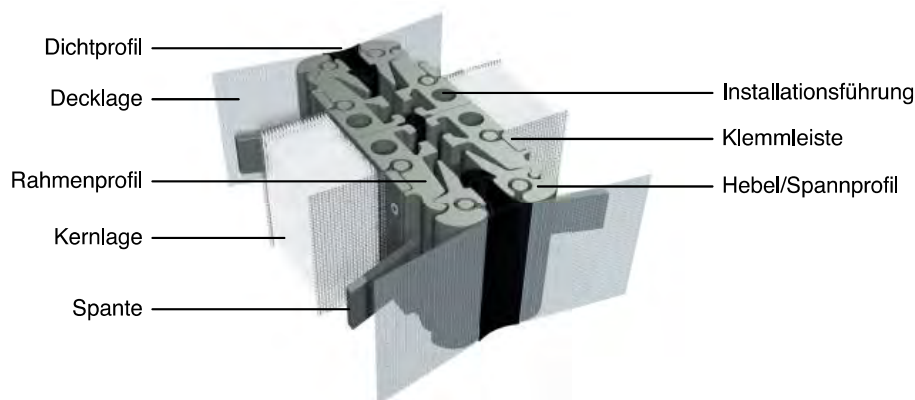


Abbildung 54: Profil der textilen Elementfassade mit Bauteilfügung [2]

Die unterschiedlichen Anforderungen einer Fassade können in vielfältiger Weise durch die Nutzung der individuellen Werkstoffeigenschaften und des Systemaufbaus der Rahmenkonstruktion in Kombination mit der textilen Oberflächenstruktur erfüllt werden. Die Hauptaufgabe des Entwurfs ist, aus Werkstoffen notwendige Bauteile herzustellen, die innerhalb der Konstruktion so positioniert sind, dass eine ausreichende Wirkung eintritt, um die relevanten physikalischen, strukturellen und ästhetischen Anforderungen erfüllen zu können. Die Herausforderung, die mit der Entwicklung textiler Gebäudehüllen ersichtlich wird, ist die Notwendigkeit eines Konfliktlösungsansatz, der zwischen konkurrierenden Anforderungen im Gestaltungsprozess zielsicher vermittelt. Dies führt zwangsläufig zu konträren Zielvorstellungen und Interaktionen zwischen den verschiedenen Bestandteilen des Systems. Das Erreichen einer ausreichenden Balance zwischen Interaktionen und Konfliktlösung ist nur durch einen kontinuierlichen iterativen Gestaltungsprozess möglich.

6.6.3 Die Leistungsfähigkeit von textilen Werkstoffen als Flächenelement

Für die Umsetzung der Flächenelemente des Konzeptes der adaptiven mehrlagigen Gebäudehüllen haben sich textile Werkstoffe als ein leichter und einstellbarer Werkstoff herausgestellt. Die vielfältigen Herstellungs- und Produktionsweisen sind gut geeignet, um vielfältige Effekte durch die Anpassung des Herstellungsprozesses in den Bauteilen anzulegen. Die Prozesse haben dabei das Potenzial in industriell notwendigem Umfang kostengünstig umgesetzt zu werden.

Die Anwendung von biegeweichen Werkstoffen ist im Bauwesen mit Gewebe- und Folienwerkstoffen bereits etabliert. Die Werkstoffe sind in Betracht auf die Schutzfunktion und die abzutragenden Lasten ausgelegt. Hierzu werden hauptsächlich PVC-beschichtetes Polyestergewebe und PTFE-beschichtete Glasfasergewebe verwendet. Für Folien werden hauptsächlich Fluorkunststoffe wie ETFE als Werkstoff eingesetzt. Ausführliche Informationen zu den Werkstoffen, den Werkstoffeigenschaften und der konstruktiven Umsetzung biegeweicher Bauteile sind bei Seidel [44], bei Koch [45], und Knippers [22] gegeben. Die Schutzfunktionen und wesentlichen konstruktiven Anforderungen lassen sich durch diese Gewebe- und Folienwerkstoffe erfüllen. Der Vorteil einer geringen Masse ist jedoch Nachteil bei der Betrachtung der bauphysikalischen Anforderungen und Bedingungen.

Bei Haase et al. [15] wurden die wärme- und feuchtetechnischen Bedingungen bei solchen textilen Aufbauten untersucht. Als Fazit wurde die zielführende Umsetzung durch den Systemaufbau, die Verwendung von Werkstoffen mit hohem Wärmedämmvermögen und die Integration von Techniken zur Anpassung an wechselnde Bedingungen resümiert. Die fehlende Puffer- und Speichereigenschaft, die massige Baustoffe in der Regel bereitstellen, muss bei diesen leichten Konstruktionen durch technische Lösungen ersetzt werden. Bei Mehra et al. [19] sowie bei Schmid et al. [1, 26] wurden die Bedingungen solcher Konstruktionen bezüglich der Bau- und Raumakustik zusammengefasst. Auch hier lässt sich die Tendenz hin zur Verwendung von leistungsfähigen Materialien in Kombination mit einem mehrschichtigen Aufbau und der Ausrüstung mit Techniken zur Bewerkstelligung der Anpassungsfähigkeit zusammenfassen. Schalldämmung kann bei ultraleichten Systemen jedoch nur durch einen mehrlagigen, -schichtigen und -schaligen Aufbau generiert werden, indem Resonanzen genutzt werden, um eine entsprechende Dämmwirkung zu erzielen. Die physikalischen Gegebenheiten der Dimensionen der wirkenden Wellenlängen und Energien bei akustisch wirksamen Systemen macht eine Konditionierung oder Anpassungsfähigkeit nur durch großdimensionale Strukturen oder durch Masse möglich.

6.6.4 Potenzial textiler Produktions- und Herstellungsverfahren

Die Herausforderungen der Anwendung von großflächigen, biegeweichen Konstruktionen im Bauwesen sind immer noch Forschungsbereiche mit Schwerpunkt der Konfektionierung, Montage und Dimensionierung [44]. Für die Funktionalisierung dieser Werkstoffe und für die Verwendung in einer als umfassend funktionierenden Fassadenkonstruktion sind jedoch weitere Themenstellungen relevant.

Die Entwicklung von Produktions- und Fertigungsprozessen für Textilien und einer Vielzahl von etablierten technischen Produkten, haben die Erweiterung der Funktionalität von textilen Werkstoffen und den Ausbau erlaubt. Zugleich ist der Marktanteil und die Relevanz dieser Werkstoffgruppe in den vergangenen drei Jahrzehnten in den Bereichen Automobiltechnologie, Luft- und Raumfahrttechnik, Sport und Freizeit, Schutz und Sicherheit sowie in Medizin, Kommunikations- und Informationstechnologie gestiegen [3, 15].

Industrie und Wissenschaft verfolgen mit ihrer Arbeit an textilen Werkstoffen unterschiedliche Methoden, Ansätze und Ziele [15, 16]. Fasern sind mit den Halbfabrikaten und Endprodukten in unseren langlebigen Gütern und Gebrauchsgegenständen allgegenwärtig. Atmungsaktivität, Nichtbrennbarkeit, Energieabsorption und Speicherkapazität sind nur einige der möglichen Eigenschaften von Textilien. Diese Eigenschaften konnten durch die Entwicklung kombinierter Materialien, Beschichtungen, Einbettungen und durch die technologische Weiterentwicklung von Herstellung, Verbindung und Verarbeitung erweitert werden. Gries und Klopp konnten die Entwicklung von Prozessen bis hin zur Katalogisierung der Möglichkeiten und Anwendungen aus textiltechnologischer Sichtweise zusammenfassen [3, 15].

Die Weiterverarbeitung von Fasern und Filamenten ermöglicht Zwischenprodukte, bei denen sich neben der Materialwahl und der Eigenschaft erste strukturelle und funktionale Unterschiede ergeben. Aus diesen Zwischenprodukten werden schließlich zwei oder dreidimensionale textile Produkte. Die aus der Anwendung im Bauwesen und aus den durchgeführten Forschungsprojekten als relevant identifizierte Produkte sind Gewebe, Gelege, Vliesstoffe und Gewirke. Für das entwickelte passiv wirkende Kernelement ist der Herstellungsprozess des Vernadelns von Gelegen verwendet und angepasst worden. Hieraus ist ein mehrschichtiger PES-Verbundvliesstoff entstanden. Für das aktiv wirkende Kernelement wurden Abstandsgewirke weiterverarbeitet und mit zwei auflaminierten Deckschichten versehen. Damit ist ein Zwischenprodukt als stabilisierendes und dichtes Element zur Lagesicherung des Aerogel-Granulats entstanden. Das funktionsinkludierende Kollektorelement wurde durch die Erweiterung des Herstellungsprozess sogenannter One-Piece-Woven-Gewebe produziert. Abbildung 55 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser mehrlagigen, abgesteppten Gewebe und einen beispielhaften Zuschnitt mit den unterschiedlichen Gewebebereichen. Die One-Piece-Woven-Gewebe werden auf computergesteuerten Jacquards-Webstühlen produziert und beispielsweise als Seitenairbag in der Automobilindustrie verwendet. Die Herausforderung bei der Weiterentwicklung zur Verwendung als fluidgefülltes Kollektorelement war die Abdichtung des Gewebes, die Ausführung der Absteppungen und die Art der Fluidführung.

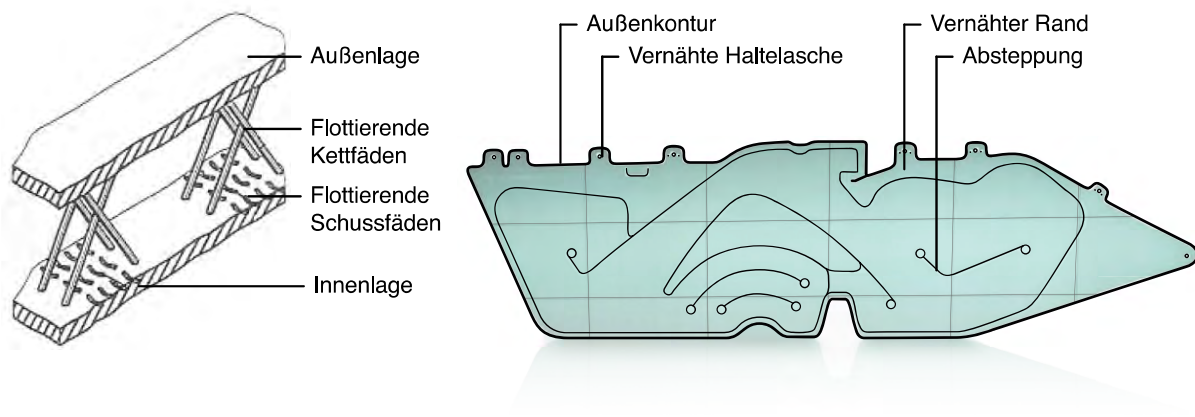


Abbildung 55: Detailsometrie und Schnittmuster eines One-Piece-Woven

6.7 Anwendung von Funktionsintegration bei der Systemkonzeption

6.7.1 Systemanalyse

Bei der Erarbeitung des elementierten Fassadenkonzeptes für nichttragende Fassaden zur Anwendung in Büro- oder Wohngebäuden wurde der Mehrlagen- und Mehrschichtenaufbau gewählt. Dadurch werden die Lösungen den physikalischen und werkstoffspezifischen Einflüssen und Wechselwirkungen für die Erfüllung unterschiedlicher Anforderungen des Wärme- und Feuchteschutzes, der Akustik sowie des Brandschutzes gerecht [3, 15, 16].

Um die größtmögliche Wirkung zu erzielen, werden die Werkstoffe und Bauteile in ihrer Ausprägung für die spezielle Position im Lagenaufbau entwickelt. Durch die Ergänzung zusätzlicher Lagen oder durch die produktionstechnische Anpassung einzelner Lagen bietet sich der Mehrwert, dass masse-, ressourcen- und energieangepasste Lösungen für unterschiedliche Umgebungs- und Nutzungsbedingungen umgesetzt werden können. Aktive Bauelemente ermöglichen es, zusätzlich die Wirkweise des Aufbaus an wechselnde Bedingungen anzupassen. Ein solches Systemkonzept kann die notwendige Leistungsfähigkeit zum geforderten Zeitpunkt erfüllen. Um dies für mehrere Kriterien umsetzen zu können und trotzdem die Anzahl der Komponenten zu reduzieren, ist Funktionsintegration und -inklusion anzuwenden. Nur so führt die gesteigerte Funktionalität nicht zu einem „rebound effect“ durch übermäßig viele Komponenten, die wiederum Masse einbringen und Energie verbrauchen.

Durch die Mehrlagigkeit wird eine Trennung von Funktionen in unterschiedliche Lagen, Schichten und Schalen ermöglicht. Die Wirkweise kann dementsprechend ausdifferenziert werden, um Zielkonflikte oder negative Folgen abzuschwächen oder auszuschließen. Die äußere, zur Abtragung der Wind- und Schneelast ausgelegte Membran wird sinnvollerweise separat von den für die bauphysikalischen Eigenschaften des Gesamtsystems relevanteren Lagen entwickelt und eingebaut. Dies ist auch für eine abgestimmte, wirtschaftliche Instandsetzung von einzelnen Komponenten unterschiedlicher Lebensdauer sinnvoll.

Durch Funktionsintegration können der konstruktive Aufwand, die verbaute Masse und die eingesetzte Energie reduziert werden. Die resultierenden Lösungen erfüllen damit die ökologisch gesetzten Anforderungen besser als hybride Konstruktionsweisen.

Aus den Analysen von vorhandenen Fassadenlösungen, den Bedingungen und Anforderungen an transparente, transluzente und opake Fassaden sind die in Tabelle 20 aufgelisteten, als relevant erarbeiteten Kriterien, ausgewählt. Anhand dieser Kriterien ist die Bewertung von Lösungsvarianten in der darauffolgenden Systemsynthese und -konzeption nachvollziehbar.

Zur Einschätzung der Wirkweise von Wechselwirkungen werden die Maßnahmen, Mittel, Schutz- und Nutzfaktoren gegenübergestellt und bewertet. Tabelle 21 weist die Maßnahmen und Mittel, daraus resultierende Wechselwirkungen sowie die Auswirkung als Zielkonflikt oder Synergie aus. Dabei beeinflussen sich Maßnahmen negativ, die durch gleiche Faktoren mit unterschiedlichen Zielwerten zur gleichen Zeit und am gleichen Ort wirken müssen. Die Maßnahmen und Mittel sind durch ihre Zielrichtung an Effekte gekoppelt, die durch die Werkstoffeigenschaften, die Dimension und die Positionierung umgesetzt werden. Folglich ist die Erfüllung entweder durch einen anderen Faktor oder durch die räumliche und zeitliche Trennung des Mitteleinsatzes und der Maßnahmenanwendung möglich.

Tabelle 20: Relevante Anforderungen zur exemplarischen Abbildung von Funktionsintegration am Beispiel einer Elementfassade

Kriterien	Effekte	Maßnahmen/Mittel	EF	SF	NF
Strahlungsleistung	Dämmen/Dämpfen	Wärmeschutz	E	S M	
Lufttemperaturniveau	Dämmen/Dämpfen	Wärmeschutz	E	S	
rel./abs. Luftfeuchte	vorhandener Feuchtegehalt	Temperaturregulierung, Feuchteschutz	S	E S	
Winddichtigkeit	Dichten	Windeinfluss ausschließen	E	S	
Lärmpegel	Dämmen/Dämpfen	Schallschutz	E	M I	
Wasserdichtigkeit	Umleiten, Dichten	Wasser ausschließen	S	S	
Entflammbarkeit	Ausbreitung verhindern	Feuerschutz	E	E I	
Feuerbeständigkeit	Entstehung verhindern	Feuerschutz	E	E I	
Klangqualität	Regulierung/Steuerung	Raumakustik einstellen	E		S M I
Temperaturverteilung	Regulierung/Steuerung	Temperaturregulierung	E		E
Feuchteverteilung	Regulierung/Steuerung	Temperaturregulierung, Stoffwechsel	S		S E
Lichtmenge	Regulierung/Steuerung	Belichtung	E	S I	S M
Lichtqualität	Regulierung/Steuerung	Belichtung	E		S I
Luftmenge	Regulierung/Steuerung	Stoffwechsel	S		S I
Luftgeschwindigkeit	Regulierung/Steuerung	Stoffwechsel	S	S	S M
GWP	Art der Umsetzung	Ressourcenreduktion	I		M S I
PEI	Art der Umsetzung	Ressourcenreduktion	I		M S I
Abkürzungen:	EF Einflussfaktor; SF Schutzfaktor; NF Nutzfaktor; S Stoff; M Masse; E Energie; I Information; GWP Global Warming Potential; PEI Primary Energy Intensity				

Tabelle 21: Maßnahmen/Mittel, resultierende Wechselwirkungen, Zielkonflikte und Synergien am Beispiel eines Fassadenflächenelements

Maßnahmen/Mittel	Wechselwirkung	Zielkonflikt	Synergie
Wärmeschutz Temperierung	Energie: Regulierung Steuerung		x
Schallschutz R.-/E.-Reduktion	Masse: notwendig reduzieren	x	
Wärmeschutz Schallschutz	Masse: leitet reflektiert	x	
Wärmeschutz Feuchteschutz	Kondensation vermeiden		x
Wärmeschutz Schallabsorption	dämpfender, dämmender Werkstoff		x
Wärmeschutz Belichtung	Konstruktionsaufbau: hoch niedrig	x	
Wärmeschutz Stoffwechsel	Stoff-/Energieaustausch (gekoppelt): niedrig hoch	x	
Schallschutz Feuerschutz	Masse wirkt: reflektierend absorbierend		x
Schallschutz Raumakustik	Masse: hoch niedrig	x	
Schallschutz Temperierung	zeitliche Varianz: Masse Energie		x
Schallschutz Reduktion	zeitliche Varianz: Masse Stoff		x

Beispielsweise kann die Erfüllung der Zielwerte für die relative Luftfeuchte durch das stoffliche Gefüge umgesetzt werden. Hierzu muss sichergestellt sein, dass jeder verwendete Werkstoff in der jeweiligen Position die notwendige Dampfdiffusion ermöglicht. Da ebenfalls der Faktor Energie die Einstellung der relativen Feuchte zulässt, wäre eine nutzbringende Kombination, dies in einer möglicherweise benötigten Flächenheizung abzudecken.

In gleicher Weise lassen sich mit einer Matrix mögliche Zielkonflikte und Synergien anhand der Faktorenbezüge sortieren und potenzielle Kombinationen identifizieren. Die Bewertung, ob Zielkonflikte wirken oder Synergien genutzt werden können, ist dann Teil der Variantenbildung und -prüfung im Syntheseprozess.

Das aus den Zusammenhängen der Fassadenanalyse ableitbare prinzipielle System, das Systemumfeld sowie die Ein- und Auswirkungen sind als Ausgangszustand in einer ersten Systemdarstellung in Abbildung 56 gezeigt. Neben den direkten Einflüssen der Faktoren auf das Flächenelement steht es in Wechselwirkung mit dem Rahmenelement.

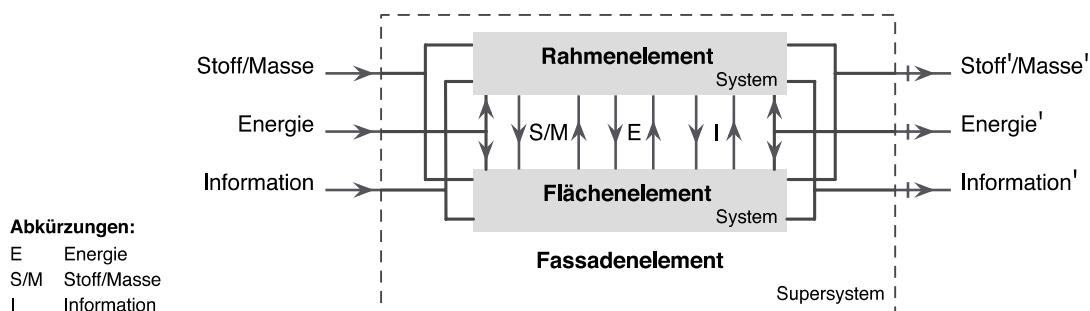


Abbildung 56: Hierarchische Ordnung eines Fassadensystem

Für das Flächenelement wurde aus den typischen Fassadenkonstruktionen ein erstes Funktionsmodell für den genutzten Zustand in Abbildung 57 aufgestellt. Die Trennung in die beiden Deckelemente und das Kernelement bildet als Struktur die mehrlagigen transparenten Lösungsvarianten ab. Zwi-

schen der äußeren und inneren Umgebung sowie zwischen den Elementen bestehen Wechselwirkungen aller Faktoren. Der energetische Einfluss auf die Elemente durch das Rahmenelement bezieht sich bei diesem passiven Konzept lediglich auf die konstruktive Anbindung. Transluzente Lösungsvarianten würden sich in reduzierten Wechselwirkungen des Faktors Information auswirken. Opake Lösungsvarianten beinhalten keinen Austausch des Faktors Information. (vergleiche Abbildung 58)

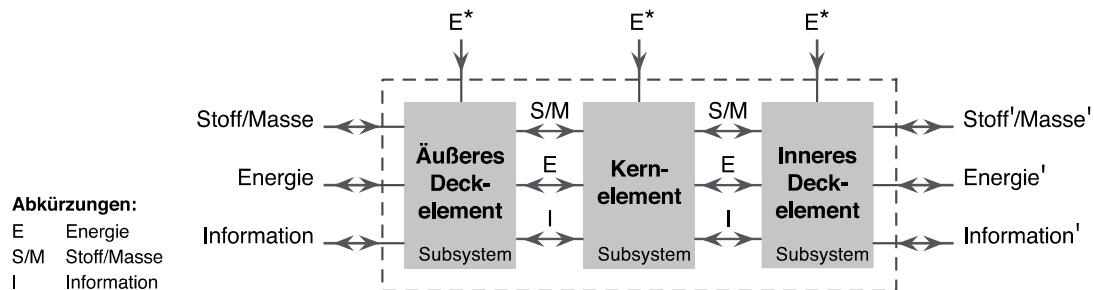


Abbildung 57: Funktionsmodell passiver Wirkzusammenhänge

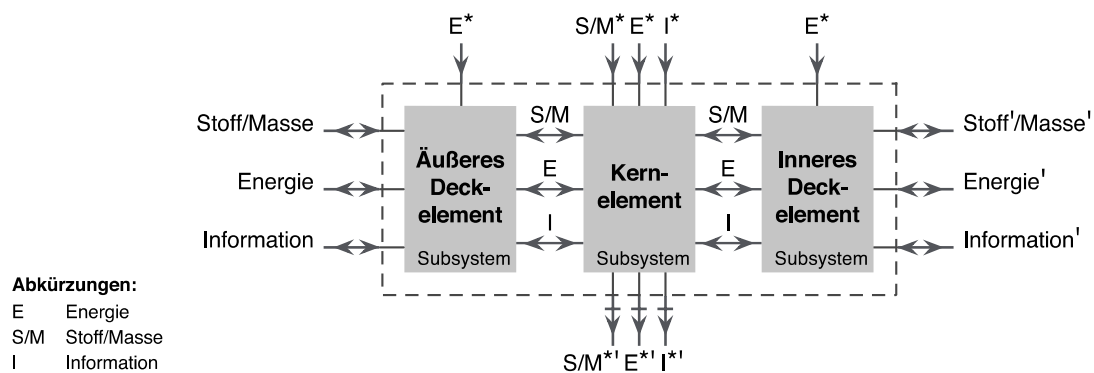


Abbildung 58: Funktionsmodell aktiver Wirkzusammenhänge

Führt man die Ansätze der mehrlagigen, adaptiven Gebäudehüllen in die Systembeschreibung ein, sind aktive, das heißt regelungs- und steuerungstechnisch funktionale Lagen zu integrieren. Um die Sinnhaftigkeit eines aktiven Bauelements und dessen Positionierung abschätzen zu können, werden die Erkenntnisse zu den Anforderungen und Kriterien analysiert und in einer Zuordnungstabelle sortiert. In Abgleich mit den Wechselwirkungen wird in der Synthese überprüfbar, inwieweit die unterschiedlichen Kriterien im entsprechenden Element erfüllt werden können und welche Kombinationen von Kriterien aussichtsreich sind. Tabelle 22 führt die drei Subsysteme auf und ordnet die jeweiligen Kriterien zu. Die Wichtung ist in der Tabelle über den Schriftschnitt ausgedrückt.

Tabelle 22: Anforderungen, Wirkräume und Gewichtung der Kriterien

Anforderungen	Äußeres Deckelement	Kernelement	Inneres Deckelement
Stabilität	Windlast, Anprall	<i>Formstabilität</i>	<i>Anprall</i>
Witterungsschutz	Dichtigkeit	–	<i>Abnutzung</i>
Belichtung	Transluzenz	Transluzenz	Transluzenz
Wärme/Feuchte	<i>Dichtigkeit, Einstrahlung</i>	Wärmedämmung	<i>Abstrahlung</i>
Akustik	<i>Dichtigkeit</i>	Reflexion/Absorption	<i>Absorption</i>
Brandschutz	Entflammbarkeit	Feuerbeständigkeit	<i>Entflammbarkeit</i>
Ressourcenverbrauch	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise
Energieverbrauch	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise
Umweltverträglichkeit	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise
Ästhetik	Öffentliche Wahrnehmung	<i>Konstruktionsweise</i>	Wahrnehmung Nutzer
Behaglichkeit	<i>Energieeintrag</i>	Energienutzung	Temperierung
Herstellung	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise
Betrieb	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise
Wartung	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise	Konstruktionsweise

Anmerkungen: **fett**: relevant; *normal*: wichtig; *kursiv*: merklich

Die Auswertung bestätigt, was mehrere Variantenstudien aus den Forschungsprojekten des ILEK ebenfalls zeigen. Die resultierenden Ergebnisse weisen eine Aktivierung der Kernlage und die Erfüllung des Witterungsschutzes durch ein getrenntes äußeres Deckelement auf. Diese Maßnahmen sind mit den geringsten Zielkonflikten behaftet, da Kriterien des Witterungsschutzes und der mechanischen Beanspruchung an das gesamte Flächenelement von den Decklagen erfüllt werden. Dabei wirkt das Deckelement ohne negativen Einfluss auf die anderen Elemente und dient vornehmlich den konstruktiven Anforderungen, die zu jeder Zeit gewährleistet sein müssen. Die Kernlage erfüllt hingegen die bauphysikalischen Anforderungen. Sie vereint bei ultraleichten Konzepten, dass durch die minimal eingesetzte Masse und die reduziert wirkenden Werkstoffeigenschaften der fehlende Effekt durch Anpassungsfähigkeit kompensiert werden muss.

Diese Funktionstrennung erweist sich ebenfalls hinsichtlich des zu erwarteten Lebenszyklus als sinnvoll. Elemente, die aufgrund von Nutzungsalterung oder konstruktiver Schädigung ausgetauscht werden müssen, sind getrennt von Elementen, die aufgrund von Verschleiß technischer Komponenten getauscht werden.

Die Differenzierung der Struktur der Kernlage wird in der weiteren Analyse aufbereitet, um das Integrationspotenzial für den Syntheseprozess vorzubereiten. Als Grundlage hierfür werden die relevanten bauphysikalischen Kriterien in relationsorientierten Funktionsmodellen abgebildet. Dies ermöglicht die Identifikation notwendiger Funktionen, potenzieller Zielkonflikte und möglicher Synthesemöglichkeiten. Abbildung 59, Abbildung 60 und Abbildung 61 stellen die Funktionsmodelle für die Zusammenhänge bezogen auf das Wärme-/Feuchteverhalten, den Brand- und Schallschutz dar. Daraus werden die blau dargestellten Synthesemöglichkeiten in eine Zuordnungstabelle übertragen.

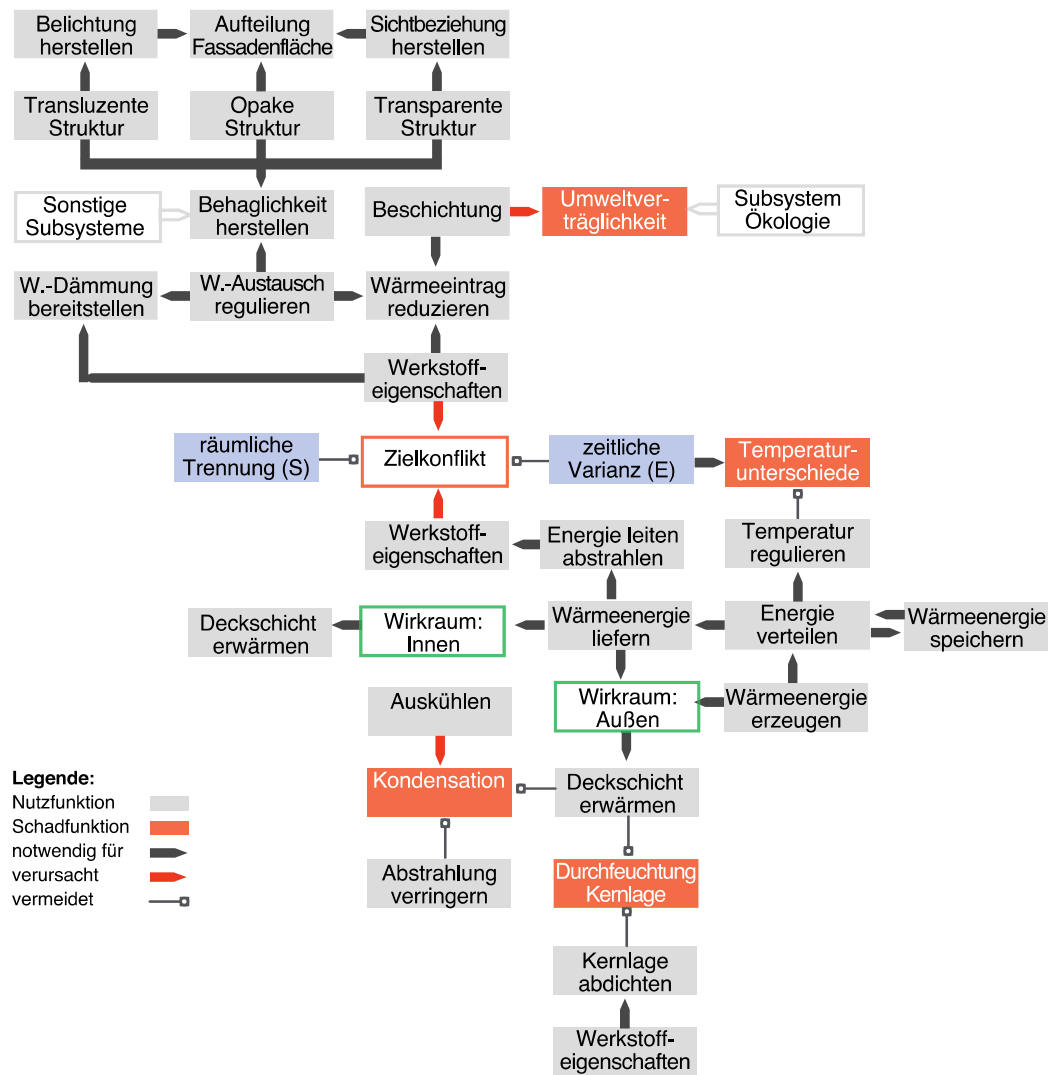


Abbildung 59: Relationsorientiertes Funktionsmodell für Flächenelemente: Wärme-/Feuchteverhalten

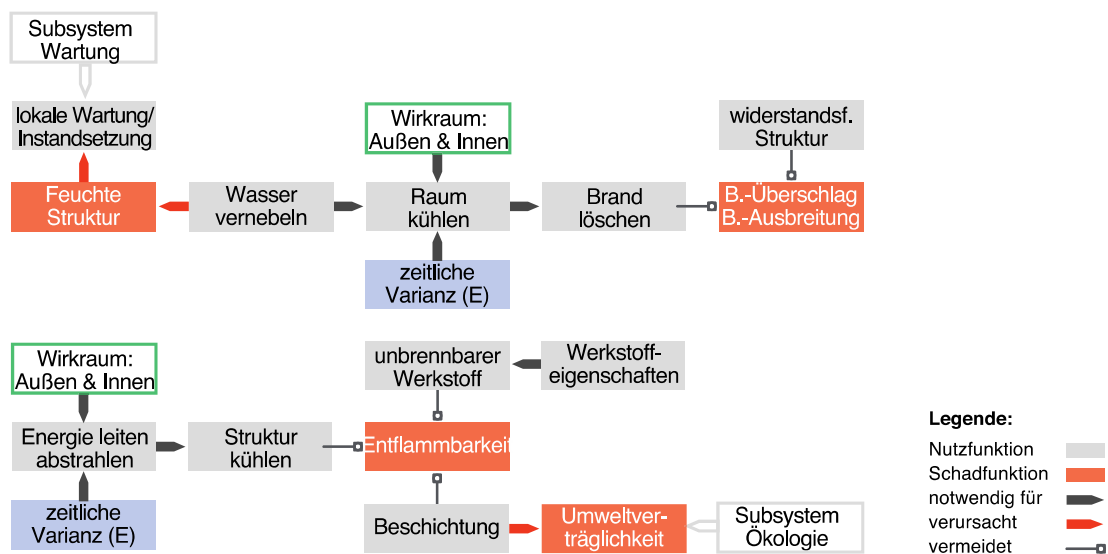


Abbildung 60: Relationsorientiertes Funktionsmodell für Flächenelemente: Brandschutz

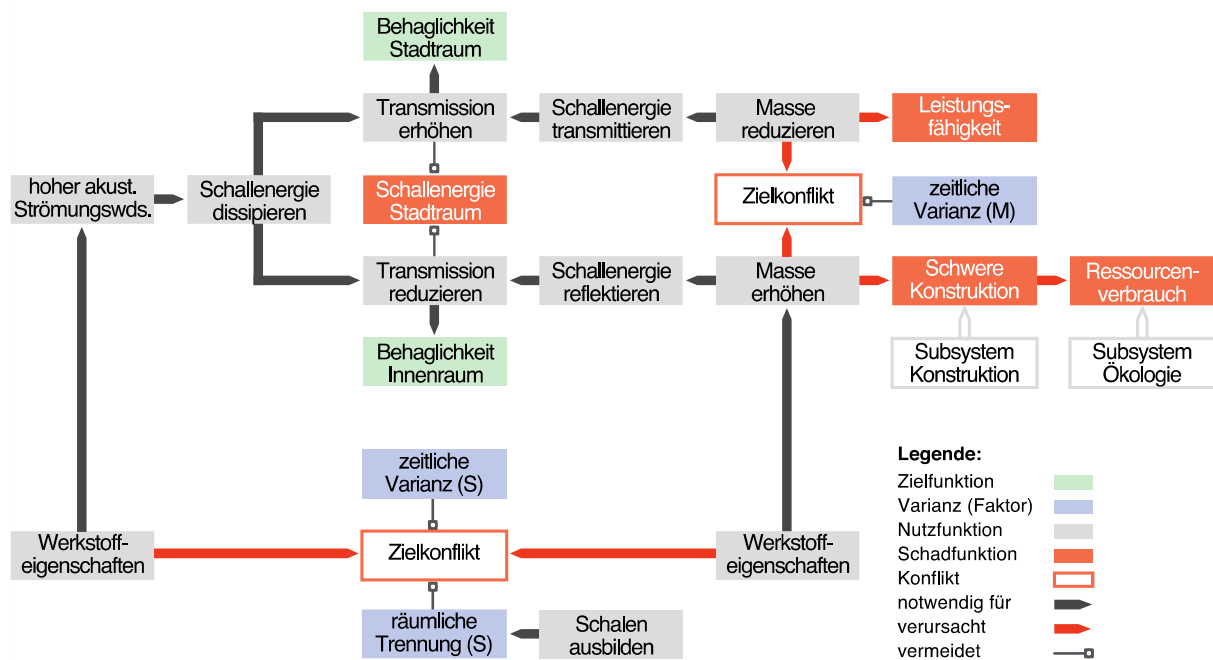


Abbildung 61: Relationsorientiertes Funktionsmodell für Flächenelemente: Schallschutz

Ergänzt wird diese Grundlage für den Gestaltungsprozess durch die Aufarbeitung der Funktionszusammenhänge anhand des Niveaus der Funktionsintegration. Hierzu ist die mögliche Integrationsumsetzung den Kriterien in einer Tabelle zugeordnet (vergleiche Tabelle 23 und Tabelle 24). Um die Zielerfüllung der jeweils kombinierten oder getrennten Umsetzung prognostizieren zu können, dient ein Faktorendiagramm, welches die Potenziale anhand gleichgerichteter Faktorbezüge aufbereitet. Dieses Faktorendiagramm ist in Abbildung 62 dargestellt.

Tabelle 23: Integrationsausprägung möglicher Kriterien- und Effektkombinationen

Kriterium	Wirk- raum	Vari- anz	Zustand	Folgen, Erfordernis	Umsetzung- möglichkei- ten
Wärme/ Feuchte	I, A	E	thermische Einstrahlung Abstrahlung	Speicherung (E) (extern), Steuerung	Feststoff, Fluid, Gas
Akustik	I, A	M	hohe niedrige Masse	Steuerung, Dämpfung	Feststoff, Fluid
	I, A	S	hoher niedriger Strömungswiderstand	Steuerung, Dämpfung	Feststoff, Fluid
Brandschutz	I, A	E	Energieableitung	Steuerung/Regelung	Fluid, Gas
	I, A	S	Löschmittelverteilung	Steuerung/Regelung	Fluid, Gas
Belichtung	I, A	S	hohe niedrige Lichttransmission	Steuerung/Regelung	Fluid Feststoff

Anmerkungen: I Innen; A Außen; E Energie; M Masse; S Stoff

Tabelle 24: Zuordnungsmatrix der Kriterien, Varianzen und Umsetzungsmöglichkeiten

	W/F (E)	A (E)	A (S)	Bs (E)	Bs (S)	B (S)
Wärme/Feuchte (E)						
Akustik (E)	Fluid					
Akustik (S)	-	Feststoff, Fluid				
Brandschutz (E)	Feststoff, Fluid	Feststoff, Fluid	Feststoff, Fluid			
Brandschutz (S)	Fluid, Gas	Fluid	-	Fluid, Gas		
Belichtung (S)	Fluid, Gas	Fluid, Gas	-	Fluid	Fluid	
Abkürzungen:	W/F Wärme/Feuchte; A Akustik; Bs Brandschutz; B Belichtung; (E) Einflussfaktor; (S) Schutzfaktor					

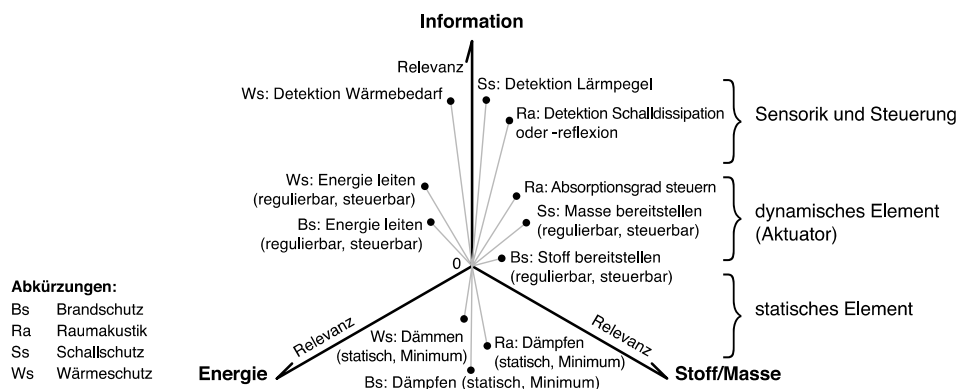


Abbildung 62: Faktorendiagramm mit aufgetragenen Zielwerten einzelner Kriterien

Mit der Prognose zu möglichen Leistungsfähigkeiten wird die Zielerfüllung für die unterschiedlichen Funktionsintegrationsniveaus in einem Diagramm zusammengeführt. Dies bereitet das Spektrum möglicher Lösungen auf Basis der systemtheoretischen Zusammenhänge der Faktoren auf. Die Bewertung und Einschätzung der Zielerfüllung ist dabei eng an die gewählten Umsetzungsmöglichkeiten gebunden. Im Beispiel von Abbildung 63 ist dies das stoffliche Gefüge. Zusammenfallende Tendenzen der Zielerfüllung für die einzelnen Kriterien sollten auf ihre Sinnhaftigkeit der Trennung oder Zusammenführung im Syntheseprozess untersucht werden. Deutlich wird anhand des zugrundeliegenden Faktorendiagramms die Notwendigkeit der Ausdifferenzierung bei der Umsetzung.

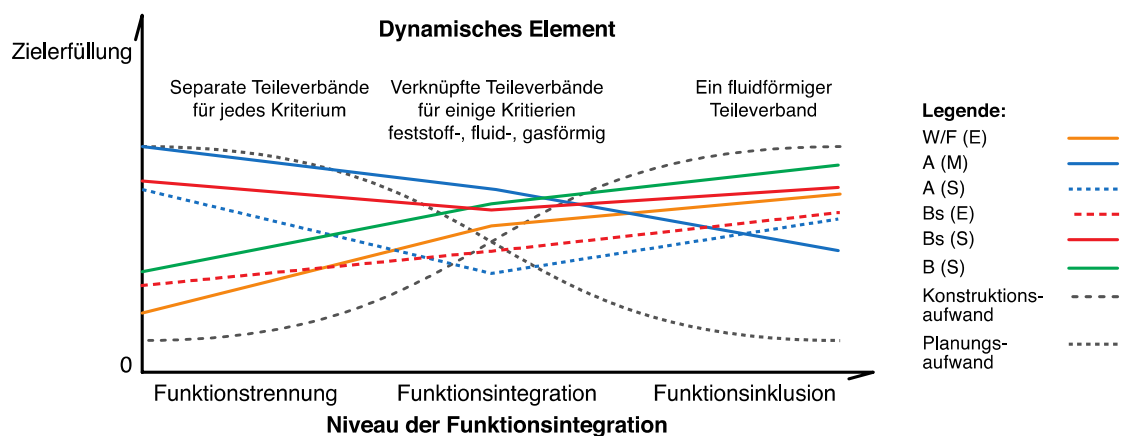


Abbildung 63: Zielerfüllung für relevante bauphysikalische Kriterien

Als Fazit aus den Voruntersuchungen resultieren für die Konkretisierung der Flächenelemente in zielführenden Sachgesamtheiten, dass leichte biegeeweiche und biegesteife Schalen mit unterschiedlichem Abstand und eine wärmedämmende und akustisch dämpfende Kernlage zielführend sind. Zusätzlich ist ein dynamisches Element zu entwickeln, das es ermöglicht, den Faktor Masse, Stoff und Energie zu regulieren. Dies reduziert insgesamt die eingesetzte Masse auf ein notwendiges Minimum. Zudem ist ein statisches Element sinnvoll, welches die minimal notwendigen, definierten Zielwerte erfüllt.

Die damit verbundene Systemstruktur ermöglicht die Lösung der relevanten Faktoren über die Attribute der Kernelemente sowie der innen beziehungsweise außenliegenden Deckelemente. Kriterien, die durch einen oder mehrere Faktoren in gleicher Weise bestimmt werden, sind im konkreten Entwicklungsprozess auf ihre Integrations- oder Inklusionsfähigkeit hin zu prüfen. Sich ausschließende oder gegensätzliche Kriterien werden sinnvollerweise zeitlich getrennt, falls der Faktor Information dies durch zugrundeliegende Szenarien zulässt. Ist dies ebenfalls nicht möglich, muss eine örtliche Trennung der Maßnahmen erfolgen, um eine effektive und effiziente Ziel- und Leistungserfüllung für die jeweilige Anforderung zu ermöglichen.

6.7.2 Systemsynthese

Die beschriebenen Ergebnisse der Systemanalyse bilden die Grundlage für die Entwicklung von Bauelementen und die Umsetzung von prototypischen Lagenaufbauten. Methodisch wurde der Gestaltungsprozess durch folgende Schritte erarbeitet:

- Iterative Systemanalyse mit Bauingenieuren, Bauphysikern und Architekten
- Entwurf prinzipieller Lösungsvarianten als Grundlage für die Erarbeitung
- Befragung und Bewertung von Experten (Bauingenieure, Bauphysiker, Architekten)
- Überarbeitung der Entwürfe
- Interdisziplinärer Workshop mit Bauingenieuren, Bauphysikern, Physikern, Textiltechnikern, Textilgestaltern und Architekten zur Einschätzung und Prognose möglicher Lösungsvarianten; Definition der notwendigen Bauelemente; Expertise zur Anpassung des Produktionsprozesses/Technologietransfers
- Iterative Entwicklung der Bauelemente in Abstimmung zwischen Architekten, Textiltechnikern, Hersteller, Bauphysikern; Herstellung von prototypischen Bauelementen zur Evaluation; Verbesserung und Anpassung
- Herstellung der Bauelemente für die Untersuchung prototypischer Lagenaufbauten

Als Ausgangslage für die Systemsynthese werden die Systeme der drei prinzipiellen Funktionsbereiche präzisiert.

Aus der Systemanalyse und den Expertisen wurde ersichtlich, dass eine transparente Fassadenlösung mit voll umfänglicher, bauphysikalischer Funktionsweise schwer zu erreichen ist. Die existierenden Lösungen auf Basis von Glaswerkstoffen sind sehr leistungsfähig [46, 47].

Der Stand der Technik bei Glaswerkstoffen entspricht bei der verbauten Masse und der Mehrlagigkeit den Zielgrößenbereichen für Konstruktionsweisen ohne Anpassungsfähigkeit in Bezug auf Anforderungen des Wärme- und Feuchteschutzes, der Bauakustik und der Konstruktion. Eine Erweiterung der Funktionalität durch die Integration von beschichteten, fluidgefüllten oder schaltbaren Schichten wird in der Forschung entwickelt, um größeren Leistungsumfang beispielsweise mit der Regulierung des Energieeintrags zu ermöglichen [48]. Die Etablierung dieser Techniken in der Baupraxis ist aufgrund der Kosten noch nicht weitläufig vorhanden. Anbauteile vor der Fassade haben zur Zeit immer noch zwei Vorteile für den Gestaltungsprozess: Sie können prägend für die Fassadengestaltung eingesetzt werden und sind sequenziell im Planungsprozess erarbeitbar.

Die Verwendung von leichten transparenten Folien entwickelt sich entsprechend. Jedoch ist die geringe Masse in Verbindung mit Transparenz für die Erfüllung der bauphysikalischen

Zielwerte ein grundlegendes Problem, welches nicht effektiv genug durch materialinhärente oder anlagentechnische Alternativen kompensiert werden kann. Untersuchungen bei Haase et al. und Knippers et al. geben Ansätze und den Forschungsstand wieder [15, 22].

Eine andere Situation gilt für opake Konstruktionen. Sie stellen die kostengünstigste Variante dar, da wenig Nebenfunktionen erfüllt werden müssen und die existierenden Konstruktionsweisen sehr ausgereift und kostengünstig ausgeführt werden können. Zudem ist eine Funktionsintegration am einfachsten möglich, da die wenigen Schnittstellen zu anderen Komponenten und die geringen Auswirkungen auf andere Elemente und das Erscheinungsbild beachtet werden müssen.

Die transluzenten Lösungen stehen zwischen den beiden vorgenannten Extremen. Dies gilt sowohl in ihrer Ausprägung als auch bei den Anforderungen. Sie sollen Tageslicht nutzbar machen und gleichzeitig bauphysikalische und wirtschaftliche Anforderungen erfüllen.

Für die unterschiedlichen Funktionsbereiche lassen sich Tendenzen notwendiger Attribute hinsichtlich der verwendeten Elemente zusammenfassen. Die Kurzbeschreibung ist in Tabelle 25 aufgelistet.

Tabelle 25: Ausrichtung der Bauelemente für unterschiedliche Funktionsbereiche

Funktionsbereich	transparent	transluzent	opak
Äußere Decklage	witterungsbeständig, transparent	witterungsbeständig, transparent oder transluzent	kostengünstig, witterungsbeständig, opak
Kernelement	Wärmeregulation über aktives Element; Schallschutz kritisch	Wärmedämmung mit geringem Querschnitt; aktives Element zur Erreichung der Zielkennwerte	kostengünstig, passiv wirkend; bedarfsorientierte Integration eines aktiven Kernelementes
Innere Decklage	transparent	transparent oder transluzent	kostengünstig, opak

6.8 Systemkonzeption

Für die drei prinzipiellen Funktionsbereiche können Komponenten abgeleitet werden, die jeweils Funktionen mit gleichen Faktorenbezügen in integrierender Bauweise erfüllen und für mehrere prinzipielle Konzepte anwendbar sind. Umgekehrt wurden übergeordnete Faktoren im Gesamtaufbau und sich ausschließende Faktoren getrennt in den Systemkonzepten der Lagenaufbauten umgesetzt. Diese drei Konzepte standen im Rahmen des interdisziplinären Workshops als erste Skizzen und Diskussionsgrundlage zur Verfügung. Workshopinhalt war die Erörterung der drei Lösungsvorschläge, die Identifikation von Vor- und Nachteilen, die Expertise der beteiligten Disziplinen aus ihrer Perspektive und die Erörterung von Entwicklungsmöglichkeiten zu Komponenten und Elementen sowie die Umsetzung in Bauteile.

6.8.1 Äußeres Deckelement

Die Erfahrungen und Erkenntnisse, die in der Entwicklung von beschichteten Geweben für den Einsatz bezogen auf die Schutzfunktionen in Membranbauwerken vorliegen, sollten für die äußere Deckschicht übernommen werden. Der Einsatz von konfektionierten Gewebelagen für das Fassadenkonzept kann durch die konstruktive Einbindung des Rahmenprofils ermöglicht werden. Das Zusammenwirken hinsichtlich der Wärme- und Feuchteeffekte muss entweder durch das Rahmenprofil oder durch die dahinter liegenden Elemente gelöst werden. Die Entkopplung der Funktionen der Lastabtragung und der Schutzfunktionen von den bauphysikalischen und in großen Teilen nutzungsspezifischen

Funktionen setzt die Tendenz der Trennung von konstruktiven und bauphysikalischen, die für die Entwicklung der nichttragenden Fassaden notwendig war, in untergeordneter Systembetrachtung fort. Insbesondere bei den leichten, biegeweichen Gewebelagen führt die notwendige Vorspannkraft dazu, dass die Fläche sich über die Nutzungszeit entsprechend kriecht und nachgespannt werden muss. Dieses Vorspannungsniveau ist für die anderen Lagen nicht notwendig und würde unnötige Maßnahmen und Mittel zur Aufrechterhaltung der Vorspannung und zur Kompensation der Dehnung zur Folge haben.

Als mögliche Werkstoffe wurden ETFE-Folie mit 200 μm für die transparenten Bereiche, ein PVC-beschichtetes Polyestergewebe mit 250 g/m^2 und einem Transmissionsgrad von 66 % für die transluzenten Bereiche und ein kostengünstigeres PVC-beschichtetes Polyestergewebe mit 250 g/m^2 und einem Transmissionsgrad von 8 % für die opaken Bereiche gewählt.

6.8.2 Inneres Deckelement

Durch die fortgeführte Trennung des Lastabtrags von den nutzungsspezifischen Anforderungen ist insbesondere bei den inneren Deckschichten eine Ausrichtung auf die Nutzung des dahinter liegenden Raumes möglich. Mehrere unbeschichtete Gewebelagen sind beispielsweise für die Erhöhung der akustischen Absorption des Raumes möglich. Der Einsatz von beschichteten oder mit Metalldrähten verstärkten Gewebelagen ist für Fassaden in exponierter Lage und bei Gebäuden mit öffentlicher Nutzung möglich.

Eine anwendungsbezogene Szenarienbildung erfolgt in dieser Abhandlung nicht, weshalb für die transparenten Lösungsvarianten eine ETFE-Folie entsprechend der äußeren Deckschicht und ein unbeschichtetes, mikroperforiertes Polyestergewebe mit 150 g/m^2 für die transluzenten und opaken Bereiche gewählt wurde.

6.8.3 Kernelement

Die Komponentenentwicklung für ein Kernelement wurde mit zwei unterschiedlichen Intentionen durchgeführt. Zum einen ist ein kostengünstiges Element notwendig, um die bisherigen, opaken Konfigurationen durch minimales Eingreifen zu erweitern. Zum anderen ist ein qualitativ hochwertiges Element notwendig, um die höheren Anforderungen an Lichttransmission und Wärmeschutz für transluzente Fassadenlösungen zu ermöglichen.

Das kostengünstige Kernelement ist durch die Verwendung von industriell weit verbreiteten Produktionsverfahren herzustellen. Hierzu wurde ein doppellagiger, vernadelter Verbundwerkstoff beim interdisziplinären Workshop entworfen und beschrieben. Der Aufbau dieses zweischichtigen Verbundwerkstoffs ist in Abbildung 64 gezeigt. Der Verbundvliesstoff setzt in einem Bauteile eine dicht vernadelte, beschwerte Deckschicht und einen offen vernadelten Bereich mit hohem akustischem Strömungswiderstand um.

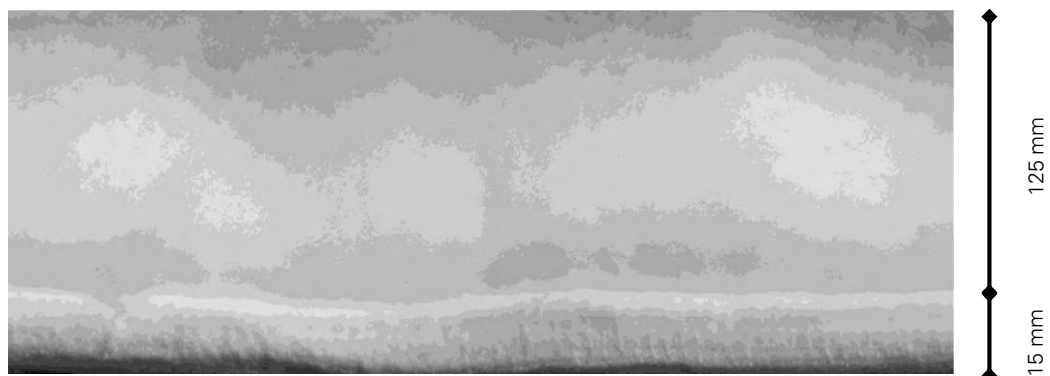


Abbildung 64: Entwickeltes Verbundvliesstoff-Element: Schnittansicht des mehrschichtigen Polyester-Nadelvliesstoffs

Für die Anwendung in einem Fassadenelement werden zwei Verbundvliesstoffelemente in gespiegelter Anordnung eingebaut. Die offen vernadelten Bereiche sind zueinander gerichtet und setzen die notwendige thermische Wärmedämmschicht als Faservliesstoff um. Dadurch werden die beiden beschwerten Deckschichten mit maximalem Abstand zueinander in das Fassadenelement eingebaut. Die dicht vernadelten Deckschichten ermöglichen einen Querschnittaufbau, der als schalldämmender, resonatorbildender Schalenaufbau aus biegeweichen Platten wirkt [1]. Der offen vernadelte Kernbereich wirkt zusätzlich als akustische Dämpfung, reduziert die dynamische Steifigkeit und verhindert Interferenzen zwischen den beiden beschwerten Decklagen.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit [49] an der Hochschule Albstadt-Sigmaringen in Kooperation mit der Groz-Beckert KG und dem ILEK wurde dieses Bauelement von der Konzeptionsphase über verschiedene Prototypen zu einem Vorprodukt weiterentwickelt. Das resultierende Bauelement wird aus schwer entflammbarem Polyester hergestellt. Im Prototypaufbau konnte dieser Bereich mit einer erhöhten flächenbezogenen Masse von $1,5 - 2,0 \text{ kg/m}^2$ ausgeführt werden.

Zur Umsetzung eines transluzenten Flächenelementes ist ein möglichst hochdämmendes, dünnes und transparentes Kernelement notwendig. Diese Anforderungen hinsichtlich der Belichtung und der Wärmedämmung sind durch Aerogel zu erreichen [15, 22]. Um in einem Fassadenelement die maximal mögliche Wärmedämmung bei minimalsten Schichtdicken zu erreichen, ist ein möglichst hoher Anteil des Aerogels notwendig. Trotzdem muss ein Mindestmaß an Steifigkeit gewährleistet sein, um die Schicht gleichmäßig im Fassadenelement ausbilden zu können. Hierzu wurde Silikat-Aerogel-Granulat der Cabot AG gewählt, welches in einem stabilisierenden Abstandsgewirk gehalten wird. Das 50 mm starke Dämmelement ist umlaufend mit Folien kaschiert. Der Aufbau dieses transluzenten Kernelements ist in Abbildung 65 dargestellt. Das so ausgebildete plattenförmige Bauelement muss lediglich durch die Rahmenkonstruktion in Position gehalten werden.



Abbildung 65: Entwickeltes Aerogel-Element: Schnittansicht des folienkaschierten, aerogelbefüllten Abstandsgewirks

Aerogele verfügen neben der reduzierten Wärmeleitfähigkeit ebenfalls über einen hohen akustischen Strömungswiderstand. Deshalb ist das Element in gleicher Weise wie der offen vernadelte Vliesstoff als Dämpfung zwischen zwei beschwerten, schwingenden Lagen einsetzbar. Zur Ausbildung dieser beschwerten Lagen wurde ein aktives, anpassungsfähiges Kollektorelement entwickelt, welches, beidseitig zum Kernelement angebracht, die Anpassung der akustischen, wärme-, feuchte- und brandschutztechnischen Wirkweise des Flächenelementes umsetzt.

6.8.4 Kollektorelement

Die Ausdifferenzierung der Masse- beziehungsweise Stoffverteilung des Verbundvliesstoffes wird ermöglicht, indem konträre Funktionen durch örtlich unterschiedliche Stoffgefüge ausgebildet werden. Eine zweite Möglichkeit besteht in der Nutzung der zeitlich unterschiedlich relevanten Funktionsweise. Je nach Einsatzszenario ist die Nutzung der Wärmedämmfunktion zeitlich zwischen Tag und Nacht sowie über Jahreszeiten unterschiedlich. Die Anforderungen für den Schallschutz sind hingegen über viel kürzere Einflussdauern von mehreren Sekunden bis zu Stunden prägend. Um den

technologischen Aufwand für die Sensorik, Aktuatorik und Steuerung in Grenzen zu halten, ist ein Bauelement, welches sowohl den Faktor Energie in Bezug auf den Wärme-/Feuchteschutz als auch den Faktor Masse in Bezug auf den Schallschutz zeitabhängig regulieren kann, zielführend und sinnvoll. Unterschiedliche Einfluss szenarien können so ereignis gesteuert erfüllt werden. Um diese Funktionalität umsetzen zu können, wurde eine Komponente entworfen und in Zusammenarbeit mit der Global Safety Textiles GmbH iterativ als Kollektorelement umgesetzt. Hergestellt werden konnte das entsprechende Bauteil durch die Weiterentwicklung des Produktionsprozesses von sogenannten One-Piece-Woven-Geweben. Abbildung 66 zeigt die prototypische Umsetzung im Querschnitt. Es besteht aus einem abgesteppten, abgedichteten Taschengewebe, welches mit Fluiden gefüllt oder durchflossen werden kann. Eine Zu- und Ableitungsinfrastruktur ist in den Rahmenprofilen für die textilen Fassadenelemente bereits integriert [2].



Abbildung 66: Entwickeltes Kollektor-Element: Schnittansicht des fluidgefüllten Taschengewebes

Das Kollektorelement eignet sich, die notwendige akustische und thermische Anpassungsfähigkeit für das Fassadenkonzept der mehrlagigen Gebäudehülle durch ein sehr leichtes textiles Bauteil zu erfüllen, indem es je nach Anforderung die Kriterien Temperierung, Wärmeverteilung oder Massevariabilität einstellt. Das zweilagige, vernähte Taschengewebe wird als ergänzende Maßnahme im opaken Element vor den Verbundvliesstoff oder als separates Element in transluzenten Lagenaufbauten eingebaut. In jedem Fall kann die notwendige Plattenwirkung an beiden Deckseiten des Fassadenaufbaus verbessert werden. Darüber hinaus werden die reflektierenden und absorbierenden Eigenschaften mit einem dämpfenden Kernelement und durch die Variation der flächenbezogenen Masse eingestellt. Die Änderung des Flüssigkeitsvolumens und der resultierende Druck beeinflusst dabei auch das Schwingungsverhalten der Schicht. Je nach Anordnung in der Fassade können akustische Eigenschaften des Stadtraums oder des Innenraums beeinflusst werden [1, 26].

Synergetisch lassen sich durch die Verwendung von Wasser als Fluid weitere Funktionen integrieren. Als Kühlelement verhindert es die Entzündung und die Brandausbreitung im detektierten Eintrittsfall. Durch die erhöhte Zirkulation des Fluids wird Energie abgeführt. Entsprechende Pufferspeicher und Abstrahlflächen sind als sekundäre Einrichtungen notwendig, um die Energieüberschüsse abführen und speichern zu können. Ist der Brandeinfluss zu groß und wird die Decklage des Aufbaus zerstört sowie eine Druckerhöhung im dahinter montierten Kollektorelement ermöglicht, führt die gezielte Perforation der Gewebestruktur zum Austreten des Fluids in dünnen Strahlen.

Eine weitere Funktionskombination kann bei den Anforderungen der Belichtung umgesetzt werden. Durch die Füllmenge und die suspendierten Partikel reguliert das Kollektorelement die Transluzenz und die Belichtungsstärke.

6.9 Systementwicklung und Umsetzung in Sachgesamtheiten

Die oben entwickelten funktionsintegrierenden Komponenten können in der jeweiligen Position und Schicht in das System eingebracht werden, in der sie die größtmögliche Wirkung erzielen. Darüber hinaus sind durch Addition der funktionalen Lagen entsprechende Mehrwerte der Funktions- und Wirkweise erreichbar.

Für den transluzenten Funktionsbereich ist Abbildung 67 als Systembeschreibung gültig. Das Kernelement wird durch ein Dämm- und Dämpfungselement umgesetzt. Abbildung 68 zeigt die Prinzipskizze und die prototypische Umsetzung des entsprechenden Flächenelements.

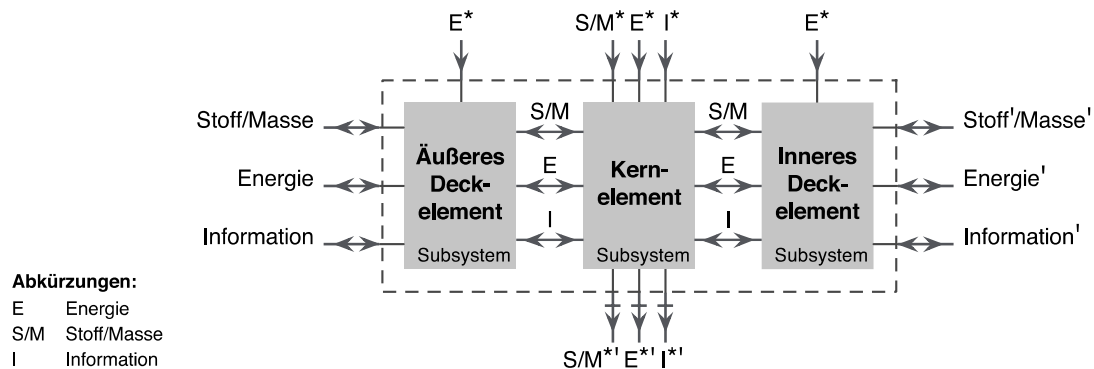


Abbildung 67: Systembeschreibung zu transparenten Lösungskonzepten

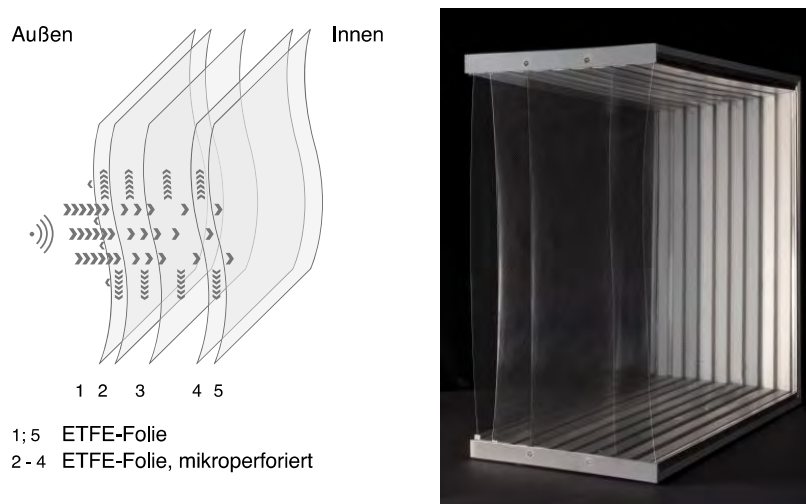


Abbildung 68: Prinzipskizze und Modellaufbau zur transparenten Lösungsvariante

Für den transluzenten und opaken Funktionsbereich ist das Kernelement aufgrund der Kriterienbewertung bei der Systemanalyse und der darauffolgenden Expertise und Einschätzungen ausdifferenzierter gestaltet worden. In Abbildung 69 ist die Systemstruktur für transluzente und opake Bereiche gezeigt. Für die opaken Elemente reduziert sich die Wechselwirkung des Faktors Information zwischen den Elementen auf ein Minimum.

Abbildung 70 zeigt für den transluzenten Funktionsbereich die Prinzipskizze und die prototypische Umsetzung. Abbildung 71 vervollständigt die Ausführungen mit den entsprechenden Darstellungen für den opaken Funktionsbereich. Alle drei prototypischen Umsetzungen wurden zur Prüfung der Ex-

pertise aus dem Syntheseprozess mittels unterschiedlicher Methodiken hinsichtlich der relevanten Kriterien näher untersucht.

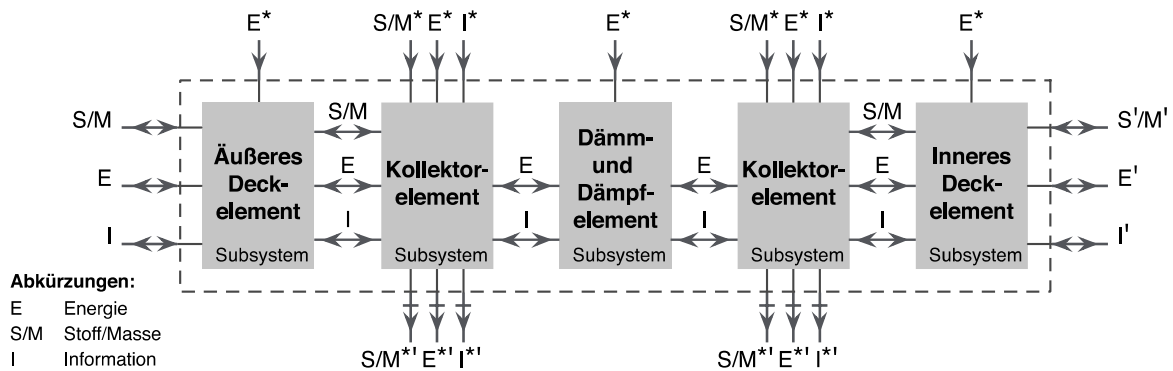


Abbildung 69: Systembeschreibung zu transluzenten und opaken Lösungskonzepten

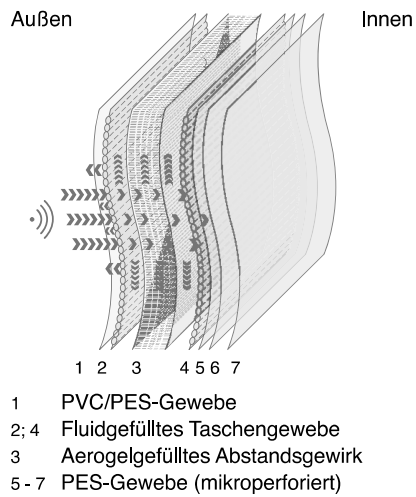


Abbildung 70: Prinzipskizze und Modellaufbau zur transluzenten Lösungsvariante

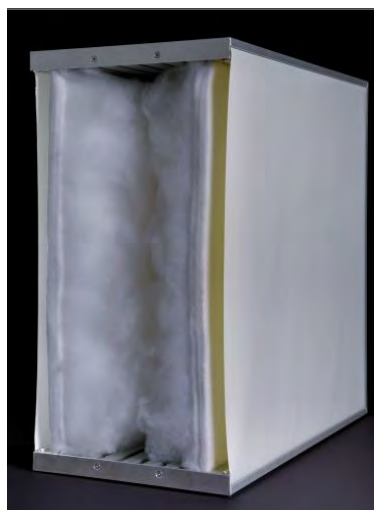
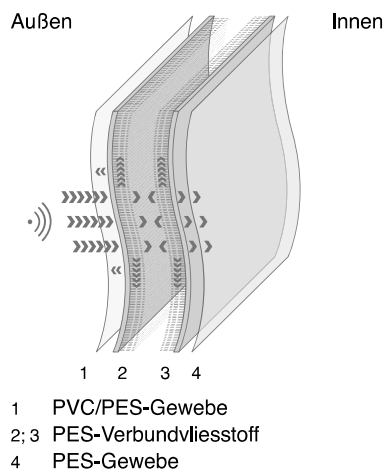


Abbildung 71: Prinzipskizze und Modellaufbau zur opaken Lösungsvariante

7 Prüfung und Validierung der Konzepte anhand der wichtigsten Anforderungen

7.1 Leistungsüberprüfung „Wärme und Feuchte“

Eine Wärmedämmung und ein kontrollierter Feuchtetransport sind zwei der wichtigsten thermohumiden Anforderungen an moderne Fassadensysteme im Hinblick auf wechselnde Witterungsbedingungen [15].

Die Reduktion des Wärmeverlustes von Räumen und Gebäuden ist ein primärer Aspekt für die thermische Dämmwirkung textiler Fassadensysteme in der Kaltperiode. Während der Warmperiode hingegen wird diese Wärmeerhaltung weniger relevant. Zu diesen Zeiten ist die Einstellung hinsichtlich des optimalen Verhältnisses zwischen der Vermeidung von Kühllasten, der Reduktion von einfallender Sonnenstrahlung sowie einer ausreichenden Tageslichtzufuhr wichtig [15]. Die reduzierte Masse textiler Gebäudehüllen führt zu Herausforderungen in Bezug auf die richtige Konditionierung und Einstellung der Wohlfühl- und Aufenthaltsparameter.

Bei herkömmlichen Wand- und Dachkonstruktionen erfolgt eine Wärmeübertragung hauptsächlich durch Wärmeleitung und thermische Konvektionen. Zusätzlich wirkt bei leichten Konstruktionen der Strahlungsaustausch zwischen den Werkstoffen und Bauelementen als wichtiger Effekt. Die geringe Masse führt bei diesen Systemen zu einem reduzierten Puffer- und Speichervermögen sowie zu einem ausgeprägten dynamischen Verhalten bezüglich Veränderungen der Umweltbedingungen und Auswirkungen auf die Raumkonditionierung.

Dieses dynamische Verhalten beeinflusst ebenso die Wasserdampfdiffusion durch die Konstruktion. Kondensation und Feuchtigkeitsbildung werden innerhalb der Wärmedämmung begünstigt. Sie werden häufig als Ursachen für Schäden an mehrlagigen textilen Gebäudehüllen beschrieben [15, 38]. Durch den Austausch der Wärmestrahlung mit dem kalten und klaren Nachthimmel sinkt die Oberflächentemperatur des leichten Lagenaufbaus unter die Lufttemperatur der Umgebung. Dadurch fällt die Lufttemperatur direkt an der Membranoberfläche unter die Dampfsättigungstemperatur. Es bildet sich Kondensat an den Materialoberflächen. Abbildung 72 verdeutlicht diese Zusammenhänge schematisch [15].

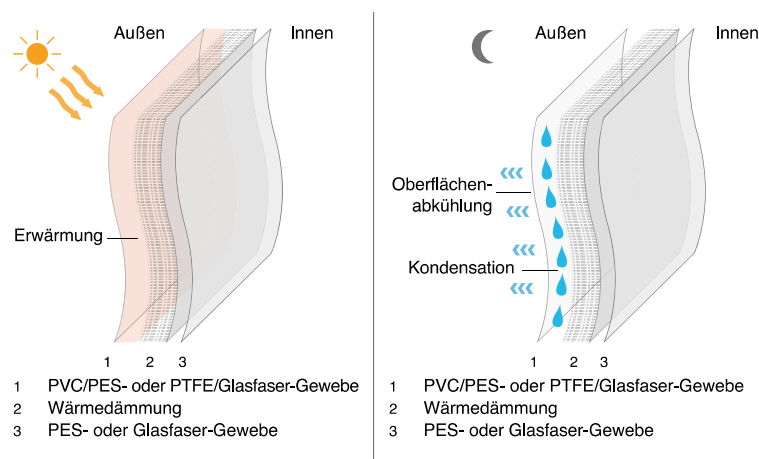


Abbildung 72: Prinzip der Nachtauskühlung und Kondensation in leichten mehrschichtigen Fassaden

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand der verwendeten Materialien muss daher bei der Planung und Zusammensetzung der Lagenaufbauten beachtet werden. Um die Gefahr der Feuchtigkeitsbildung auszuschließen, ist der Wert des Wasserdampfdiffusionswiderstands von der innersten zur äußersten

Lage stetig zu verringern. Zudem gibt es prinzipielle Lösungswege, um die Bildung von Kondensat zu verhindern.

Abbildung 73 zeigt die folgenden drei Möglichkeiten:

- kontrollierte Belüftung der Dämmung und der Luftzwischenräume, um die gesättigte humide Luft abzuführen und durch trockenere Luft auszutauschen
- Beschichtung der Außenlage mit einer niedrig emittierenden Beschichtung, um den Hitzeverlust einzuschränken und zu reduzieren
- gezielte Beheizung einzelner Membranschichten, um die Oberflächentemperaturen zeitweilig zu erhöhen und damit die Kondensation zu vermeiden

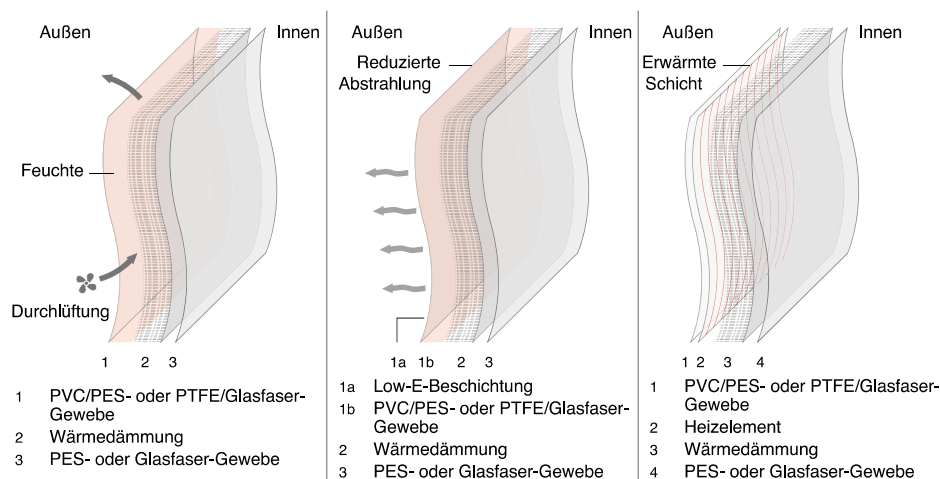


Abbildung 73: Prinzipien zur Vermeidung von Kondensation in leichten mehrschichtigen Fassaden

Um die Leistungsfähigkeit der Lagenaufbauten hinsichtlich der Wärmedämmleistung, der Wärmeregulationspotentiale und des Dampfdiffusionsverlaufes einzuordnen, wurden Simulationen nach der Klaus-Rubin-Methode durchgeführt [25]. Die zugrundeliegenden Werkstoffkennwerte wurden anhand von messtechnischer Spektroskopie, die am ILEK ermittelt wurde, für die Simulation generiert. Als Umgebungs- und Behaglichkeitswerte wurden die relevanten Grenzwerte angenommen, wie sie bei Haase et al. aufgeführt sind [3].

Nachfolgend sind die Zielwerte für Fassadenflächen von Wohnungsneubauten nach der EnEV 2014 [50] und weitere Kennwerte für die Bewertung der Fassadenflächen [38] aufgeführt:

Tabelle 26: Ausgewählte Zielwerte [38, 50]

Bezeichnung	Zielwert
U-Wert Fassade	0,24 W/(m ² · K)
U-Wert Fenster	1,3 W/(m ² · K)
Energieeintrag	250 – 450 kW/(m ² · a) bei einer Einstrahlung von 900 – 1200 kW/(m ² · a)
Energiespeicherfähigkeit	100 kJ/(m ² · K) auf der Konstruktionsinnenseite
Feuchtereulation	steigende Wasserdampfdiffusionsfähigkeit der Lagen von innen nach außen; Regulierbarkeit über Temperierung; Regulierbarkeit über Luftwechsel

Nachfolgend sind die Vergleichswerte von herkömmlichen Lösungen aufgeführt:

Tabelle 27: Zielerfüllung herkömmlicher Lösungen

Zielwert	3-fach Isolierverglasung	Satinierte Verglasung mit TWD	WDVS
U-Wert	0,7 – 1,1 W/(m ² · K)	0,2 – 0,3 W/(m ² · K)	0,18 – 0,24 W/(m ² · K)
Energiespeicherfähigkeit	75 kJ/(m ² · K)	110 kJ/(m ² · K)	280 kJ/(m ² · K)
Feuchtereulation	nicht zutreffend	Werkstoffeigenschaften; Luftaustausch	Werkstoffeigenschaften

Nachfolgend sind die Kennwerte der Rahmenbedingungen aufgeführt:

Tabelle 28: Bedingungsszenario: Winternacht

Bedingungen	außen	innen
Lufttemperatur	–14 °C	22 °C
relative Luftfeuchtigkeit	84 %	50 %
Windgeschwindigkeit	0 m/s	-
Solareinstrahlung	0 W/m ²	-
Faktor der direkten Himmelsrichtung	0	-
Bewölkungsgrad	0 %	-
Wolken-Temperatur	0 °C	-
Wolken-Reflexion (IR)	0 %	-
Wolken-Emissivität	0,0	-
Objekt-Temperatur	–14 °C	22 °C
Objekt-Reflexivität (IR)	90 %	10 %
Objekt-Emissivität	0,1	0,9

Tabelle 29: Bedingungsszenario: Sommertag

Bedingungen	außen	innen
Lufttemperatur	35 °C	22 °C
relative Luftfeuchtigkeit	41 %	50 %
Windgeschwindigkeit	0 m/s	-
Solareinstrahlung	600 W/m ²	-
Faktor der direkten Himmelsrichtung	0	-
Bewölkungsgrad	0 %	-
Wolken-Temperatur	0 °C	-
Wolken-Reflexion (IR)	0 %	-
Wolken-Emissivität	0,0	-
Objekt-Temperatur	35 °C	22 °C
Objekt-Reflexivität (IR)	90 %	10 %
Objekt-Emissivität	0,1	0,9

Nachfolgend sind die Ergebnisse, die mit der Simulation von Klaus erstellt wurden, aufgeführt.[25]

MULTILAYER CONSTRUCTION																	
LAYERS	Material Layer		1		2		3		4		5				TOTAL		
	Surface		Outer/Inner		Outer/Inner		Outer/Inner		Outer/Inner		Outer/Inner		Outer/Inner				
	Type	Surface Film	Material	Thickness	Material	Thickness	Material	Thickness	Material	Thickness	Material	Thickness	Material	Thickness	Surface Film	Thickness	
	Description	Outside Air Layer	ETFE	1	Air	10	ETFE mikroper	20	Air	30	ETFE mikroper	180	Air	1	ETFE	Inside Air Layer	245
MATERIAL PROPERTIES	Thickness	mm	1		10		20		30		180		1			245	
	Thermal Conductivity	W/m·K	0.24		0.24		0.24		0.24		0.24		0.24		0.24	0.28	
	Thermal Conductance	W/m²·K	12.3		240.0		1.6		240.0		1.7		240.0		240.0	0.28	
	SOL Transmissivity	%	0.91		0.906		0.906		0.906		0.906		0.91				
	SOL Reflectivity	%	0.08 0.08		0.08 0.08		0.08 0.08		0.08 0.08		0.08 0.08		0.08 0.08				
	IR Transmissivity	%	0.9		0.9		0.9		0.9		0.9		0.9				
	IR Reflectivity	%	0.06 0.06		0.14 0.14		0.14 0.14		0.14 0.14		0.14 0.14		0.06 0.06				
	IR Emissivity	%	0.9 0.9		0.9 0.9		0.9 0.9		0.9 0.9		0.9 0.9		0.9 0.9				
	Permeability	kg/Para·m	0.752000		0.752000		0.752000		0.752000		0.752000		0.752000				
	Permeance	kg/Para·m²	752.0		752.0		752.0		752.0		752.0		752.0			150.4	
AIR	Force Convection Airspeed	m/s															
	Force Airspace Temperature	°C															
	Radiative Flux (SOL)	W/m²	800	0 5		0 0		0 0		0 0		0 0		0 0		0	
	Radiative Heat Flux (IR)	W/m²	732	756 704		702 700		829 827		558 555		489 488		436			
	Conductive/Convective Heat Flux	W/m²	429	920 180		172 108		94 100		84 85		88 77		44			
	Temperature Change	°C	40.0	0.9	6.9	0.3	9.0	0.4	9.5	0.4	10.5	0.4	16.7		13.0		
	Temperature at Surface	°C	35.0	75.0	75.5	69.0	68.6	59.1	59.3	49.6	49.1	39.0	38.7		22.0		
	Vapour Pressure Change	hPa	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	0.0		9.9		
	Vapour Pressure at Surface	hPa	23.1	23.1	21.1	21.1	19.1	19.1	17.2	17.2	15.1	15.2	13.2		13.2		
	Saturation Vapour Pressure	hPa	56.3	391.6	407.1	302.2	297.6	198.0	194.8	122.9	120.7	70.1	68.8		26.4		
OUTPUT DAY	Relative Humidity	%	41.0	5.9	5.2	7.0	6.4	9.7	8.8	14.0	12.4	21.7	19.2		50.0		
	Radiative Flux (SOL)	W/m²	0	0 0		0 0		0 0		0 0		0 0		0			
	Radiative Heat Flux (IR)	W/m²	248	247 247		275 276		310 310		345 346		382 382		426			
	Conductive/Convective Heat Flux	W/m²	-172	-125 -26		-6 -4		8 9		20 20		30 41		44			
	Temperature Change	°C	3.8	0.2	7.4	0.2	8.0	0.2	7.5	0.2	6.8	0.2	1.6		36.0		
	Temperature at Surface	°C	-14.0	-10.2	-10.0	-2.6	-2.4	9.6	9.8	13.3	13.5	20.2	20.4		22.0		
	Vapour Pressure Change	hPa	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0		11.7		
	Vapour Pressure at Surface	hPa	1.5	1.5	3.9	3.9	6.2	6.2	8.5	8.5	10.9	10.9	13.2		13.2		
	Saturation Vapour Pressure	hPa	1.8	2.6	2.6	4.9	5.0	9.1	9.2	15.3	15.4	23.7	24.0		26.4		
	Relative Humidity	%	84.0	59.4		78.2		68.6	92.4	56.0	70.4	45.9	55.1		50.0		
OUTPUT NIGHT	Radiative Flux (SOL)	W/m²	0	0 0		0 0		0 0		0 0		0 0		0			
	Radiative Heat Flux (IR)	W/m²	248	247 247		275 276		310 310		345 346		382 382		426			
	Conductive/Convective Heat Flux	W/m²	-172	-125 -26		-6 -4		8 9		20 20		30 41		44			
	Temperature Change	°C	3.8	0.2	7.4	0.2	8.0	0.2	7.5	0.2	6.8	0.2	1.6		36.0		
	Temperature at Surface	°C	-14.0	-10.2	-10.0	-2.6	-2.4	9.6	9.8	13.3	13.5	20.2	20.4		22.0		
	Vapour Pressure Change	hPa	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0		11.7		
	Vapour Pressure at Surface	hPa	1.5	1.5	3.9	3.9	6.2	6.2	8.5	8.5	10.9	10.9	13.2		13.2		
	Saturation Vapour Pressure	hPa	1.8	2.6	2.6	4.9	5.0	9.1	9.2	15.3	15.4	23.7	24.0		26.4		
	Relative Humidity	%	84.0	59.4		78.2		68.6	92.4	56.0	70.4	45.9	55.1		50.0		

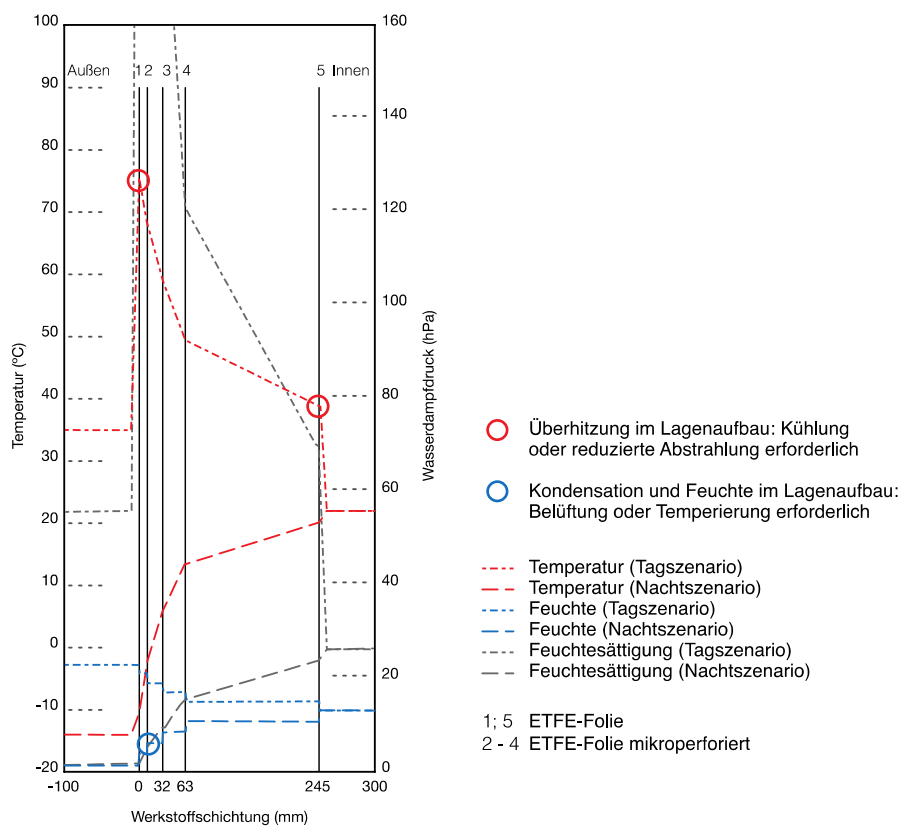


Abbildung 74: Wärme/Feuchte-Analyse des folgenden Lagenaufbaus: ETFE-Folien, fünflagig, teilweise mikroperforiert [25]

MULTILAYER CONSTRUCTION																	
LAYERS	Material Layer		1		2		3		4		5						TOTAL
	Surface		Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	
	Type	Surface Film	Material	Airspace	Material	Airspace	Material	Airspace	Material	Airspace	Material	Airspace	Material	Airspace	Material	Airspace	
	Description	Outside Air Layer	PVC/PES	Air	Fluid/TG	Aerogel	Fluid/TG	Air	PES							Inside Air Layer	
MATERIAL PROPERTIES	Thickness	mm	1	10	10	50	10	10	1								92
	Thermal Conductivity	W/m·K	☐ Override 0.50		0.62	0.02	0.62		0.65						☐ Override		
	Thermal Conductance	W/m²·K	12.3	500.0	2.5	61.9	0.4	61.9	2.5	650.0					2.0		0.27
	SOL Transmissivity	%		0.367		0.037	0.04	0.037		0.264							
	SOL Reflectivity	%		0.56	0.56	0.23	0.23	0.23	0.23	0.64	0.64						
	IR Transmissivity	%		0.485		0.04	0.04	0.04		0.251							
	IR Reflectivity	%		0.42	0.42	0.13	0.13	0.14	0.14	0.61	0.61						
	IR Emissivity	%		0.81	0.93	0.82	0.82	0.9	0.9	0.97	0.97						
	Permeability	μg/Pa·s·m		0.400000		0.000000	3000.0	0.000000		6.000000							
	Permeance	ng/Pa·s·m²		400.0		0.0	80000.0	0.000000		6000							0.0
AIR	Force Convection Airspeed	m/s															
	Force Airspace Temperature	°C															
	Radiative Flux (SOL)	W/m²	800	3	2		0	0	0	0	0		443	443		0	
	Radiative Heat Flux (IR)	W/m²	777	807	829		793	790	771	454	435	433				452	
	Conductive/Convective Heat Flux	W/m²	429	977	201		220	220	220	220	84	84		65	52	44	
	Temperature Change	°C	44.7	0.6		7.8	0.3	43.5	0.3	11.6	0.0					3.8	13.0
	Temperature at Surface	°C	35.0	79.7	80.2		88.1	77.3	37.1	37.4	25.8	25.4					22.0
	Vapour Pressure Change	hPa	0.0	0.0	0.0		4.9	0.0	4.9	0.0	0.0	0.0				0.0	9.9
	Vapour Pressure at Surface	hPa	23.1	23.1	23.1		23.1	18.2	18.2	13.2	13.2	13.2					13.2
	Saturation Vapour Pressure	hPa	56.3	476.3	487.4		667.2	432.1	66.8	84.4	33.3	33.2					26.4
OUTPUT DAY	Relative Humidity	%	41.0	4.8	4.7		3.5	4.2	27.1	20.5	39.7	39.4				50.0	
	Radiative Flux (SOL)	W/m²	0	0	0		0	0	0	0	0					0	
	Radiative Heat Flux (IR)	W/m²	241	239	244		238	239	251	374	396	387		418	418	44	
	Conductive/Convective Heat Flux	W/m²	-172	-158	-32		-14	0.000	0.000	0.000	72	72		54	43		
	Temperature Change	°C	1.1	0.0		7.2	0.2	27.7	0.2	7.3	0.0					0.6	36.0
	Temperature at Surface	°C	-14.0	-12.9	-12.8		-5.7	-9.4	28.6	28.8	21.4	21.5					22.0
	Vapour Pressure Change	hPa	0.0	0.0	0.0		5.8	0.0	5.8	0.0	0.0	0.0				0.0	11.7
	Vapour Pressure at Surface	hPa	1.5	1.5	1.5		1.5	7.4	7.4	13.2	13.2	13.2					13.2
	Saturation Vapour Pressure	hPa	1.8	2.0	2.0		3.8	3.0	39.1	39.6	25.5	25.6					26.4
	Relative Humidity	%	84.0	75.8	75.6		40.1		18.6	33.4	51.7	51.7					50.0
OUTPUT NIGHT																	

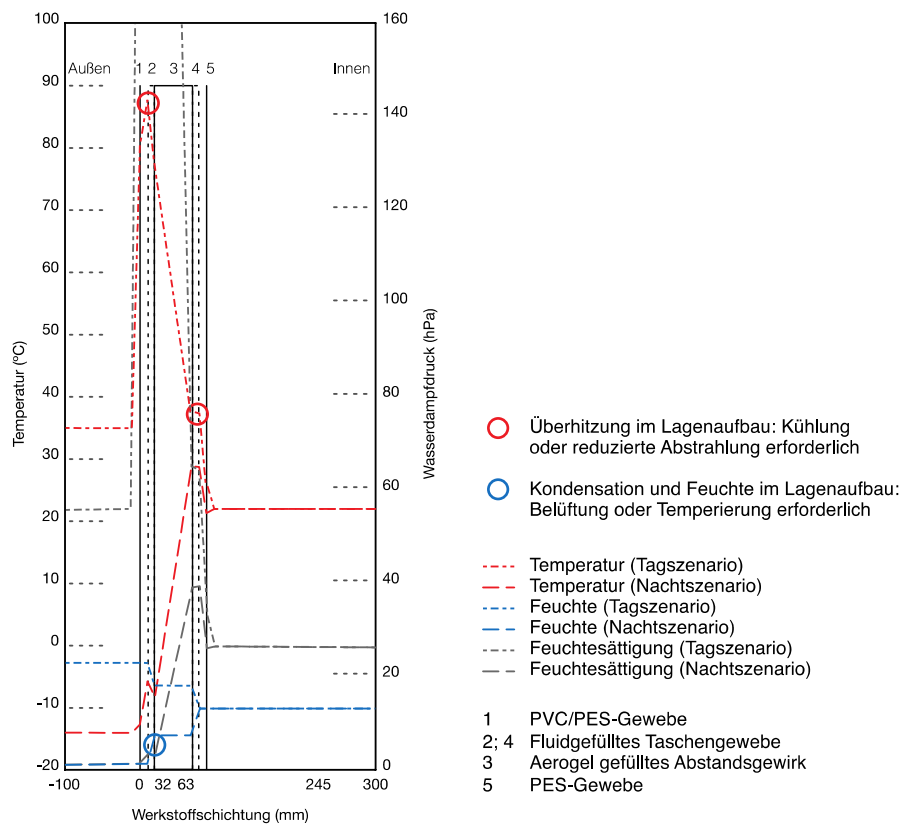


Abbildung 75: Wärme/Feuchte-Analyse des folgenden Lagenaufbaus:
PVC/PES-Gewebe – Fluidgefülltes Taschengewebe – Aerogel gefülltes Abstandsgewirk – Fluid-
gefülltes Taschengewebe – PES-Gewebe [25]

Als Ergebnis der Untersuchungen sind die nachfolgend genannten Faktoren für die Werkstoffauswahl und für die Verwendung als Lage im Systemaufbau wichtig. Die Werkstoffeigenschaften können hinsichtlich ihrer thermischen Leitfähigkeit und bezogen auf das Strahlungsverhalten beeinflusst werden. Für den jeweiligen Einbauort ist der richtige Dampfdiffusionswiderstand zu beachten. Die Dicke der Wärmedämmung, das Wärmedämmvermögen und der Abstand zwischen den einzelnen Lagen sind relevant, um eine ausreichende Belüftung zur Verhinderung der Kondensatbildung sowie eine Verminderung des Dampfdiffusionswiderstands der Innen- zur Außenschicht zu gewährleisten [15].

Die leichten Materialien führen zu einem reduzierten Puffer- und Speichervermögen, weshalb wechselnde und unterschiedliche Umgebungsbedingungen unverzüglich Einfluss auf die Konstruktion und die Wechselwirkungen mit dem Innenraum haben. Ein dämpfender Effekt des masseinhärenten Puffervermögens ist ausgeschlossen. Im Konzept dieser leichten Konstruktionen wird daher die Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Umgebungszustände relevant, um mit der geringstmöglichen Masse und der geringst notwendigen Energie die Anforderungen zeit- und situationsabhängig erfüllen zu können.

Zur Untersuchung des thermohumiden Verhaltens der aufgezeigten Systeme wurde das Simulationstool von Klaus verwendet [25]. Die Simulation der leichten Lösungsvarianten ohne Temperaturregulierung an den äußeren und inneren Decklagen führt zu den bekannten Problemen der Überhitzung und der Kondensatbildung. Mit einem thermodynamischen Kollektorelement sind sowohl die solaren Überschüsse abzuführen, wie auch gezielt zuzuheizen, wenn die Oberflächentemperaturen nahe der Taupunkttemperatur kommen oder es für die Behaglichkeit im Innenraum erforderlich ist. Tabelle 30 stellt die Leistungsbereiche der prototypischen Konzepte den herkömmlichen Lösungen gegenüber und zeigt, dass insbesondere die transluzenten und opaken Funktionsbereiche durch ultraleichte Lösungen massensparend und situationsabhängig erfüllt werden können.

Tabelle 30: Kennwerte der Wärme- und Feuchte-Anforderungen mit den Leistungsbereichen prototypischer und herkömmlicher Lösungen

	Kriterium	Zielwert	Leistungsbereich prototypische Lösung	Leistungsbereich herkömmliche Lösung
transparent	Wärmedurchgangskoeff.	$1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^*$	$0,7 - 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^*$
	Energiespeicherfähigkeit	$100 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$1,5 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$70 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	Feuchtereulation	notwendig	Luftaustausch	nicht möglich
transluzent	Wärmedurchgangskoeff.	$1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{**}$	$0,3 - 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{**}$
	Energiespeicherfähigkeit	$100 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$42 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$110 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	Feuchtereulation	notwendig	Luftaustausch	Werkstoffeigenschaften; Luftaustausch
opak	Wärmedurchgangskoeff.	$0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{***}$	$0,2 - 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})^{***}$
	Energiespeicherfähigkeit	$100 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$42 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$280 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	Feuchtereulation	notwendig	Luftaustausch	Werkstoffeigenschaften

Anmerkungen: – 240 mm Elementtiefe (A1 in Abbildung 5.5);

* 3-fach Isolierverglasung mit Kryptonfüllung (B3 in Abbildung 5.5);

** 90 mm Elementtiefe (B3 bzw. B3 in Abbildung 5.6);

*** 240 mm Elementtiefe (B3 bzw. B3 in Abbildung 5.7)

7.2 Leistungsüberprüfung „Bau- und Raumakustik“

Die akustische Qualität von Räumen wird durch die Nutzer zunehmend bewusst wahrgenommen, da Lärm der dominierende Faktor der Umwelteinflüsse ist. Laute Hintergrundgeräusche und akustische Mängel der Baukonstruktionen verstärken oft den Eindruck einer schlechten Hörbarkeit und führen zu einer mangelhaften Bewertung der Behaglichkeit und der Raumqualität [4].

Die bauakustische Wirkweise von Systemkonzepten und die resultierende Leistungsfähigkeit der Lagenaufbauten wird durch das akustische Absorptions-, Transmissions- und Reflexionsvermögen der Werkstoffe sowie durch das Schwingungsverhalten der eingesetzten physikalisch wirkenden Schalen beeinflusst [23, 51].

Lärmschutz wird heute im urbanen Umfeld vor allem durch die Reduzierung der Schallemissionen, durch die Errichtung von Schallschutzwänden sowie durch die Verwendung lärmindernder Verglasung in bestehenden Gebäuden oder durch entsprechende Ausrichtung der Räume in Neubauten erreicht. Normalerweise kann eine ausreichende Qualität für die Bewohner nur durch die Kombination von Maßnahmen und Mitteln in allen drei Kategorien erreicht werden [1].

Auch wenn die Eindämmung der Emissionen von Schallquellen die wirksamste Methode zur Verminderung des Lärms ist, so genügt dies vor allem im urbanen Umfeld nicht, da hier die Zunahme von schallemittierender Infrastruktur zu einem *rebound effect* führt [4, 23].

Die effektive Verbesserung der urbanen Qualität kann im Kontext der zunehmenden Bevölkerungsdichte und dem Ausbau von geräuschemittierender Infrastruktur nur durch die Kombination aus Emissionsreduktion mit dem Einsatz schallabsorbierender Fassaden ermöglicht werden. Schallemissionen würden durch Fassaden nicht mehr nur in den Stadtraum reflektiert sondern umgeleitet, dissipiert und reduziert werden. Die Auswirkung absorbierender und vollständig reflektierender, schalldämmender Fassaden oder Wände auf den Stadtraum ist bei Möser und Schmid et al. beschrieben [23, 26].

Die raumakustische Optimierung wird heute vornehmlich von der Einstellung der Nachhallzeit bestimmt. Bei zunehmend flexibel genutzten Räumen und bei schneller Umnutzung von Gebäuden ist diese Abstimmung aber schwierig. In der Folge wird auf einfache, universelle Einstellungsmöglichkeiten mit elektroakustischer Unterstützung zurückgegriffen, die aber hinter den akustisch charakteristischen Potenzialen der Räume zurückbleiben [4, 15]. Ein aufwendiger, alternativer Weg sind aktiv veränderliche, raumakustisch wirkende Lösungen, die gezielt auf die Nutzungssituation eingestellt werden können. Die heute am Markt vorhandenen Produkte sind für den Stellenwert der Raumakustik relativ teuer und erfordern eine professionelle Bedienung. Sie werden daher nur vereinzelt in hochwertigen Mehrzweckhallen eingesetzt [4].

Mit dem funktionalen und modularen Konzept der adaptiven mehrlagigen textilen Gebäudehüllen steht eine Fassadenlösung in Aussicht, die zur automatisierten Steuerung der akustischen Konditionierung von Innenräumen erweitert werden kann. Für die erforderliche Anpassungsfähigkeit und Veränderlichkeit der Raumakustik sind Kombinationen von textilen Werkstoffen aufgrund ihrer vielfältigen Eigenschaften, den breiten Anwendungsspektren und der variablen Herstellungsverfahren prädestiniert [15].

Als Lösungsansatz werden Produkte und deren zugrunde liegende Systeme, die heute vorwiegend zur Optimierung der Raumakustik dienen, auf ihre Tauglichkeit für die Anwendung als Fassadenlösung geprüft. Passive Absorberlösungen, beispielsweise aus Fasergewirken oder Schäumen, bilden die einfachste und kostengünstigste Lösung. Sie wurden so weiterentwickelt, dass die Mehrlagigkeit und -schichtigkeit des Systemkonzepts auch akustisch als mehrschalig schwingendes Resonatorsystem verwendet werden kann. Mit dem gradierten Verbundvliesstoff wurde dies in ein Bauteil umgesetzt, welches als leichtes, biegeweiches Konstruktionselement ein Masse-Feder-System bildet. Die Kombination von zwei regulierbaren Kollektorelementlagen und einem Aerogel-Element als Kernlage setzen diese Systematik für die hochwertigere Anwendungen im transluzenten Funktionsbereich um. Eine Erweiterung des Fassadenflächenaufbaus durch mikroperforierte Schichten, die dem Innenraum zugewandt sind, ist möglich, um einen nutzungsspezifischen Breitbandabsorber in der Fassade umsetzen zu können [15].

Die Systemkonzeption der adaptiven mehrlagigen Fassaden bietet die Möglichkeit, Fassadenlösungen als anpassbares und steuerbares Element für den Stadtraum und für die jeweils dahinter liegenden Innenräume zu verwenden. Anwendungsszenario und Umwelteinflüsse werden so nicht nur in der Planung eruiert, um eine Lösung für den jeweiligen Fall auszulegen. Es erfolgt die Anpassung an unterschiedliche Nutzungsbedingungen im Stadtraum und im Innenraum während des Betriebes. Lauten Ereignissen im Stadtraum wird beispielsweise die erhöhte Schallabsorption entgegengesetzt. Auf die Notwendigkeit des konzentrierten Arbeitens oder eines ungestörten Gesprächs wird eine erhöhte Schallreflexion einstellbar [4, 51].

Das Leistungsvermögen einer Konstruktion, die auftretende Schallenergie reflektieren oder dissipieren zu können, wird anhand des Schalldämm-Maßes vergleichbar. Fenster und Fassaden werden für unterschiedlich starke Immissionen klassifiziert. Nachfolgende Tabelle zeigt die Schallschutzklassen und die erforderlichen Schalldämm-Maße bei der Abschätzung über Messungen im Prüfstand.

Tabelle 31: Schallschutzklassen und bewertete Schalldämm-Maße für Einbau und Prüfung

Schallschutzklasse	Bewertetes Schalldämmmaß der eingebauten Konstruktion	Erforderliches bewertetes Schalldämmmaß bei der Prüfung im Prüfstand
1	25 – 29 dB	≥ 27 dB
2	30 – 34 dB	≥ 32 dB
3	35 – 39 dB	≥ 37 dB
4	40 – 44 dB	≥ 42 dB
5	45 – 49 dB	≥ 47 dB
6	≥ 50 dB	≥ 52 dB

In Forschungsprojekten wurde die akustische Leistungsfähigkeit der entwickelten Komponenten und möglicher Systemkonfigurationen anhand von Prototypen durch das Schalldämm-Maß quantifiziert. Die messtechnische Prüfung wurde am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) durchgeführt. Die ausführlichen Messprotokolle der Ergebnisse sind in Anhang 10.6 angefügt.

Die Bestimmung dieses Merkmals wurde im Türenprüfstand am IBP in Stuttgart durchgeführt. Die Beschreibung der Messproben und der Ergebnisse ist in Abschnitt 4.5 beschrieben.

Das berechnete, bewertete Schalldämm-Maß des Systemaufbaus [A1] ist mit $R_W = 25$ dB allein durch die Einbringung einer Verbundvliesstofflage um 8 dB höher als z.B. eine zweilagige PVC/Polyester Membranaufbau (R_W 17 dB). Die Spiegelung, wie in Systemaufbau [B1] ausgeführt, erweitert die Leistungsfähigkeit um weitere 5 dB auf $R_W = 30$ dB. (vgl. A zu B).

Die Ergänzung der flächenbezogenen Masse um rund 18 kg/m^2 durch das mit Flüssigkeit gefüllte Taschengewebe im Systemaufbau C führt zu einer weiteren Steigerung des Schalldämmvermögens, insbesondere im Frequenzbereich über 500 Hz. Das bewertete Schalldämm-Maß erreichte $R_W = 34$ dB.

Die Verwendung des Silicat-Aerogel gefüllten Abstandsgewirke in Systemaufbau D zeigt wiederum eine deutliche Verbesserung des Schalldämm-Maßes über alle Frequenzen hinweg. Sehr auffällig ist dabei der lineare Verlauf der Werte über die Frequenzen hinweg, was für ein Resonanzsystem als außergewöhnliche Eigenschaft zu bewerten ist. Der Aufbau erreicht somit ein bewertetes Schalldämm-Maß von $R_W = 39$ dB.

Mit den Ergebnisse bestätigt sich der Entwicklungsweg, die mehrlagigen textilen Gebäudehüllen über den prinzipiellen Systemaufbau, die Materialwahl der akustischen Dämpfung und thermischen Dämmung und die zielgerichtete Erhöhung der flächenbezogenen Maßen und damit dem Ausbau zu einem umfassend anpassungsfähigen System, zu verbessern.

Der Vergleich mit dem bewerteten Schalldämm-Maß bildet eine erste Bewertungsgrundlage und ermöglicht die Einordnung der Leistungsfähigkeit der Lösungsvarianten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 32 vergleichend zusammengeführt. Herkömmliche massive Wände und Fassaden erreichen hauptsächlich durch ihre Masse ein bewertetes Schalldämm-Maß größer 42 dB. Im Vergleich dazu sind leichte, zweilagige Konstruktionen bestehend aus PVC/PES-Geweben, mit einem bewerteten Schalldämm-Maß von 17 dB für Fassaden nur in Ausnahmefällen anwendbar. Mit den entwickelten Bauelementen war es möglich, die Leistungsfähigkeit eines textilen Lagenaufbaus deutlich zu erhöhen. Durch den Einsatz der Verbundvliesstoffdämmung wurde eine Verdopplung des bewerteten Schalldämm-Maßes erreicht. Die Ergänzung eines fluidgefüllten Taschengewebes mit einer im Versuch vorhandenen flächenspezifischen Masse von 17,75 kg/m² führt zu einer weiteren Erhöhung der Schalldämmwirkung. Dieser Lagenaufbau kann mit einem bewerteten Schalldämm-Maß von 34 dB charakterisiert werden, was einer Schallschutzklasse 2 und damit einer Anwendung an merklich benutzter Infrastruktur entspricht.

Tabelle 32: Kennwerte der Bau- und Raumakustik-Anforderungen mit den Leistungsbereichen prototypischer und herkömmlicher Lösungen

	Kriterium	Zielwert	Leistungsbereich textile Lösung	Leistungsbereich herkömmliche Lösung*
transparent	Bew. Schalldämmmaß	27 dB (SSK 1)	17 dB	27 – 39 dB (SSK 1-3)**
	Absorptionsgrad	$0 < \alpha < 1$	0,8 – 0,9	0,9 – 0,4
	Reflexionsgrad	$0 < \rho < 1$	0,1 – 0,2	0,6 – 0,9
transluzent	Bew. Schalldämmmaß	27 dB (SSK 1)	39 dB (SSK 3)	27 – 39 dB (SSK 1-3)**
	Absorptionsgrad		0,3 – 0,9 (adaptiv einzustellen)	0,1 – 0,9 (auszulegen)
	Reflexionsgrad		0,1 – 0,7 (adaptiv einzustellen)	0,9 – 0,1 (auszulegen)
opak	Bew. Schalldämmmaß	27 dB (SSK 1)	34 dB (SSK 2)	27 – 39 dB (SSK 1-3)**
	Absorptionsgrad		0,3 – 0,9 (adaptiv einzustellen)	0,1 – 0,9 (auszulegen)
	Reflexionsgrad		0,1 – 0,7 (adaptiv einzustellen)	0,9 – 0,1 (auszulegen)
Abkürzung:		Bew. bewertet		
Anmerkungen:		* vergleiche B2 oder B3 in Abbildung 5.6 ** üblich		

7.3 Leistungsüberprüfung „Brandverhalten und Brandschutz“

Die rechtlichen Bestimmungen zum baulichen Brandschutz sind in den Landesbauordnungen geregelt. Der bauliche Brandschutz lässt sich unterteilen in die Sicherstellung der Infrastruktur für die Feuerwehr, die Bildung von Brandabschnitten, die Bemessung und normgerechte Erstellung von tragenden und raumabschließenden Konstruktionen sowie die Planung und Herstellung von Flucht- und Rettungswegen. Daneben existiert der anlagentechnische Brandschutz, der den Umgang mit Brandschutzvorkehrungen für die technische Gebäudeausrüstung behandelt und durch technische Einrichtungen den Brand- und Umweltschutz verbessert [53].

Seitens der brandschutztechnischen Anforderungen müssen Fassaden als trennendes Bauelement die Entstehung von Bränden verhindern. Sie stellen zudem als Raumabschluss von Gebäuden eine wichtige Barriere dar, um Rauch- und Brandausbreitung zu vermeiden. Darüber hinaus erfolgt bei manchen Gebäudeklassen (GK) die Bereitstellung eines zweiten Rettungsweges über die Fassade. Hierzu ist Zugänglichkeit am Gebäude und an der Fassade notwendig [5].

Modulare Gebäudehüllen werden durch ihre Vorteile insbesondere bei mehrgeschossigen Gebäuden wie Verwaltungs- oder Bürogebäuden eingesetzt und müssen daher die für GK 4 und 5 vorgesehe-

nen, höchsten Anforderungen an Werkstoffe und Bauteile erfüllen. Für Hochhäuser sind Sonderrichtlinien in den Bauordnungen geregelt. Sie orientieren sich an den Anforderungen der GK 4 und 5, werden aber durch zusätzlich geforderte Maßnahmen des anlagentechnischen Brandschutzes erweitert [5, 53].

Wird das Fassadenelement als nichttragende Außenwand verwendet, ist es so auszubilden, dass eine Brandausbreitung ausreichend lange verhindert wird. Diese Bauteile müssen als feuerhemmend oder hochfeuerhemmend ausgeführt werden. Tragende Teile sind mit nichtbrennbaren Werkstoffen auszuführen. Oberflächen von Außenwänden und Außenwandbekleidungen können aus schwerentflammenden Werkstoffen ausgeführt werden [5, 53].

Grundlage für das Brennverhalten von textilen Werkstoffen ist das Fasermaterial. Es werden entflammbare und unbrennbare Faserstoffe unterschieden. Entflammbare Materialien lassen sich darüber hinaus durch flammhemmende Beschichtungen ausrüsten, um im entsprechenden Anwendungsbereich eine verzögerte Entzündung, geringere Brandlast und reduzierte Rauchentwicklung zu gewährleisten. Damit verbunden können Bauteile durch diese Werkstoffe die notwendigen Fluchtzeiten gewährleisten [5].

Unbrennbare Werkstoffe, die sowohl in Geweben, Gewirken und Vliesstoffen verwendet werden können, sind Glas- oder Steinfasern. Beispiele für Vliesstoffe sind Basalt-, Silikat- oder Glasvliesstoffe, die als Nadelvliesstoff hergestellt werden. Entflammbare Werkstoffe wie Polyester, Viskose, Polyamide können durch chemische Behandlung mit Halogenen, Phosphor, Stickstoffen oder Metallsalzen zu Flammenschutzprodukten ausgerüstet werden. Das Auftragen der Beschichtung kann dabei als nichtpermanenter, semipermanenter oder als wasch permanenter Schutz auf das Fasermaterial aufgebracht werden [5].

Entflammbare Werkstoffe können darüber hinaus in Verbundbauteilen oder Konstruktionen angewandt werden, wenn ausgeschlossen ist, dass eine Entzündbarkeit durch direkte Flammen oder durch Strahlungswärme von brennenden oder aufgeheizten Bauteilen erfolgt [5, 53].

Die Möglichkeiten zur Ausrüstung von Materialien zu nichtbrennbaren oder schwer entflammenden Werkstoffen ist mit chemischen Maßnahmen verbunden, die größtenteils im Widerspruch zu den Anforderungen an Umweltverträglichkeit und Energieverbrauch stehen. Ein weiterer Weg ist die Ausweitung der Funktionalität der Fassade durch anlagentechnische Infrastruktur. Die Maßnahmen wie gas- oder fluidführende Löschanlagen erweitern die mögliche Verwendung von entflammenden Werkstoffen, indem sichergestellt ist, dass im Brandfall die Ausbreitung von Feuer und Rauchgasen unterbunden wird. Dies kann durch Kühlen und Löschen sowie durch die Dichtigkeit der Konstruktion erfolgen. Das Kühlen der Flächen verhindert ebenfalls die Selbstentzündung und damit den Brandüberschlag. Zudem ist die Abfuhr von Rauchgasen durch gezielte Entlüftung sicherzustellen [1, 54].

Der Einsatz des Kollektorelementes an der äußeren und inneren Decklage ermöglicht durch die Verwendung von Wasser die Möglichkeit, dieses sicherheitsrelevante Bauteil synergetisch einzusetzen. Wie bei der Bau- und Raumakustik werden die aufwendigen Maßnahmen für die Steuerung und Regelung in einem Bauelement kombiniert, um die anderen Bauteile einfacher und kostengünstiger ausführen zu können. Die Abfuhr von Wärme kann im prototypisch ausgeführten Kollektorelement bis zu 4 kWh/m² betragen. Als zweite Sicherheitsstufe ermöglicht die Druckbeaufschlagung des Fluids die punktuelle Öffnung des Taschengewebes, um mit flächig angeordneten Sprühstrahlen einen gezielten Löschvorgang oder die Kühlung zu ermöglichen. Im Rahmen der Forschungsprojekte wurden erste erfolgreiche Tests an Probeaufbauten hierzu durchgeführt. Ähnliche Ansätze sind durch die Entwicklungen im anlagentechnischen Brandschutz nachgewiesen [53, 54]. Abbildung 77 zeigt die zwei Lösungen der brandschutztechnischen Anforderungen in Prinzipskizzen.

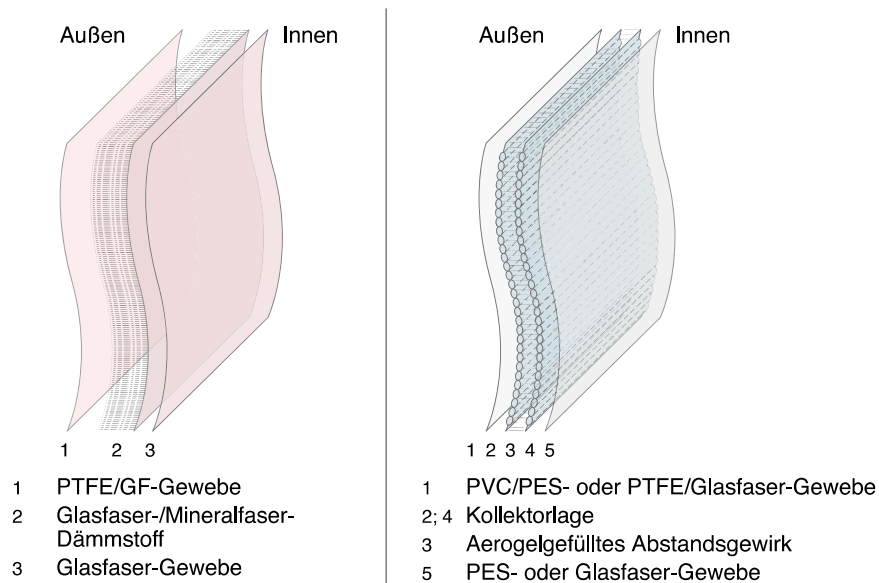


Abbildung 77: Prinzipien zur Lösung der Brandschutzanforderungen

Die Anwendungen und Anforderungen des baulichen sowie des anlagentechnischen Brandschutzes ist in der Musterbauordnung (2002) nach unterschiedlichen Gebäudeklassen, die sich durch Höhe und Nutzung unterscheiden, eingeteilt. Die Baukomponenten, Bauteile und Baustoffe müssen entsprechend der Gebäudeklasse unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, um die Erfordernisse zu erfüllen. Grundsätzlich dürfen keine leicht entflammbaren Werkstoffe zum Einsatz kommen. Die Anforderungen an Baustoffe und Bauteile sind in DIN 4102 und DIN EN 13501 geregelt [55, 56]. Insbesondere für Fassaden und Dächer sind DIN 4102-3 und -4 sowie DIN EN 13501- 1 und -2 zu beachten [53].

Wird das Fassadenelement als sogenannte Brandwand (bspw. zur Unterteilung von Brandabschnitten) verwendet, ist sie als feuerbeständiges Bauteil auszuführen. Es dürfen ausschließlich nichtbrennbare Baustoffe zur Anwendung kommen [5, 53].

Tabelle 27 führt die ermittelten Werkstoffeigenschaften und Zielwerte für die Energiereduktion und das Löschwasservolumen zusammen und vergleicht die Lösungen für die drei Funktionsbereiche. Die ausführliche Ermittlung der kalkulierten Werte für die Energieminderung und das verfügbare Löschwasservolumen ist in Tabelle 34 nachvollzogen.

Tabelle 33: Kennwerte der Brandschutz-Anforderungen mit den Leistungsbereichen prototypischer und herkömmlicher Lösungen

	Kriterium	Zielwert	Leistungsbereich textile Lösung	Leistungsbe- reich herkömm- liche Lösung*
transparent	Brandschutzklasse	A	B1	A
	Energieminderung	15 kWh/m ² (NF)**	0 ⁺	0 ⁺
	Löschwasservolumen	10 l/m ² (NF)**	0 ⁺	0 ⁺
transluzent	Brandschutzklasse	A	B1	A
	Energieminderung	15 kWh/m ² (NF)**	bis 4 kWh/m ² (FF)**	0 ⁺
	Löschwasservolumen	10 l/m ² (NF)**	bis 30 l/m ² (FF)**	0 ⁺
opak	Brandschutzklasse	A	B1	A
	Energieminderung	15 kWh/m ² (NF)**	bis 4 kWh/m ² (FF)**	0 ⁺
	Löschwasservolumen	10 l/m ² (NF)**	bis 30 l/m ² (FF)**	0 ⁺
Abkürzungen:	NF Nutzfläche; FF Fassadenfläche; A nicht brennbare Stoffe; B1 schwer entflammbare Stoffe			
Anmerkung:	* vergleiche C2, C4 oder D2, D4 in Abbildung 5.7;			
	** äquivalent in der Annahme von Anhang C.3;			
	+ zusätzliche Maßnahmen notwendig			

Tabelle 34: Zielwerte zur Einschätzung des Brandverhaltens und des Brandschutzes

	Kennwert	Bemerkung
Bemessungszielwerte		
Mindestbrandbelastung**	15 kWh/m ²	bezogen auf die Grundfläche
Bemessung der Löschleistung*		
Durchflussmenge gem. äqu. Sprinkleranlage	50,6 – 90 l/min	
Abgabemenge gem. äqu. Sprinkleranlage	2,5 – 10 l/m ²	
Bemessung der Kühlleistung*		
Angenommene Temperaturerhöhung	$\Delta T = 60 \text{ K}$	Erwärmung des Wassers von 20 auf 80 °C
Vorhandenes Volumen	$V_{\text{Wasser}} = 20 \text{ l}$	
Spezifische Wärmekapazität	$c_{\text{Wasser}} = 4,182 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	
Volumenstrom bei 1 bar über 3 Zuleitungen	$Q_{\text{Taschengewebe}} = 60 \text{ l/min}$	$\equiv 60 \text{ kg}$
Fläche des Taschengewebes	$A_{\text{Taschengewebe}} = 2 \text{ m}^2$	
Energieaufnahme absolut	$W_{\text{Aufnahme}} = c_{\text{Wasser}} \cdot \Delta T \cdot m_{\text{Wasser}} = 4,182 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot 60 \text{ K} \cdot 60 \text{ kg} = 15055,2 \text{ kWs}$	
Energieaufnahmepotential	$W_{\text{Aufnahmequotient}} = \frac{W_{\text{Aufnahme}}}{A_{\text{Taschengewebe}}} = \frac{15055,2 \text{ kWs}}{2 \text{ m}^2} = 7527,6 \text{ kWs/m}^2 = 2,091 \text{ kWh/m}^2$	bezogen auf die Fassaden-/Wandfläche
Abkürzung:	äqu. äquivalent	
Anmerkungen:	* nach DIN EN 12259-1, DIN CEN/TS 14972, VdS-Richtlinie 2100-28;	
	** nach DIN 18230;	

7.4 Leistungsüberprüfung „Belichtung“

Um bei transluzenten Fassadenaufbauten den Vorteil einer natürlichen Belichtung als Grundbeleuchtung nutzen zu können, muss das notwendige Beleuchtungsniveau erreicht werden. Dies beträgt beispielsweise in Deutschland am Arbeitsplatz 500 – 1000 lx bei einem Tageslichtquotient von mindestens 1 %. Hierzu muss die Fassadenfläche eine ausreichend hohe Lichttransmission aufweisen.

Über das Spektrum der Wellenlängen des sichtbaren Lichtes ist zudem eine ausgewogene Lichttransmission notwendig, um eine möglichst neutrale Farbwiedergabe zu erreichen. Eine gleichmäßige Beleuchtung in der Fläche ist erforderlich, um eine harmonische Helligkeitsverteilung zu erreichen. Schlagschatten und wechselnde Lichtrichtungen oder Flimmern sowie Blendung durch zu helle Flächen sind hingegen auszuschließen. Ebenfalls zu beachten ist die Frage der Wärmeentwicklung in der Konstruktion und die Möglichkeit zur Überhitzung bei zu großen Anteilen an Energieeintrag durch Wärmestrahlung oder Wärmeentwicklung.

Vollständig transparente Fassadenflächen müssen zusätzlich durch Sonnen- und Belichtungsschutz geschützt werden, um ein angenehmes Lichtmilieu zu gewährleisten. Bei Gebäuden für eine Büronutzung nach Arbeitsstättenrichtlinien genügt zur Erfüllung der genannten Anforderungen ein Fensterflächenanteil von 10 % bei einer Aufteilung zwischen opaken und transparenten Bereichen sowie einer vorhandenen 90 cm hohen Brüstung. Bei einer äquivalenten vollflächig transluzenten Ausführung zur Belichtung mit Tageslicht würde folglich eine Lichttransmission von mindestens 3 % für den Fassadenflächenaufbau benötigt werden.

Um die Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Transparenz und der Transluzenz zwecks Belichtung mit natürlichem Licht einzuschätzen, wurde der Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrad über die Wellenlängen des sichtbaren Lichts untersucht. Aus den spektroskopischen Vermessungen der Werkstoffe zur Ermittlung der Kennwerte für die Klaus- Rubin-Simulation sind Transmissions- und Reflexionswerte für einen Wellenlängenbereich von 250 – 2500 nm und von 2000 – 7500 nm als Ausgangsdaten vorhanden. Nachfolgende Diagramme tragen die Transmissionswerte für die untersuchten Lagenaufbauten im Wellenspektrum zwischen 300 – 1000 nm auf. Die zugrundeliegenden Messungen wurden am ILEK durchgeführt.

Um die Werte einordnen zu können, wurde als Szenario ein Reihenbüro mit der Grundfläche 5 m × 6 m und einer Fassadenfläche von 5 m × 3 m angenommen. Das Zimmer wurde nach den Bemessungsempfehlungen der ISO 15469:2004(E) und der DIN 5034 bemessen [57, 58].

Empfehlungen zur Belichtung mit natürlichem Licht sind bei Hegger et al. aufgeführt [11].

Tabelle 35: Ermittlung der Zielwerte für die Überprüfung des Belichtungsvermögens

	Kennwert	Bemerkung
Bemessungszielwerte		
Tageslichtquotient (Mindestwert)*	1 %	$\equiv 24 \% FFA$
Tageslichtquotient (Empfehlung)*	3 %	$\equiv 60 \% FFA$ und $50 \% TLA$
Helligkeit am Arbeitsplatz*	500 – 1000 lx	bis 5 m Raumtiefe
Helligkeit im Außenraum	5000 – 100 000 lx	trüber Wintertag bis unverschatteter Sommertag
Transmissionsgrad (Mindestwert)	$\tau_F = 0,3$	für Belichtung bis 5 m Raumtiefe
Bemessung einer äquivalenten vollflächigen transluzenten Fassade		
Empfehlung für den Fensterflächenanteil	$FFA_{\text{empf}} = 0,6$	
Mindestanforderung für den Fensterflächenanteil	$FFA_{\text{min}} = 0,24$	
Fassadenfläche	$FF = 5 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} = 15 \text{ m}^2$	
Transmissionsgrad für transluzente Fassade (Empfehlung)	$\tau_{\text{eq-empf}} = FFA_{\text{empf}} \cdot \tau_F = 0,6 \cdot 0,3 = 0,18$	
Transmissionsgrad für transluzente Fassade (Mindestwert)	$\tau_{\text{eq-min}} = FFA_{\text{min}} \cdot \tau_F = 0,24 \cdot 0,3 = 0,027$	
Anmerkungen: * nach DIN 5034		
Abkürzungen: FFA Fensterflächenanteil; TLA Tageslichtautonomie		

Neben der Einordnung einer ausreichenden Belichtung wird auch die Lichtqualität anhand des Transmissionsgrades ablesbar. Um eine neutrale Farbwiedergabe zu erhalten, müssen die Transmissionswerte über den Wellenlängen des sichtbaren Lichtes gleichbleibend verlaufen.

Werden einzelne Wellenlängenbereiche bevorzugt transmittiert, erfolgt eine Farbverschiebung. Eine mäßige Bevorzugung des Wellenbereichs zwischen 580 – 630 nm wird als warm empfunden, da ein gelb, orange oder rot dominierter Farbeindruck entsteht. Eine Bevorzugung des Wellenbereichs zwischen 390 – 560 nm wird als kühl empfunden, da ein violett, blau oder grün dominierter Farbeindruck entsteht [59].

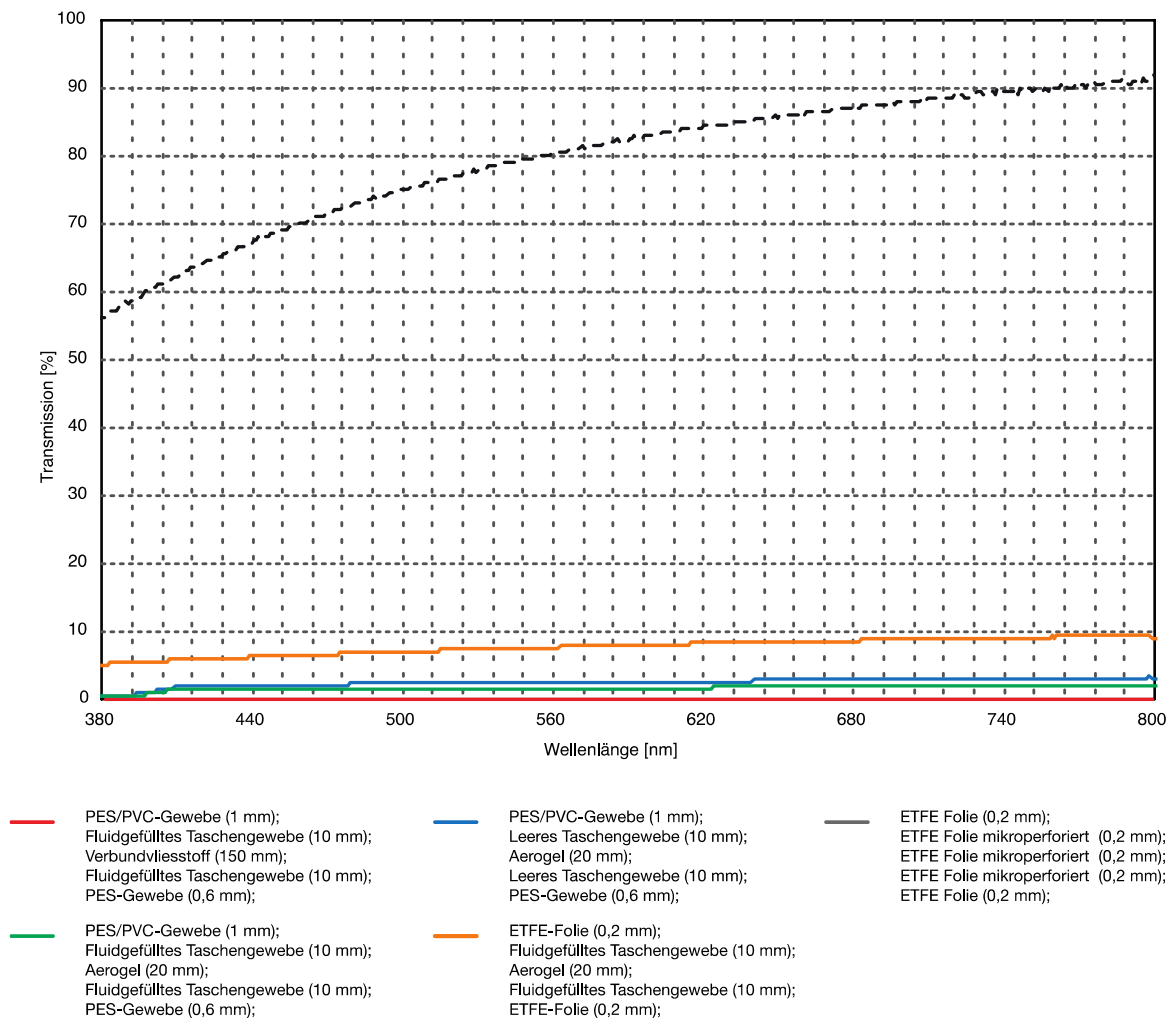


Abbildung 78: Lichttransmissionsverteilung der untersuchten Lagenaufbauten

Die Untersuchungen der prototypischen Lagenaufbauten waren diesbezüglich zielerfüllend. Mit einer Lichttransmission von insgesamt 0 – 8 % für die transluzenten Lagenaufbauten ist eine Blendung ausgeschlossen. Trotzdem wird ausreichend Licht für eine Bürotätigkeit ohne zusätzliche Beleuchtung transmittiert. Dieses Licht kommt mit einem ausgewogenen Wellenspektrum des sichtbaren Lichtes durch die Konstruktion. Tabelle 36 führt die Kennzahlen für die untersuchten Lösungsvarianten auf.

Tabelle 36: Kennwerte der Belichtungs-Anforderungen mit den Leistungsbereichen prototypischer und herkömmlicher Lösungen

	Kriterium	Zielwert	Leistungsbereich textile Lösung	Leistungsbereich herkömmliche Lösung*
transparent	Transmissionsgrad	0,6 – 1,0	0,8	0,6 – 0,9
	Diffusionsgrad	0	~ 0	~ 0
	Farbwiedergabe	ausgewogen	gegeben	gegeben
transluzent	Transmissionsgrad	0,02 – 0,6	0,05 – 0,08	0,05 – 0,6
	Diffusionsgrad	1	~ 1	~ 1
	Farbwiedergabe	ausgewogen	gegeben	gegeben
opak	Transmissionsgrad	< 0,02	< 0,01	< 0,01

7.5 Witterungseinflüsse

Der Schutz vor Regen, Verschmutzung, Wind und UV-Strahlung wird durch die Eigenschaften der im klassischen Membranbau verwendeten Werkstoffe und durch die Konstruktionsweise mit einer biaxialen Vorspannung ermöglicht. Die Beschichtungen aus Polyvinylchlorid (PVC) und Polytetrafluorethylen (PTFE) sorgen für die Dichtigkeit. Im Falle der PTFE-Beschichtung ermöglicht die geringe Oberflächenspannung und der niedrige Reibungskoeffizient eine sehr gute Reinigung der Oberfläche bei Verschmutzungen. Um die Windlasten abzutragen, wird die äußere Gewebelage im Konstruktionsrahmen eingespannt und über sogenannte Spanten vorgespannt. Das Rahmenprofil ermöglicht dabei auch das Nachspannen jedes Fassadenelements, falls das Vorspannniveau durch Relaxation zu weit absinkt. Tabelle 37 zeigt eine Auflistung der Aufgaben bezogen auf den Witterungsschutz und die Funktionen sowie Effekte, die zur Erfüllung der Anforderungen verwendet werden.

Tabelle 37: Kennwerte der Witterungseinflüsse mit den Leistungsbereichen prototypischer und herkömmlicher Lösungen (gültig für alle Funktionsbereiche)

Kriterium	Zielwert	Leistungsbereich textile Lösung	Leistungsbereich herkömmliche Lösung*
Wasserdichtigkeit	erforderlich	Beschichtung; Flottierung	Beschichtung; Material
Winddichtigkeit	erforderlich	Beschichtung; Flottierung	Beschichtung; Material

7.6 Weitere Anforderungen

Unter weiteren Anforderungen sind diejenigen Aufgaben zusammengefasst, die im Bewertungsprozess und bei der Identifikation der Bedingungen, Anforderungen und Kriterien als notwendige Nebenfunktionen identifiziert wurden. Die Einordnung als Nebenfunktion geht auf die beiläufige Erfüllbarkeit durch die Systemgestaltung zurück oder ist durch eine enge Verknüpfung zum individuellen Planungskontext nicht auf einer übergeordneten Ebene eindeutig einschätzbar. Die Aufgaben, die Funktionen zur Umsetzung und die Maßnahmen sind in Tabelle 38 aufgelistet.

Tabelle 38: Kennwerte der weiteren Anforderungen mit den Leistungsbereichen prototypischer und herkömmlicher Lösungen (gültig für alle Funktionsbereiche)

Kriterium	Zielwert	Leistungsbereich textile Lösung	Leistungsbereich herkömmliche Lösung*
Mech. Belastbarkeit	Druck, Sog Hieb, Stich	erfüllbar** ästh. und funkt. Mängel	erfüllbar*** ästh. Mängel
Vorfertigung	hoch	hoch	mittel bis hoch
Herstellung	automatisiert	automatisiert	handwerklich, tlw. automatisiert
Abkürzungen:	Mech mechanisch; ästh. ästhetisch; funkt. funktional		
Anmerkungen:	** Membranstruktur bei minimaler Masse; *** Plattenstruktur		

7.7 Syntheseergebnis und Leistungsfähigkeit

Die Auswertung der Untersuchungen zu den angeführten Einflüssen zeigt, dass Fassadenlösungen mit ausdifferenziert entwickelten Bauteilen ausgerüstet werden können, um unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen. Die Ausdifferenzierung findet dabei hinsichtlich der minimal zu erfüllenden Zielwerte für die einzelnen Anforderungen statt. Zudem ermöglichen anpassungsfähige Komponenten die Steuerung und Regelung durch die Veränderung und Varianz der grundlegenden Faktoren. Diese aktiven Komponenten werden entsprechend der maximal notwendigen Leistungserfüllung ausgelegt. Dies wird bei masse- und ressourcensparenden Lösungen durch ein aktives Konstruktionselement erfüllt, das jeden der grundlegenden Faktoren regulieren kann.

Für die Untersuchung des exemplarischen Teilsystems eines Fassadenflächenelementes wurden durch die Systemsynthese mehrere kombinierbare Bauelemente entwickelt, von denen das fluidgefüllte Taschengewebe durch die Anpassungsfähigkeit insbesondere auf die drei bauphysikalischen Anforderungen des Wärme-/Feuchteinflusses, des Schallschutzes und des Brandschutzes eingehen kann. Wesentliche Charakteristik dieses Syntheseergebnisses ist, dass die unterschiedlichen Lagen, Schichten und Schalen, der im Beispiel textilen Bauelemente, so ausdifferenziert sind, dass für die einzelnen Anforderungen jeweils die beste Position im Gesamtaufbau identifiziert und mit den relevantesten Faktoren durch einen textilen Werkstoff oder eine textile Werkstoffkombination umgesetzt wird. Ergänzend wird ein Bauelement eingeführt, welches aktiv auf die bauphysikalische Wirkweise Einfluss nimmt und sich durch die Regulierung von Stoff, Masse und Energie als funktionsintegriertes Bauteil mit hohem Integrationsniveau auszeichnet. Die Mehrfachverwendung eines Bauelementes für die Temperierung, die Wärme- und Feuchtereulation, die Bau- und Raumakustik sowie für den anlagentechnischen Brandschutz nutzt die gleichen Ressourcen für unterschiedliche Funktionen und ermöglicht den gezielten, zeitlich begrenzten Einsatz. Die optimale Einstellung des Flächenelements hängt letztendlich von der Einbettung in den gesamten Lagenaufbau und von der Steuerung ab, um auf die jeweils relevanteste Anforderung eingehen zu können.

Die Einschätzung, für welche Funktionsbereiche eine Leistungserfüllung durch die Weiterentwicklung und Umsetzung sinnvoll ist, wird anhand einer Bewertungsmatrix deutlich. Demnach sind bei transparenten Funktionsbereichen und der zugrunde liegenden Wichtung der Kriterien die Lösungsvarianten mit Glaswerkstoffen am leistungs- und zielführendsten. Transluzente Funktionsbereiche sind für leichte, textile Konzepte die zielversprechendste Entwicklungstendenz, da sie durch die Flexibilität der Herstellprozesse, die Masse- und Ressourceneinsparung das Spannungsfeld zwischen Belichtung und Leistungserfüllung ausgleichen können. Für die opaken Funktionsbereiche sprechen wiederum die Anpassungsfähigkeit und die Einsparungspotenziale für leichte, textile Konstruktionen. Ökonomisch sind herkömmliche Lösungen jedoch durch die existierenden, im Markt etablierten Prozesse bevorzugt. Tabelle 39 führt die Zielerfüllung der einzelnen Kriterien in Bezug auf die aussichtsreichsten Lösungsvarianten der einzelnen Funktionsbereiche zusammen. Die Wichtung erfolgt entsprechend der Annahmen aus der Analyse. Im Anschluss zeigt Abbildung 79 die Umsetzung der leistungsfähigen

ren Lösung für jeden Funktionsbereich in einem prototypischen Schnitt des Fassadenflächenelementes.

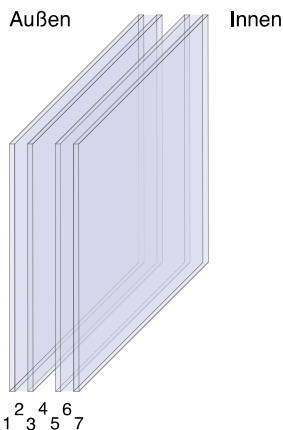
Die beispielhaft entwickelten Lösungen für ein Fassadenflächenelement zeigen, wie die Anwendung des Niveaus der Funktionsintegration als Vergleichswert im Entwurfs- und Entwicklungsprozess als Indikator genutzt werden kann. Die Einschätzung über den Stellenwert einzelner Parameter und das intuitive Handeln der Akteure im konkreten Planungs- und Gestaltungsprozess bleibt wesentlich von der jeweiligen Planungssituation, dem Kontext und den Intentionen der handelnden Akteure geprägt.

Tabelle 39: Bewertungsmatrix zum Leistungsvergleich der untersuchten Lösungen

Kriterium	Wichtung	transparent				transluzent				opak			
		TL		SD		TL		SD		TL		SD	
Konstruktive Einbindung	0,6	10	6,0	6	3,6	10	6	6	3,6	10	6	6	3,6
Witterungsschutz	0,6	10	6,0	10	6,0	10	6,0	10	6,0	10	6,0	10	6,0
Belichtung	1,2	10	12	10	12	10	12	10	12	1	1,2	1	1,2
Wärme/Feuchte	1,2	6	7,2	8	9,6	8	9,6	8	9,6	10	12	10	12
Akustik	1,2	2	2,4	8	9,6	10	12	8	9,6	10	12	8	9,6
Brandschutz	1,2	6	7,2	8	9,6	8	9,6	6	7,2	8	9,6	8	9,6
Ressourcenverbrauch*	0,8	8	6,4	8	6,4	8	6,4	4	3,2	8	6,4	2	1,6
Energieverbrauch*	0,4	6	2,4	8	3,2	6	2,4	4	1,6	6	2,4	2	0,8
Umweltverträglichkeit	0,8	8	6,4	8	6,4	8	6,4	6	4,8	8	6,4	4	3,2
Ästhetik	1,0	6	6,0	6	6,0	6	6,0	6	6,0	6	6,0	6	6,0
Herstellung	0,4	10	4,0	8	3,2	10	4,0	6	2,4	10	4,0	4	1,6
Betrieb	0,3	8	2,4	8	2,4	8	2,4	6	1,8	8	2,4	4	1,2
Wartung/Instandsetzung	0,3	8	2,4	8	2,4	8	2,4	6	1,8	8	2,4	4	1,2
Gesamtzielerfüllung		70,8		80,4		85,2		69,6		76,8		57,6	

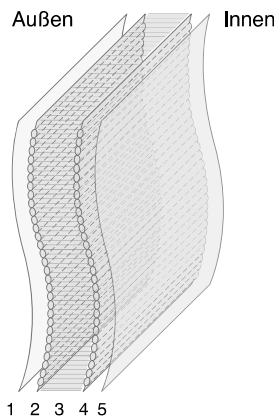
Anmerkung: TL textil-leichte Lösung; SD verglichene Standardlösung; * im Betrieb, Herstellung, Entsorgung

Transparentes Flächenelement



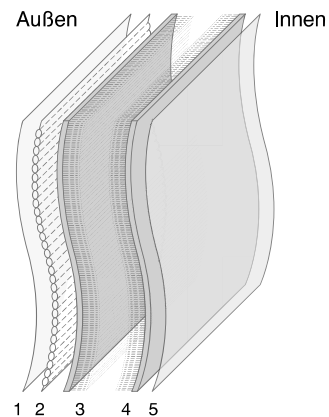
- 1; 7 Deckglasscheibe
- 2; 6 Fluidschicht
- 3; 5 Kernglasscheibe
- 4 Vakuum- oder Kryptonschicht

Transluzentes Flächenelement



- 1 PVC/PES- oder PTFE/Glasfaser-Gewebe
- 2; 4 Kollektorschicht
- 3 Aerogelgefülltes Abstandsgewirk
- 5 PES- oder Glasfaser-Gewebe

Opakes Flächenelement



- 1 PVC/PES- oder PTFE/Glasfaser-Gewebe
- 2 Kollektorschicht
- 3; 4 Verbundvliesstoff
- 5 PES-Gewebe

Abbildung 79: Prinzipskizzen der zielführenden Lösungsvarianten

Abschließend wurden die drei prinzipiellen Funktionsbereiche (transluzent, opak und transparent) als eigenständige Elemente umgesetzt. Damit ist eine Beispielanordnung für eine ultraleichte, Membranfassade entstanden, die jeweils die entsprechend entwickelten Bauteile einsetzt und die Ergebnisse hinsichtlich der Lichttransmission und der Akustik erlebbar macht. Abbildung 80 zeigt die 3 Fassadenelemente.



Abbildung 80: Innenansicht von 3 Modulen einer Membranfassaden (transluzent, opak und transparent)

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Zur Erreichung der definierten Ziele wurden vier Arbeitsphasen definiert:

- AP1: Grundlagen
- AP2: Charakterisierung der Systemaufbauten
- AP3: Optimierung der Systemlösung
- AP4: Dokumentation

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets erfolgte eine breit angelegte Recherche mit Inhalten zur Bau- und Raumakustik, der Elektroakustik aber auch zu Herstellungs- und Produktionsverfahren sowie zum Stand der Technik in der Automobilindustrie und der Luft- und Raumfahrttechnik. Die Recherche wurde in ZOTERO-Datenbanken strukturiert dokumentiert.

Aus den Erfahrungen der vorangegangenen Projekte, der Diskussion mit dem Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart (LBP) und den vorhandenen Voruntersuchungen wurden Funktions- und Anwendungsbeschreibungen für Materialien, Werkstoffe, Systeme und für Adaptionismethoden verfasst. Diese dienten als Grundlage für die Erstellung einer Bewertungsmatrix für Systemlösungsansätze und für die Optimierung der später entwickelten Lagenaufbauten.

Auf Grundlage der Recherche wurde für die Serienuntersuchungen der Werkstoffe und Materialien die Impedanzrohrmethode als sinnvoll bestätigt. Die Serienuntersuchung von textilen Werkstoffen und die Einarbeitung in die institutsinterne Datenbank wurden durchgeführt. Die Ergebnisse der Recherche flossen auch in Dokumente zur Charakterisierung von Werkstoffeigenschaften und zur Charakterisierung von Systemlösungen ein. Die Erhebungsbögen dienten zur Verifizierung der jeweiligen Eigenschaften und können mittels der gewichteten Bewertungsmatrix zu aussagekräftigen Vergleichen herangezogen werden.

Der Mehrlagenaufbau wurde bei der Systementwicklung aus den physikalischen, werkstoffspezifischen und konstruktiven Grundlagen heraus im Rahmen der vorangegangenen Forschungsprojekte als sinnvolle Konfiguration ermittelt.

Mit diesen Einschätzungen und Expertisen wurden die zu verwendenden Werkstoffe festgelegt.

Im weiteren Schritt war der prinzipielle Aufbau der Kernlagen zu definieren. Aus den Variantenstudien ergab sich als leistungsfähigste Lösung eine Schichtung in Anlehnung an in der Raumakustik typisch verwendeten Platten-, Helmholtz- sowie Breitband-Resonatoren.

Aus den Vorentwürfen, den Variantenstudien und der Einschätzung zur Herstellbarkeit wurde ein zweischichtiger, vernadelter Lagenaufbau entwickelt, der die akustische Leistungsfähigkeit (Schalldämmung) eines rein textilen Aufbaus demonstrieren soll und vielseitig in den zweischaligen Systemaufbauten Anwendung finden kann.

Der entwickelte Lagenaufbau kann als Ausgangs- beziehungsweise Vorprodukt für verschiedene, akustisch passiv wirkende Systeme dienen und ist damit "universell" einsetzbar. Hierbei sind insbesondere mehrschalige Aufbauten aus zwei gespiegelten Schichten mit luft- und feuchtedichten Deckschichten sowie mehrschaliger Aufbauten aus zwei gespiegelten Schichten mit beschwerenden Deckschichten interessant.

Erste Konzepte zur Umsetzung einer Anpassungsfähigkeit der Masse konnten nach der Entwicklung der ersten passiven Systeme mit dem Kooperationspartner GST GmbH auf die Realisierbarkeit hin geprüft und in Prototypen umgesetzt werden.

Die Charakterisierung der Systemlösungen wurde in Arbeitsphase zwei realisiert. Neben der Serienprüfung im Impedanzrohr wurden die prinzipiell erarbeiteten Systemlösungen im Türenprüfstand hinsichtlich der Schalldämmung validiert. Insgesamt wurde die Schalldämmung von sieben Varianten gemessen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Schalldämm-Maße aller im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Konstruktionen weder den typischen Verlauf einschaliger noch den zweischaliger Systeme zeigen. Charakteristisch ist dabei, dass die Schalldämm-Kurven bis 800 Hz in ihrem Verlauf eher dem Verhalten gleich schwerer einschaliger Bauteile ähneln. Die Luftschicht, bzw. die Hohlraumfüllung zwischen den beiden äußeren Schalen scheint sich in akustischer Hinsicht nicht wie eine Feder, sondern eher wie eine biegeeweiche Platte zu verhalten, so dass eine starre Kopplung zwischen den Schalen besteht.

Nach Abschluss der Messreihe im Türenprüfstand und nach der Auswertung der Ergebnisse wurden in Arbeitsphase 3 die unterschiedlichen Lösungen hinsichtlich weiterer Anforderungen an Fassaden untersucht. Damit konnte für die prinzipiellen Funktionsbereiche einer Fassade (transparent, transluzent und opak) eine übergeordnete Einschätzung zur Leistungsfähigkeit dieser masse- und ressourcensparenden sowie anpassungsfähigen Lösungskonzepte erarbeitet werden. Die Untersuchungen wurden mit Simulationen zum Wärmedurchgang und zum Feuchteverhalten, zur Belichtung und zum Brandschutz durchgeführt. Insbesondere für den Aspekt des Brandschutzes konnten prinzipielle Lösungen entwickelt werden. Eine messtechnische Prüfung war im Rahmen des Forschungsprojektes diesbezüglich jedoch nicht möglich. Diese Untersuchungen müssen folgen, da sowohl interessante werkstoffimmanente, als auch anlagentechnische Lösungskonzepte im Forschungsprojekt aufgezeigt werden konnten. Diese Lösungsansätze führen eine Funktionsintegration und die aktive Beeinflussung von wechselnden Randbedingungen und Anforderungen in einem Gesamtkonzept weiter. Nach der Einordnung von zielführenden Lösungen wurden prototypische Fassadenelemente umgesetzt.

In Arbeitsphase 4 wurden die Arbeitsergebnisse dokumentiert. Zudem wurden während der Projektlaufzeit mehrere Zeitschriftenartikel und Konferenzbeiträge verfasst und publiziert sowie die Ergebnisse in Ausstellungen gezeigt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

8.2 Fazit

Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen haben die Möglichkeiten zum Bau von sinnvollen, klimatechnisch hochwertigen, schalltechnisch funktionierenden, mehrlagigen, textilen Gebäudehüllen aufgezeigt. Dies konnte insbesondere mit Hilfe der im Forschungsprojekt durchgeführten, breiten Überprüfung der bauphysikalischen Parameter zum Wärme- und Feuchteverhalten, zur Bau- und Raumakustik sowie zum Brandschutz und zur Belichtung gezeigt werden.

Wesentlich für diese prinzipiellen Aussagen waren die detaillierten Untersuchungen zum bau- und raumakustischen Verhalten ultraleichter Lagenaufbauten. Im Rahmen des Validierungsprozesses wurde die Relevanz der richtigen Werkstoffauswahl, der richtigen Lagenschichtung und der zielführendsten Masseverteilung im Lagenaufbau gezeigt. Weiterer wichtiger Aspekt waren die Erkenntnisse zur anpassungsfähigen und einstellbaren Masseverteilung in solchen leichten Aufbauten, um die Konstruktionen an unterschiedliche Nutzungsbedingungen anzupassen und dadurch insgesamt eine optimierte, effektive und effiziente Lösung zu entwickeln.

Als Ergebnisse wurde ein Verbundvliesstoff, ein Aerogel gefülltes Abstandsgewirk und ein fluidgefülltes Taschengewebe als drei wesentliche Bauteile für ultraleichte Fassadenlösungen entwickelt, umgesetzt und getestet. Diese Bauteile gilt es nach dem Forschungsprojekt weiter zu optimieren und zur Marktreife hin zu entwickeln.

Die Untersuchungen wurden von technikwissenschaftlichen Vorgehensweisen und Methoden zur zielführenden und schnellen Lösungsfindung begleitet, um bei der zukünftigen Lösungsfindung zu komplexen Fragestellungen noch zielgerichteter und methodisch stringenter agieren zu können.

Weitere Anschlussprojekte sowohl zur methodischen Lösungsfindung wie zu den entwickelten Bauteilen für ultraleichte Fassadenlösungen sind wünschenswert, um die Erkenntnisse in einem absehbaren Zeithorizont in Produkte und Fassaden umsetzen zu können.

9 Literatur

- [1] Schmid, F., et al., Schallschutz und akustische Wirkweise bei mehrlagigen textilen Fassadensystemen. Bauphysik, 2014. 01/2014.
- [2] Bäumer, R., et al., Entwicklung leichter Profile und Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen für Anwendungen in der textilen Gebäudehülle und der Fenstertechnik - PROFAKU. 2011, Faserinstitut Bremen e.V.; Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart; Fachbereich Architektur, Fachhochschule Dortmund: Bremen, Stuttgart, Dortmund.
- [3] Haase, W., et al., Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen. 2011, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart: Stuttgart.
- [4] Mommertz, E., Akustik und Schallschutz: Grundlagen Planung Beispiele. 1. Aufl. ed. 2008, München: Institut f. intern. Architektur-Dok.
- [5] Lutz, P., Lehrbuch der Bauphysik: Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. 2002, Stuttgart; Leipzig; Wiesbaden: Teubner.
- [6] Mühlberger, J., Zur Bauphysik und zur Konstruktion von mehrlagigen gedämmten Membranbauwerken, in Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren. 2005, Universität Stuttgart.
- [7] Schnubel, A., Implementierung klimatisierender Funktionsmaterialien in textile Gebäudehüllen, in Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren. 2003, Universität Stuttgart.
- [8] Holzbach, M., Adaptive und konditionierende textile Gebäudehüllen auf Basis hochintegrativer Bauteile: ein interdisziplinäres Funktions- und Formenrepertoire adaptiver Hüllen unter Einsatz von hochisolierenden Keramiken und wärmespeichernden Phasenwechselmaterialien, in Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren. 2009, Universität Stuttgart.
- [9] Schmid, F., Die Funktionsintegration als Indikator im Gestaltungsprozess von Leichtbaustrukturen, Dissertation in Vorbereitung; Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren. 2014, Universität Stuttgart.
- [10] Gleich, A.v., Industrial Ecology - Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen, ed. S. Gößling-Reisemann. 2008, Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- [11] Hegger, M., et al., Energie Atlas: nachhaltige Architektur. 2008, Basel: Birkhäuser.
- [12] Lindemann, U., Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 2007, Berlin; Heidelberg: Springer.
- [13] Bock, T. and E. Erdell, Methodenanwendung in der Hochbauplanung - Ergebnisse einer Schwachstellenanalyse. 2007, Stuttgart: IRB Verlag.
- [14] Breiing, A. and M. Flemming, Theorie Und Methoden Des Konstruierens. 1993: Springer London, Limited.
- [15] Haase, W., et al., Adaptive textile und folienbasierte Gebäudehüllen. Bautechnik, 2011. 88(2): p. 69.
- [16] Haase, W., F. Schmid, and W. Sobek, Adaptive textile Gebäudehüllen zur Verbesserung der Raum- und Stadtraumakustik sowie der Raumqualität. 2011, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart: Stuttgart.
- [17] DIN, D.I.f.N., DIN EN ISO 10534.
- [18] Beylerian, G.M., A. Dent, and B. Quinn, Ultra materials: innovative Materialien verÄndern die Welt. 2007, München; Berlin; London; New York: Prestel.

- [19] Mehra, S.-R., et al., Akustisches Verhalten von Hüllenkonstruktionen aus Folien und Membranen - AHAFUM. 2004, Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart: Stuttgart.
- [20] Maute, D., Technische Akustik und Lärmschutz. 2006, München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser Verl.
- [21] Fuchs, H., Schallabsorber und Schalldämpfer. 2010: Springer VDI.
- [22] Knippers, J. and J. Cremers, Atlas Kunststoffe + Membranen Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion. 2010, München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation.
- [23] Möser, M., Technische Akustik. 2007, Berlin; Heidelberg; New York: Springer.
- [24] Gries, T., K. Klopp, and A. Textiltagung, Füge- und Oberflächentechnologien für Textilien Verfahren und Anwendungen. 2007, Berlin: Springer.
- [25] Klaus, T., W. Haase, and W. Sobek, Simulationstool für mehrlagige Aufbauten – Dokumentation. 2011, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart: Stuttgart.
- [26] Schmid, F., W. Haase, and W. Sobek, Textile and Film Based Building Envelopes – Lightweight and Adaptive, in Structural Membranes 2013. 2013: Munich.
- [27] Jobst, E., Allgemeine Probleme technikwissenschaftlicher Erkenntnis, in Erkennen und Gestalten: eine Theorie der Technikwissenschaften. 2006, Ed. Sigma: Berlin.
- [28] Petsche, H.-J., Technisches Handeln, in Erkennen und Gestalten: eine Theorie der Technikwissenschaften. 2006, Ed. Sigma: Berlin.
- [29] Dörner, D., Pfadwechsel verstehen, verantworten, managen und der Umgang mit Komplexität - Umgang mit Komplexität, in Industrial Ecology. 2008, Vieweg + Teubner: Wiesbaden.
- [30] Gößling-Reisemann, S., Pfadwechsel verstehen, verantworten, managen und der Umgang mit Komplexität - Von der Verschränktheit der Nachhaltigkeits-Dimensionen, in Industrial Ecology. 2008, Vieweg + Teubner: Wiesbaden.
- [31] Jischa, M.F., Pfadwechsel verstehen, verantworten, managen und der Umgang mit Komplexität - Management trotz Nichtwissen, in Industrial Ecology. 2008, Vieweg + Teubner: Wiesbaden.
- [32] Lutz-Kuhnisch, B., Partielle Lösungen und Praxisbeispiele der Industrial Ecology – Partielle Lösungen für eine nachhaltige Entwicklung industrieller Systeme, in Industrial Ecology. 2008, Vieweg + Teubner: Wiesbaden.
- [33] Kornwachs, K., Funktions- und Strukturkonzepte, in Erkennen und Gestalten: eine Theorie der Technikwissenschaften. 2006, Ed. Sigma: Berlin.
- [34] Albers, A. and N. Burkardt, Systemleichtbau - ganzheitliche Gewichtsreduzierung, in Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung. 2011, Hanser Fachbuchverlag: München.
- [35] Roth, K., Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 1: Konstruktionslehre. 2000, Berlin; Heidelberg: Springer.
- [36] Ziebart, J.R., Ein konstruktionsmethodischer Ansatz zur Funktionsintegration. 2012, München: Verlag Dr. Hut.
- [37] Tobias, M., et al., Partielle Lösungen und Praxisbeispiele der Industrial Ecology, Energie- und Ressourceneffizienz durch Ecodesign, in Industrial Ecology. 2008, Vieweg + Teubner: Wiesbaden.
- [38] Herzog, T., R. Krippner, and W. Lang, Fassaden Atlas. 2004, Basel; München: Birkhäuser; Edition Detail.

- [39] Kühl, L., P. Eickmeyer, and E. Winkler, Entwicklung von multifunktionalen Elementfassaden zur energetischen Sanierung von Nicht-Wohngebäuden. 2009, Technische Universität Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik: Braunschweig.
- [40] Staib, G., A. Dörrhöfer, and M. Rosenthal, Elemente und Systeme: Modulares Bauen „Äi Entwurf, Konstruktion, neue Technologien. 2013, Berlin: Birkhäuser.
- [41] Terzidis, K., Algorithmic architecture. 2006, Oxford; Burlington, MA: Architectural Press.
- [42] Lobel, J.M., Building information: means and methods of communication in design and construction. 2008, Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, Mass.
- [43] Haase, W., F. Schmid, and W. Sobek, Adaptive textile Hüllsysteme zur Optimierung der Raum- und Stadtraumakustik. 2013, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart: Stuttgart.
- [44] Seidel, M., Textile Hüllen: Bauen mit biegeweichen Tragelementen; Materialien, Konstruktion, Montage. 2008, Berlin: Ernst.
- [45] Koch, K.-M. and B. Forster, Bauen mit Membranen der innovative Werkstoff in der Architektur. 2004, München Berlin [u.a.]: Prestel. 263 S.
- [46] Schittich, C., et al., Glasbau Atlas. Konstruktionsatlanten. Auflage: 2 ed. 2006, Basel; München: Birkhäuser.
- [47] Weller, B. and S. Tasche, Glasbau 2013. Auflage: 1. Auflage ed. 2013: Ernst & Sohn.
- [48] Stopper, J., Das grüne Fassadenelement "Fluidglass", in Architekturzeitung. 2013: Stuttgart. p. 1.
- [49] Badke, S., Auswahl automatisierter, flächiger Verbindungstechniken für den Einsatz bei adaptiven, mehrlagigen textilen Gebäudehüllen. 2012, HS Albstadt-Sigmaringen: Albstadt-Sigmaringen, Stuttgart.
- [50] Energieeinsparverordnung, in Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. 2009.
- [51] Möser, M., Messtechnik der Akustik. 2007, Berlin: Springer Berlin.
- [52] Maysenhölder, W., Zur Prognose der Schalldämmung zweischaliger Membrankonstruktionen. Bauphysik, 2006. 28: p. 289.
- [53] Buchholz, H., et al., Taschenhandbuch Brandschutz. 2012, München: Detail - Inst. für Internat. Architektur-Dokumentation.
- [54] Kunkelmann, J., Adaptive mehrlagige textile Gebäudehüllen. 2007, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH): Karlsruhe.
- [55] DIN, D.I.f.N., DIN 4102.
- [56] DIN, D.I.f.N., DIN EN 13501.
- [57] ISO/CIE, ISO 15469:2004, Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky. 2007, Washington: Multiple. Distributed through American National Standards Institute.
- [58] DIN, D.I.f.N., DIN 5034.
- [59] Tageslicht in Innenräumen ; Bd. (1,1983): Allgemeine Anforderungen. Vol. (1,1983). 1983, Berlin: Beuth.
- [60] Mehra, S. R.: Berechnung der Luftschalldämmung von einschaligen Trennbauteilen endlicher Abmessung. Dissertation, Universität Stuttgart (1995).
- [61] Mehra, S. R., Scholl, W. und Weber, L.: Sound screen or noise barrier for noisy machinery, streets, railway, etc. Patentschrift DE 19652871 C2, Deutsches Patent- und Markenamt (1999).

- [62] Mehra, S. R.: Aufblasbare ultraleichte Schallschirme. Fortschritte der Akustik - DAGA 2001, Hamburg-Harburg (2001), S. 538 - 539.
- [63] Zäh, I.: Luftschalldämmung von zweischaligen Konstruktionen aus Folien und Membranen unter Variation von konstruktiven und mechanischen Parametern. Diplomarbeit, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, Universität Stuttgart (1999).
- [64] Müller, M.: Akustische Materialkennwerte und Luftschalldämmung von Folien und Membranen. Diplomarbeit, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, Universität Stuttgart (1988).
- [65] Fasold, W. und Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis – Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. 2. Auflage, Huss-Medien GmbH und Verlag Bauwesen, Berlin (2003).
- [66] Mehra, S.R.: Bau- und Raumakustik. Vorlesungsumdruck, Universität Stuttgart WS 2010/11 (2010).
- [67] Cremer, L. und Heckl, M.: Körperschall. Springer-Verlag, Berlin (1996).
- [68] Kuttruff, H.: Akustik. Eine Einführung. S. Hirzel Verlag Stuttgart, Leipzig (2004).
- [69] Leissa, A.W.: Vibration of plates. NASA, Washington D.C. (1969).
- [70] Mehra, S. R., Maysenhölder, W., Leistner, Ph. und Teller, P.: Akustisches Verhalten von Hüllkonstruktionen aus Folien und Membranen – AHAFUM. Abschlussbericht des DFG-Projektes GE 368/24-1, Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart (2004)
- [71] Tieke, B.: Makromolekulare Chemie – Eine Einführung. 3.Auflage, VCH-Verlag, Weinheim (2014).
- [72] Kurtze, G.: Light-weight walls with high transmission loss. *Acustica* 9 (1959), S. 441-445.
- [73] Hashimoto, N., Katsura, M., Yasuoka, M. und Fujii, H.: Sound insulation of a rectangular thin membran with additional weights. *Applied Acoustics* 33 (1991), H. 1, S. 21-43.
- [74] Oshima, T. und Sakuma, T.: Numerical study on sound insulation performance of membranes with additional weights. *Proc. ICA Rome* (2001) (CD-ROM).
- [75] Hashimoto, N., Katsura, M., Nishikawa, Y., Katagihara, K., Torii, T. und Nakata, M.: Experimental study on sound insulation of membranes with small additional weights for applications to membrane structures. *Applied Acoustics* 48 (1996), H. 1, S. 71-84.
- [76] Bliss, D. und Danilov, P.: Sound reflection from a flexible structure with impedance discontinuities using local/global homogenization. *Proc. Forum Acusticum Sevilla 2002* (paper RBA-03-006-IP on CD-ROM).
- [77] Maysenhölder, W.: Sound transmission through periodically inhomogeneous anisotropic thin plates: Generalizations of Cremer's thin plate theory. *ACUSTICA acta acustica* 84 (1998), S. 668-680.
- [78] Maysenhölder, W.: Transmission Loss of Plates with Internal Resonators Modelled by Harmonic Oscillators with Frequency Dependent Complex Mass and Spring Stiffness. *Proc. Euronoise* (2003), Neapel (CD-ROM, paper 057-IP).
- [79] Kiyama, M., Sakagami, K., Tanigawa, M. und Morimoto, M.: A Basic Study on Acoustic Properties of Double-leaf Membranes. *Applied Acoustics* 54 (1998), H. 3, S. 239-254.
- [80] Molozidis, G.: Luftschalldämmung von ein- und zweischaligen Konstruktionen aus Folien und Membranen unter Variation der abstrahlenden Fläche, des Fülldrucks und der konstruktiven Parameter. Diplomarbeit, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, Universität Stuttgart (2002).
- [81] Thoms, M.: Luftschalldämmung ein- und zweischaliger sowie aufblasbarer Konstruktionen aus Folien und Membranen unter Variation von akustischen, konstruktiven und mechanischen Parametern. Diplomarbeit, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, Universität Stuttgart (2003).

- [82] Zäh, I.: Luftschalldämmung von zweischaligen Konstruktionen aus Folien und Membranen unter Variation von konstruktiven und mechanischen Parametern. Diplomarbeit, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, Universität Stuttgart (1999).
- [83] Mechel, F. P.: About the partition impedance of plates, shells and membranes. A-CUSTICA acta acustica 86 (2000), S. 1054-1058.
- [84] Haberkern, R. und Teller, P.: Zur Berechnung der Schalldämmung von Folien und Membranen. IBP-Mitteilung 29 (202) Nr. 417.
- [85] Maysenhölder, W.: LAYERS – ein Werkzeug zur Untersuchung der Schalldämmung von Platten aus homogenen anisotropen Schichten. IBP-Mitteilung 26 (1999), Nr. 347.
- [86] DIN EN ISO 10140 – Teil 1: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte (2010 und 2012).
- [87] DIN EN ISO 10140 – Teil 5: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen (2010).
- [88] Akustik – Fraunhofer IBP: http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Kompetenzen/Akustik/Pruefstaende/Tuer_PT.pdf
- [89] DIN EN ISO 10140 – Teil 2: Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand: Messung der Luftschalldämmung (2010).
- [90] DIN EN ISO 717 Teil 1: Akustik Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen: Luftschalldämmung (2013).
- [91] Weber, L. und Mehra, S. R.: Luftschalldämmung und akustische Materialeigenschaften von Folien und Membranen. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 49 (2002), N4. 4, S. 129 – 136.

10 Anhang

10.1 Datenblatt zur Werkstoffcharakterisierung

Die nachfolgend abgedruckten Datenblätter wurden zur Bewertung und Einordnung unterschiedlicher Werkstoffe und deren Eigenschaften verwendet.

ARAKO - Werkstoffcharakterisierung

Grundlegende Charakterisierung				
Werkstoffbezeichnung				
Produktbezeichnung				
Größe	Einheit			
Flächengewicht	g/m ²			
Dicke	mm			
Spezifische Steifigkeit Θ				

Ausgangswerkstoffe				
Größe	Einheit			
Fasermaterial				
Dichte	kg/m ³			
Fadendicken	mm			
Titer	tex			
Bruchdehnung				
Faserlänge	mm			

Verarbeitung / Zwischenprodukte				
Größe	Einheit			
Fadendichte	Fäden/m			
Bindungsart				
Rapport				
Flottierung				
Porosität σ				
Strukturfaktor X				
Längenbezogener Strömungswiderstand Ξ				
Spezifischer Strömungswiderstand RS				
Faservolumenanteil	%			

Seite 1 von 3

[illegible]

Größe	Einheit	Vergleichswert 1	Vergleichswert 2
chemisch			
Beschichtung			
Beständigkeit (chem)			
wärme / feuchtetechnisch			
wasserdampfdiffusionsäquivalente	m		
Luftschichtdicke $s_{d,l}$			
Feuchtegehalt	%		
Wärmeleitfähigkeit λ	W/(m·K)		
Wärmekapazität C	J/K		
Spezifische Wärmekapazität c	J/(kg·K)		
Wärmespeicherszahl s	J/(m³·K)		

funktional / bauphysikalische Charakteristik				
Größe	Einheit		Vergleichswert 1	Vergleichswert 2
licht- / strahlungstechnisch				
Brechungsindex				
Lichttransmission				
Alterungsbeständigkeit				
Beständigkeit (UV)				
akustisch				
Absorptionsgrad α	0...1			
Transmissionsgrad τ	0...1			
Dissipationsgrad δ	0...1			
Reflexionsgrad ρ	0...1			
Schalldämm-Maß R	dB			
feuertechnisch				
Brandverhalten	Kategorie			
Flammpunkt	°C			

10.2 Datenblatt zur Systemcharakterisierung

Die nachfolgend abgedruckten Datenblätter wurden zur Bewertung und Einordnung unterschiedlicher Lagenaufbauten und Systemzusammenhänge sowie deren Leistungspotenzial verwendet.

ARAKO - Systemcharakterisierung

Leistungsfähigkeit				
Bauweise	☐	tragend		
	x	nicht tragend	+ modulare Vorinstallation + tragwerksunabhängige Rezyklierbarkeit	
	☐	einschalig		
	x	mehrschalig	+ Aktivierung von Luftschichten zur Entlüftung / Entfeuchtung	
	☐	einschichtig		
	x	mehrschichtig	+ Anpassung an anwendungsspezifische Anforderungen	
	☐	Pfosten-Riegel		
	x	Elementfassade	+ modulare Vorinstallation + hoher Automatisierungsgrad + hoher Vorfertigungsgrad	

Schutzfunktionen					
Wärmeschutz					
(außen)	Lage	Bezeichnung	Material	Dicke	Funktion
	1				Dämmen / Dämpfen / Speichern / ...
	2				
	3				
	4				
(innen)	5				
	6				
Zielwert	$U_{gmax} = 0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$				
Erreichbarkeit					
Bemerkung					
Feuchteschutz					
(außen)	Lage	Bezeichnung	Material	Dicke	Funktion
	1				Dichten / Sperren / ...
	2				
	3				
	4				
(innen)	5				
	6				
Bemerkung					

Schutzfunktionen					
Schallschutz	Lage	Bezeichnung	Material	Dicke	Funktion
(außen)	1				Dämmen / Dämpfen / ...
	2				Reflektieren / Absorbieren / ...
	3				Streuen / Bündeln / ...
	4				
	5				
(innen)	6				
Zielwert		$R'_{W\text{res}} = 35 \text{ dB}$	$R'_{W\text{res}} = 50 \text{ dB}$		
Erreichbarkeit					
Bemerkung					
Lufthaushalt	Lage	Bezeichnung	Material	Dicke	Funktion
Temperieren					
Befeuchten					
Filtern					
Bemerkung					
Belichtung	Lage	Bezeichnung	Material	Dicke	Funktion
Tageslichtnutzung					PV / Lenkung / ...
Sonnen- und Blendschutz					mechanischer Schutz / ...
Zielwert		Lichttransmissionsgrad: mind. 10 %			
Bemerkung					
Beleuchtung	Lage	Bezeichnung	Material	Dicke	Funktion

Klassifikation nach funktionalen Kriterien			
Permeabilität für Luft			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
Maßnahmen	☐	geschlossen	
	☐	teildurchlässig / offen	
	☐	automatisiert geregelt	
	☐	manuell veränderbar	
	☐	...	
Permeabilität für Licht			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
Maßnahmen	☐	opak	
	☐	transluzent	
	☐	semitransparent	
	☐	automatisiert geregelt	
	☐	manuell öffnbar	
	☐	...	
Energiegewinn (Wärme)			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
Maßnahmen	☐	integriert	
	☐	möglich durch Zusatzmaßnahmen	
	☐	notwendig	
	☐	außgeschlossen da...	
	☐	...	
Energiegewinn (Strom)			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
Maßnahmen	☐	integriert	
	☐	möglich durch Zusatzmaßnahmen	
	☐	notwendig	
	☐	außgeschlossen da...	
	☐	...	
Veränderbarkeit der Struktur bzw. Oberflächen			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
	☐	nicht veränderbar	
	☐	mechanisch	
	☐	physisch strukturell	
	☐	chemisch substanzuell	
	☐	manuell geregelt	
	☐	automatisiert geregelt	
	☐	...	

Klassifikation nach funktionalen Kriterien

Veränderbarkeit zur Lüftung / Luftführung			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
	☐	nicht veränderbar	
	☐	mechanisch	
	☐	physisch strukturell	
	☐	chemisch substanzuell	
	☐	manuell geregelt	
	☐	automatisiert geregelt	
	☐	...	
Veränderbarkeit für die Lichtlenkung / Belichtung			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
	☐	nicht veränderbar	
	☐	mechanisch	
	☐	physisch strukturell	
	☐	manuell geregelt	
	☐	automatisiert geregelt	
	☐	...	
Veränderbarkeit zur Anpassung an den Wärme-/Feuchtehaushalt			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
	☐	nicht veränderbar	
	☐	physisch strukturell	
	☐	chemisch substanzuell	
	☐	manuell geregelt	
	☐	automatisiert geregelt	
	☐	...	
Veränderbarkeit der Akustik			
Erfüllbarkeit	niedrig		hoch
	☐	nicht veränderbar	
	☐	physisch strukturell	
	☐	chemisch substanzuell	
	☐	manuell geregelt	
	☐	automatisiert geregelt	
	☐	...	

Klassifikation nach konstruktiven Kriterien

Funktion im Tragsystem

nicht tragende Elemente

tragende Elemente

Anbindungsart an das Tragwerk

Aufbau in Schichten / Schalen

Hinterlüftung

Vorfertigungsgrad

der Vorprodukte

der Elemente

prognostizierbare "Flaschenhälse" bei
der Produktion

Mögliche / Notwendige ergänzende Maßnahmen

außen	möglich	notwendig	ausgeschlossen	Begründung
Wärmeschutz				
Sonnenschutz				
Mikroklima				
innen	möglich	notwendig	ausgeschlossen	Begründung
Blendschutz				
Sichtschutz				
Tageslichtlenkung				
Aktivierung von Bauteilen zur Energiespeicherung				

Mögliche / Notwendige ergänzende Gebäudetechnik

außen	möglich	notwendig	ausgeschlossen	Begründung
Kollektoren				
Photovoltaikpaneele				
...				
innen	möglich	notwendig	ausgeschlossen	Begründung
Konvektoren / Radiatoren				
künstliche Beleuchtung				
Klimatechnik				
...				

10.3 Skriptdateien zur Messdatenauswertung der Messungen mit dem Impe- danzrohr

Ermittlung der Kalibrierfunktion

```
1      %% Load the Data Information
2      % Load Data from MAT Files created by Electroacoustic Toolbox
3      % File M1-C.mat = Data & Time Calibration Mic 1 (Position 2)
4      % File M2-C.mat = Data & Time Calibration Mic 2 (Position 1)
5      % File O1-C.mat = Data & Time Calibration Speaker (Reference)
6      % File M1-TA.mat = Data & Time Total Absorption Mic 2 (Position 2)
7      % File M2-TA.mat = Data & Time Total Absorption Mic 1 (Position 1)
8      % File O1-TA.mat = Data & Time Total Absorption Speaker (Reference)
9
10     load('M1_C.mat');
11     load('M2_C.mat');
12     load('M1_TA.mat');
13     load('M2_TA.mat');
14     load('O_TA.mat');
15     load('O_C.mat');
16
17
18     %% Calculation of the Calibration Function H_C
19     % H_C = sqrt (H_C12 / H_C21);
20
21     %% Calculation of H_C12
22     % Data Converting
23     u = M1_TA.Data.Signal;
24     ut= M1_TA.Data.Time;
25
26     y = M2_TA.Data.Signal;
27     yt= M2_TA.Data.Time;
28
29     % Interpolation
30     t = 0:1/44100:15;
31     ui = interp1(ut,u,t,'nearest');
32     yi = interp1(yt,y,t,'nearest');
33
34     % Fast Fourier Transform
35     yfft = xcorr(ui,yi);
36     ufft = xcorr(ui,ui);
37
38     Fs = 1/min(diff(t));
39     NFFT = 2^(nextpow2(length(t))-1);
40     h = hamming(NFFT);
41     Y = fft(yfft(1:NFFT). *h',NFFT)/NFFT;
42     U = fft(ufft(1:NFFT). *h',NFFT)/NFFT;
43
44     f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
45
46     % Calculation of the Transfer Function H_C12
47     H_C12 = struct;
48     H_C12.x = Y(1:NFFT/2+1) ./ U(1:NFFT/2+1);
49
50     % Plot of H_C12
51     figure (3);
52     subplot(2, 1, 1);
53     plot(f,20*log10(abs(H_C12.x)));
54     xlabel('Frequency [Hz]');
55     ylabel('Magnitude(H_C12) [V/V]');
56     title('Plot of the Transfer Function (H_C12)')
57
58     subplot(2, 1, 2);
59     plot(f,angle(H_C12.x))
60     xlabel('Frequency [Hz]');
61     ylabel('Phase(H_C12) [18]');
62     title('Plot of the Transfer Function (H_C12)')
63
64     print -dpdf TransferFunctionH_C12;
65
66
67     %% Calculation of H_C21
68     % Data Converting
69     u = M1_C.Data.Signal;
70     ut= M1_C.Data.Time;
```



```

71
72 y = M2_C.Data.Signal;
73 yt= M2_C.Data.Time;
74
75 % Interpolation
76 t = 0:1/44100:15;
77 ui = interp1(ut,u,t,'nearest');
78 yi = interp1(yt,y,t,'nearest');
79
80 % Fast Fourier Transform
81 yfft = xcorr(ui,yi);
82 ufft = xcorr(ui,ui);
83
84 Fs = 1/min(diff(t));
85 NFFT = 2^(nextpow2(length(t))-1);
86 h = hamming(NFFT);
87 Y = fft(yfft(1:NFFT).*h',NFFT)/NFFT;
88 U = fft(ufft(1:NFFT).*h',NFFT)/NFFT;
89
90 f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
91
92 % Calculation of the Transfer Function H_C21
93 H_C21 = struct;
94 H_C21.x = Y(1:NFFT/2+1) ./ U(1:NFFT/2+1);
95
96 % Plot of H_C21
97 figure (4);
98 subplot(2,1,1);
99 plot(f,20*log10(abs(H_C21.x)));
100 xlabel(' Frequency [Hz]');
101 ylabel(' |Magnitude(H_C21) [V/V]|');
102 title('Plot of the Transfer Function (H_C21)')
103
104 subplot(2,1,2);
105 plot(f,angle(H_C21.x));
106 xlabel(' Frequency [Hz]');
107 ylabel(' Phase(H_C21) [18]');
108 title('Plot of the Transfer Function (H_C21)')
109
110 print -dpdf TransferFunctionH_C21;
111
112
113 %% Calculation of the Calibration Function H_C
114 H_C = struct;
115 H_C.x = sqrt( H_C12.x(1:NFFT/2+1) .* H_C21.x(1:NFFT/2+1));
116
117 % Plot of H_C
118 figure (5);
119 subplot(2,1,1);
120 plot(f,20*log10(abs(H_C.x)));
121 xlabel(' Frequency [Hz]');
122 ylabel(' |Magnitude(H_C) [V/V]|');
123 title('Plot of the Transfer Function (H_C)')
124
125 subplot(2,1,2);
126 plot(f,(angle(H_C.x)));
127 xlabel(' Frequency [Hz]');
128 ylabel(' Phase(H_C) [18]');
129 title('Plot of the Transfer Function (H_C)')
130
131
132 print -dpdf TransferFunctionH_C;
133
134 save('H_C', 'H_C');
135
136 close all
137
138

```

Ermittlung des Absorptions- und Reflexionskoeffizienten

```

1 %% Load the Data Information
2 % Load Data from MAT Files created by Electroacoustic Toolbox and H_C
3 % File H-C.mat = Calibration Function
4 % File M1-TA.mat = Data & Time Total Absorption Mic 2 (Position 2)
5 % File M2-TA.mat = Data & Time Total Absorption Mic 1 (Position 1)

```

```

6      % File O1-TA.mat = Data & Time Total Absorption Speaker (Reference)
7
8      load('H_C.mat');
9      load('M1_TA.mat');
10     load('M2_TA.mat');
11
12
13     %% Data Converting to calculate the Transfer Function
14     u = M1_TA.Data.Signal;
15     ut= M1_TA.Data.Time;
16
17     y = M2_TA.Data.Signal;
18     yt= M2_TA.Data.Time;
19
20
21     %% Interpolation
22     t = linspace(0,15.0,56000);
23     t = 0:1/44100:15;
24
25     ui = interp1(ut,u,t,'nearest');
26     yi = interp1(yt,y,t,'nearest');
27
28
29     %% Fast Fourier Transform
30     yfft = xcorr(ui,yi);
31     ufft = xcorr(ui,ui);
32
33     Fs = 1/min(diff(t));
34     NFFT = 2^(nextpow2(length(t))-1);
35     h = hamming(NFFT);
36     Y = fft(yfft(1:NFFT).*h',NFFT)/NFFT;
37     U = fft(ufft(1:NFFT).*h',NFFT)/NFFT;
38
39     f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
40
41
42     %% Calculation of the Transfer Function H12
43     H12 = struct;
44     H12.x = Y(1:NFFT/2+1) ./ U(1:NFFT/2+1);
45
46     % Plot of H12
47     figure (1);
48     subplot(2,1,1);
49     plot(f,20*log10(abs(H12.x)));
50     xlim([20,3200]);
51     xlabel('Frequency [Hz]');
52     ylabel('Magnitude(H12) [V/V]');
53     title('Plot of the Transfer Function (H12)')
54
55     subplot(2,1,2);
56     plot(f,angle(H12.x));
57     xlim([20,3200]);
58     xlabel('Frequency [Hz]');
59     ylabel('Phase(H12) [18]');
60     title('Plot of the Transfer Function (H12)')
61
62     print -dpdf TransferFunctionH12;
63
64
65     %% Calculation of the corrected Transfer Function H12c
66     H12c = struct;
67     H12c.x = H12.x(1:NFFT/2+1) ./ H_C.x(1:NFFT/2+1);
68
69     % Plot of H12c
70     figure (2);
71     subplot(2,1,1);
72     plot(f,20*log10(abs(H12c.x)));
73     xlim([20,3200]);
74     xlabel('Frequency [Hz]');
75     ylabel('Magnitude(H12c) [V/V]');
76     title('Plot of the Transfer Function (H12c)')
77
78     subplot(2,1,2);
79     plot(f,angle(H12c.x));
80     xlim([20,3200]);
81     xlabel('Frequency [Hz]');
82     ylabel('Phase(H12c) [18]');
83     title('Plot of the Transfer Function (H12c)')

```

```

84
85 print -dpdf TransferFunctionH12c;
86
87
88 %% Calculation of the Reflexion and Absorption Coefficients
89 %% Set Temperature tc
90 tc = 20.2;
91
92 %% Define Distance s between Mic 1 and Mic 2
93 s = 0.1
94
95 %% Define Distance x1 between Mic 1 and Reference Plain
96 x1 = 0.1
97
98 %% Calculate Propagation c
99 tk = tc + 273.15;
100 c0 = 343.2 * sqrt(tk/293)
101
102 %% Calculate Wavenumber k0
103 k0 = ((2 * pi * f) ./ c0) - (1i * 0.0194 * sqrt(f) ./ (c0 * 0.1));
104
105
106 %% Calculation
107 %% Calculate Reflection Factor r
108 r = ((H12c.x - exp(-1i * k0 * s)) ./ (exp(1i * k0 * s) - H12c.x)) * exp(2 * 1i * k0 * x1);
109
110 %% Calculate Reflection Coefficient rho
111 rho = (abs(r)).^2;
112
113 %% Calculate Absorption Coefficient alpha
114 alpha = 1 - rho2;
115
116
117 %% Final Plots
118 %% Plot of the reflection factor r
119 figure (3);
120 subplot(2,1,1);
121 plot(f,abs(r));
122 xlim([20,3200]);
123 ylim([0,10]);
124 xlabel('Frequency [Hz]');
125 ylabel('Magnitude (r)');
126 title('Plot of Reflection Factor (r)')
127
128 subplot(2,1,2);
129 plot(f,imag(r));
130 xlim([20,3200]);
131 xlabel('Frequency [Hz]');
132 ylabel('Phase (r) [18]');
133 title('Plot of Reflection Factor (r)')
134
135 print -dpdf r-factor;
136
137
138 %% Plot of the reflection and absorption coefficient
139 figure (4);
140 subplot(2,1,1);
141 plot(f,rho2);
142 xlim([20,3200]);
143 ylim([-0.2,1.2]);
144 xlabel('Frequency [Hz]');
145 ylabel('Reflection Coefficient (rho)');
146 title('Plot of Reflection Coefficient (rho)')
147
148 subplot(2,1,2);
149 plot(f,alpha);
150 xlim([20,3200]);
151 ylim([-0.2,1.2]);
152 xlabel('Frequency [Hz]');
153 ylabel('Absorption Coefficient (alpha)');
154 title('Plot of Absorption Coefficient (alpha)')
155
156 print -dpdf rhoandalpha;
157 saveas(figure (4), '4', 'ai');
158
159 close all
160

```

10.4 Dokumentation der messtechnischen Voruntersuchungen im Impedanzrohr

Die nachfolgende Beschreibung dokumentiert die messtechnischen Voruntersuchungen anhand der Ausführungen im ILEK Bericht „Adaptive textile Hüllsysteme zur Optimierung der Raum- und Stadtraumakustik“

Akustische Charakterisierung potentieller textiler Werkstoffe

Das Messsystem

Die Untersuchungen zur akustischen Charakterisierung der textilen Werkstoffe erfolgte mit dem in [3] beschriebenen Impedanzrohr. Die Planung und der Aufbau erfolgte im vorangegangenen Forschungsprojekt in Anlehnung an die DIN 10534. [9] Das vorhandene Impedanzrohr zur messtechnischen Erfassung des akustischen Absorptions- und Reflexionsgrades wurde weiter ausgebaut. Die Mikrofonhalterungen wurden erweitert und umfassender vom Rohr entkoppelt. Die Abdichtung an den Fügestellen der Probehalter wurde verbessert. Zudem konnten die Auswertalgorithmen mit MATLAB, einem numerischen Berechnungsprogramm zur Lösung und Darstellung mathematischer Zusammenhänge, optimiert werden. Damit ist eine schnellere Messwerterfassung und Auswertung möglich geworden. Im letzten Schritt vor der Serienprüfung der textilen Werkstoffe wurden Referenzmessungen anhand eines Vliesstoffes durchgeführt, um vorhandene Unregelmäßigkeiten der Messparameter aufzudecken, diese gegebenenfalls zu verbessern und für die Einschätzung der Ergebnisse bewusst zu machen.

Die Skriptdateien zur Ermittlung der Kalibrierfunktion und der akustischen Reflexions- und Absorptionskoeffizienten sind im Anhang 1 abgedruckt. Die Messprotokolle der Kalibrier- und Vergleichsmessungen sind am Institut einsehbar.

Die Messvorbereitung

Kalibrierung

Um bei der Messung mit Impedanzrohren mittels Übertragungsfunktionsmethode aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist eine Kalibrierung notwendig [7, 9]. Dabei wird eine hochabsorbierende Probe mit der für die Serienmessung vorgesehenen Positionierung der Mikrofone vermessen. Danach werden die Mikrofone ausgebaut und an der jeweils anderen Messposition angebracht. Die erneute Messung der Autoleistungsspektren und der Kreuzleistungsspektren ermöglicht die Ermittlung der Übertragungsfunktion zwischen den Messwerten bei Messung mit getauschten Mikrofonen zur Ermittlung bei der Serienprüfung. Diese Übertragungsfunktion ist Ausgangswert für die Ermittlung des Übertragungsfehlers in einer Kalibrierfunktion. Die ermittelte Kalibrierfunktion H_C ist in Absolutwerten (Magnitude) und als Phasenwinkel (Phase) in Abbildung 1 gezeigt.

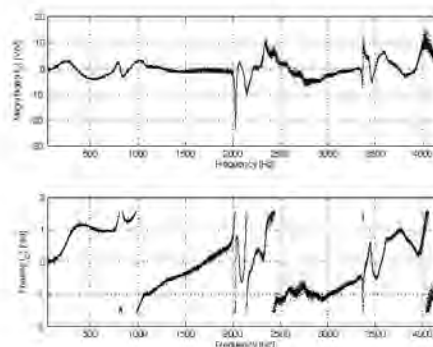


Abbildung 1: Kalibrierfunktion H_C durch die Messung einer Melaminharzschaumprobe

Die ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise bei der Kalibrierung und der Berechnung der Kalibrierfunktion ist in der DIN 10534-2 beschrieben. Die Vorgehensweise wurde in den Ablauf und in die Auswerteskripte entsprechend übernommen [7, 9].

Die Messergebnisse des Absorptionsgrades der 200 mm dicken Melaninharzschaumprobe, die zur Kalibrierung verwendet wurde, ist in Abbildung 2 vor und nach der Korrektur gezeigt. Sehr gut zu sehen ist die vollzogene Kompensation bei der Korrektur der Messung des hochabsorbierenden Schaumstoffs sowohl im Amplituden- wie im Phasenverlauf.

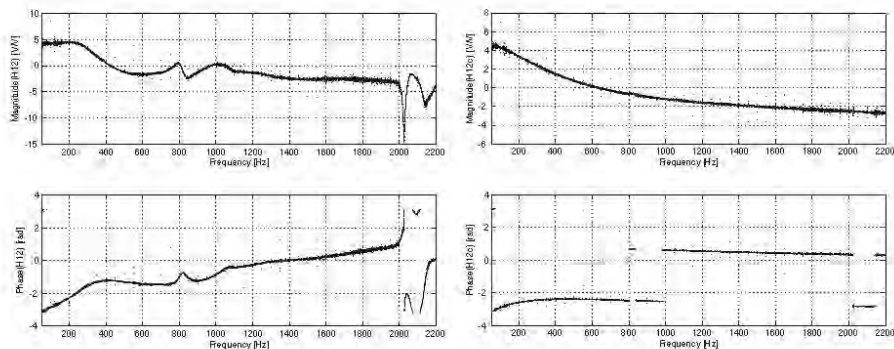


Abbildung 2: Betrag und Phase des Reflexionsfaktors der Melaninharzschaumprobe vor (links) und nach (rechts) der Verrechnung mit der Kalibrierfunktion H_C

Vergleichsmessungen

Die Durchführung von Vergleichsmessungen diente der Abschätzung der Genauigkeit der Messergebnisse und der Identifizierung möglicher Frequenzbereiche, bei denen durch Schwingungsübertragungen die Messungen negativ beeinflusst werden. Dabei wurden zuerst die Messergebnisse bei Totalreflexion mittels einer 12 mm starken Stahlplatte als Rohrabschluss ermittelt. Des weiteren lagen Messwerte für den Absorptionsgrad eines Vliesstoffes aus Polyesterfasern der Firma Lantor vor. Diese bereitgestellten Messergebnisse wurden zwar mittels der Hallraummethode ermittelt, können aber durch den bei Möser in [7] beschriebenen Vergleich von Messungen bei diffusem und gerichtetem Schallfeld zumindest vom Verlauf des Absorptionsgrades über die Frequenz ins Verhältnis gesetzt werden. Abbildung 3 zeigt den von Möser ausgeführten Vergleich bei einer 70 mm dicken Schicht aus Holzfaser-Beton-Gemisch. Der Verlauf des Absorptionsgrades durch die Messung im Impedanzrohr ist zu niedrigeren Werten hin parallel verschoben. Die Abweichung beträgt dabei zwischen 10 und 40 Prozentpunkten.

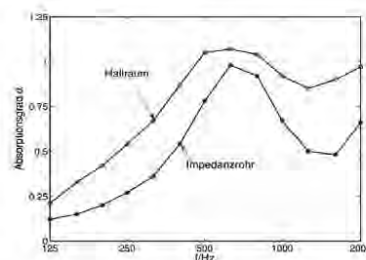


Abbildung 3: Im Impedanzrohr und im Hallraum gemessene Probe eines 70 mm dicken Holzfaser-Beton-Gemisches [7]

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis für den Absorptionsgrad über den Frequenzbereich von 50 bis 4200 Hz bei Totalreflexion. Dabei ergibt sich ein sehr guter Verlauf der gemittelten Kurve nahe Null. Lediglich im Bereich zwischen 400 und 700 Hz sowie ab 3000 Hz sind Abweichungen vom optimalen Verlauf ersichtlich.

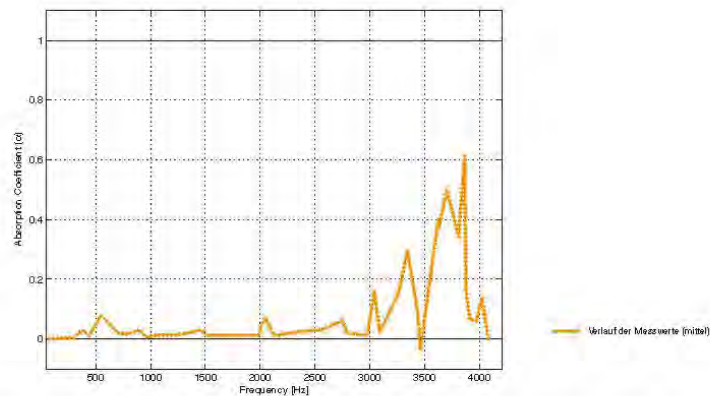


Abbildung 4: Verlauf des Absorptionskoeffizienten bei der Messung der Totalreflexion mittels Stahlplatte

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Vergleichsmessung des Vliesstoffes mit der Artikelnummer 387780, einem 60 mm starken Aufbau aus Polyesterfasern. Die orangene Fläche zeigt dabei den Bereich einer akzeptablen Abweichung, wie sie bei Möser beschrieben ist, an [7]. Die gepunktete Linie stellt den gemittelten Verlauf des Absorptionsgrades bei der Messung dar.

Bei den Messungen wurde ein Frequenzbereich von 50 bis 4200 Hz ausgewertet, um die Grenzen einer verlässlichen Genauigkeit besser einschätzen zu können. Die Parallelität der gemittelten Messwerte zum gegebenen Verlauf des Absorptionsgrades sind im Bereich von 125 bis 2200 Hz ersichtlich. Der Arbeitsfrequenzbereich des Impedanzrohres, indem vergleichbare Werte erhoben werden können, liegt bei 130 bis 2000 Hz. Das Verfahren zur Ermittlung der beiden Grenzwerte ist ebenfalls bei Möser in [7] beschrieben. Somit bestätigen sich die Grenzen einer verlässlichen Auswertung in der theoretischen Berechnung mit den Ergebnissen der Vergleichsmessung.

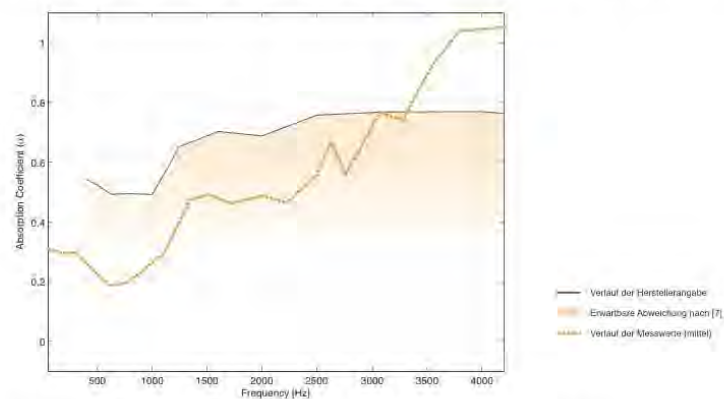


Abbildung 5: Vergleich der Vermessung eines Lantor Vliesstoffes mit den Herstellerangaben

Oberhalb von 2500 Hz sind bei der Vergleichsmessung mit dem Vliesstoff, wie auch bei der oben gezeigten Messung der Totalreflexion, die Einflüsse der Quersmoden vermutlich Grund für die Ungenauigkeiten und Abweichung der Messergebnisse vom erwartbaren Messkurvenverlauf. Für das Ziel, das Impedanzrohr als eine erste Möglichkeit zur Einschätzung von Werkstoffen und zur Vergleichbarkeit von Systemen in der Vorentwicklung zu verwenden, ist der abbildbare Verlauf des Absorptionsgrades zwischen 130 und 2200 Hz jedoch vollkommen ausreichend.

Die Messreihen

Kategorisierung

Die Messergebnisse sind in den nachfolgenden Kapiteln nach Werkstoffgruppen kategorisiert. Es ist jeweils eine Liste der für die Systementwicklung relevanten Werkstoffe aufgeführt. Die Messergebnisse sind in einem Diagramm vergleichend aufgetragen und diskutiert. Der Vergleich diene danach der Einschätzbarkeit für die Systementwicklung, die in Abschnitt 4 beschrieben ist.

Gewebe, gewebeartige Werkstoffe und Folien

Bei der Werkstoffkategorie der Gewebe wurden zuerst PVC beschichtetes Polyestergerewebe, PTFE beschichtetes Glasfasergewebe als Beispiele für typische Materialien des Membranbaus vermessen. Ein spezielles „Akustikgewebe“ der Firma GST GmbH, wurde in die Untersuchungen aufgenommen, da man sich durch dieses leichte Polyestergerewebe insbesondere als raumseitigen Abschluss ein wertig anmutendes Erscheinungsbild erhofft. Für die mögliche Zwischenlagen standen dünne Vliesstoffe und Gelege der Firma Boysen (Unifrax) und der Firma Lantor zur Verfügung. Zudem konnten zwei mikroperforierte Folien in den Voruntersuchungen zur Systementwicklung charakterisiert werden.

Abbildung 7 zeigt die für die Systementwicklung interessanten Werkstoffe im Vergleich. Dabei wurde jeweils derselbe Aufbau von 3 Lagen Werkstoff mit den Abständen 10 mm, 20 mm und 30 mm vor einem schallharten Abschluss vermessen. Der Gesamtaufbau hatte somit eine Tiefe von 62 bis 65 mm (vgl. Abbildung 6). Eine Vermessung von lediglich einer Werkstoffschicht vor dem schallharten Abschluss würde zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen führen, da durch die geringe Dicke nur Frequenzen oberhalb von 5000 Hz gedämpft werden würden. Auch in Anbetracht der Verwendbarkeit in mehrlagigen Aufbauten sind die Schichtung der Werkstoffe und die daraus resultierenden Luftschichten sinnvoll.

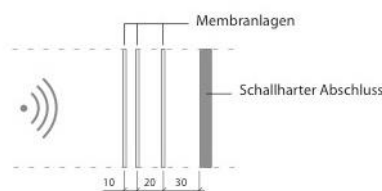


Abbildung 6: Systemskizze zu der Anordnung der Membranlagen bei mehrlagigen Messaufbauten

In den Ergebnissen ist zwischen 1000 und 1200 Hz sowie zwischen 2500 bis 2700 Hz eine erhöhte Absorption ablesbar. Dies rührt sicherlich von den Interferenzen in den Lufträumen. Ansonsten erhöhen sich die Absorptionsgrade mit steigender Frequenz erwartungsgemäß von ca. 0,1 bis auf 0,6 Punkte. Ebenfalls erwartbar war das sehr niedrige Absorptionsverhalten bei tiefen Frequenzen. Auffallend hierbei ist ein schwarzes Vliesstoffgerewebe der Firma Lantor (violetter Kurvenverlauf). Selbst im tieffrequenten Bereich dämpft es die Schallenergie deutlich. Material, Aufbau und flächenbezogene Masse sollen deshalb für eine Verwendung in der äußeren Lage eines möglichen Systemaufbaus geprüft werden.

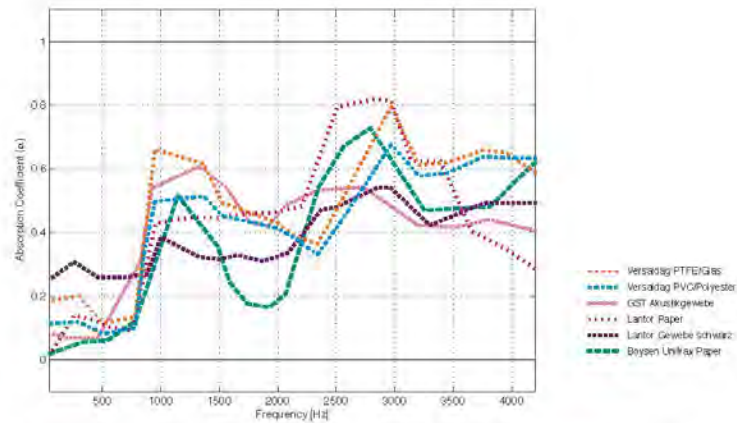


Abbildung 7: Vergleich des Verlaufs des Absorptionsgrades bei einer Auswahl von Geweben und Folien

Vliesstoffe, Gewirke und Schäume

Die Werkstoffe, welche als innenliegende funktionale Schicht eines möglichen Lagenaufbaus verwendet werden und eine Schichtdicke bis ca. 250 mm einnehmen können sind unter den Werkstoffbegriffen Vliesstoffe, Gewirke und Schäume in den Voruntersuchungen eingeordnet worden.

Dabei standen als Schäume neben einem Melaminharzschäum mit 200 mm Dicke, der zur Kalibrierung verwendet wurde, ein absorbierender Polyesterschaum sowie zwei PUR-Schäume zur Verfügung. Bei den Vliesstoffen gab es 4 Varianten von Polyestervliesen von Lantor und dem Technikum der Groz-Beckert KG sowie 2 Vliesstoffe aus Glasswolle, die von der Firma Boysen gestellt wurden.

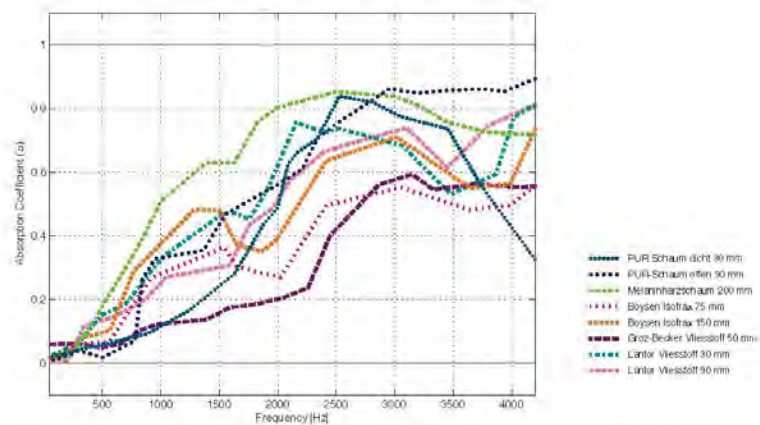
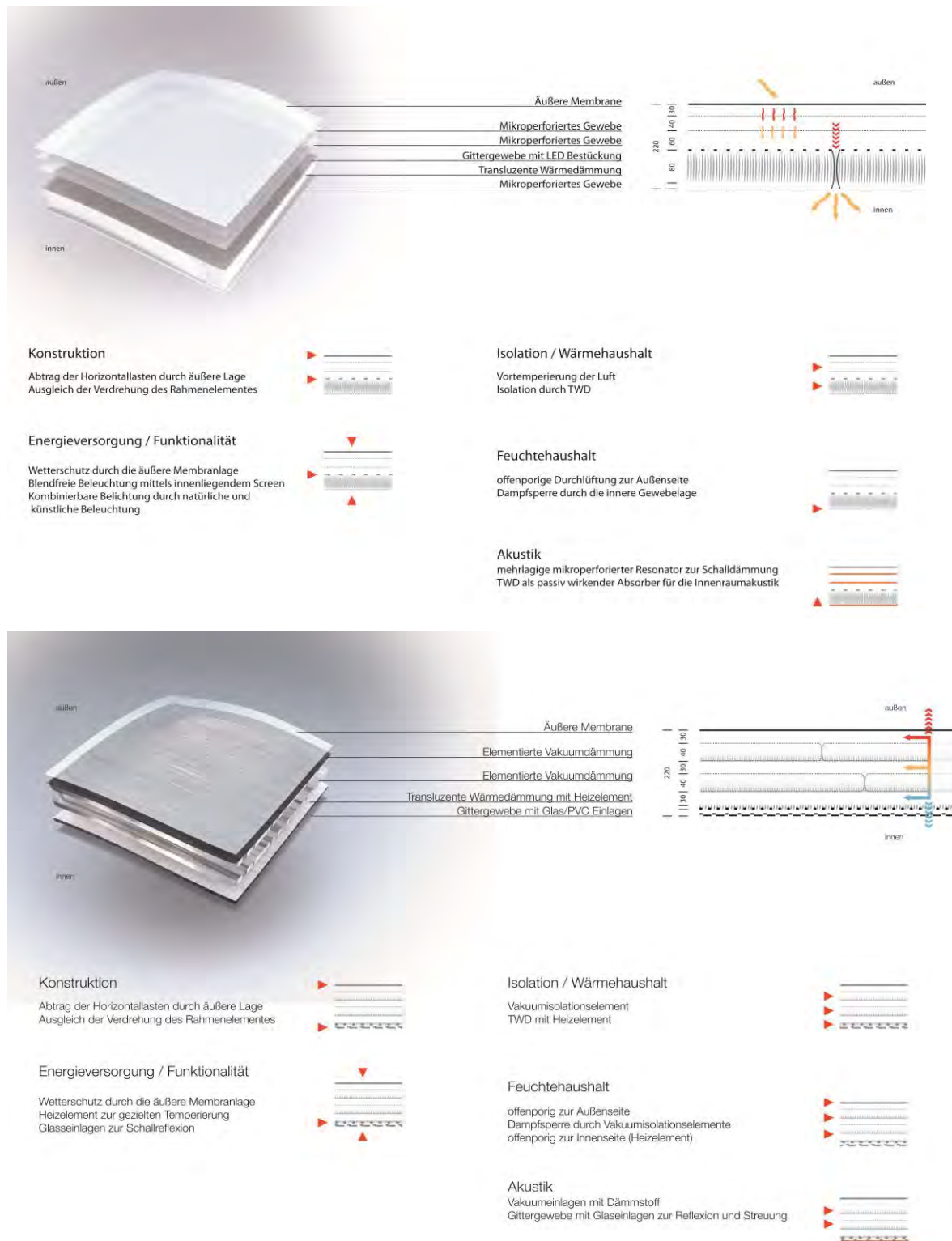


Abbildung 8: Vergleich des Verlaufs des Absorptionsgrades bei einer Auswahl von Vliesstoffen und Schäumen

Zunehmende Dicke spielt für das Absorptionsverhalten, insbesondere auch bei tiefen Frequenzen die ausschlaggebende Rolle. Schäume, vor allem der Melaninharzschäum, sind durch ihr größeres Absorptionsvermögen bei der Systementwicklung mit unterschiedlichen Werkstoffen und einem rezykliergerechten Konstruktionskonzept sicherlich vorzuziehen. Leichte und offene Vliesstoffe, wie das Material von Groz-Beckert, sind dagegen beispielsweise für die gezielte Dämpfung in den Luftschichten, die durch den systembedingten Abstand von Membranlagen herrühren, geeignet.

10.5 Übersicht zu den Variantenstudien

Die nachfolgend abgedruckten Systemkonzepte wurden aus den Expertengesprächen abgeleitet und dienten als Ausgangsvarianten für den interdisziplinären Workshop zur Entwicklung von Lagenaufbauten und Bauteilgrundlagen.





Konstruktion

Abtrag der Horizontallasten / Windlasten
Ausgleich der Verdrehung des Rahmenelementes



Energieversorgung / Funktionalität

Wetterschutz durch PV und äußere Membranlage
PV zur Energieversorgung (teilweise)



Isolation / Wärmehaushalt

passive Wärmedämmung mittels Vliesstoffeinlage
aktive Wärmedämmung mittels TWD und PCM



Feuchtehaushalt

Vliesstoffeinlage dampfdurchlässig
Dampfsperre an der Vliesstoffeinlage (innenseitig)
TWD dampfdurchlässig

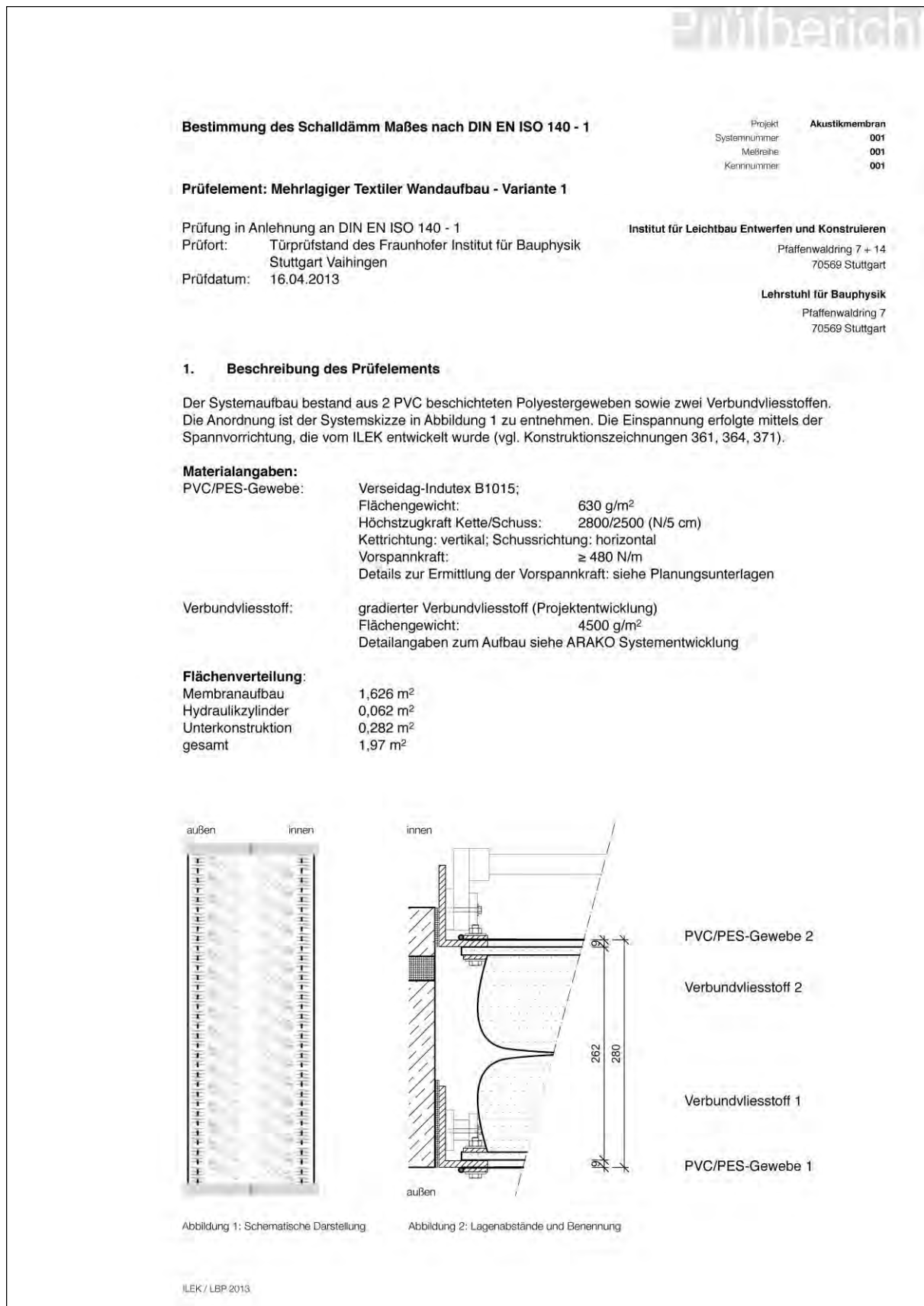


Akustik

Vliesstoffeinlage zur Schalldämmung;
Erhöhte Masse zwecks Reflexion durch Drahtgewebe
und PCM Einlage;
zweilagiger mikroperforierter Resonator für die Dämpfung
der Innenraumakustik;



Nachfolgend abgedruckt ist der Prüfbericht für Lagenaufbau B1:



Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt	Akustikmembran
Systemnummer	001
Maßnahme	001
Kennnummer	001

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 1

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Plattenweldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Prüfdatum: 16.04.2013

Lehrstuhl für Bauphysik

Plattenweldring 7
70569 Stuttgart

2. Durchführung der Messung

2.1 Technische Ausstattung

Meßeinrichtung: aussagekräftiger Frequenzbereich: 125 Hz bis 4000 Hz
Sonstige Konstruktionsdaten sind den Planungsunterlagen zu entnehmen.
Lautsprecher: Lautsprecher in Dodekaederform
Mikrofone: Die Mikrofone werden auf geneigten Kreisbahnen durch den Raum geschwenkt.

Die Messung und Mittlung der Schalldruckpegel erfolgte mit kalibrierten, bauakustischen Messsystem des IBP

2.2 Prüfanordnung:

Türenprüfstand PT mit unterdrückter Flankenübertragung
Anschlußmauerwerk: Stahlbeton bzw. Kalksandsteinmauerwerk
Decken: Stahlbeton
Volumen der Prüfkammern: 62 und 54 m³
Höhe: 3,08 m und 3,08 m
Breite: 5,00 m und 4,73 m
Länge: 4,00 m und 3,74 m
Öffnungsgröße: 1000 mm x 2000 mm
Prüfbedingungen: max. Schalldämmung bezogen auf die Prüföffnung: $R'_{max,w} = 61$ dB
Freier Zugang: 0,87 m x 2,02 m und 1,92 m x 2,04 m
Druckluft- und Stromanschluss

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt: Akustikmembran
Systemnummer: 001
Meßreihe: 001
Kennnummer: 001

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 1

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen
Prüfdatum: 16.04.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

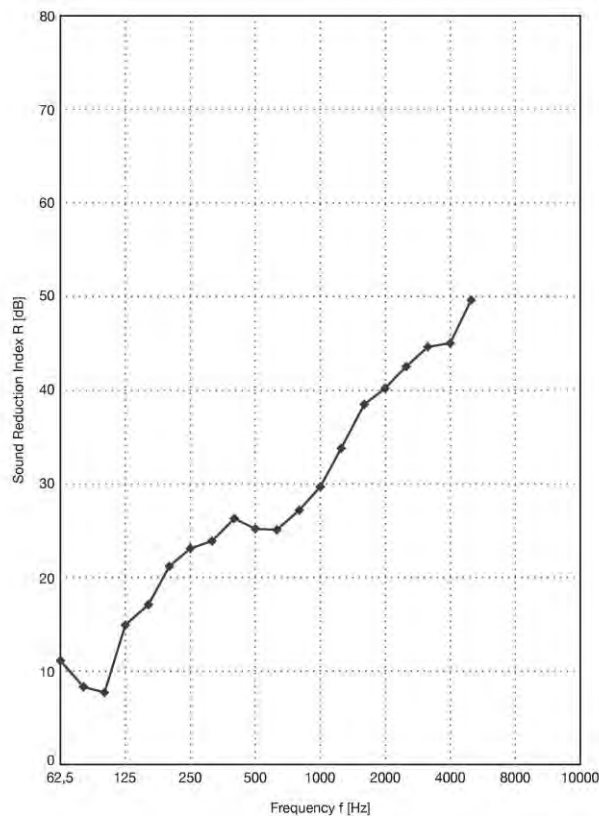
Lehrstuhl für Bauphysik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

3. Ergebnisse

Fläche des Prüfgegenstandes: 1,97 m²
Lufttemperatur in den Prüfräumen: ~ 19 °C
Luftfeuchte in den Prüfräumen: ~ 55 %
Volumen des Senderraums: 54 m³
Volumen des Empfangsraums: 62 m³

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
R [dB]	-1,6	11,1	8,3	7,7	14,9	17,1	21,2	23,1	23,9	26,3	25,2	25,1	27,2	29,7	33,8	38,5	40,2	42,5	44,6	45	49,6

Tabelle



Bewertetes Schalldämmmaß:

$R_w = 30 \text{ dB}$

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Meßergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden; Bewertung nach DIN 52210;

Nachfolgend abgedruckt ist der Prüfbericht für Lagenaufbau B2:

Prüfbericht

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 2

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
 Prüfort: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
 Stuttgart Vaihingen
 Prüfdatum: 04.06.2013

Projekt	Akustikmembran
Systemnummer	002
Meßreihe	001
Kennnummer	002

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
 Pfaffenwaldring 7 + 14
 70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik
 Pfaffenwaldring 7
 70569 Stuttgart

1. Beschreibung des Prüfelements

Der Systemaufbau bestand aus 2 PVC beschichteten Polyestergeweben sowie zwei Verbundvliesstoffen. Zusätzlich wurden auf der Innenseite 2 Lagen aus mikroperforiertem Akustikgewebe der Firma Global Safety Textiles GmbH im Abstand von 20 und 65 mm angebracht. Die Anordnung ist der Systemskizze in Abbildung 1 zu entnehmen. Die Einspannung erfolgte mittels der Spannvorrichtung, die vom ILEK entwickelt wurde (vgl. Konstruktionszeichnungen 361, 364, 371).

Materialangaben:

PVC/PES-Gewebe:	Verseidag-Indutex B1015; Flächengewicht: 630 g/m ² Höchstzugkraft Kette/Schuss: 2800/2500 (N/5 cm) Kettrichtung: vertikal; Schussrichtung: horizontal Vorspannkraft: ≥ 480 N/m Details zur Ermittlung der Vorspannkraft: siehe Planungsunterlagen
Verbundvliesstoff:	gradierter Verbundvliesstoff (Projektentwicklung) Flächengewicht: 4500 g/m ² Detailangaben zum Aufbau siehe ARAKO Systementwicklung
Akustik-Gewebe:	Global Safety Textiles GmbH Flächengewicht: 110 g/m ²

Flächenverteilung:

Membranaufbau	1,646 m ²
Unterkonstruktion	0,324 m ²
gesamt	1,97 m ²

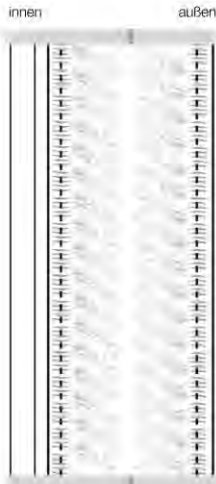


Abbildung 1: Schematische Darstellung

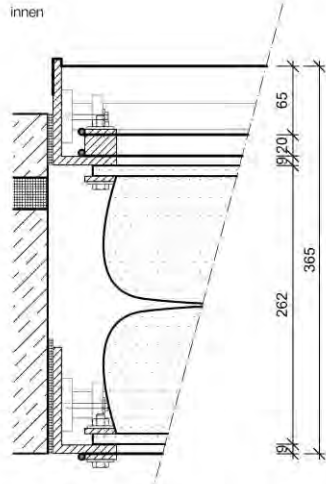


Abbildung 2: Lagenabstände und Benennung

Akustik-Gewebe 2

Akustik-Gewebe 1

PVC/PES-Gewebe 2

Verbundvliesstoff 2

Verbundvliesstoff 1

PVC/PES-Gewebe 1

ILEK / LBP 2013

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt:	Akustikmembran
Systemnummer:	002
Meßreihe:	001
Kennnummer:	002

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 2

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Plattenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Plattenwaldring 7
70569 Stuttgart

2. Durchführung der Messung

2.1 Technische Ausstattung

Meßeinrichtung: aussagekräftiger Frequenzbereich: 125 Hz bis 4000 Hz
Sonstige Konstruktionsdaten sind den Planungsunterlagen zu entnehmen.
Lautsprecher: Lautsprecher in Dodekaederform
Mikrofone: Die Mikrofone werden auf geneigten Kreisbahnen durch den Raum geschwenkt.

Die Messung und Mittlung der Schalldruckpegel erfolgte mit kalibrierten, bauakustischen Messsystem des IBP

2.2 Prüfanordnung:

Türenprüfstand PT mit unterdrückter Flankenübertragung

Anschlußmauerwerk: Stahlbeton bzw. Kalksandsteinmauerwerk

Decken: Stahlbeton

Volumen der Prüfkammern: 62 und 54 m³

Höhe: 3,08 m und 3,08 m

Breite: 5,00 m und 4,73 m

Länge: 4,00 m und 3,74 m

Öffnungsgröße: 1000 mm x 2000 mm

Prüfbedingungen: max. Schalldämmung bezogen auf die Prüföffnung: $R'_{max,w} = 61$ dB

Freier Zugang: 0,87 m x 2,02 m und 1,92 m x 2,04 m

Druckluft- und Stromanschluss

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt Akustikmembran
Systemnummer 002
Meßreihe 001
Kennnummer 002

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 2

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen
Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

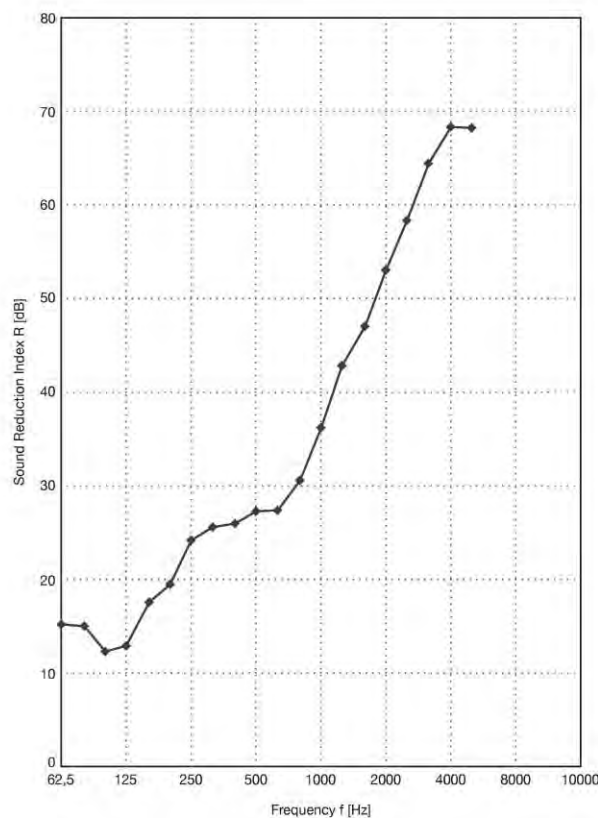
Lehrstuhl für Bauphysik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

3. Ergebnisse

Fläche des Prüfgegenstandes 1,97 m²
Lufttemperatur in den Prüfräumen ~ 19 °C
Luftfeuchte in den Prüfräumen ~ 55 %
Volumen des Senderraums 62 m³
Volumen des Empfangsraums 54 m³

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
R [dB]	15,1	15,2	15	12,3	12,9	17,6	19,5	24,2	25,6	26	27,3	27,4	30,6	36,2	42,8	47	53	58,3	64,4	68,3	68,2

Tabelle



Bewertetes Schalldämmmaß:

$$R_w = 32 \text{ dB}$$

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Meßergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden; Bewertung nach DIN 52210;

Nachfolgend abgedruckt ist der Prüfbericht für Lagenaufbau C:



Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 3

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
 Prüfort: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
 Stuttgart Vaihingen
 Prüfdatum: 04.06.2013

Projekt: Akustikmembran
 Systemnummer: 003
 Maßreihe: 001
 Kennnummer: 003

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
 Pfaffenwaldring 7 + 14
 70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik
 Pfaffenwaldring 7
 70569 Stuttgart

1. Beschreibung des Prüfelements

Der Systemaufbau bestand aus 2 PVC beschichteten Polyestergeweben sowie zwei Verbundvliesstoffen. Zusätzlich wurde zwischen dem außenliegenden PVC/PES-Gewebe und dem Verbundvliesstoff ein fluidgefülltes Taschengewebe eingebaut. Die Anordnung ist der Systemskizze in Abbildung 1 zu entnehmen. Die Einspannung erfolgte mittels der Spannvorrichtung, die vom ILEK entwickelt wurde (vgl. Konstruktionszeichnungen 361, 364, 371).

Materialangaben:

PVC/PES-Gewebe:	Verseidag-Indutex B1015; Flächengewicht: 630 g/m ² Höchstzugkraft Kette/Schuss: 2800/2500 (N/5 cm) Kettrichtung: vertikal; Schussrichtung: horizontal Vorspannkraft: ≥ 480 N/m Details zur Ermittlung der Vorspannkraft: siehe Planungsunterlagen
Verbundvliesstoff:	gradierter Verbundvliesstoff (Projektentwicklung) Flächengewicht: 4500 g/m ² Detailangaben zum Aufbau siehe ARAKO Systementwicklung



Abbildung 1: Schematische Darstellung

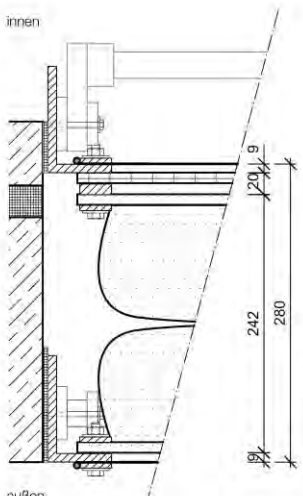


Abbildung 2: Lagenabstände und Benennung

PVC/PES-Gewebe 2

Fluidgefülltes Taschengewebe

Verbundvliesstoff 2

Verbundvliesstoff 1

PVC/PES-Gewebe 1

ILEK / LBP 2013

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt: Akustikmembran
Systemnummer: 003
Methode: 001
Kennzeichnung: 003

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 3

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Plattenwandroing 7 + 14
70569 Stuttgart

Prüfdatum: 04.06.2013

Lehrstuhl für Bauphysik

Plattenwandroing 7
70569 Stuttgart

Taschengewebe:

Das Taschengewebe wurde bei der GST GmbH hergestellt. Es besteht aus Polyesterfasern mit einer Folienkaschierung. Um die Dichtigkeit sicherzustellen wurde eine Dispersionslösung eingefüllt. Das Abtrocknen setzte die vorhandenen Poren zu. Danach konnte Wasser als exemplarisches Fluid eingefüllt werden. Um korrekte Lage des Taschengewebes im Aufbau sicherzustellen musste ein Metallgitter eingebracht werden. Um Beschädigungen bei Transport und Einbau auszuschließen wurde der gesamte Aufbau in PVC-Folien eingeschweißt

Flächengewicht gesamt:	18000 g/m ²
Gewicht Taschengewebe:	1280g/m ²
Gewicht Fluid:	15070 g/m ²
Gewicht Metallgewebe:	650 g/m ²
Gewicht PVC-Folien:	2 * 500 g/m ²

Schichtdicke gesamt:	18 mm
Schichtdicke Taschengewebe:	15 mm

Flächenverteilung:

Membranaufbau	1,626 m ²
Hydraulikzylinder	0,062 m ²
Unterkonstruktion	0,282 m ²
gesamt	1,97 m ²

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt:	Akustikmembran
Systemnummer:	003
Meßreihe:	001
Kennnummer:	003

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 3

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Plattenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Plattenwaldring 7
70569 Stuttgart

2. Durchführung der Messung

2.1 Technische Ausstattung

Meßeinrichtung: aussagekräftiger Frequenzbereich: 125 Hz bis 4000 Hz
Sonstige Konstruktionsdaten sind den Planungsunterlagen zu entnehmen.
Lautsprecher: Lautsprecher in Dodekaederform
Mikrofone: Die Mikrofone werden auf geneigten Kreisbahnen durch den Raum geschwenkt.

Die Messung und Mittlung der Schalldruckpegel erfolgte mit kalibrierten, bauakustischen Messsystem des IBP

2.2 Prüfanordnung:

Türenprüfstand PT mit unterdrückter Flankenübertragung

Anschlußmauerwerk: Stahlbeton bzw. Kalksandsteinmauerwerk

Decken: Stahlbeton

Volumen der Prüfkammern: 62 und 54 m³

Höhe: 3,08 m und 3,08 m

Breite: 5,00 m und 4,73 m

Länge: 4,00 m und 3,74 m

Öffnungsgröße: 1000 mm x 2000 mm

Prüfbedingungen: max. Schalldämmung bezogen auf die Prüföffnung: $R'_{max,w} = 61$ dB

Freier Zugang: 0,87 m x 2,02 m und 1,92 m x 2,04 m

Druckluft- und Stromanschluss

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt **Akustikmembran**
Systemnummer **003**
Meßreihe **001**
Kennnummer **003**

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 3

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

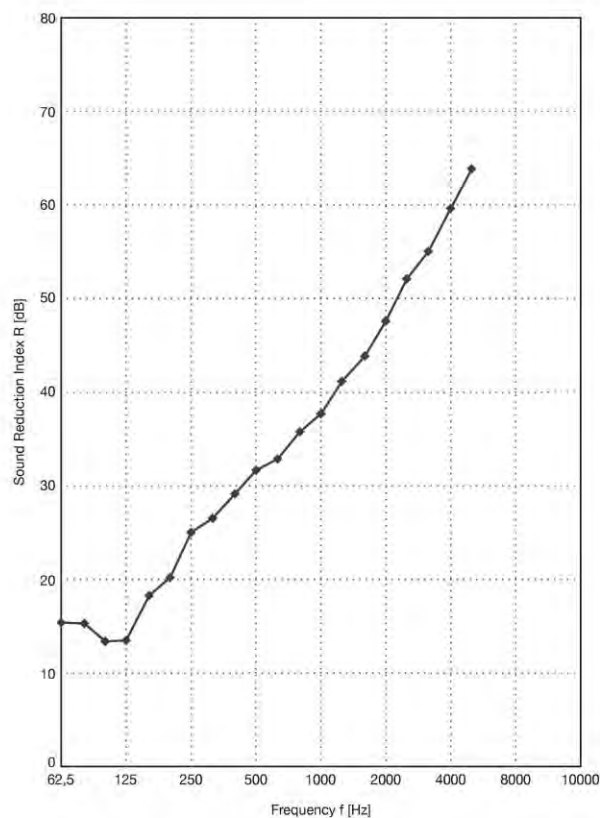
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

3. Ergebnisse

Fläche des Prüfgegenstandes 1,97 m²
Lufttemperatur in den Prüfräumen ~ 19 °C
Luftfeuchte in den Prüfräumen ~ 55 %
Volumen des Senderraums 62 m³
Volumen des Empfangsraums 54 m³

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
R [dB]	17,8	15,4	15,3	13,4	13,5	18,3	20,2	25	26,5	29,1	31,6	32,8	35,7	37,6	41	43,7	47,4	51,9	54,8	59,4	63,6

Tabelle



Bewertetes Schalldämmmaß:

$$R_w = 34 \text{ dB}$$

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Meßergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden; Bewertung nach DIN 52210;

Nachfolgend abgedruckt ist der Prüfbericht für Lagenaufbau D:

Prüfbericht

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt

Systemnummer

Meßreihe

Kennnummer

Akustikmembran

004

001

004

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 4

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Pfaffenwaldring 7 + 14

70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Pfaffenwaldring 7

70569 Stuttgart

1. Beschreibung des Prüfelements

Der Systemaufbau bestand aus 2 PVC beschichteten Polyestergeweben sowie einer Verbundvliesstofflage. Als Variante zu der zweiten Verbundvliesstofflage wurde ein mit Silicat-Aerogel gefülltes Abstandsgewirk eingebaut. Zusätzlich wurde zwischen dieser Gewirklage und des außenliegenden PVC/PES-Gewebes ein fluidgefülltes Taschengewebe eingebaut.

Die Anordnung ist der Systemskizze in Abbildung 1 zu entnehmen. Die Einspannung erfolgte mittels der Spannvorrichtung, die vom ILEK entwickelt wurde (vgl. Konstruktionszeichnungen 361, 364, 371).

Materialangaben:

PVC/PES-Gewebe:

Verseidag-Indutex B1015;

Flächengewicht: 630 g/m²

Höchstzugkraft Kette/Schuss: 2800/2500 (N/5 cm)

Kettrichtung: vertikal; Schussrichtung: horizontal

Vorspannkraft: ≥ 480 N/m

Details zur Ermittlung der Vorspannkraft: siehe Planungsunterlagen

Verbundvliesstoff:

gradierter Verbundvliesstoff (Projektentwicklung)

Flächengewicht: 4500 g/m²

Detailangaben zum Aufbau siehe ARAKO Systementwicklung

außen

innen

innen

außen

PVC/PES-Gewebe 2

Fluidgefülltes Taschengewebe

Abstandsgewirk mit Silicat-Aerogel-Füllung

Verbundvliesstoff 1

PVC/PES-Gewebe 1

Abbildung 1: Schematische Darstellung

Abbildung 2: Lagenabstände und Benennung

ILEK / LBP 2013

148

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt: Akustikmembran
Systemnummer: 004
Methode: 001
Kennzeichen: 004

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 4

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Plattenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Plattenwaldring 7
70569 Stuttgart

Taschengewebe:

Das Taschengewebe wurde bei der GST GmbH hergestellt. Es besteht aus Polyesterfasern mit einer Folienkaschierung. Um die Dichtigkeit sicherzustellen wurde eine Dispersionslösung eingefüllt. Das Abtrocknen setzte die vorhandenen Poren zu. Danach konnte Wasser als exemplarisches Fluid eingefüllt werden. Um korrekte Lage des Taschengewebes im Aufbau sicherzustellen musste ein Metallgitter eingebracht werden. Um Beschädigungen bei Transport und Einbau auszuschließen wurde der gesamte Aufbau in PVC-Folien eingeschweißt.

Flächengewicht gesamt:	18000 g/m ²
Gewicht Taschengewebe:	1280g/m ²
Gewicht Fluid:	15070 g/m ²
Gewicht Metallgewebe:	650 g/m ²
Gewicht PVC-Folien:	2 * 500 g/m ²

Schichtdicke gesamt:	18 mm
Schichtdicke Taschengewebe:	15 mm

Abstandsgewirk:

Abstandsgewirke mit Höhen von 30, 20 und 10 mm wurden aufeinandergelegt und verschweißt. Eine Tasche aus PVC Folie stellte die Dichtigkeit sicher. Zwei horizontal eingeteckte Aluminiumstäbe (d = 6 mm) dienten als Streben der Lagesicherung. Die Gewirkelagen wurden mit Silikat-Aerogel der Cabot AG gefüllt.

Flächengewicht gesamt:	11800 g/m ²
Gewicht Silikat-Aerogel:	3300 g/m ²
Gewicht Polyester-Gewirke:	7600 g/m ²
Gewicht PVC-Folien:	900 g/m ²

Schichtdicke gesamt:	110 - 130 mm (Einschnürung bei den Streben)
----------------------	---

Flächenverteilung:

Membranaufbau	1,626 m ²
Hydraulikzylinder	0,062 m ²
Unterkonstruktion	0,282 m ²
gesamt	1,97 m ²

04.06.2013

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt:	Akustikmembran
Systemnummer:	004
Meßreihe:	001
Kennnummer:	004

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 4

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Plattenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Plattenwaldring 7
70569 Stuttgart

2. Durchführung der Messung

2.1 Technische Ausstattung

Meßeinrichtung: aussagekräftiger Frequenzbereich: 125 Hz bis 4000 Hz
Sonstige Konstruktionsdaten sind den Planungsunterlagen zu entnehmen.
Lautsprecher: Lautsprecher in Dodekaederform
Mikrofone: Die Mikrofone werden auf geneigten Kreisbahnen durch den Raum geschwenkt.

Die Messung und Mittlung der Schalldruckpegel erfolgte mit kalibrierten, bauakustischen Messsystem des IBP

2.2 Prüfanordnung:

Türenprüfstand PT mit unterdrückter Flankenübertragung

Anschlußmauerwerk: Stahlbeton bzw. Kalksandsteinmauerwerk

Decken: Stahlbeton

Volumen der Prüfkammern: 62 und 54 m³

Höhe: 3,08 m und 3,08 m

Breite: 5,00 m und 4,73 m

Länge: 4,00 m und 3,74 m

Öffnungsgröße: 1000 mm x 2000 mm

Prüfbedingungen: max. Schalldämmung bezogen auf die Prüföffnung: $R'_{max,w} = 61$ dB

Freier Zugang: 0,87 m x 2,02 m und 1,92 m x 2,04 m

Druckluft- und Stromanschluss

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt **Akustikmembran**
Systemnummer **004**
Meßreihe **001**
Kennnummer **004**

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 4

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen
Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

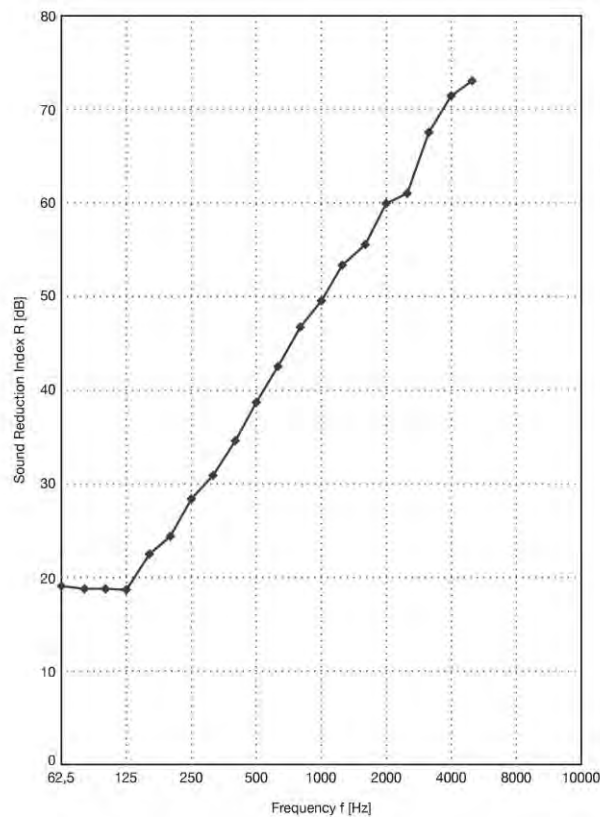
Lehrstuhl für Bauphysik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

3. Ergebnisse

Fläche des Prüfgegenstandes 1,97 m²
Lufttemperatur in den Prüfräumen ~ 19 °C
Luftfeuchte in den Prüfräumen ~ 55 %
Volumen des Senderraums 62 m³
Volumen des Empfangsraums 54 m³

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
R [dB]	19,6	19,1	18,8	18,8	18,7	22,5	24,4	28,4	30,9	34,6	38,7	42,5	46,7	49,5	53,3	55,5	59,9	61	67,5	71,4	73

Tabelle



Bewertetes Schalldämmmaß:

$R_w = 39 \text{ dB}$

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Meßergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden; Bewertung nach DIN 52210;

Nachfolgend abgedruckt ist der Prüfbericht für Lagenaufbau A1:



Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt	Akustikmembran
Systemnummer	005
Meßreihe	001
Kennnummer	005

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 5

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

1. Beschreibung des Prüfelements

Der Systemaufbau bestand aus 2 PVC beschichteten Polyestergeweben sowie einer Verbundvliesstofflage. Die Anordnung ist der Systemskizze in Abbildung 1 zu entnehmen. Die Einspannung erfolgte mittels der Spannvorrichtung, die vom ILEK entwickelt wurde (vgl. Konstruktionszeichnungen 361, 364, 371).

Materialangaben:

PVC/PES-Gewebe: Verseidag-Indutex B1015;
Flächengewicht: 630 g/m²
Höchstzugkraft Kette/Schuss: 2800/2500 (N/5 cm)
Ketrichtung: vertikal; Schussrichtung: horizontal
Vorspannkraft: ≥ 480 N/m
Details zur Ermittlung der Vorspannkraft: siehe Planungsunterlagen

Verbundvliesstoff: gradierter Verbundvliesstoff (Projektentwicklung)
Flächengewicht: 4500 g/m²
Detailangaben zum Aufbau siehe ARAKO Systementwicklung

Flächenverteilung:

Membranaufbau	1,626 m ²
Hydraulikzylinder	0,062 m ²
Unterkonstruktion	0,282 m ²
gesamt	1,97 m ²

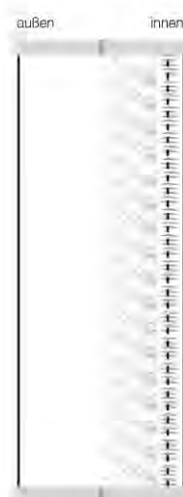


Abbildung 1: Schematische Darstellung

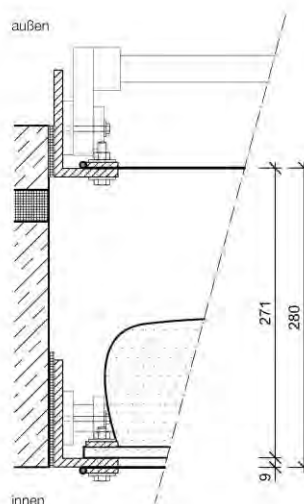


Abbildung 2: Lagenabstände und Benennung

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt	Akustikmembran
Systemnummer	005
Maßnahme	001
Komplexionier	005

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 5

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Plattenwandbox 7 + 14
70569 Stuttgart

Prüfdatum: 04.06.2013

Lehrstuhl für Bauphysik
Plattenwandbox 7
70569 Stuttgart

2. Durchführung der Messung

2.1 Technische Ausstattung

Meßeinrichtung: aussagekräftiger Frequenzbereich: 125 Hz bis 4000 Hz
Sonstige Konstruktionsdaten sind den Planungsunterlagen zu entnehmen.
Lautsprecher: Lautsprecher in Dodekaederform
Mikrofone: Die Mikrofone werden auf geneigten Kreisbahnen durch den Raum geschwenkt.

Die Messung und Mittlung der Schalldruckpegel erfolgte mit kalibrierten, bauakustischen Messsystem des IBP

2.2 Prüfanordnung:

Türenprüfstand PT mit unterdrückter Flankenübertragung
Anschlußmauerwerk: Stahlbeton bzw. Kalksandsteinmauerwerk
Decken: Stahlbeton
Volumen der Prüfkammern: 62 und 54 m³
Höhe: 3,08 m und 3,08 m
Breite: 5,00 m und 4,73 m
Länge: 4,00 m und 3,74 m
Öffnungsgröße: 1000 mm x 2000 mm
Prüfbedingungen: max. Schalldämmung bezogen auf die Prüföffnung: R_{max,w} = 61 dB
Freier Zugang: 0,87 m x 2,02 m und 1,92 m x 2,04 m
Druckluft- und Stromanschluss

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt: Akustikmembran
Systemnummer: 005
Meßreihe: 001
Kennnummer: 005

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 5

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen
Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

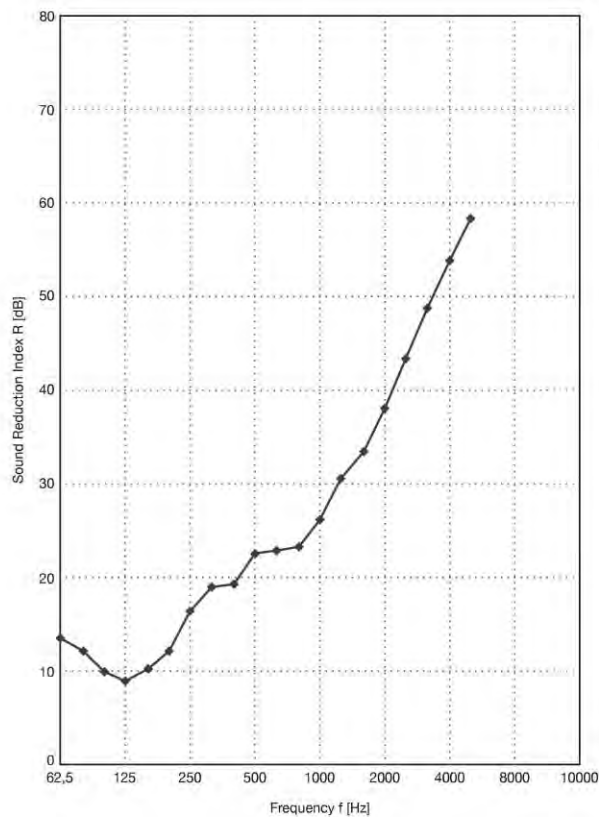
Lehrstuhl für Bauphysik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

3. Ergebnisse

Fläche des Prüfgegenstandes 1,97 m²
Lufttemperatur in den Prüfräumen ~ 19 °C
Luftfeuchte in den Prüfräumen ~ 55 %
Volumen des Senderraums 62 m³
Volumen des Empfangsraums 54 m³

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
R [dB]	12,2	13,5	12,1	9,9	8,9	10,2	12,1	16,4	19	19,3	22,6	22,9	23,3	26,2	30,6	33,5	38,1	43,4	48,8	53,9	58,4

Tabelle



Bewertetes Schalldämmmaß:

$R_w = 25 \text{ dB}$

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Meßergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden; Bewertung nach DIN 52210;

Nachfolgend abgedruckt ist der Prüfbericht für Lagenaufbau A2:

Prüfbericht

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 6

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
 Prüfort: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
 Stuttgart Vaihingen
 Prüfdatum: 04.06.2013

Projekt	Akustikmembran
Systemnummer	006
Meßreihe	001
Kennnummer	006

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
 Pfaffenwaldring 7 + 14
 70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik
 Pfaffenwaldring 7
 70569 Stuttgart

1. Beschreibung des Prüfelements

Der Systemaufbau bestand aus 2 PVC beschichteten Polyestergeweben sowie einer Verbundvliesstofflage. Die äußere Gewebelage wurde mit Maschinenmutter (M20, M24) punktförmig beschwert. Die Anordnung ist der Systemskizze in Abbildung 1 zu entnehmen. Die Einspannung erfolgte mittels der Spannvorrichtung, die vom ILEK entwickelt wurde (vgl. Konstruktionszeichnungen 361, 364, 371). Dabei wurde das einzeln befestigte PVC/PES-Gewebe mit erhöhter Kraft biaxial vorgespannt.

Materialangaben:

PVC/PES-Gewebe:	Verseidag-Indutex B1015; Flächengewicht: 630 g/m ² Höchstzugkraft Kette/Schuss: 2800/2500 (N/5 cm) Kettrichtung: vertikal; Schussrichtung: horizontal Biaxiale Vorspannkraft: ≥ 980 N/m Details zur Ermittlung der Vorspannkraft: siehe Planungsunterlagen
-----------------	--

Verbundvliesstoff:	gradierter Verbundvliesstoff (Projektentwicklung) Flächengewicht: 4500 g/m ² Detailangaben zum Aufbau siehe ARAKO Systementwicklung
--------------------	--

Flächenverteilung:

Membranaufbau	1,626 m ²
Hydraulikzylinder	0,062 m ²
Unterkonstruktion	0,282 m ²
gesamt	1,97 m ²



Abbildung 1: Schematische Darstellung

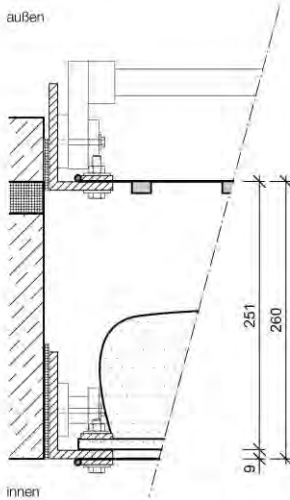


Abbildung 2: Lagenabstände und Benennung

251
260
9

PVC/PES-Gewebe mit erhöhter Vorspannung und Beschwerung

Verbundvliesstoff 1

PVC/PES-Gewebe 1

ILEK / LBP 2013

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt:	Akustikmembran
Systemnummer:	000
Meßreihe:	001
Kennnummer:	006

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 6

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Plattenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Plattenwaldring 7
70569 Stuttgart

2. Durchführung der Messung

2.1 Technische Ausstattung

Meßeinrichtung: aussagekräftiger Frequenzbereich: 125 Hz bis 4000 Hz
Sonstige Konstruktionsdaten sind den Planungsunterlagen zu entnehmen.
Lautsprecher: Lautsprecher in Dodekaederform
Mikrofone: Die Mikrofone werden auf geneigten Kreisbahnen durch den Raum geschwenkt.

Die Messung und Mittlung der Schalldruckpegel erfolgte mit kalibrierten, bauakustischen Messsystem des IBP

2.2 Prüfanordnung:

Türenprüfstand PT mit unterdrückter Flankenübertragung

Anschlußmauerwerk: Stahlbeton bzw. Kalksandsteinmauerwerk

Decken: Stahlbeton

Volumen der Prüfkammern: 62 und 54 m³

Höhe: 3,08 m und 3,08 m

Breite: 5,00 m und 4,73 m

Länge: 4,00 m und 3,74 m

Öffnungsgröße: 1000 mm x 2000 mm

Prüfbedingungen: max. Schalldämmung bezogen auf die Prüföffnung: $R'_{max,w} = 61$ dB

Freier Zugang: 0,87 m x 2,02 m und 1,92 m x 2,04 m

Druckluft- und Stromanschluss

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt Akustikmembran
Systemnummer 006
Meßreihe 001
Kennnummer 006

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 6

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen
Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

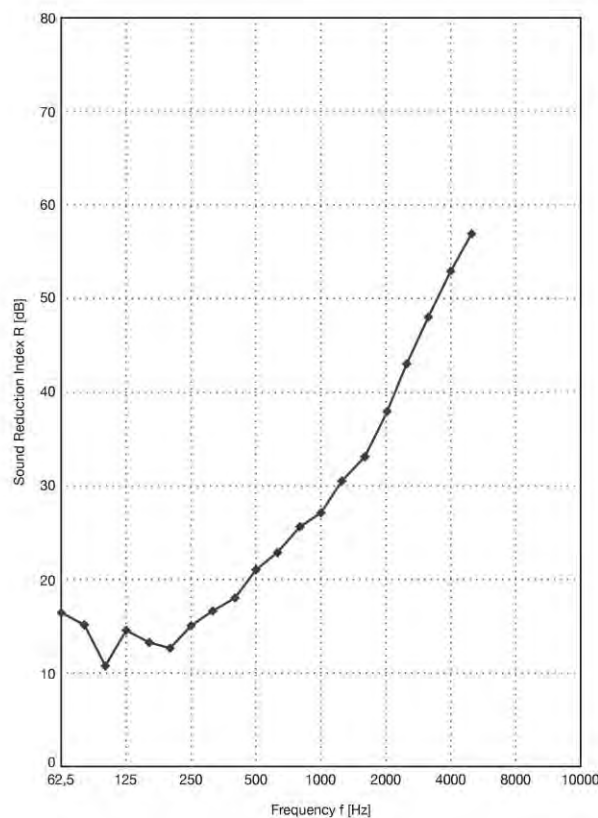
Lehrstuhl für Bauphysik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

3. Ergebnisse

Fläche des Prüfgegenstandes 1,97 m²
Lufttemperatur in den Prüfräumen ~ 19 °C
Luftfeuchte in den Prüfräumen ~ 55 %
Volumen des Senderraums 62 m³
Volumen des Empfangsraums 54 m³

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
R [dB]	13,4	16,3	15	10,6	14,4	13,1	12,5	14,9	16,5	17,9	20,9	22,8	25,5	27	30,4	33	37,5	42,9	47,9	52,8	56,8

Tabelle



Bewertetes Schalldämmmaß:

$$R_w = 25 \text{ dB}$$

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Meßergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden; Bewertung nach DIN 52210;

Nachfolgend abgedruckt ist der Prüfbericht für Lagenaufbau A3:

Prüfbericht

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt	Akustikmembran
Systemnummer:	007
Meßreihe:	001
Kennnummer	007

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 7

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

1. Beschreibung des Prüfelements

Der Systemaufbau bestand aus 2 PVC beschichteten Polyestergeweben sowie einer Verbundvliesstofflage. Die Anordnung ist der Systemskizze in Abbildung 1 zu entnehmen. Die Einspannung erfolgte mittels der Spannvorrichtung, die vom ILEK entwickelt wurde (vgl. Konstruktionszeichnungen 361, 364, 371). Dabei wurde das einzeln befestigte PVC/PES-Gewebe mit erhöhter Kraft biaxial vorgespannt.

Materialangaben:

PVC/PES-Gewebe:

Verseidag-Indutex B1015;

Flächengewicht: 630 g/m²

Höchstzugkraft Kette/Schuss: 2800/2500 (N/5 cm)

Kettrichtung: vertikal; Schussrichtung: horizontal

Biaxiale Vorspannkraft: ≥ 980 N/m

Details zur Ermittlung der Vorspannkraft: siehe Planungsunterlagen

Verbundvliesstoff:

gradierter Verbundvliesstoff (Projektentwicklung)

Flächengewicht: 4500 g/m²

Detailangaben zum Aufbau siehe ARAKO Systementwicklung

Flächenverteilung:

Membranaufbau

Hydraulikzylinder

Unterkonstruktion

gesamt

1,626 m²

0,062 m²

0,282 m²

1,97 m²



Abbildung 1: Schematische Darstellung

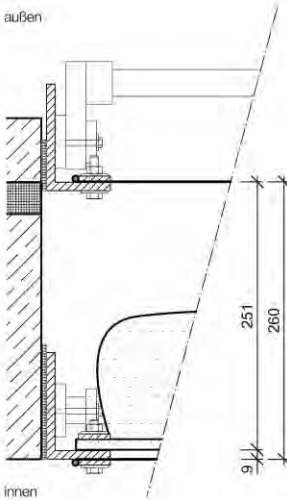


Abbildung 2: Lagenabstände und Benennung

ILEK / LBP 2013

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt	Akustikmembran
Systemnummer	007
Maßnahme	001
Kennnummer	007

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 7

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1

Prüfart: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen

Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Plattenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

Lehrstuhl für Bauphysik

Plattenwaldring 7
70569 Stuttgart

2. Durchführung der Messung

2.1 Technische Ausstattung

Meßeinrichtung: aussagekräftiger Frequenzbereich: 125 Hz bis 4000 Hz
Sonstige Konstruktionsdaten sind den Planungsunterlagen zu entnehmen.
Lautsprecher: Lautsprecher in Dodekaederform
Mikrofone: Die Mikrofone werden auf geneigten Kreisbahnen durch den Raum geschwenkt.

Die Messung und Mittlung der Schalldruckpegel erfolgte mit kalibrierten, bauakustischen Messsystem des IBP

2.2 Prüfanordnung:

Türenprüfstand PT mit unterdrückter Flankenübertragung

Anschlußmauerwerk: Stahlbeton bzw. Kalksandsteinmauerwerk

Decken: Stahlbeton

Volumen der Prüfkammern: 62 und 54 m³

Höhe: 3,08 m und 3,08 m

Breite: 5,00 m und 4,73 m

Länge: 4,00 m und 3,74 m

Öffnungsgröße: 1000 mm x 2000 mm

Prüfbedingungen: max. Schalldämmung bezogen auf die Prüföffnung: $R'_{max,w} = 61$ dB

Freier Zugang: 0,87 m x 2,02 m und 1,92 m x 2,04 m

Druckluft- und Stromanschluss

Bestimmung des Schalldämm Maßes nach DIN EN ISO 140 - 1

Projekt: Akustikmembran
Systemnummer: 007
Meßreihe: 001
Kennnummer: 007

Prüfelement: Mehrlagiger Textiler Wandaufbau - Variante 7

Prüfung in Anlehnung an DIN EN ISO 140 - 1
Prüfört: Türprüfstand des Fraunhofer Institut für Bauphysik
Stuttgart Vaihingen
Prüfdatum: 04.06.2013

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Pfaffenwaldring 7 + 14
70569 Stuttgart

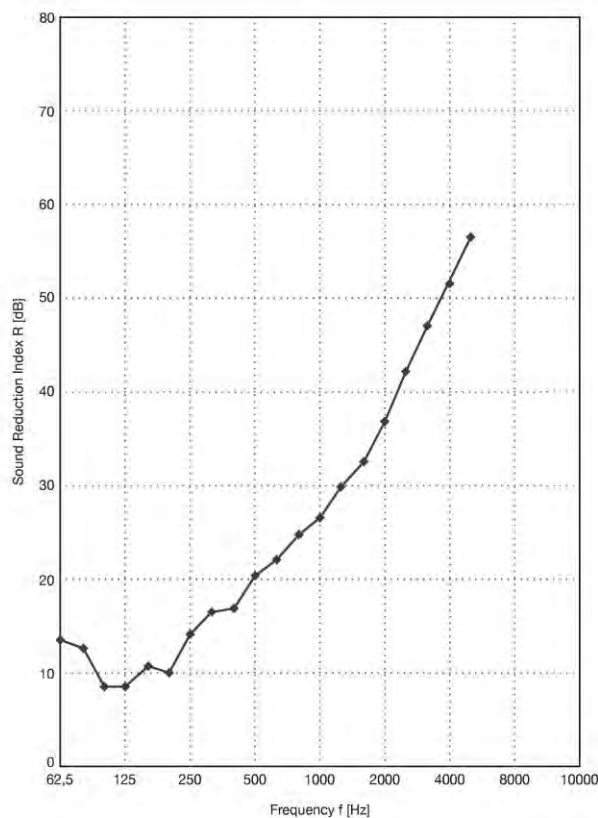
Lehrstuhl für Bauphysik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

3. Ergebnisse

Fläche des Prüfgegenstandes 1,97 m²
Lufttemperatur in den Prüfräumen ~ 19 °C
Luftfeuchte in den Prüfräumen ~ 55 %
Volumen des Senderraums 62 m³
Volumen des Empfangsraums 54 m³

Frequenz [Hz]	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
R [dB]	11,6	13,5	12,6	8,5	8,5	10,7	10	14,1	16,5	16,9	20,4	22,1	24,8	26,6	29,9	32,6	36,9	42,2	47,1	52	56,6

Tabelle



Bewertetes Schalldämmmaß:

$$R_w = 24 \text{ dB}$$

Die Ermittlung basiert auf Prüfstands-Meßergebnissen, die in Terzbändern gewonnen wurden; Bewertung nach DIN 52210;

10.7 Methoden für Systemanalyse, -transformation und -synthese

Nachfolgende Tabellen führen technikwissenschaftliche Methoden für die Phase der Analyse, der Transformation und der Synthese auf. Bei der Durchführung des exemplarischen Entwurfs- und Entwicklungsprozesses wurde auf der Grundlage dieser Zuordnungstabelle die Eignung für die spezifische Aufgabenstellung geprüft, um geeignete Methoden auszuwählen.

Tabelle 40: Zielzuordnung für Analysemethoden

Zuordnung	Methode	Operation	Konstruktionsaufgabe								Bibliographie
			FE	LS	ZS	TZR	GR	BRR	ME	KS	
Beurteilen; Verknüpfen	Minimalelementlösung	Bewertung; Auswahl	✗	✗	✗	○	○	○	✗	○	Gairola, 1984; Pahl, 2007; Rodenacker, 1976.
Generieren	Crull-Formblatt	Abstraktion; Analyse	✗	○	○	✓	✓	✓	✓ 1	✓	Crull, 2004.
Generieren	Modularisierung der Funktionsstruktur	Abstraktion; Analyse	✗	✗	○	✗	○	✗	✓	✓	Gumpinger, 2008; Kallen- bach et al., 2001; Roth 1985.
Generieren	Funktionseigen- schaftenabgleich	Konstruktions- regel	✗	✗	✗	✓	✓	○	○	○	Köcher, 1983; Gumpinger et al., 2008.
Generieren	Wirkflächen zusammenfassen	Konstruktions- regel	✗	✗	✗	✓	✓	○	○	○	Birkhofer, 1980; Roth, 2000.
Generieren	Relativbewegungs- analyse	Abstraktion; Analyse	✗	✗	○	✓	✓	○	✓ 1	✓	Gerber, 1971; Koller, 1994.
Extrahieren; Erfahrungen	Zielobjektanalyse	Abstraktion; Analyse	✗	✗	✗	✗	○	✗	✗	○	Wulf et al., 2000.

Abkürzungen: FE Funktionserweiterung; LS Leistungssteigerung; TZR Teilezahlreduktion; ZS Zuverlässigkeitssteigerung;
 Anmerkungen: GR Gewichtsreduktion; BRR Bauraumreduktion; ME Montageerleichterung; KS Kostensenkung;
 1 weniger Bauteile; 2 mechanisch möglich; 3 weniger Fügestellen; 4 weniger Fügeteile;

Tabelle 41: Zielzuordnung für Transformationsmethoden

Zuordnung	Methode	Operation	Konstruktionsaufgabe								Bibliographie
			FE	LS	ZS	TZR	GR	BRR	ME	KS	
Beurteilen; Verknüpfen	Integrale Nutzung der Bauteileigenschaften	Abstraktion; Analyse	○	✓	○	✓	✓	○	○	✓	Birkhofer, 1980; Gerber, 1971; Koller, 1976.
Generieren	Herstellungs- konstruktionsregeln	Konstruktions- regel	✗	○ 2	○	✓	○	○	○ 2	✓	Gairola, 1984; Hoenow, 1982; Koller, 1994; Pahl, 2007.
Generieren	Gestaltungs- konstruktionsregeln	Konstruktions- regel	✗	✗	○	✓	○	○	○ 2	✓	Ehrlenspiel, 2009; Koller, 1994; Gairola, 1984.
Generieren	Bauteiltrennungs- analyse	Abstraktion; Analyse	✗	✗	✓ 3	✓	○	✗	✓ 1	✓	Roth, 1985.
Generieren	Einteilige Maschine	Abstraktion; Analyse	✗	✗	✓ 3	✓	○	✗	○ 2	✓	Ehrlenspiel, 2009.
Generieren	Bauteileigenschafts- konstruktionsregel	Konstruktions- regel	✗	✗	✗	✓	✗	✗	○ 2	✓	Gairola, 1984; Koller, 1976.
Generieren		Konstruktions- regel	✓		○	✓	○			✓	Koller, 1976.
Extrahieren; Erfahrungen	Verwendung integraler Lösungen	Konstruktions- regel	✗	○	○	✓	○	✗	○	○	Gairola, 1984; Rodenacker, 1976; Roth, 2000.

Abkürzungen: FE Funktionserweiterung; LS Leistungssteigerung; TZR Teilezahlreduktion; ZS Zuverlässigkeitssteigerung;
 Anmerkungen: GR Gewichtsreduktion; BRR Bauraumreduktion; ME Montageerleichterung; KS Kostensenkung;
 1 weniger Bauteile; 2 mechanisch möglich; 3 weniger Fügestellen; 4 weniger Fügeteile;

Tabelle 42: Zielzuordnung für Synthesemethoden

Zuordnung	Methode	Operation	Konstruktionsaufgabe								Bibliographie
			FE	LS	ZS	TZR	GR	BRR	ME	KS	
Beurteilen; Verknüpfen	Optimierung der Produktstruktur	Variation	✗	✗	✗	✓	✓	⊙	✓ ¹	✓	Rodenacker, 1976.
Beurteilen; Verknüpfen	Gausemeier-Matrix	Variation	⊙	✓	✓	✓	✓	⊙	✓ ¹	✓	Köckerling et al., 2003.
Generieren	Variation der Funktionsstruktur	Variation	⊙	✓	✓	✓	✓	⊙	✓ ¹	✓	Füssel et al., 1999; Roth, 1985; Köcher,1983.
Generieren	Herstellungsveriati	Abstraktion; Analyse	✓	✓	⊙	✓	✓	✓	✓ ¹	✓	Ehrlenspiel, 2009.
Generieren	Gestaltvariati	Abstraktion; Analyse	✓	✓	⊙	✓	✓	⊙	⊙	⊙	Gumpinger et al., 2008; Koller, 1994.
Generieren	Prinzipvariati	Variation	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	✓	Köckerling et al., 2003.
Generieren	Wirkflächenanalyse; Wirkflächenvariati	Abstraktion; Analyse	✗	⊙ ²	✓ ³	✓	⊙	⊙	✓ ¹	✓	Roth, 2000.
Extrahieren; Erfahrungen	integraler Lösungskatalog	Katalognutz	✓	✓	⊙	⊙	✓	⊙	⊙	✓	Birkhofer, 1980; Füssel et al., 1999.
Extrahieren; Erfahrungen	Doppelfunktionen einsetzen	Katalognutz	⊙	⊙	✓	✓	✓	⊙	⊙	✓	Rodenacker, 1976.
Abkürzungen:	FE Funktionserweiterung; GR Gewichtsreduktion;		LS Leistungssteigerung; BRR Bauraumreduktion;		TZR Teilezahlreduktion; ME Montageerleichterung;			ZS Zuverlässigkeitssteigerung; KS Kostensenkung;			
Anmerkungen:	1 weniger Bauteile;		2 mechanisch möglich;		3 weniger Fügestellen;			4 weniger Fügeteile;			