

Xiaoru Zhou, Christoph Schwitalla

Integrale Bausysteme zur effizienten Beeinflussung von Klima, Akustik und Luftqualität in Räumen

F 2761

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

2012

ISBN 978-3-8167-8382-4

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

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Abschlussbericht

Integrale Bausysteme zur effizienten Beeinflussung von Klima, Akustik und Luftqualität in Räumen

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert. (Aktenzeichen: Z6 – 10.08.18.7-08.25/II2-F20-08-22). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Der Bericht umfasst:

81 Seiten

11 Tabellen

90 Abbildungen

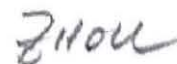
Stuttgart, 28. Juni 2010

Abteilungsleiter



Dr.-Ing. Philip Leistner

Bearbeiter



Xiaoru Zhou

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Übersicht, Grundlagen und Kenngrößen für Multifunktionale Bauteile	4
2.1	Grundlagen	4
2.2	Die Kenngrößen	5
2.2.1	Akustik	5
2.2.2	Wärme	6
2.2.3	Luftqualität	7
3	Multi-Funktionale-Bauteile – Stand der Technik	9
4	Multifunktionale Bauteile – Wirkprinzipien und Ansätze	9
4.1	Wirkprinzipien	9
4.2	Ansätze	12
4.2.1	Variante 1: (A) MPA, (W) Smart-Board, (L) Aktiv	12
4.2.2	Variante 2: (A) PoA, (W) Smart-Board, (L) Aktiv	13
4.2.3	Variante 3a/3b: (A) PoA, (W) Smart-Board + PCM-Basotect, (L) Aktiv	13
4.2.4	Variante 4: (A) PoA, (W) PCM-Basotect, (L) Aktiv	15
4.2.5	Variante 5: (A) PoA, (W) PCM-Basotect + Smart Board, (L) Aktiv	16
4.2.6	Variante 6: (A) PoA, (W) PCM-Basotect, (L) Aktiv	16
4.2.7	Variante 7: (A) STA, (W) PCM Basotect + Smart Board, (L) Aktiv	17
4.2.8	Variante 8: (A) STA, (W) PCM Basotect + Smart Board, (L) Aktivekohleplatte	17
4.2.9	Variante 9: (A) PoA, (W) PCM Basotect, (L) Aktiv	18
5	Theoretische Modellierung	18
5.1	Akustik: Schallabsorption	19
5.1.1	Absorptionsgrad	19
5.1.2	Poröse Absorber (PoA)	20
5.1.3	Plattenresonatoren (PLA)	21
5.1.4	Lochplattenresonatoren (MPA)	23
5.1.5	Schlitzförmige Schallabsorber (SLA)	25
5.1.6	Mehrschichtige Resonanzabsorber	26
5.1.7	Nebeneinander liegende Absorberflächen (STA)	28
5.2	Latentwärmespeicher	28
5.2.1	Speicherung	28
5.2.2	Latente Speicherung	29
5.2.3	Simulation	30

5.2.3.1	Smart Board-Platte	31
5.2.3.2	Micronal Basotect	34
5.2.3.3	Delta Cool	35
5.3	Empfundene Luftqualität	36
5.3.1	Adsorption	36
5.3.2	Heterogene Photokatalyse	38
6	Experimentelle Überprüfung	38
6.1	Schallabsorptionsgrade für senkrechten Schalleinfall	39
6.1.1	Messprinzip und -einrichtung	39
6.1.2	Vergleich Messung – Rechnung: Akustik	39
6.2	Latentwärmespeicher	44
6.3	Empfundene Luftqualität	46
6.3.1	Adsorption	46
6.3.2	Photokatalyse	48
7	Demonstratoren	51
8	Analyse und Beurteilung der gewählten Ansätze	61
8.1	Akustik	62
8.2	Wärme	62
8.3	Empfundene Luftqualität	63
8.4	Gestaltung	63
8.5	Gesamte Beurteilung	64
9	Zusammenfassung und Ausblick	65
10	Literatur	66
11	Anlagen	67
11.1	Anlage 1: Übersichtstabellen	67
11.2	Anlage 2	69
11.3	Anlage 3	75

Überblick

Der Kerngedanke des Forschungsvorhabens war die stoffliche und konstruktive Integration von Funktionen zur Regulierung von Raumklima, Raumakustik und Raumluftqualität in Bauteilen und Bausystemen. In diesen Bereichen sind die Anforderungen an Räume hoch und komplex. Bauteile zur Reaktion auf jede einzelne dieser Anforderungen existieren zwar, sie beanspruchen aber jeweils (Ober-)Fläche, Raum und spezielle Einsatz- und Randbedingungen, die miteinander kollidieren oder gar nicht verfügbar sind. Eine Schall und/oder Geruch absorbierende Flächenverkleidung lässt sich z.B. weder mit thermisch aktivierten Bauelementen noch mit dem architektonischen Wunsch nach fugenlosem Sichtbeton vereinbaren. Die Lösung derartiger bauphysikalischer Widersprüche unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ästhetischer Ansprüche stellte die zentrale Zielstellung des Verbundvorhabens dar. Ziel war es, nutzungs- und nutzerorientierte Bauteileigenschaften aus den Bereichen thermische Behaglichkeit und Energie, Luftqualität und Hygiene, Raumakustik und Schallschutz sowie architektonische Gestaltung zu integrieren statt zu addieren. Die erforderliche Methodik und Vorgehensweise ist Gegenstand dieses Berichtes.

1 Einleitung

Für ein behagliches Raumklima spielen mehrere Faktoren eine wesentliche Rolle. Egal ob Büros, Schulräume, Kindertagesstätten/Kindergärten oder Wohnräume etc. – es werden in der heutigen Zeit hohe Ansprüche an den Komfort und die Leistungsfähigkeit eines Raumes gestellt. Moderne Gebäude sind gekennzeichnet durch leichte Bauweise mit einem hohen Glasanteil. Dadurch steht für die akustische und thermische Raumkonditionierung oftmals nur die Deckenfläche zur Verfügung. Im Falle von thermisch aktivierten Betondecken entfällt für die Akustik auch diese Fläche. Übrige Bauteile zur Raumkonditionierung verfügen üblicherweise nur über eine Funktion, z.B. Schall absorbierende Unterdecken. Abhilfe aus der Platznot können sogenannte multifunktionale Bauteile (MFB) schaffen. Sie beinhalten mehr als nur eine Funktion, wobei oft eine Funktion in den Vordergrund gestellt wird. StoSilentCool beispielsweise ist ein Schall absorbierendes Kühldecken-Element, jedoch ist die Kühlung nur als aktives System realisierbar. Dies wird durch die Positionierung der Wirkschichten innerhalb eines Bauteils eingestellt. In der Regel ist die Wirksamkeit der multifunktionalen Bauteile geringer als die von monofunktionalen Bauteilen. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die Strukturen aus vorhandenen Baumaterialien nach Multi-Funktionalität optimiert. Neue multifunktionelle Baumaterialien wurden mit den Projektpartnern entwickelt und getestet um sie potenziell praktisch umsetzen zu können.

2 Übersicht, Grundlagen und Kenngrößen für Multifunktionale Bauteile

2.1 Grundlagen

Der wissenschaftliche Ansatz fokussierte auf die prinzipielle Integrierbarkeit von stofflichen Lösungsansätzen in Volumen und Oberfläche, z.B. mikro- oder makroverkapselte Latentwärmespeicher, Stoffe zur Einlagerung und photokatalytischen „Reinigung“ unerwünschter oder schädigender Luftbestandteile, hoch wirksame und hygienisch anspruchsvolle Schallabsorber wie beschichtete mikroperforierte Flächen.

Die (multi-)funktionale Umsetzung der wissenschaftlichen Lösungsansätze beruhte auf der engen Kooperation von Wissenschaft und Industrie und konzentrierte sich auf praktisch umsetzbare

Demonstratoren: Die Stell- und Trennwandbauteile wurden kollisionsfrei mit Latentwärmespeichern sowie Schall und Geruch absorbierenden Eigenschaften ausgestattet, ohne die eigentliche Trennfunktion, z.B. Schallschutz, einzuschränken. Notwendig war auch eine Art bauphysikalisches Raum- und Flächenmanagement der möglichst schlanken Wände und der verfügbaren raumseitigen Oberflächen.

2.2 Die Kenngrößen

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen für die Entwicklung der Multifunktionalen Bausysteme, Ansätze für multifunktionale Bauteile aufzuzeigen und zu bewerten. Dies sollte einerseits mittels theoretischer Modelle (Wirkung der einzelnen Funktionen) und andererseits experimentell erfolgen. Diese Funktionen sind in den meisten Raumnutzungen, z.B. Büros, Schulen, Konferenzräume, von zentraler Bedeutung. Multifunktionale Bauteile sollen hauptsächlich an Decken, Stellwänden und Vorsatzschalen angewandt werden.

2.2.1 Akustik

Für die o. g. Nutzung ist die Anforderung an den Schallabsorptionsgrad in Abb. 1 veranschaulicht. Die Anforderung an den Schallabsorptionsgrad wurde auf den mittleren Frequenzbereich konzentriert, weil sich im höheren Frequenzbereich Möbel, Menschen, ggf. Teppiche etc. auswirken können. Im tieferen Frequenzbereich sind beispielsweise durch Gipskartonwände oder Fenster oft ausreichende Schallabsorptionsmaterialien vorhanden. Auch wenn bei tiefen Frequenzen unzureichende Absorptionsflächen im Raum vorhanden sind, ist es auf Grund der Anatomie des menschlichen Gehörs, der Wirtschaftlichkeit und der Raumgestaltung nicht zu empfehlen, die Absorptionsgrade bei tiefen Frequenzen zu hoch anzusetzen, da sonst zu erwarten ist, dass sowohl die Dicke unpraktikabel, als auch die Kosten der Absorberstrukturen sehr hoch sein werden.

Frequenz f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Alpha (oben)	0.40	0.70	0.85	0.85	0.70	0.35
Alpha (unten)	0.05	0.35	0.50	0.50	0.35	0

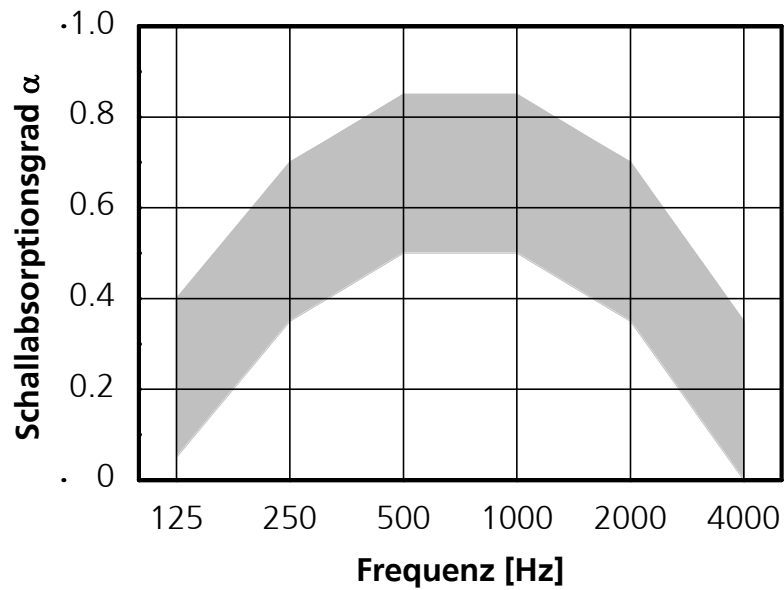


Abb. 1:
Anforderungen an den Schallabsorptionsgrad

2.2.2 Wärme

Bei Gebäuden in Leichtbauweise fehlen die nötigen Wärmespeichermassen (massive Bauteile). Diese sollen in dieser Arbeit durch Integration von Latentwärmespeichern (PCM) kompensiert werden. Die Anforderung hierfür ist, wie in Abb. 2 angedeutet, die größtmögliche Dämpfung der Temperaturamplituden in einem definierten Raum zu erreichen.

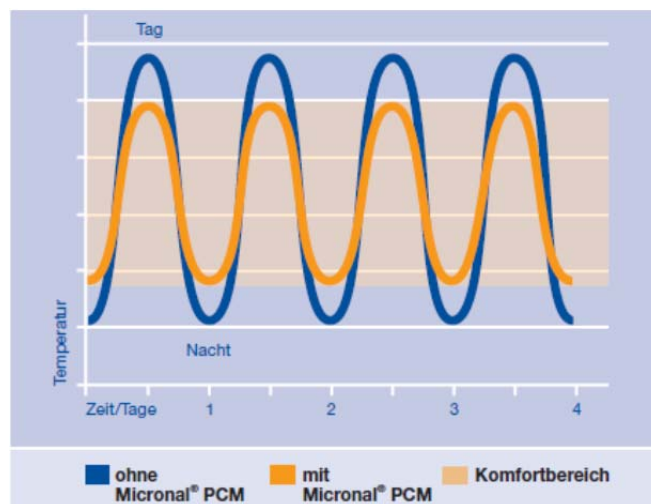


Abb. 2:
Anforderung an die Wärmespeicherung erläutert anhand der schematischen Wirkungsweise von PCM [1].

2.2.3 Luftqualität

Energiesparendes Bauen verlangt zwingend nach einer immer dichteren Gebäudehülle. Der mit der zunehmenden Dichtigkeit immer geringer werdende Luftaustausch zwischen Innenräumen und Umgebungsluft kann zur Verschlechterung der Luftqualität in Innenräumen führen. Damit steigen die Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen (VOC) und Geruchsstoffen in Innenräumen an. Ursächlich dafür können sowohl die VOC- und Geruchsstoffemissionen aus Baumaterialien, Einrichtungsgegenständen und – im gewerblichen Bereich – Arbeitsmitteln sein als auch die Nutzer und ihre Aktivitäten. Hier sind insbesondere Bioeffluente, Kosmetika, Emissionen aus Computern und Druckern, Emissionen durch Raumpfleagemittel, Zigarettenrauch, Kochen, die Haltung von Haustieren und Ähnliches zu nennen. Mit der Anzahl der Raumnutzer steigt außerdem die CO₂-Konzentration in der Raumluft an. Die Verbesserung der lufthygienischen Situation ist beim gegenwärtigen Stand der Technik nur durch eine Erhöhung der Luftwechselrate möglich. Diese kann mittels Fensterlüftung oder mit Hilfe einer raumlufttechnischen Anlage (RLT) erfolgen. Nach Angaben des BDH (*Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik*, 2009) werden 50 % des Gesamtwärmebedarfs für die Aufheizung der notwendigen Frischluftversorgung benötigt. Bestehende mechanische Lüftungssysteme, die bei Bedarf auf Änderungen der Raumluftqualität reagieren, sind bislang noch nicht verfügbar. Da die empfundene Luftqualität im Inneren, die zu Beschwerden der Nutzer führt, von deren subjektiven Wahrnehmungen abhängig ist, wird oft, zusätzlich zum Betrieb einer RLT, manuell gelüftet. Ein einfaches System, das zur Verbesserung der empfundenen Luftqualität führt, kann hier Abhilfe schaffen. Die wesentlichen Parameter zur Beschreibung und Ermittlung der empfundenen Luftqualität sind:

Die Empfundene Luftqualität ist eine Größe zur quantitativen Erfassung der von Menschen empfundenen Luftqualität. Die empfundene Luftqualität wird mit einem Panel untrainierter Probanden ermittelt und setzt sich aus folgenden drei Größen zusammen:

Akzeptanz: Maß für die Zufriedenheit mit einem Umgebungszustand

Geruchsintensität: Stärke eines Geruchseindrucks

Hedonische Geruchswirkung: Bewertung eines Geruchseindrucks innerhalb der Merkmalspole „äußerst angenehm“ bis „äußerst unangenehm“

Damit ein Stoff in einer Atmosphäre wahrnehmbar wird, muss seine Konzentration ein der Geruchsschwellen überschreiten. Die Geruchsschwellen beschreiben die kleinste Konzentration eines Stoffs in der Luft, bei der die Mehrheit der Probanden den Geruch a) wahrnehmen (Wahrnehmungsschwelle) oder b) erkennen (Erkennungsschwelle) kann. Sobald die Konzentration eines Einzelstoffs eine dieser Geruchsschwellen überschreitet, trägt er zum Gesamteindruck des Geruchs bei.

Zur humanolfaktometrischen Beurteilung von Gerüchen z. B. in Räumen werden die Größen Geruchsintensität, Akzeptanz und hedonische Wirkung herangezogen. In der Abb. 3 sind die Zielbereiche für Akzeptanz, Intensität und hedonische Wirkung durch grüne Ellipsen hervorgehoben.

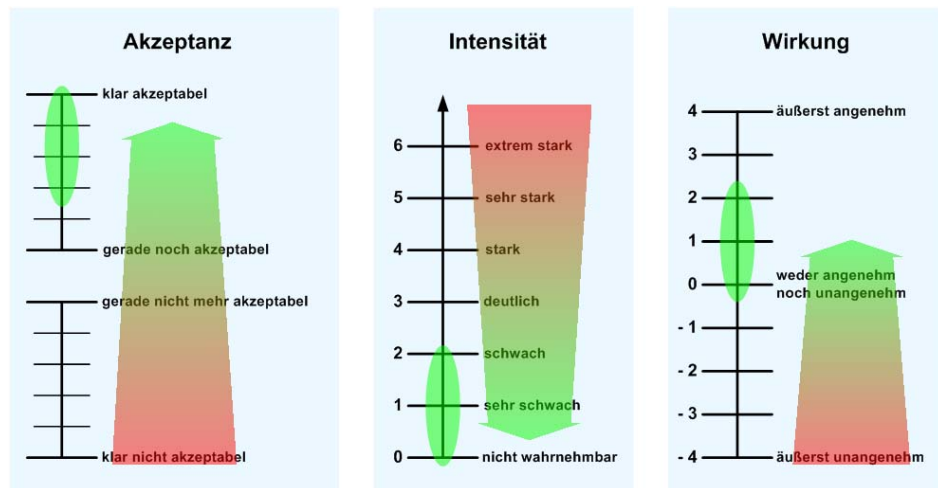


Abb. 3:
Bewertungsmaßstäbe für die Bewertung der empfundenen Luftqualität.

Selbst in gut belüfteten Gebäuden liegt der Prozentsatz der Unzufriedenen bei ca. 15 % der Nutzer oder Probanden (Abb. 4).

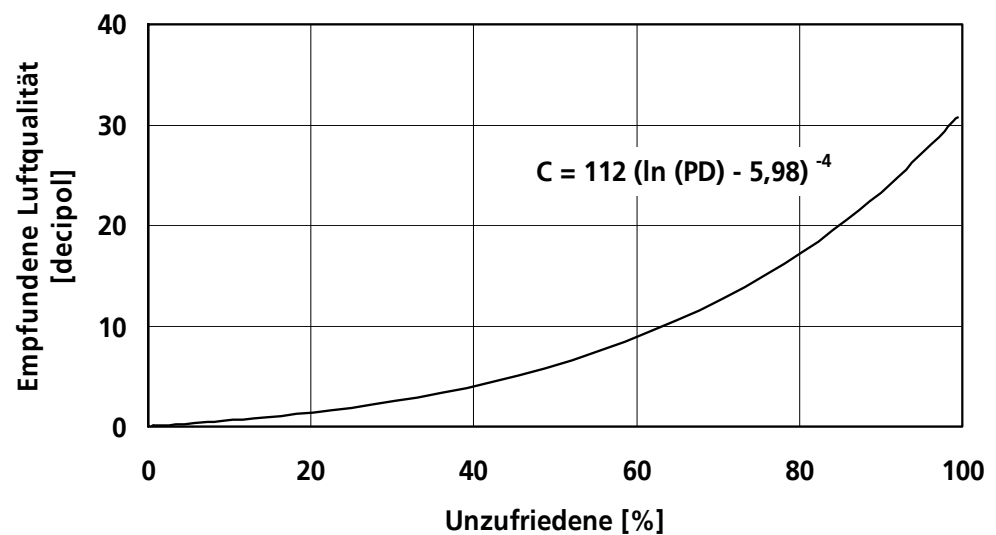


Abb. 4:
Zusammenhang zwischen empfundener Luftqualität und dem Prozentsatz Unzufriedener (PD).

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der kombinierten multifunktionalen Bauteile hinsichtlich der empfundenen Luftqualität wurden die Kenngrößen Geruchsintensität, Akzeptanz und die hedonische Wirkung herangezogen.

3 Multi-Funktionale-Bauteile – Stand der Technik

Mikroperforierte Absorber (MPA) sind schon länger bekannt. Produziert und vertrieben werden diese von Firmen wie Käfer [2], OWA [3], Akustik & Raum [4], Nimbus [5], etc. MPA sind in verschiedenen Ausführungen und Materialien wie Kunststofffolien bis hin zu Glas verfügbar.

Poröse Absorber (PoA) gibt es in verschiedenen Varianten, beispielsweise aus Mineralwolle oder Schaumstoffen. Diese sind für ihr hohes Absorptionsvermögen im mittleren und hohen Frequenzbereich bekannt. Innerhalb dieses Projektes wurde Basotect® [6] verwendet. Basotect® ist ein offenzelliger Melaminharzschäumstoff der von BASF entwickelt wurde.

Des Weiteren hat BASF in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE einen Latentwärmespeicher in Form von mikroverkapseltem PCM-Pulver, entwickelt. Das sogenannte Micronal® PCM ist beispielsweise in der Micronal® PCM Smart Board™ [7] verarbeitet und in zwei verschiedenen Varianten (Schalttemperatur 23 bzw. 26°C) erhältlich.

Die Firma ILKAZELL Isoliertechnik GmbH Zwickau vertreibt die Micronal® PCM Smart Board™ [8] sowohl als passive Wandsysteme als auch aktive Raum-Kühlsysteme, die durch Kapillarrohrmatten optimiert wurden.

Dörken GmbH & Co. KG [9] entwickelte ebenfalls Latentwärmespeicherplatten für den Einsatz in abgehängten Decken. Angeboten werden zwei PCM-Produkte, Delta®-Cool 24 und Delta®-Cool 28 mit Schalttemperaturen von 24 bzw. 28°C.

Für die Schadstoffneutralisierung in der Luft entwickelte Xella das passive System Fermacell green-line [10]. Diese Platte ist mit einer Keratinbeschichtung versehen, welche die dauerhafte Bindung von Schad- und Geruchsstoffen ermöglicht.

Aktivkohle [11] ist angesichts der großen inneren Oberfläche in der Lage, Schadstoffe zu absorbieren. Aktivkohleplatten lassen sich in nahezu allen geometrischen Varianten produzieren. Aufgrund des hohen Strömungswiderstands sind diese Platten auch aus akustischer Sicht interessant.

Eine weitere Alternative basiert auf einem aktiven System. Dabei werden durch UV-Licht und Titandioxid photokatalytische Prozesse ausgelöst, welche die Molekülbindungen der Schadstoffe aufbrechen und somit neutralisieren [12].

Das in diesem Projekt entwickelte PCM(Micronal®)-getränkte bzw. markierte Basotect® (im folgenden als „Micronal Basotect“ bezeichnet) bildet eine Kombination, die sowohl akustisch als auch thermisch einen Beitrag leisten kann.

4 Multifunktionale Bauteile – Wirkprinzipien und Ansätze

4.1 Wirkprinzipien

Typische leichte Wandbausysteme sind doppelschalig und verfügen über eine innere tragende und zugleich den Hohlraum bedämpfende Schicht, ggf. mit innerer oder lateraler Stützstruktur.

Die äußeren (massebehafteten) Schalen dienen als Beplankung und können als Zusatzfunktion, z.B. Latentwärmespeicher, enthalten. Weitere äußere Schichten (z.B. Absorber) beeinflussen bzw. behindern diese Zusatzfunktion (Abb. 5).

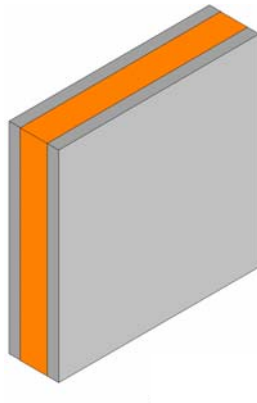


Abb. 5:
Typische leichte Wandbausysteme

Dem Ziel der Aktivierung der inneren Dämpfungsschicht als Absorber kommt eine Perforation einer Außenschale entgegen. Nach wie vor können Latentwärmespeicher funktionieren. Allerdings verliert die ursprüngliche Funktion der Schalldämmung deutlich an Wirkung (Abb. 6).

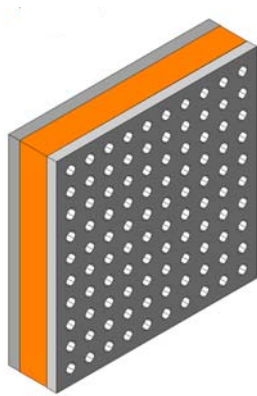


Abb. 6:
Akustische Aktivierung der inneren Dämpfungsschicht

Mit Bezug auf perforierte Außenschalen und die funktionale Integration lässt sich der Perforationsgrad und die Verteilung der Perforation (z.B. in den Randbereich) optimieren, um die Schalldämmende Wirkung wieder zu erreichen und das Absorptionsspektrum anzupassen (Abb. 7).

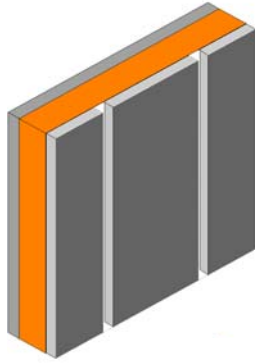


Abb. 7:
Optimierung der Perforation der Abdeckung

Einen Schritt weiter gehen 5-schichtige Sandwichelemente (eventuell auch mit einer Luftschicht). Mit Ihnen können alle bisher genannten Funktionen (Schalldämmung, Latentwärmespeicher, raumseitige Absorption von Schall und Geruch) auf hohem Niveau integriert werden. Dabei bleiben schlanke Waddicken erhalten, z.B. möglichst ≤ 100 mm für Rauntrennwände (Abb. 8).

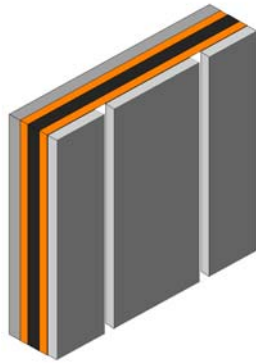


Abb. 8:
Integration aller Funktionen: Akustik, Wärme, Luftqualität

Alle o. g. Lösungsansätze haben einen raumseitigen Abschluss mit funktional transparenten Schichten, die insbesondere der architektonischen Gestaltung dienen (Abb. 9).

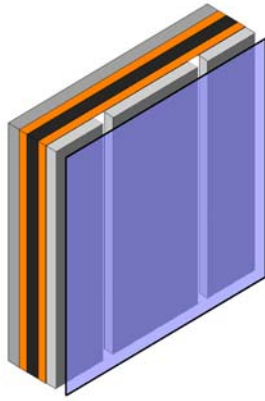


Abb. 9:
Architektonische Gestaltung

4.2 Ansätze

Aus dem Wirkungsprinzip wurden 8 Ansätze zusammengestellt. Die Multifunktionen sind mit (A) Akustik, (W) Wärme und (L) Luftneutralisierung beschrieben. Als Abkürzungen der verschiedenen Absorptionsstrukturen, die in weiteren Kapiteln beschrieben werden, sind wie folgt definiert: PoA (5.1.2): Poröseabsorber; PLA (5.1.3): Plattenabsorber; MPA (5.1.4): mikroperforierte Absorber; SLA (5.1.5): Schlitzabsorber; STA (5.1.7): Steifenabsorber.

4.2.1 Variante 1: (A) MPA, (W) Smart-Board, (L) Aktiv

Mikroperforierte Folien funktionieren nach dem Prinzip des Helmholtz-Resonators und weisen daher im Bereich der Resonanzfrequenz einen sehr hohen jedoch schmalbandigen Absorptionsgrad auf. Um eine breitbandigere Wirkung zu erzielen, schafft eine zweilagige Konstruktion (eine weitere dahinterliegende Folie), Abhilfe (Abb. 10).

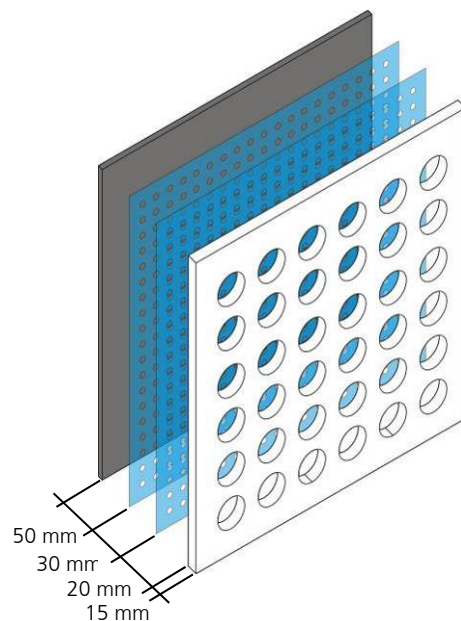


Abb. 10:

Variante 1: akustisch transparente SmartBoard-Platte mit zwei dahinter liegenden mikroperforierten ETFE-Folien, $D_{\text{ges}} = 115 \text{ mm}$

In Abhängigkeit vom Folien-/Wandabstand kann die Absorption variiert werden. Die gelochte SmartBoard-Platte sorgt für die Wärmespeicherung und akustische Transparenz. Maßnahmen für die Luftneutralisation kommen hier noch nicht zum Tragen. Diese müssen neben der Konstruktion gemäß Variante 8 mit einem aktiven System (s. Kapitel 7) angebracht werden (wie z.B. in Abb. 17).

4.2.2 Variante 2: (A) PoA, (W) Smart-Board, (L) Aktiv

Das Basotect eignet sich aufgrund der offenzelligen Struktur hervorragend als breitbandiger Schallabsorber (Abb. 11). Die gelochte SmartBoard-Platte sorgt für die Wärmespeicherung und akustische Transparenz. Maßnahmen für die Luftneutralisation müssen zusätzlich angebracht werden.

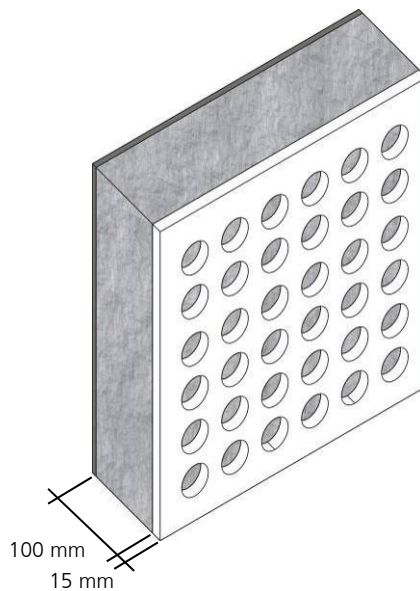


Abb. 11:

Variante 2: akustisch transparente SmartBoard-Platte mit dahinterliegendem Basotect UF, $D_{\text{ges}} = 115 \text{ mm}$

4.2.3 Variante 3a/3b: (A) PoA, (W) Smart-Board + PCM-Basotect, (L) Aktiv

Das Basotect eignet sich aufgrund der offenzelligen Struktur hervorragend als breitbandiger Schallabsorber. Die Abdeckung für Wärmespeicherung besteht aus einer Smartboard-Platte (3a) oder DeltaCool [9] (3b) (Abb. 12). Um eine architektonische Vielfalt zu erzielen, werden geschlitzte Strukturen aufgeführt, welche ebenfalls durchaus beachtliche Absorptionswerte aufweisen können. Die Breitbandigkeit ist entweder durch Verkleinerung des Schlitzes d und des Schlitzabstandes b in gleichem Verhältnis oder durch Minimierung der Plattendicke t (s. Abb. 24) positiv beeinflussbar. Maßnahmen für die Luftneutralisation müssen zusätzlich angebracht werden.

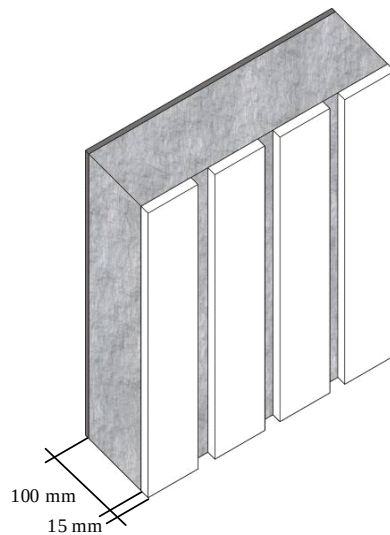


Abb. 12:

Variante 3a/3b: Berechnung: geschlitzte SmartBoard-Platte (3a) / DeltaCool (3b) mit dahinterliegendem Basotect UF, $D_{ges} = 115 \text{ mm}$

4.2.4 Variante 4: (A) PoA, (W) PCM-Basotect, (L) Aktiv

Das neue (getränkte) PCM-Basotect kann sowohl akustisch als auch als Wärmelattenspeicher eingesetzt werden (Abb. 13). Es funktioniert nach dem Schema des Modells in Abb. 12. Aufgrund des höheren Strömungswiderstandes (das in den Poren von Basotect getränkte Micronal erhöht den Strömungswiderstand von Bastoect) kann hier mit dünneren Schichtdicken des porösen Materials gearbeitet werden, wobei der Perforationsgrad aus Metallstreifen von $\sigma = 37,5\%$ und die Plattendicke $t = 1 \text{ mm}$ beträgt. Die Aluminium-Platten stellen für die thermische Be- und Entladung aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit kein Problem dar und dienen eher zu gestalterischen Zwecken. Maßnahmen für die Luftneutralisation müssen in der Luftschicht hinter PCM-Basotect oder zusätzlich angebracht werden.

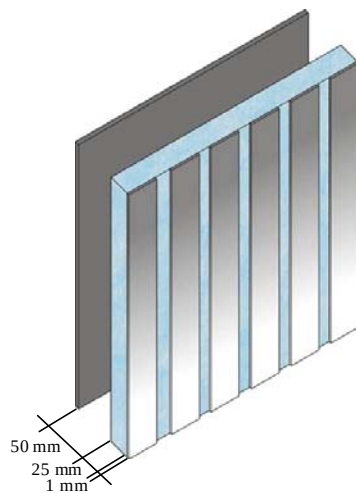


Abb. 13:

Variante 4: geschlitzte Aluminium-Platte mit dahinter liegendem Micronal Basotect,
 $D_{ges} = 76 \text{ mm}$

4.2.5 Variante 5: (A) PoA, (W) PCM-Basotect + Smart Board, (L) Aktiv

Die fünfte Variante spiegelt die Aussage aus dem vorangegangenen Abschnitt (4.2.4) wieder. Bei diesem Modell (Abb. 14) wurde lediglich die dünne Aluminiumplatte ($t = 1 \text{ mm}$) durch eine verhältnismäßig dicke PCM-Platte ($t = 15 \text{ mm}$) ersetzt. Die Auswirkungen zur Wärmespeicherung sind offensichtlich. Der Grundgedanke hierbei war, zwei PCMs unterschiedlicher Schmelzpunkte zu kombinieren, um eventuell eine breitere Temperaturspitzendämpfung zu erreichen. Maßnahmen für die Luftneutralisation müssen im Luftspalt hinter PCM-Basotect angebracht werden.

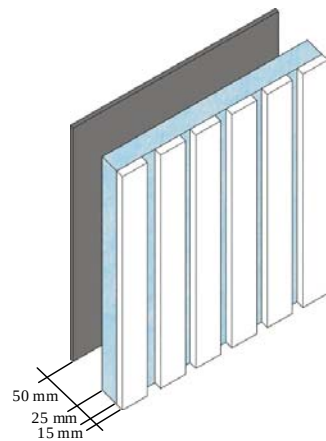


Abb. 14:

Variante 5: geschlitzte SmartBoard-Platte mit dahinterliegendem Micronal Basotect,
 $D_{ges} = 90 \text{ mm}$

4.2.6 Variante 6: (A) PoA, (W) PCM-Basotect, (L) Aktiv

Das PCM-Basotect (getränkt) funktioniert sowohl akustisch als auch als Wärmelatespeicher (Abb. 15). Die gelochten Aluminium-Platten stellen für die thermische Be- und Entladung aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit kein Problem dar und dienen eher zu gestalterischen Zwecken. Maßnahmen für die Luftneutralisation müssen im Luftspalt hinter PCM-Basotect angebracht werden.

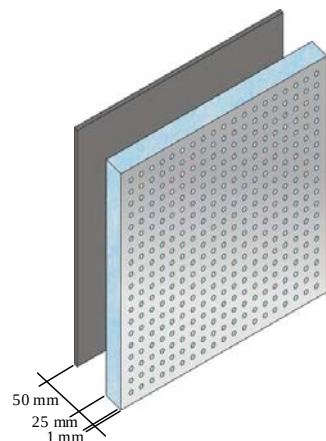


Abb. 15:

Variante 6: akustisch transparente Stahl-Lochplatte mit dahinterliegendem Micronal Basotect
 $D_{ges} = 76 \text{ mm}$

4.2.7 Variante 7: (A) STA, (W) PCM Basotect + Smart Board, (L) Aktiv

Die Struktur-Kombination (Abb. 16) besteht aus der gelochten SmartBoard-Platte (rechts) und einer zweiten mikroperforierten Platte (links). Die linke Hälfte kann transluzent gestaltet werden. Maßnahmen für die Luftneutralisation müssen in der linken Hälfte im Luftspalt hinter PCM-Basotect angebracht werden

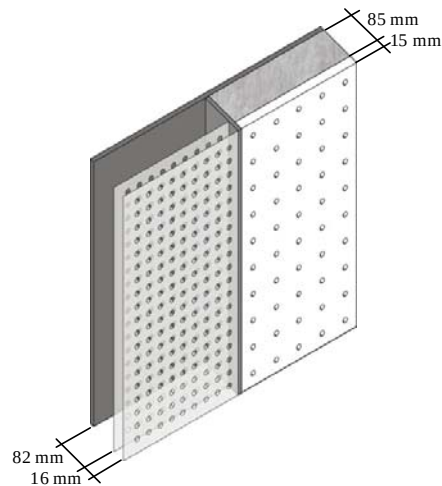


Abb. 16:

Variante 7: Streifenabsorber, 50% Wabenplatte, 50% gelochte PCM-Platte, $D_{ges} = 100 \text{ mm}$

4.2.8 Variante 8: (A) STA, (W) PCM Basotect + Smart Board, (L) Aktivkohleplatte

Die Variante 8 ist in Abb. 17 dargestellt. Diese ist ein weiterer Streifenabsorber, bestehend aus einer 50/50-Kombination (Aktivkohle für Luftneutralisierung und SmartBoard-Platte für Wärmespeicherung). Die poröse Aktivkohle und Basotect hinter dem gelochten SmartBoard sorgen für die akustische Absorption.

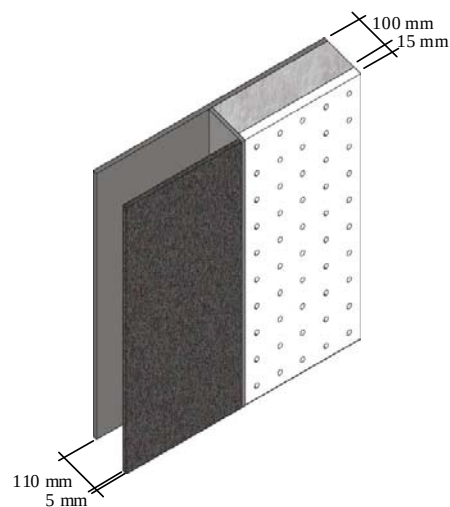


Abb. 17:

Variante 8: Streifenabsorber, 50% Aktivkohleplatte, 50% gelochte PCM-Platte, Dges = 115 mm

4.2.9 Variante 9: (A) PoA, (W) PCM Basotect, (L) Aktiv

Als Variante mit dem höchsten Schallabsorptionsgrad kristallisierte sich der mit Mikronal® PCM modifizierte Basotect Schaumstoff. Der Schaumstoff wurde in einem von BASF entwickelten Verfahren mit einer Micronal® PCM haltigen Suspension getränkt. Die Eindringtiefe in das offenporige Melaminharzschaumgefüge betrug 5 mm bis 10 mm. Der Flächenverbrauch an der Suspension lag bei 2 kg/m² bis 4 kg/m². Hohe Schallabsorptionsgrade wurden mit Schaumstoffproben, deren Flächenverbrauch an PCM haltiger Suspension bei 3,5 kg/m² lag, erzielt. Das in der Endphase des Projektes neu entwickelte „PCM-markierte“ Basotect ist akustisch und als Wärmelateentspeicher perfekt einsetzbar (Abb. 18). Die Abdeckung aus PCM-Mischung stellt die effizienteste Be- und Entladung dar. Die PCM-Abdeckung kann nach Wunsch angepasst werden, um die Anforderung an Akustik und Wärme zu erreichen.

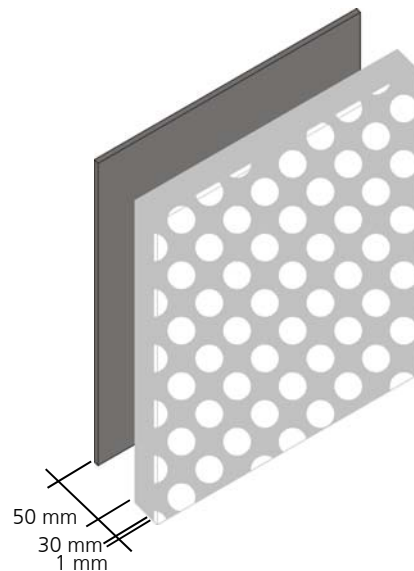


Abb. 18:

Variante 9: PCM-markiertes Basotect Dges = 81 mm

5 Theoretische Modellierung

Am Fraunhofer IBP sind Verfahren entwickelt worden, um den Schallabsorptionsgrad α_0 verschiedener Konstruktionen abzuschätzen und zu optimieren. Das Rechenmodell beschränkt sich hierbei auf den Fall des senkrechten Schalleinfalls. Die Arbeitsschritte im theoretischen Teil dieses Vorhabens waren die Modellierung von unterschiedlichen akustischen Ansätzen, die Modellierung der thermischen Speicherfähigkeit von Latentwärmespeichern und die Luftneutralisierung. Das Ziel war es, mittels Parametervariation ein Optimum zu berechnen, welches die in 2.2 genannten Anforderungen erfüllt. Außerdem sollte die theoretische Eingrenzung die Möglichkeit liefern, multifunktionale Bauteile so auszulegen, dass eine bestimmte Raumnutzung besonders unterstützt wird.

5.1 Akustik: Schallabsorption

5.1.1 Absorptionsgrad

Als Schallabsorption wird die Umwandlung von Schallenergie in Wärme bezeichnet. Der Schallabsorptionsgrad α kann aus dem Reflexionsfaktor r wie folgt berechnet werden [15]:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (1)$$

Der Reflexionsfaktor r kann auch aus der komplexen Wandimpedanz Z abgeleitet werden, da diese das Hindernis (z.B. eine Trennwand) akustisch gänzlich beschreibt.

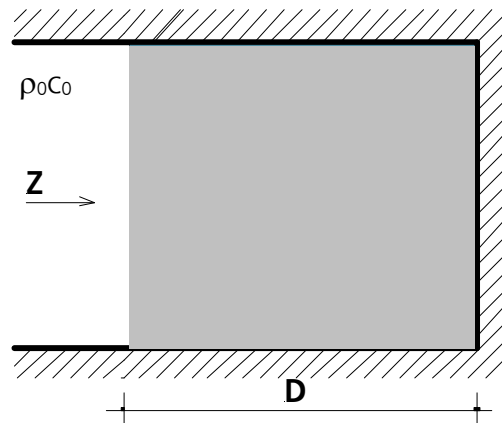


Abb. 19:
Schema einer Absorptionsstruktur mit Wandimpedanz Z

Für senkrechten Schalleinfall gilt

$$\underline{r} = \frac{Z - \rho_0 c_0}{Z + \rho_0 c_0} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2)$$

mit $Z_0 = \rho_0 c_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 343 \text{ m/s} = 413 \text{ Pa s/m}$

Die Absorption wird am größten, wenn die Wandimpedanz optimal an die Schallkennimpedanz der Luft angepasst ist: $Z = \rho_0 c_0$, somit $r = 0$.

Für diffusen Schalleinfall kann der Schallabsorptionsgrad nach

$$\alpha_s = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\Theta) \cdot \cos \Theta \cdot \sin \Theta \cdot d\Theta \quad (3)$$

ermittelt werden, wobei Θ den Schalleinfallswinkel in Bezug auf die Wandnormale darstellt.

5.1.2 Poröse Absorber (PoA)

Poröse Materialien haben ein breitbandiges Schallabsorptionsspektrum und werden oft in Absorberstrukturen integriert.

Die Faserbauteile bestehen hauptsächlich aus Luft und einem mehr oder weniger beweglichen Skelett. In der Luftschicht breiten sich Luftschallwellen aus, die während ihrer Ausbreitung gedämpft (absorbiert) werden. Auch das Skelett schwingt (je nach Steifigkeit und Trägheit) mit und trägt damit zur Schalldämpfung bei. Es ist bereits für künstliche Faser- und Schaumbauteile erfolgreich angewendet worden [16].

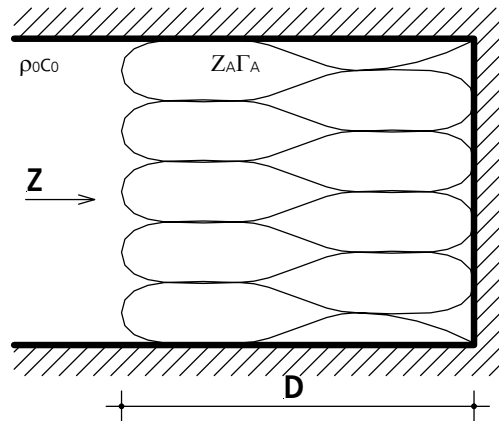


Abb. 20:
Schema eines porösen Absorbers

Um die Schallabsorption einer homogenen Schicht zu berechnen, müssen die Ausbreitungskonstante Γ_A und der Wellenwiderstand Z_A der Schicht aus den bekannten Parametern berechnet werden.

Die Ausbreitungskonstante Γ_A in einer homogenen Faserschicht wird wie folgt berechnet

$$\Gamma_A = j \cdot k_0 \sqrt{\frac{\kappa + jE_{\text{eff}}/E_0}{1 + jE_{\text{eff}}/E_0}} \left(\chi - j \frac{\sigma_v}{2\pi E_{\text{eff}}} \right). \quad (4)$$

Der Wellenwiderstand Z_A in einer homogenen Faserschicht nach Gleichung

$$Z_A = \frac{Z_0}{\sigma_v} \sqrt{\frac{1 + jE_{\text{eff}}/E_0}{\kappa + jE_{\text{eff}}/E_0}} \left(\chi - j \frac{\sigma_v}{2\pi E_{\text{eff}}} \right) \quad (5)$$

mit

$$E_{\text{eff}} = \frac{\rho_0 f}{\Xi} - j \frac{\rho_0}{2\pi \rho_a}. \quad (6)$$

Die Wandimpedanz (Widerstand an der Oberfläche des porösen Materials, den die Schallwelle „sieht“) des Faserbauteils wird nach

$$Z = Z_A \coth(\Gamma_A D) \quad (7)$$

berechnet.

Hierin bedeuten:

D	Dicke der Absorber Schicht
κ :	Adiabatexponent für Luft ($= 1.4$);
χ :	Strukturfaktor;
σ_v :	Volumen-Porosität des Absorbermaterials
ρ_0 :	Dichte der Luft;
ρ_a :	Dichte des Absorberskeletts;
f:	Frequenz;
$k_0 = 2 \pi f / c_0$	Wellenzahl
$Z_0 = \rho_0 c_0$:	Schallkennimpedanz der Luft
c_0	Schallgeschwindigkeit in Luft
Ξ :	längenbezogener Strömungswiderstand des Absorbermaterials

5.1.3 Plattenresonatoren (PLA)

Physikalisch gesehen sind Plattenresonatoren Feder-Masse-Systeme. In dem System fungiert die schwingende Platte als Masse und der eingeschlossene Luftraum hinter der Platte als Feder, wobei die Folie oder Membran als eine Masse ohne eigene Innenspannung bzw. Biegesteife angesehen werden kann. Als einschichtiger Plattenresonator versteht man eine biegesteife Platte mit einem dahinter liegenden, schallhart abgeschlossenen Luftvolumen der Dicke D.

Im Folgenden werden quadratische Platten betrachtet. Die Impedanz Z ergibt sich entsprechend der „Additionsregel für Impedanzen“ [17]. Additiv aus einem Anteil Z_p , welcher sich aus den Impedanzen der Eigenschwingung der Platte zusammensetzt und einer Transferimpedanz Z_t , welche die Wirkung des schallhart abgeschlossenen Luftvolumens berücksichtigt. Die Gesamtimpedanz Z für senkrechten Schalleinfall ergibt sich aus

$$Z = Z_p + Z_t \quad (8)$$

wobei nach [18]

$$Z_p = \frac{1}{\sum_m \sum_n \frac{1}{Z_{mn}}} \quad m, n = 1, 3, 5, \dots \quad (9)$$

und nach [17] für die Transferimpedanz (= Impedanz der am Ende schallhart abgeschlossenen Luftschicht der Dicke D am Ort der schwingenden Platte)

$$Z_T = -j\rho_0 c \cdot \cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right) \quad (10)$$

einzusetzen ist.

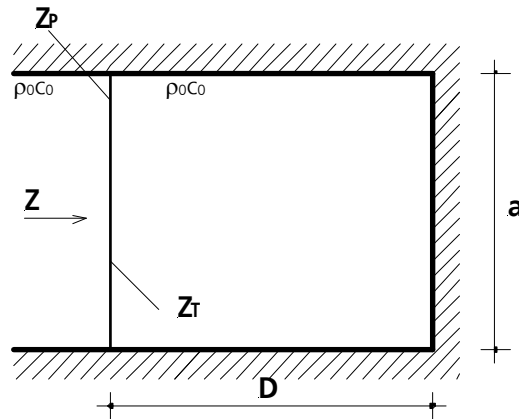


Abb. 21:
Schema eines Plattenabsorbers

Die einzelnen Impedanzen Z_{mn} der Platteneigenschwingungen sind parallel geschaltet und ermitteln sich wie folgt [18]:

$$Z_{mn} = \frac{B'B_{mn}g_{mn}}{\omega \cdot a^4} + j \left[\omega \cdot m'' A_{mn} - \frac{B'B_{mn}}{\omega \cdot a^4} \right] \quad (11)$$

$$\text{mit } B' = \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \mu_p^2)} \quad (12)$$

$$\text{und } A_{mn} = m^2 n^2 \pi^4 \frac{1}{64}, \quad B_{mn} = (m^2 + n^2)^2 \pi^4 A_{mn} \quad (13)$$

Hierin bedeuten:

B'	Biegesteife der Platte
A_{mn}, B_{mn}	Konstanten, von der Platteneinspannung abhängig
g_{mn}	Verlustfaktor der Moden (m, n)
$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz
m''	Flächenbezogene Masse der Platte
E	Elastizitätsmodul des Plattenmaterials
t	Dicke der Platte

a	Seitenlänge
μ_P	Poissonsche Querkontraktionszahl

5.1.4 Lochplattenresonatoren (MPA)

Die Impedanz eines Lochplattenresonators lässt sich wie beim Plattenresonator aus zwei verschiedenen Anteilen zusammensetzen. Zum einen die Impedanz Z_L der Lochplatte und zum anderen der Transferimpedanz Z_T der dahinter liegenden, schallhart abgeschlossenen Luftschicht. Die Impedanz der Gesamtkonstruktion ergibt sich zu

$$Z = Z_L + Z_T \quad (14)$$

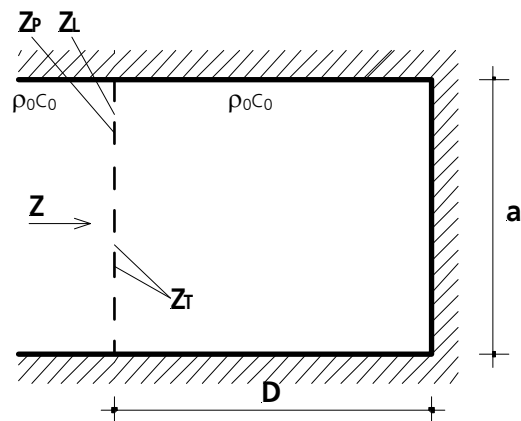


Abb. 22:
Schema eines Lochplattenabsorbers

Die Transferimpedanz Z_T ist entsprechend Glg. (10) zu berechnen. Für die Berechnung der Impedanz der schwingungsfähigen Lochplatte muss vorab die Impedanz Z_h der Luftpfropfen in den Löchern (nach [19], [20]), wie folgt ermittelt werden

$$Z_h = \rho_0 c \left[\frac{32\mu}{\varepsilon} \frac{t}{d^2} \left(\sqrt{1 + \frac{x^2}{32}} + \frac{x\sqrt{2}}{8} \frac{d}{t} \right) + j \frac{\omega t}{\varepsilon c_0} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + \frac{x^2}{2}}} + 0,85 \frac{d}{t} \right) \right] \quad (15)$$

wobei sich der dimensionslose (auf die Grenschichtdicke bezogene) Lochradius x durch

$$x = \sqrt{\frac{\omega}{\pi}} \frac{d}{2} \quad (16)$$

bestimmen lässt. Darin bedeuten:

d	Lochdurchmesser
---	-----------------

b Lochabstand

$$\varepsilon = \frac{\pi d^2}{4 b^2} \quad \text{Lochflächenanteil}$$

μ Kinematische Zähigkeit der Luft ($\mu = 1,56 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)

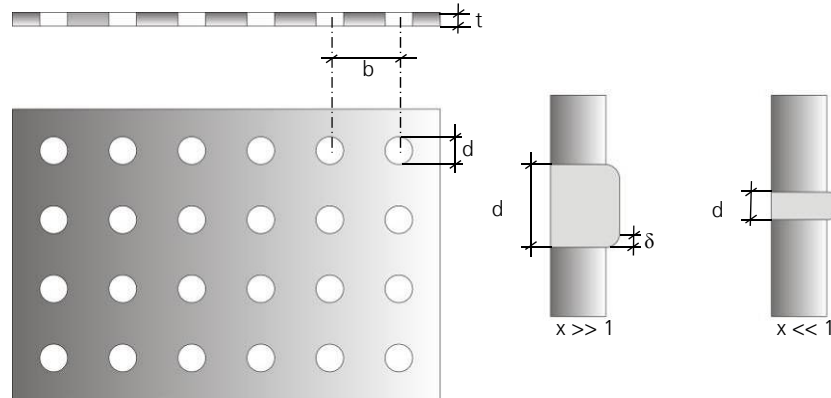


Abb. 23:

schematisches Modell einer perforierten Platte und Schnelleverteilung der Schwingung in großen und kleinen Löchern

Wenn es sich um ein gut Wärme leitendes Plattenmaterial handelt, treten zusätzliche Verluste auf, die durch eine Erhöhung der kinematischen Zähigkeit in Glg. (15) berücksichtigt werden.

$$\mu \rightarrow \mu + \Delta\mu \quad \text{mit } \Delta\mu \approx 3.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ (bei Metall)}$$

Unter der Voraussetzung, dass sich die Biegesteife der Platte durch das Einbringen der Löcher nicht verändert, kann die Impedanz Z_L der schwingungsfähigen Lochplatte aus der akustischen Parallelschaltung der Teilimpedanzen Z_P (schwingungsfähige Platte) und Z_h (Luft in den Löchern) folgendermaßen berechnet werden

$$Z_L = \frac{Z_P Z_h}{Z_P + Z_h}, \quad (17)$$

wobei für Z_P die Glg. (9) und für Z_h die Glg. (15) zu verwenden sind. Die Gesamtimpedanz der Konstruktion ergibt sich durch Einsetzen der Glg. (10) und Glg. (17) in Glg. (14).

Die Absorptionsgrade dieser einschichtigen Resonatoren weisen neben relativ schmal ausgeprägten Absorptionsmaxima auch starke Einbrüche zwischen den einzelnen Resonanzspitzen auf. Durch eine raffiniert gewählte, mehrschichtige Konstruktion schwingungsfähiger Lochplatten kann die Tiefe der Einbrüche reduziert werden. Dabei ist zu beachten, dass die verschiedenen geometrischen und stofflichen Parameter mit Hinblick auf ein möglichst breitbandiges Absorptionsvermögen ausgelegt sind, d.h. dass alle Resonanzen eine hohe Absorption erzeugen und jeweils nicht zu weit auseinander liegen. Bei den erzeugten Absorptionsmaxima ist darauf zu achten, dass die höchsten Frequenzanteile vor allem in der (vom Raum her gesehen) ersten und die tiefsten Anteile insbesondere in der letzten Schicht absorbiert werden.

5.1.5 Schlitzförmige Schallabsorber (SLA)

Wie beim Lochplattenresonator lassen sich beträchtliche Unterschiede der Wirkprinzipien durch geringe geometrische Modifikationen paralleler Schlitzte feststellen. Durch Variation der Schlitzbreite d und des Schlitzabstands b bei gleichbleibender Perforation σ gibt es wesentliche Auswirkungen auf die einzelnen Absorptionskurvenverläufe.

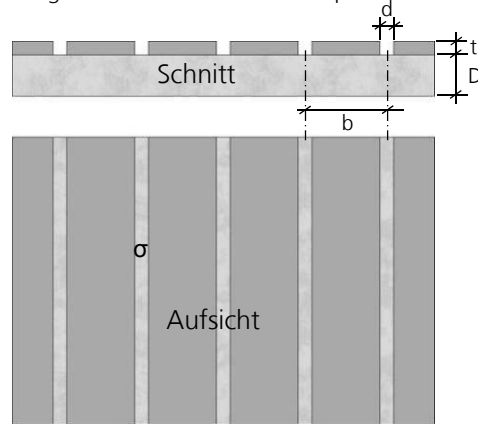


Abb. 24:
Skizze eines schlitzförmigen Schallabsorbers

Für schlitzförmige Schallabsorber sind Absorberschichten der Dicke D mit porösen Materialien ausgefüllt. Die Kenngröße der porösen Schicht wie Wellenimpedanz Z_A und Ausbreitungskonstante Γ_A lassen sich aus den Glg (4) und (5) berechnen.

Die Impedanz Z_1 ist der Widerstand der Absorberschicht im Bereich der freien Schlitzfläche, welche folgendermaßen beschrieben werden kann

$$Z_1 = \sigma \cdot Z_A \coth \Gamma_A D, \text{ mit } \sigma = \frac{d}{b} \quad (18)$$

Dabei stellt σ den Perforationsgrad dar, der sich aus dem Quotienten Schlitzbreite d durch Schlitzabstand b bildet.

Allerdings berücksichtigt die so dargestellte Schallausbreitung in der Absorberschicht nur eine ankommende ebene Wellenfront, die durch die Schlitzte eindringt. In der Absorberschicht bildet sich nach dem Beugungsprinzip erst nach einer gewissen Strecke wieder eine ebene Wellenausbreitung aus, da in den Schlitzten eine Einschnürung erzwungen wird und infolgedessen ein fast linienförmiges Eindringen stattfindet.

Für die hier betrachtete Anordnung lässt sich die Impedanz für die Ausbreitung in homogenen Schichten [21] durch die nachstehende Formel darstellen

$$Z_2 = Z_1 + 2\sigma \Gamma_A Z_A \sum_{n>0} \left(\frac{\sin n\pi\sigma}{n\pi\sigma} \right)^2 \frac{1}{\varepsilon_n} \coth \varepsilon_n D \quad (19)$$

Der zweite Term in Glg. (19) stellt die harmonische Schallausbreitung dar, welche durch die periodisch wiederkehrenden Linienquellen (Schlitze) erzeugt wird. Die daraus resultierende Schallausbreitung wird beschrieben. Dabei gilt für die Wellenzahl

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{n2\pi}{b}\right)^2 + \Gamma_A^2} \quad (20)$$

Für die in der Praxis üblichen Absorberschichtdicken von $D > 10$ mm kann nachfolgende Vereinfachung verwendet werden

$$\varepsilon \approx \left(\frac{n2\pi}{b}\right) \text{ und } \coth \varepsilon_n D \approx 1 \quad (21)$$

Dies führt zu

$$Z_2 = Z_1 + Z_A \Gamma_A \frac{b^2}{d\pi^3} \sum_{n>0} \frac{1}{n^3} (\sin n\pi\sigma)^2 \quad (22)$$

Ersetzt man nun noch den in Glg. (22) konvergierenden Summenausdruck, so erhält man für die Impedanz der hinter der Schlitzplatte liegenden Absorberschicht

$$Z_2 = Z_1 + Z_A \Gamma_A \frac{b^2}{d\pi^3} (\sin \pi\sigma)^2. \quad (23)$$

Für die Gesamtwandimpedanz Z_s des schlitzförmigen Absorbers mit der „effektiven“ Luftmasse in den Schlitzen in Abhängigkeit der Plattendicke, also inklusiv der vorderseitigen Mündungskorrektur, ergibt sich

$$Z_s = \frac{1}{\sigma} \left(j\omega m_L'' + \sigma Z_A \coth \Gamma_A D + \frac{b^2}{d\pi^3} Z_A \Gamma_A (\sin \pi\sigma)^2 \right) \quad (24)$$

5.1.6 Mehrschichtige Resonanzabsorber

Bei mehrfach geschichteten Resonanzabsorbern werden die einzelnen Schichten für die Berechnung der Impedanz zerlegt, so dass jeweils ein einschichtiger Resonator entsteht. Der Abschluss der Luftvolumina dieser einzelnen Teilsysteme werden nicht mehr prinzipiell schallhart, sondern zur Generalisation durch eine Impedanz Z_1 einer begrenzenden Ebene abgeschlossen. Diese beschreibt das akustische Verhalten der hinter der begrenzenden Ebene liegenden anknüpfenden Absorptionsschicht. Die Berechnung der Gesamtimpedanz Z erfolgt analog zu der in den vorigen Abschnitten angewendeten Berechnungsweise. Es ist lediglich eine modifizierte Transferimpedanz anstelle der angegebenen Transferimpedanz in Glg. (10) einzusetzen, welche die Wirkung der begrenzenden Ebene, des mit der Impedanz Z_1 abgeschlossenen Luftvolumens, am Ort unmittelbar hinter der schwingenden Platte bzw. Lochplatte beschreibt. Die modifizierte Transferimpedanz (ebenfalls mit Z_T bezeichnet) ist nach [17] wie folgt definiert

$$Z_T = \rho_0 c \frac{-j \cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right) Z_1 + \rho_0 c_0}{-j \rho_0 c_0 \cot\left(\frac{\omega D}{c_0}\right) + Z_1} \quad (25)$$

Besteht der Resonanzabsorber aus mehreren Schichten, ist die Transferimpedanz rekursiv zu ermitteln.

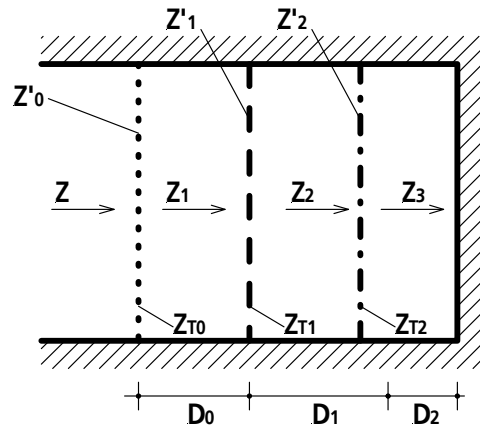


Abb. 25:
Schema einer mehrschichtigen Anordnung

Unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Platten bzw. Lochplatten die Trennimpedanzen $Z'_0, Z'_1, Z'_2 \dots$ aufweisen, die sich bei Platten entsprechend Glg. (9), bei „starken Lochplatten“ mittels Glg. (15) und bei „schwingungsfähigen Lochplatten“ nach Glg. (17) bestimmen lassen, lautet die Rekursionsformel für die Impedanz einer mehrschichtigen Resonanzabsorber-Anordnung allgemein

$$Z_m = Z'_m + Z_{Tm} \quad (26)$$

mit

$$Z_{Tm} = \rho_0 c \frac{-j \cot\left(\frac{\omega D_m}{c_0}\right) Z_{m+1} + \rho_0 c_0}{-j \rho_0 c_0 \cot\left(\frac{\omega D_m}{c_0}\right) + Z_{m+1}}, \quad m = 0 \text{ bis } m_{\text{ges}}-1. \quad (27)$$

Dabei bezeichnet m_{ges} die Anzahl der Schichten der Gesamtanordnung und Z_m die Eingangsimpedanz, mit der die $(m-1)$ te Schicht abgeschlossen ist, $Z_{m,\text{ges}}$ die Eingangsimpedanz des schallharten Abschlusses und D_m die Luftschichtdicke der $(m-1)$ ten Schicht.

5.1.7 Nebeneinander liegende Absorberflächen (STA)

Die Berechnung der nebeneinander liegenden Absorberflächen (auch Streifen-Absorber STA genannt) erfolgt in der ersten Annäherung (ohne Berücksichtigung der zusätzlichen Wirkung des Impedanzsprungs) in Analogie zur Elektrotechnik. Zunächst wurde die Impedanz der jeweiligen Absorberfläche einzeln ermittelt (Z_1 , Z_2 mit entsprechenden Flächen von S_1 und S_2). Die Gesamtimpedanz Z ergibt sich aus der akustischen Parallelschaltung dieser beiden flächenbewerteten (σ_1 : σ_2) Impedanzen gemäß Glg. (28).

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{(1 - \sigma_1)Z_1 + \sigma_1 Z_2} \quad (28)$$

Mit $\sigma_1 = S_1/(S_1+S_2)$, und $\sigma_2 = S_2/(S_1+S_2)$ und $\sigma_1 + \sigma_2 = 1$.

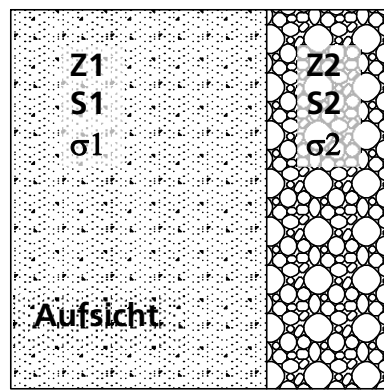


Abb. 26:
Aufsicht eines nebeneinander liegenden Absorbers

Durch Ausnutzung der nebeneinander liegenden Absorptionsflächen können die Absorptionsvermögen und Funktionen einer Struktur eines Multi-Funktional-Bauteils optimiert werden.

5.2 Latentwärmespeicher

5.2.1 Speicherung

Die thermische Speicherung kann über sensible oder latente Speicherung erfolgen. Die sensible Speicherung ist eine „spürbare“ Speicherung, die über die spezifische Wärmekapazität beschrieben werden kann. Diese Konstante gibt die Energiemenge an, welche benötigt wird, um ein Kilogramm eines Materials um ein Kelvin zu erwärmen. Um beispielsweise ein Kilogramm Beton um ein Kelvin zu erwärmen, benötigt man 0,84 kJ/(kg·K). Für ein Kilogramm Wasser hingegen 4,18 kJ/(kg·K) [22]. Diese Kapazitäten sind in der Regel druck- und temperaturabhängig. In den bauüblichen Temperaturbereichen ergeben sich dabei keine nennenswerten Einflüsse und auch die Abhängigkeit vom Druck spielt vor allem bei Gasen eine Rolle. Anders ist es bei Aggregatzustandsänderungen, bei denen die spezifischen Wärmekapazitäten ober- und unterhalb des Schmelzpunktes beachtet werden müssen.

5.2.2 Latente Speicherung

Die thermische Speicherung soll mithilfe von einem Latentwärmespeichermaterial, kurz PCM (Phase Change Material) realisiert werden. PCM nimmt Wärme auf, ohne dass eine Temperaturerhöhung stattfindet. Diese nicht fühlbare oder verborgene Wärme wird auch Latentwärme genannt. Da das PCM reversibel ist, tritt gleichermaßen keine Temperaturänderung bei der Wärmeabgabe ein.

Ein exemplarisch latenter Vorgang findet bei Wasser statt, indem beim Phasenübergang von flüssig zu gasförmig bzw. von fest zu flüssig, Wärme in Form von Verdampfungsenergie benötigt wird.

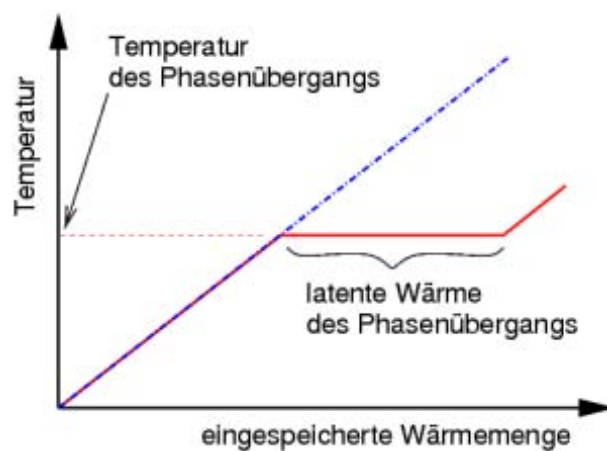


Abb. 27:

S Abb. 2.13: Vergleich sensibler (blau) und latenter Wärmespeicherung (rot) [13]

Um Eis bei 0°C zu Wasser bei 0°C aufzuschmelzen ist die gleiche Energie erforderlich, wie bei der Erhitzung des Wassers von 0°C auf 80°C.

Die Energie, die benötigt wird, um einen Stoff von einem Aggregatzustand in einen anderen (z.B. fest-flüssig) zu überführen, wird Schmelzwärme genannt. Dabei werden auf molekularer Ebene durch Wärmezufuhr die Teilchen in Bewegung versetzt. Je mehr Wärme zugeführt wird, um so heftiger sind die Teilchenbewegungen. Die zugeführte Wärmeenergie wird folglich in kinetische Energie der Teilchen umgewandelt. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit der Teilchen brechen die molekularen Bindungen auf, ohne dass sich die Geschwindigkeit weiter erhöht, demnach bleibt die Temperatur konstant. Erst nachdem alle Bindungen aufgebrochen sind, erfolgt ein weiterer Temperaturanstieg des PCM (siehe Abb. 27).

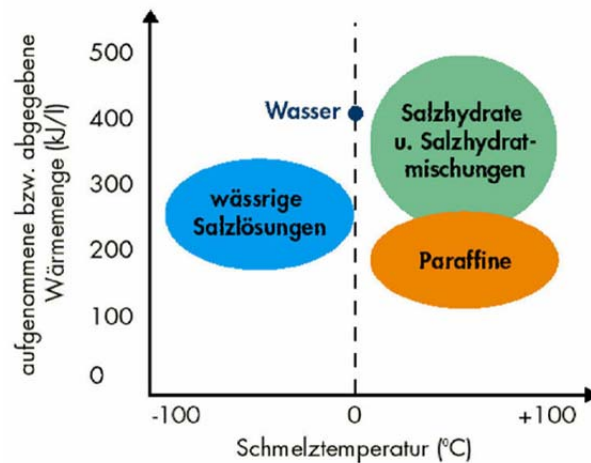


Abb. 28:

S Abb. 2.14: Schmelztemperaturen und speicherbare Wärmemenge Q von Latentmaterial [14]

Bei PCM wird unterschieden zwischen organischen (Paraffine, Fettsäuren) und anorganischen PCM (Wasser, Salze, Salzhydrate, Metalle). Sie weisen unterschiedliche Schmelz- bzw. Erstarrungsbereiche auf, welche sich durch Beimengung anderer Salze beeinflussen lassen (Abb. 28). Beispiele für Schmelztemperatur T_s und Schmelzenthalpie:

Wasser: $T_s = 0 \text{ °C}$; $L = 330 \text{ MJ/m}^3$

Micronal PCM: $T_s = 23/26 \text{ °C}$; $L = 30/33 \text{ MJ/m}^3$

Delta Cool: $T_s = 24/28 \text{ °C}$; $L = 245/291 \text{ MJ/m}^3$

Hierbei spielt auch die optimale Dicke t_{opt} des PCM-Bauteils eine wesentliche Rolle, da das PCM über die Eindringtiefe hinaus unwirksam und somit auch unwirtschaftlich ist. Durch die nachfolgende Gleichung (29) lässt sich die optimale Dicke t_{opt} über die Eindringtiefe σ berechnen.

$$d_{\text{opt}} = 1,2 \cdot \sigma = 1,2 \cdot \sqrt{\frac{T}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{L} \cdot \Delta\theta} \quad (29)$$

Dabei bedeuten:

T : Periodendauer [s]
 λ : Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
 L : Schmelzenthalpie [J/m³]
 $\Delta\theta$: Schmelzbereich [K]

5.2.3 Simulation

Die Wirksamkeit des PCMs wurde mithilfe des Simulationsprogramms THERMPLAN TRANSIT berechnet und veranschaulicht. Dafür wurde ein vereinfachter Raum (Abb. 29) mit folgenden Parametern angenommen:

Länge:	5,0 m
Breite:	4,0 m
Höhe:	3,0 m
Volumen:	60 m ³
Fensterfläche:	1,5 m x 3,0 m = 4,5 m ²

Um die Wirkung des PCMs besser hervorheben zu können, sind die Begrenzungsflächen des Raumes für die Simulation folgendermaßen definiert: seitlich, ober- und unterhalb des Raumes wurde in den umgebenden Räumlichkeiten jeweils eine Temperaturkonstante von 20°C angenommen, sowie eine südorientierte Außenwand, in der sich ein Fenster der Größe 4,5 m² befindet. Zudem wurde ein konstanter Luftwechsel von 0,6 h⁻¹ vorgegeben. Der Raum ist in Leichtbauweise ausgeführt. Die Bauteileigenschaften des Referenzraumes sind in Anhang 2, **Tabelle 9**: Parameter des Referenzraumes

aufgelistet.

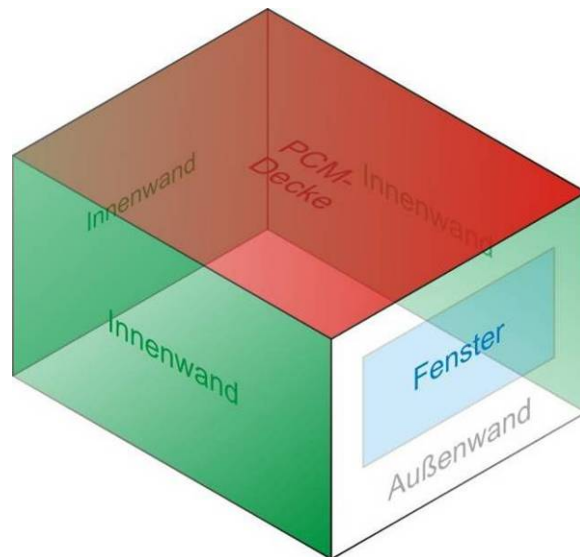


Abb. 29:
S Abb. 2.15: Schematische Skizze des Raumes

5.2.3.1 Smart Board-Platte

Für die Smart Board-Platte ergibt sich deren optimale Dicke nach Glg. (29) in 5.2.2 zu $t_{\text{opt}} = 47$ mm. Jedoch ergab sich bei der Parametervariation, dass die optimale Dicke im Gegensatz zur 15 mm-Platte einen Dämpfungsvorteil von nur ca. 30 % bei 3-facher Dicke bzw. Masse hat und zudem zu beträchtlichen Einbußen des Absorptionsvermögens führt (Anhang 2).

Für die Simulation wurde nur die Decke mit den MFBs bzw. PCM belegt, d.h. für die verschiedenen Varianten änderte sich lediglich der Deckenaufbau unterhalb des Stahlbetons. In den folgenden Abbildungen sind Temperaturverläufe veranschaulicht, die sich über den Tag bzw. die Nacht im Raum einstellen. Abgebildet ist die Außentemperatur (blaue Linie), der Referenzraum ohne PCM (schwarze Linie), mit SmartBoard 26 (Schalttemperatur bei 26°C, grüne Linie) und Smart-

Board 23 (Schalttemperatur bei 23°C, rote Linie). Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurde ein Zeitraum von sieben Tagen, vom 29. August bis 05. September, mit dem statistisch heißesten Tag des Jahres, gewählt.

Um die Auswirkung der Perforation der akustisch wirksamen Deckenaufbauten (ge-
locht/geschlitzt) quantifizieren zu können, wurde vorerst eine Vergleichssimulation mit einer voll-
ständigen PCM-Belegung (0% Perforation) durchgeführt.

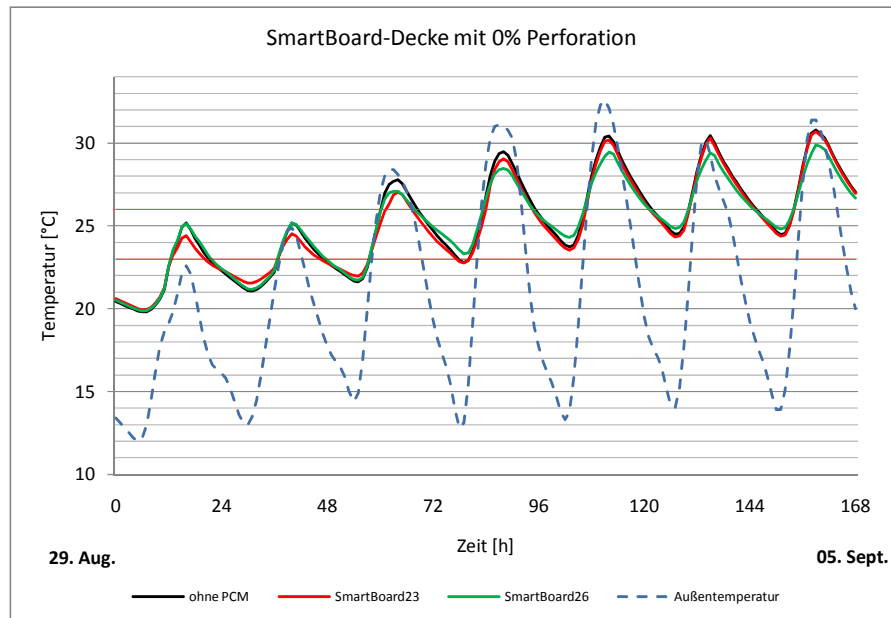


Abb. 30:

Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke, 0% Perforation

Eine Überhitzung im Raum wird selbst bei 100%iger PCM-Deckenbelegung nur zeitweise verhindert. Betrachtet man nun die Smart Board 23 (rote Linie), ist gut zu erkennen, dass in den ersten 72 Stunden, in Abb. 30, wo die 23°C-Grenze (Schmelztemperatur) überschritten wird, eine Temperaturdämpfung eintritt. Danach, wenn die Temperaturen im Raum nicht mehr unter die jeweilige Schalttemperatur sinken, ist eine Entladung unmöglich und somit nähert sich die Temperaturkurve des PCMs immer mehr der des Referenzraumes an, bis sie sich schließlich überlagern. Analog dazu, zeigt sich die Wirksamkeit der Smart Board 26 (grüne Linie) ab dem dritten Tag, bei der die Schalttemperatur von 26°C durchfahren wird.

Die Temperaturschwankung kann in den heißen Monaten Juli bis Oktober mit der Smart Board 23 um bis zu 1,3 K und mit der Smart Board 26 um 1,2 K gedämpft werden, sofern eine Entladung gewährleistet ist. Abb. 31 veranschaulicht den heißesten Tag des Jahres und zeigt die Phasenverschiebung des Maximums um ca. 1h.

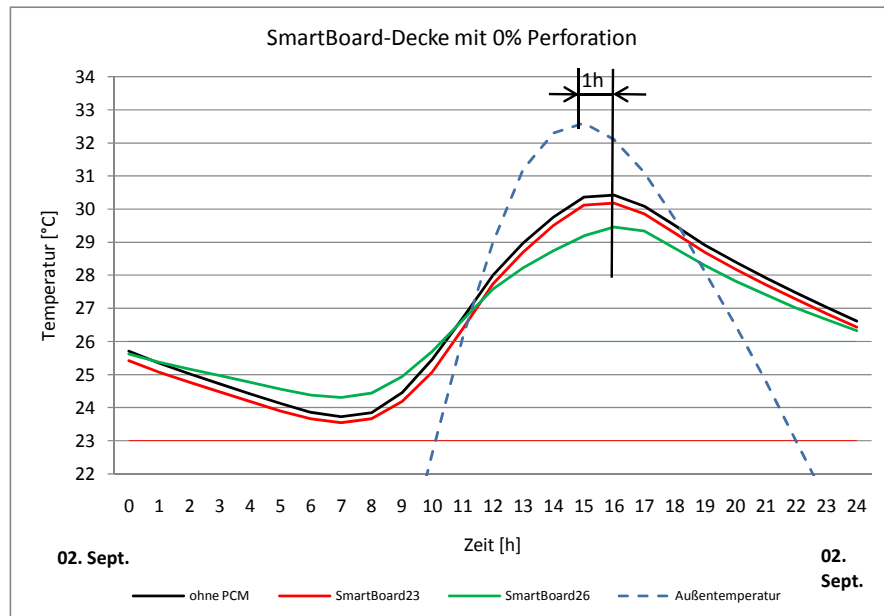


Abb. 31:

Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke für den 02. Sept., 0% Perforation

Der Verlauf für die Varianten mit der geringsten Perforation von 25% wird in Abb. 32 dargestellt. Aufgrund der Perforation, verringert sich das Dämpfungsvermögen auf ca. 1,1 K (Smart Board 23) bzw. 1,0 K (Smart Board 26). Durch die geringere Kapazität gleichen sich die Kurven der PCM-Decken dementsprechend der des Referenzraumes ohne PCM schneller an.

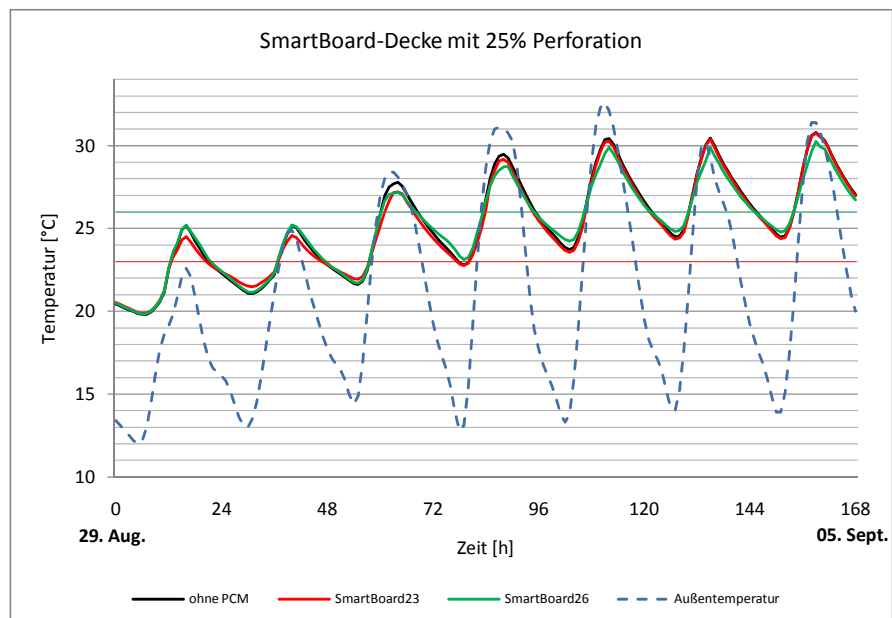


Abb. 32:

Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke mit geringster Perforation (25%)

Die Smart Board-Decke mit der höchsten Perforation von 60% weist eine nahezu vernachlässigbare Temperaturänderung im Raum auf (Abb. 33). Hierfür ergeben sich die Werte beider Smart Board-Platten (23/26) von jeweils maximal 0,6 K.

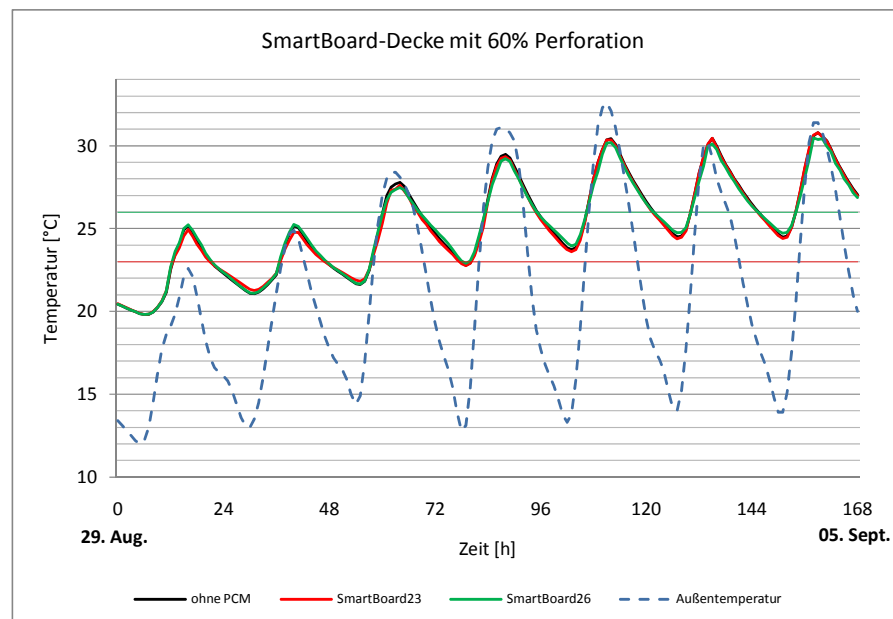


Abb. 33:
Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke mit geringster Perforation (60%)

In **Abb. 69:** bis **Abb. 74:** , Anhang 3, befinden sich die Schaubilder mit den entsprechenden Werten weiterer Smart Board-Varianten mit der Perforationen 72% und 63% bzw. den detaillierteren Schaubildern.

5.2.3.2 Micronal Basotect

Alternativ zur Smart Board-Platte kommt als weiterer Latentwärmespeicherträger Micronal Basotect zum Einsatz. Für Micronal Basotect ergibt sich nach Glg. (29) eine optimale Dicke von $t_{\text{opt}} = 25 \text{ mm}$. Auch bei diesem Produkt kann optional zwischen den Schalttemperaturen 23°C und 26°C gewählt werden. Demzufolge wurden auch hierzu entsprechend Simulationen durchgeführt, welche in Abb. 34 dargestellt sind.

Durch den höheren PCM-Anteil und größere Bauteildicke zeichnet sich hier eine etwas höhere Dämpfung ab. Dabei wurde zwischen dem Referenzraum und dem Raum mit PCM eine Temperaturdifferenz von 1,9 K (Schalttemperatur 23°C) bzw. 1,5 K (Schalttemperatur 26°C) ermittelt.

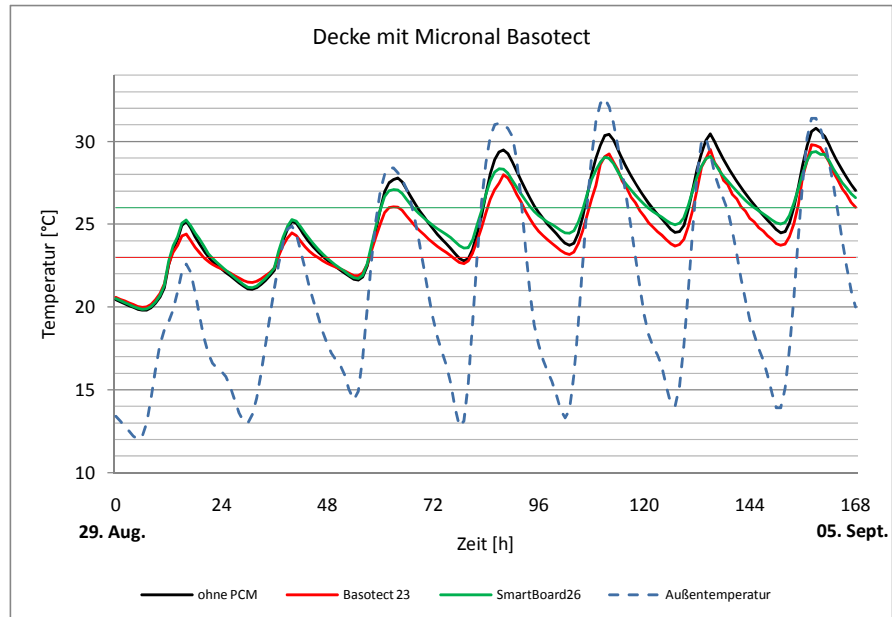


Abb. 34:
Temperaturverlauf für den Raum mit Micronal Basotect-Decke

5.2.3.3 Delta Cool

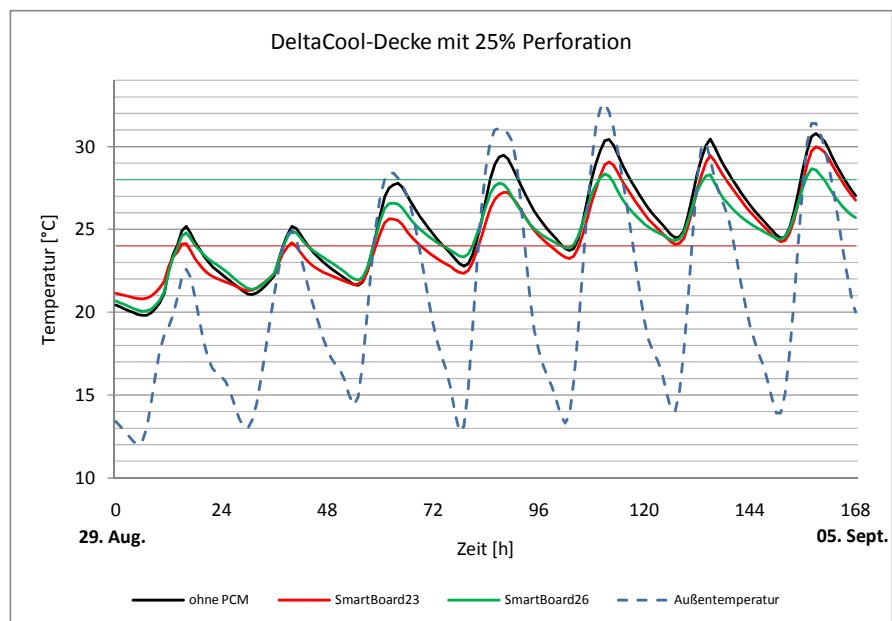


Abb. 35:
Temperaturverlauf für den Raum mit Delta Cool-Decke mit 75% Perforation

In Variante 3b wurde die Smart Board-Platte (Variante 3a) durch das Delta Cool-System ersetzt, das durch die wesentlich höhere Wärmekapazität und höhere Wärmeleitfähigkeit eine höhere Dämpfung der Temperaturspitzen erwarten lässt. Zur Auswahl steht zum einen Delta Cool 24

und zum anderen Delta Cool 28. Bei der Berechnung konnte für Delta Cool 24 ein Temperaturunterschied von 2,3 K und für Delta Cool 28 von 2,4 K festgestellt werden (siehe Abb. 35).

5.3 Empfundene Luftqualität

Zur Beeinflussung der empfundenen Luftqualität, also zur Verringerung der Konzentration an unerwünschten Stoffen in der Innenraumluft stehen prinzipiell zwei Ansätze zur Verfügung, nämlich die Adsorption, also die reversible Bindung von Stoffen an geeignete Oberflächen und die katalytische Umsetzung. Beide Verfahren weisen unterschiedliche Einschränkungen auf. Adsorptiv wirksame Oberflächen haben eine begrenzte Kapazität. Sie sind nach einer bestimmten Belastung gesättigt und können keine weiteren Stoffe mehr anlagern. Die Adsorption ist aber auch ein Gleichgewichtsprozess, das bedeutet, dass Stoffe, die an die Oberfläche angelagert sind, z. B. nach Ende der Belastung wieder abgegeben werden können.

Das Wirkprinzip der Katalyse ist die Absenkung der Aktivierungsenergie, die eine chemische Reaktion benötigt, um in Gang zu kommen. Ein Katalysator wird durch seine katalytische Aktivität nicht verbraucht. Die Reaktionen sind i. A. unter den im Innenraum gegebenen Bedingungen nicht umkehrbar. Die Katalyse benötigt aber die Zufuhr einer gewissen Energiemenge z. B. in Form von Wärme oder Licht, um die gewünschte Reaktion in Gang setzen zu können. Der Eintrag von Energie zur Katalyse in Form von Wärme ist in der Gebäudetechnik kontraproduktiv. Daher empfiehlt sich für die Beeinflussung der empfundenen Luftqualität die Photokatalyse.

5.3.1 Adsorption

Unter Adsorption versteht man die Anreicherung von Stoffen an den Grenzflächen fester, gasförmiger bzw. flüssiger Stoffe. Bei der Adsorption findet eine Belegung der Festkörperoberfläche mit einer dünnen Molekülschicht durch Adhäsion statt. Je nach auftretenden Bindungskräften spricht man von Chemisorption (chemische Bindung) oder Physisorption. Bei der Physisorption wirken z. B. van-der-Waals-Kräfte oder Wasserstoff-Brückenbindungen. Die gebräuchlichsten Adsorptionsmittel sind Aktivkohle, Aluminiumoxid, Kieselgel, Zeolithe sowie faserförmige oder mikrokristalline Cellulose und synthetische poröse Adsorberharze. Für technische Anwendungen eignen sich besonders Aktivkohlen und Zeolithe [23].

Unter Aktivkohle versteht man Pulver oder Granulate aus Graphit-Kristallen und amorphem Kohlenstoff mit poröser Struktur und sehr großer innerer (aktiver) Oberfläche. (500–1500 m²/g) (siehe Abb. 36).

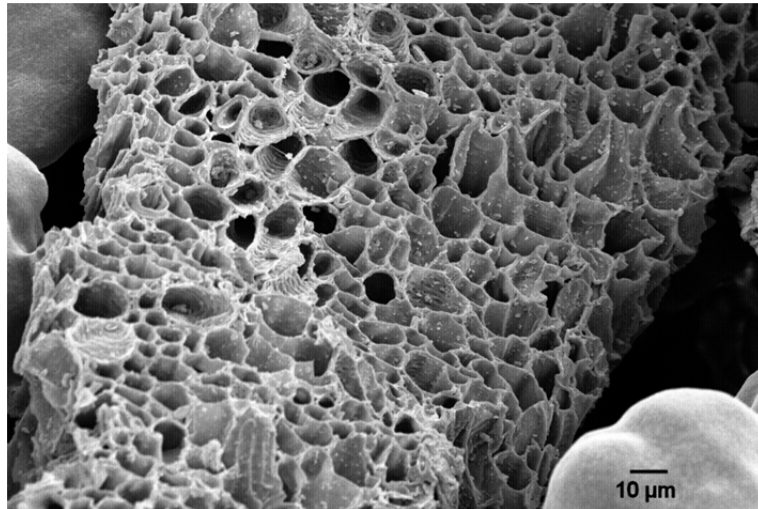


Abb. 36:
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der porösen Struktur von Aktivkohle-Granulat

Bei Zeolithen handelt es sich um die Materialklasse von kristallinen Alumosilicaten. Die Kristallgitter der Zeolithe sind aus SiO_4 - und AlO_4 -Tetraedern aufgebaut, die jeweils über Sauerstoff-Brücken miteinander verknüpft sind und Ringe oder Prismen bilden. Diese wiederum verbinden sich zu weiteren sekundären Baueinheiten die jeweils bis zu 16 Si- oder Al-Atome enthalten können. Dabei entsteht eine räumliche Anordnung gleichgebauter Hohlräume, die über Porenöffnungen bzw. dreidimensionale Kanalsysteme zugänglich sind (siehe Abb. 37).

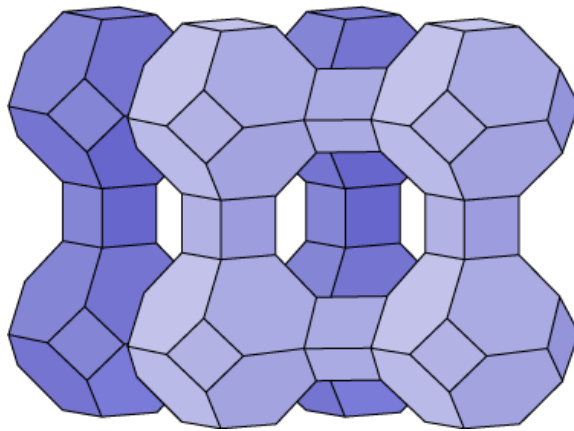


Abb. 37:
Struktur von synthetischem Zeolith A (Quelle Römpp)

Eine derartige dreidimensionale Gitterstruktur kann als Sieb wirken. Während Moleküle mit kleinerem Querschnitt als die Porenöffnungen die Hohlräume des Gitters passieren können, können größere Moleküle nicht eindringen. Zeolithe werden deshalb häufig als Molekularsiebe eingesetzt. Beide genannten Materialklassen (Aktivkohle und Zeolithe) werden technisch zur Adsorption von organischen Verbindungen eingesetzt.

5.3.2 Heterogene Photokatalyse

Bei der heterogenen Photokatalyse liegen Katalysator und Reaktanden in unterschiedlichen Phasen vor. Der Photokatalysator ist meistens ein Halbleiter. Die Reaktanden sind Gase, organische Flüssigkeiten oder gelöste organische Moleküle. Der Katalysator kann als Feststoff in einer Flüssigkeit suspendiert sein oder auf einem anorganischen Träger immobilisiert sein. Bevorzugt wird Titandioxid in der Modifikation Anatas als Katalysator eingesetzt.

Allgemein wird die Eigenschaft von Oberflächen, die mit Titandioxid (TiO_2) beschichtet wurden, in Gegenwart von UV-Licht organische Materialien zu zersetzen, als Photokatalyse bezeichnet. Während des Herstellungsprozesses erhält TiO_2 durch Sintern einen Sauerstoffunterschuss so dass die Formel eigentlich TiO_{2-x} (mit $x < 0,05$) lauten müsste. Das dadurch entstehende Ladungsdefizit wird durch Elektronen in Donorniveaus ausgeglichen. Durch diese Donorniveaus werden die Halbleitereigenschaften des Titandioxids erklärt. Durch Strahlung geeigneter Wellenlänge ist es im TiO_2 möglich, zusätzliche Elektronen anzuregen. Der Abstand von Valenzband zu Leitungsband hängt von der Modifikation ab und beträgt für Anatas 3,2 eV (388 nm) und Rutil 3,0 eV (413 nm). In Photohalbleitern können Elektronen durch Zufuhr von Strahlung, deren Energie größer oder gleich der Bandlückenenergie ist ins Leitungsband promovieren. Dadurch entsteht im Valenzband ein Loch mit positiver Ladung, das auch als Defektelektron bezeichnet wird. Zusammen mit dem transferierten Elektron bildet es ein Ladungsträgerpaar (Elektron/Loch). An der Oberfläche wirkt das Defektelektron als ein starkes Oxidationsmittel. Im Gegenzug kann das Elektron als Reduktionsmittel wirken.

Organische und anorganische Verbindungen können auf zwei verschiedene Arten photokatalytisch oxidiert werden. Die Moleküle werden durch die Defektelektronen im Valenzband des Titandioxids oxidiert, müssen aber an der Oberfläche des Titandioxids adsorbiert sein. In dem anderen Fall sind für den Oxidationsprozess die reaktiven Spezies $\text{O}_2^\bullet$ und $\text{HO}^\bullet$ verantwortlich, die in Gegenwart von Sauerstoff bzw. Wasser entstehen [24].

6 Experimentelle Überprüfung

Die Theorie zum Schallabsorptionsgrad aus den vorangegangenen Abschnitten diene nun zur akustischen Modellierung der MFB. Bei der Modellierung wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Bauteile der Thermik, Akustik und Schadstoffneutralisierung sinnvoll angeordnet wurden. Genauer ist damit gemeint, dass sich das PCM zur optimalen Be- und Entladung an der zum Raum gewandten vordersten Schicht befindet. Das akustisch funktionale Bauteil kann auch im „Hintergrund“ beachtliche Werte liefern bzw. das thermische Bauteil kann akustisch wirksam gestaltet werden. Vorerst wurden durch Parametervariationen verschiedene Modelle konzipiert. Infolgedessen wurden vergleichbare, auf dem Markt erhältliche Materialien untersucht und dementsprechend in der Berechnung angepasst. Zur experimentellen Überprüfung der berechneten Absorptionswerte wurden die modellierten Proben im Impedanzrohr im senkrechten Schalleinfall gemessen.

6.1 Schallabsorptionsgrade für senkrechten Schalleinfall

6.1.1 Messprinzip und -einrichtung

Der Reflexionsgrad bzw. die Wandimpedanz für senkrechten Schalleinfall wurde im Kundt'schen Rohr, auch Impedanzrohr genannt, in Anlehnung nach DIN EN ISO 10534 „Akustik-Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren“ mittels der „1-Mikrofon-FFT-Methode“ ermittelt. Abb. 38 veranschaulicht den Aufbau.

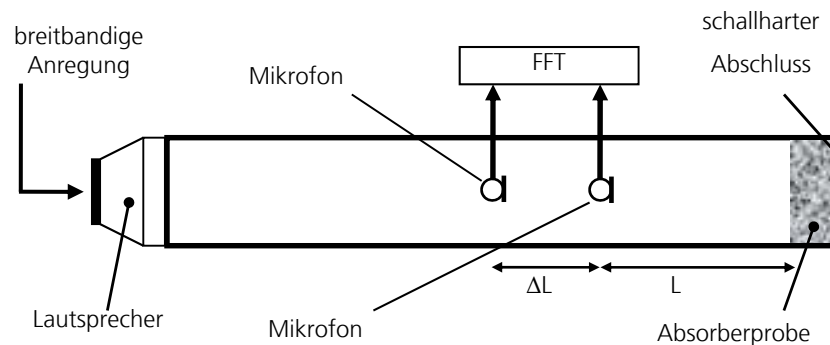


Abb. 38:
Aufbau und Messprinzip im Impedanzrohr.

Der Rohrquerschnitt des Impedanzrohres beträgt $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$. Da der Messaufbau aus einem Set von vier Mikrofonen besteht, welche parallel zur Probenoberfläche angeordnet sind, ist es möglich, die ersten beiden Quermoden des Messkanals auszublenden. Die daraus resultierende obere Frequenzgrenze liegt somit bei 2500 Hz.

6.1.2 Vergleich Messung – Rechnung: Akustik

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Messergebnisse der Absorptionsmessungen im Frequenzbereich zwischen 100 und 2500 kHz dargestellt. Die Messergebnisse sind hier als blaue Linie abgebildet. Um einen direkten Vergleich zwischen Messung und Berechnung anstellen zu können, sind die berechneten Werte als rot gestrichelte Linie dargestellt. Der graue Bereich zeigt die Anforderung an den Absorptionsgrad (Abb. 1). In Tabelle 7 sind die wichtigsten Parameter der verwendeten Materialien aufgelistet.

Variante 1 (siehe auch 4.2.1)

Für die Variante 1 passt das Messergebnis mit der Berechnung in etwa überein. In der Berechnung wurde die Folienschwingung mitberücksichtigt, allerdings sind in Abb. 39 Einbrüche zu erkennen, welche hauptsächlich auf die unzureichende Fixierung der Folie auf dem Stützgerüst zurückzuführen sind. Das Stützgerüst dient dazu, das Mitschwingen der Folie zu verhindern.

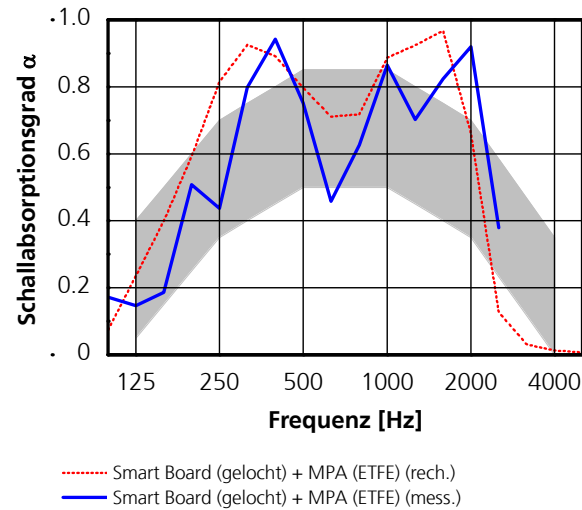


Abb. 39:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 1

Variante 2 (siehe auch 4.2.2)

Wie in Abb. 40 dargestellt, lässt sich die Messung durch die Berechnung sehr gut reproduzieren. Das Maximum zwischen 400 und 500 Hz stimmt gut überein. Selbst der Absorptionsabfall ab 1600 Hz, der durch die vorgesetzte PCM-Lochplatte hervorgerufen wird, wird exakt nachgebildet.

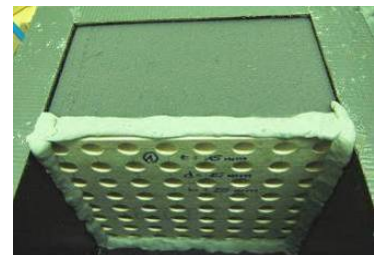
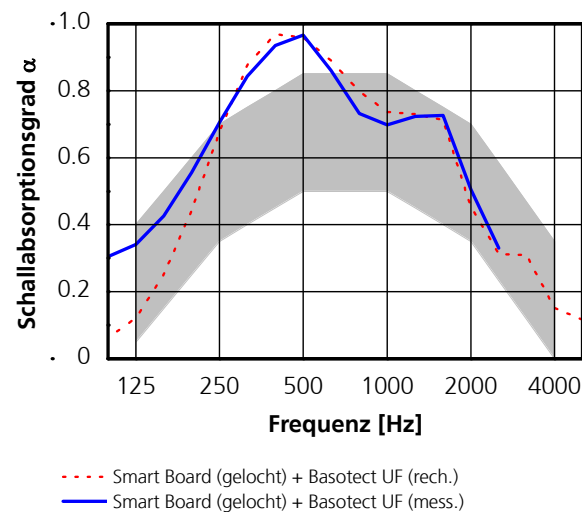


Abb. 40:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 2

Variante 3 (siehe auch 4.2.3)

Auch bei Variante 3 (Abb. 41), gibt die Berechnung die Realität sehr gut wieder. Ebenso, wie in der vorangegangenen Variante, gibt es ähnliche Unterschiede zwischen Messung und Berechnung.

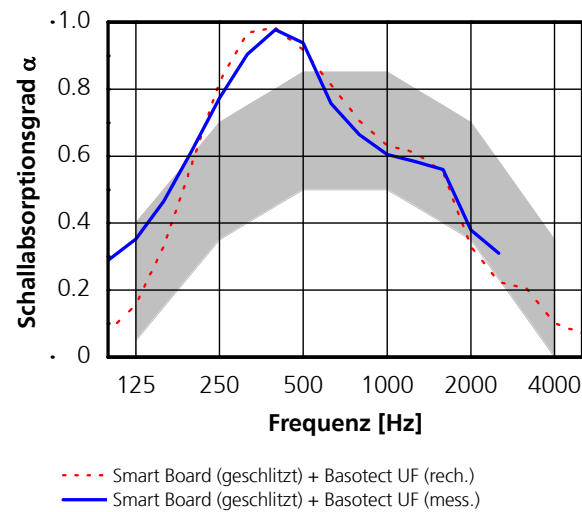


Abb. 41:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 3

Variante 4 (siehe auch 4.2.4)

Wie schon erwähnt, ist aufgrund der Inhomogenität des in Micronal PCM getränkten Basotects, hinsichtlich des Strömungswiderstandes, nur eine Abschätzung möglich. In Anbetracht dessen, lässt sich auch das in der Berechnung geringer ausfallende Absorptionsvermögen (Abb. 42) begründen. Im Frequenzbereich von 125 Hz bis 400 Hz stimmt die Realität mit der Modellierung hervorragend überein.

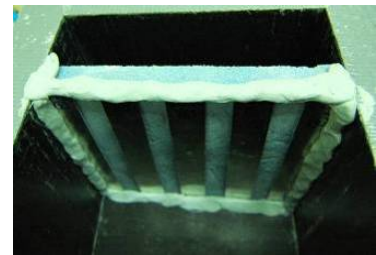
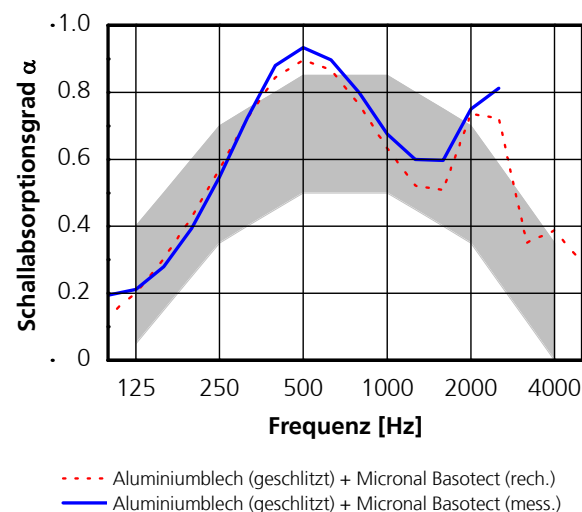


Abb. 42:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 4

Variante 5 (siehe auch 4.2.5)

Gleichermaßen zum vorangegangenen Modell, geht die Abweichung zwischen Berechnung und Messung in Abb. 43 zu Lasten des Strömungswiderstandes, immerhin liegen die Maxima der Modellierung und die der Realität bei den selben Frequenzen, bei 500 und 2000 Hz. Daher kann eine ausreichende Aussage bezüglich der Tendenz gemacht werden.

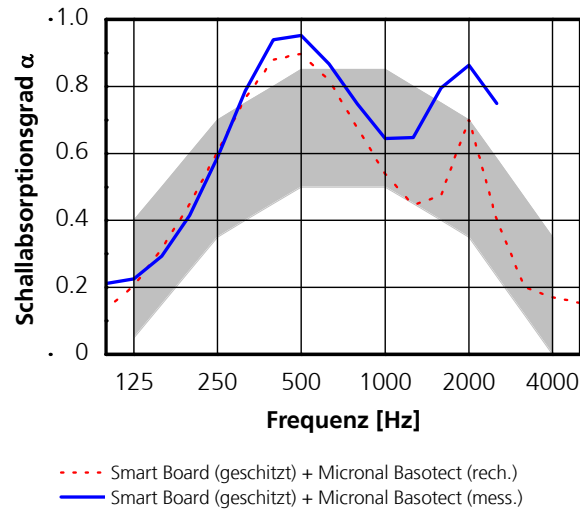


Abb. 43:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 5

Variante 6 (siehe auch 4.2.6)

Analog zu den Varianten 4 und 5 ist auch hier in Abb. 44 eine nahezu exakte Wiedergabe sehr gut möglich. Das Maximum sowie der Einbruch lassen sich hervorragend nachbilden.

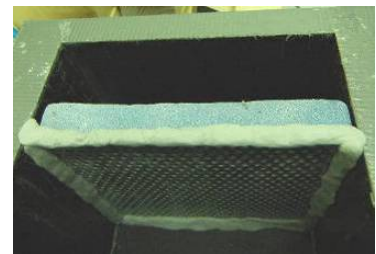
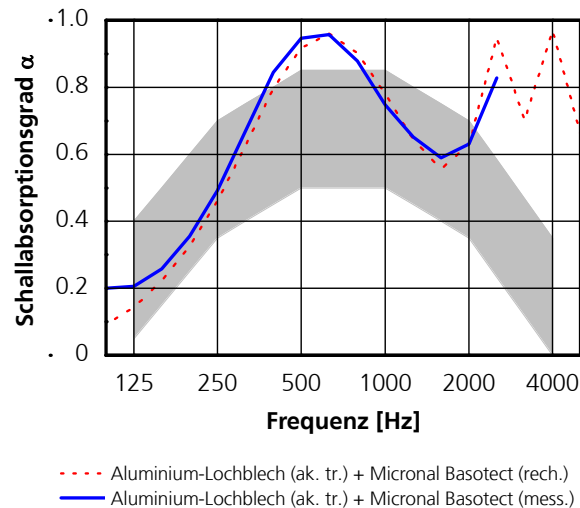


Abb. 44:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 6

Variante 7 (siehe auch 4.2.7)

Eine Struktur aus zwei nebeneinander gestellten unterschiedlichen Absorbern (Abb. 45) lässt sich auch gut theoretisch (nach 5.1.7) vorher sagen.

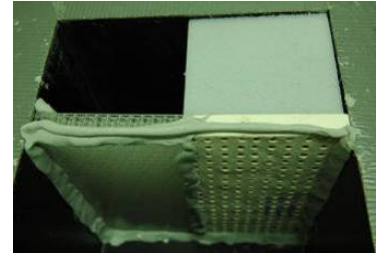
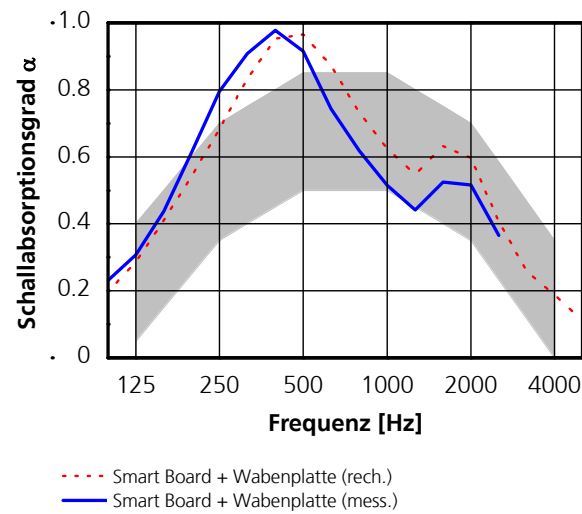


Abb. 45:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 7

Variante 8 (siehe auch 4.2.8)

In Abb. 46 können auch hier gute Vorhersagen einer Kombination aus Aktivkohleplatte (links) und Basotect hinter dem gelochten SmartBoard getroffen werden.

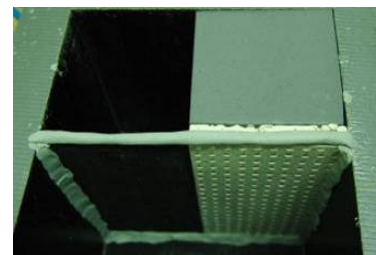
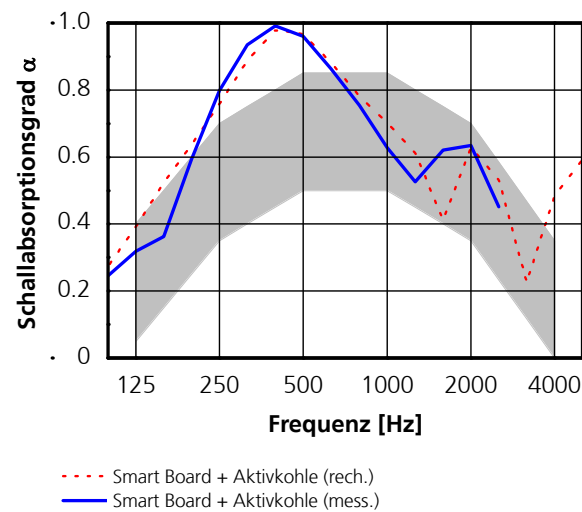


Abb. 46:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 8

Variante 9 (siehe auch 4.2.9)

Das neue PCM-markierte Basotect lässt sich ebenfalls gut berechnen. Die PCM-Markierung kann sehr flexibel gestalten werden. Diese einfache Struktur hat ein hohes Absorptionsvermögen.

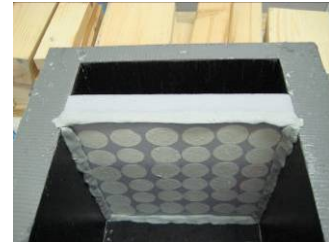
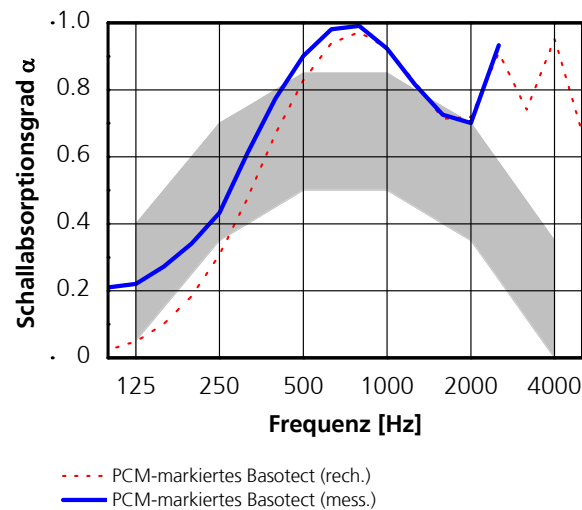


Abb. 47:
Vergleich Messung – Berechnung der Variante 9

Je nach Anforderung können das Absorptionsspektrum und die Wärmespeicherung angepasst werden. Abb. 48 zeigt beispielsweise verschiedene, in der Entwicklungsphase hergestellte Muster der PCM-Markierung. Es gibt für die neue Technik bzw. die Produkte viele Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis.



Abb. 48:
die PCM-Markierung lässt sich leicht variieren

6.2 Latentwärmespeicher

Da für das angesetzte Material (Micronal Basotect; 1.2) keine Herstellerangaben zu den Materialeigenschaften in Bezug auf Wärmeleitfähigkeit und Latentwärmespeicherkapazität verfügbar sind, werden diese im Plattenapparat bestimmt.

Mittels eines Zweiplattenapparats lässt sich die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität von plattenförmigen Stoffproben messtechnisch bestimmen. Im Zentrum dieser Vorrichtung befindet sich eine elektrisch beheizbare Metallplatte. Zwei plattenförmige Proben des zu prüfenden Stoffes

werden ober- und unterseitig der Heizplatte angeordnet. Auf den außenliegenden Seiten der Stoffproben wird die anfallende Wärmeenergie über zwei mit einem Kühlmedium durchströmte Kühlplatten abgeführt. Die Heizplatte ist mit einem Heizring umgeben, der auf dieselbe Temperatur eingestellt wird. Dies ist erforderlich, um auszuschließen, dass Energie, die der Heizplatte zugeführt wird, über die Ränder entweicht, zum Anderen, dass sich die Wärmeströme innerhalb der Stoffprobe homogen, senkrecht zu den Plattenoberflächen ausbilden. Ohne den Heizring würde die anfallende Wärme die Platte an den Rändern nicht homogen durchströmen, sondern auch zur Seite hin fließen. Die Heizplatte und der Heizring sind aus gut wärmeleitenden Materialien; im hier vorliegenden Fall aus Aluminium. So ist gewährleistet, dass sie eine näherungsweise homogene Temperaturverteilung aufweisen (siehe Abb. Xxx).

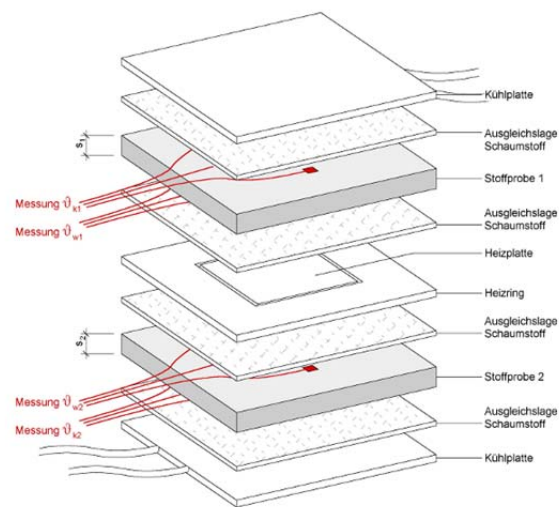


Abb. 49:
Schematischer Aufbau Zweiplattenapparat

Mit Thermoelementen werden die Temperaturen auf beiden Seiten der Stoffproben sowie die Temperaturen von Heizring und Heizplatte gemessen. Da Thermoelemente wegen des zugrundeliegenden physikalischen Prinzips (Thermospannung durch temperaturabhängigen Elektronenübergang zwischen zwei unterschiedlichen Metallen, „Seebeck-Effekt“) nur relative Temperaturen zur am anderen Kabelende anliegenden Temperatur messen können, ist es erforderlich, als Referenztemperatur die Raumtemperatur direkt zu messen.

Um Inhomogenitäten in den Proben oder fehlerhaft funktionierende Thermoelemente erkennen zu können, werden auf jeder zu messenden Oberfläche drei Thermoelemente angeordnet.

Da es für einen ungestörten, gleichmäßigen Wärmeübergang erforderlich ist, dass zwischen den Platten keine Luftspalten auftreten, werden Zwischenlagen aus Schaumstoff eingefügt, die die Unebenheiten durch die Kabel ausgleichen und so einen flächigen, einwandfreien Kontakt zwischen allen Bestandteilen des Apparats gewährleisten.

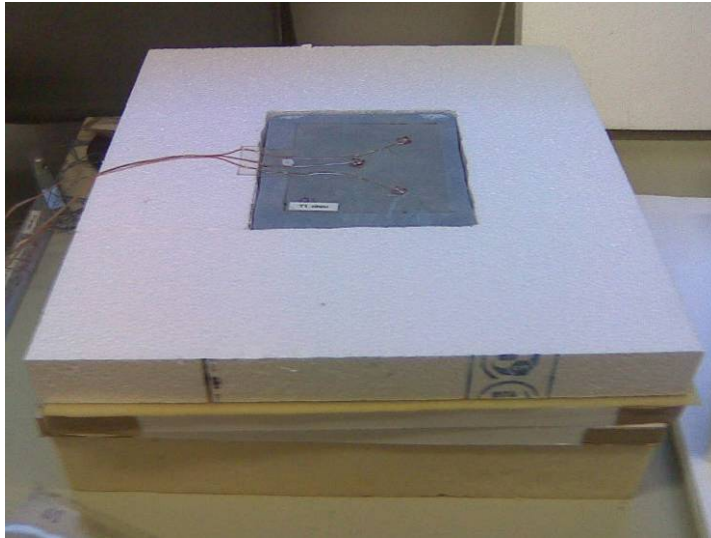


Abb. 50:
Messaufbau mit Micronal Basotect

In Abb. 50 ist das zu messende Micronal Basotect abgebildet. Da die Probe recht klein ist, wurde hier noch ein Polystyrolschaum-Rahmen gleicher Dicke, dessen Parameter bekannt sind, angefertigt. Somit ist es möglich die Werte der Probe zurückzurechnen. Jedoch können die gemessenen Werte nur als Anhaltspunkt betrachtet werden, da durch die Inhomogenität und zu geringe Größe der Probe ein Fehler von bis zu 20% zu erwarten ist.

Für das Micronal Basotect wurde eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,057 \text{ W/mK}$ bzw. eine latente Wärmekapazität von 1100 kJ/m^2 ermittelt. Der vorab rechnerisch bestimmte Wert für die latente Wärmekapazität liegt bei 917 kJ/m^2 (Abweichung 16%). Der berechnete und gemessene Wert liegen damit in der gleichen Größenordnung. Für die thermischen Simulationen wurde der berechnete Wert verwendet.

6.3 Empfundene Luftqualität

6.3.1 Adsorption

Um die Adsorbereigenschaften gesinterter Aktivkohle PEAC 40-60 (Polycarb, Abb. 51) zu testen, wurde eine Substanzmischung bestehend aus polaren und unpolaren Substanzen in einen Reinluftstrom dosiert und in gleichen Teilen in 3 Prüfkammern geleitet. Eine Prüfkammer diente dabei als Referenzkammer ohne Probenmaterial, in der die Prüfgasatmosphäre gemessen werden kann. In einer zweiten Prüfkammer wurde gesinterter Aktivkohle ohne Bedeckung eingebracht und in einer dritten Prüfkammer wurde gesinterter Aktivkohle mit Bedeckung in Form einer dünnen polymeren Deckschicht eingebracht.

Bei kontinuierlicher Dosierung von Substanzen in Prüfkammern erreicht man bei konstantem Luftwechsel nach einer Phase der Gleichgewichtseinstellung (steigende Konzentration) einen Gleichgewichtszustand, bei dem die Konzentrationen der Substanzen in den Prüfkammern konstant bleiben.

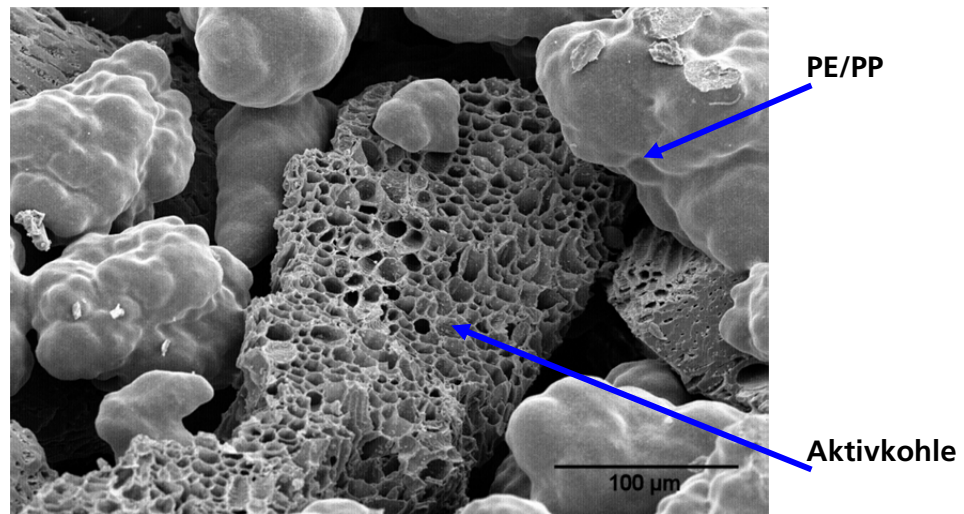


Abb. 51:
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Aktivkohle PEAC 40-60

Die Referenzkammer ohne gesinterte Aktivkohle weist für die zudosierten Komponenten wie erwartet die höchsten Substanzkonzentrationen auf (rote Kurvenverläufe). Etwas geringere Konzentrationen weist die Prüfkammer mit bedeckter Aktivkohle auf (blaue Kurvenverläufe). In der Prüfkammer mit gesinteter Aktivkohle ohne Bedeckung sind die Konzentrationen sowohl polarer als auch unpolarer Komponenten sehr niedrig (grüne Kurvenverläufe), obwohl nur eine Aktivkohleplatte parallel zur Luftströmung in die Prüfkammer eingebracht wurde. Die Aufnahmekapazität und Senkenwirkung der gesinterten Aktivkohle ist entsprechend sowohl für polare als auch unpolare Substanzen als sehr gut einzustufen. Diese Verläufe sind am Beispiel der Adsorption von Butanol in der Abb. 52 dargestellt.

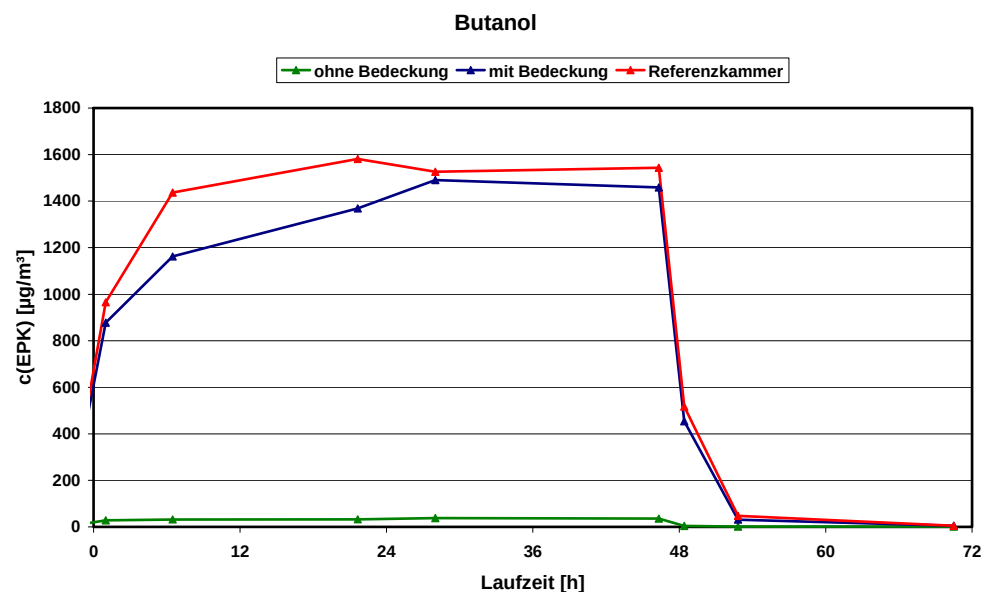


Abb. 52:
Absorption von Butanol

Die Senkenwirkung, die durch gesinterte Aktivkohle hervorgerufen wird, wurde mit folgender Substanzmischung getestet: Butanol, Butanon, Butylacetat, Heptan, 3-Methylhexan, 1-Methylcyclohexan, Pentanal (Valeraldehyd), Toluol.

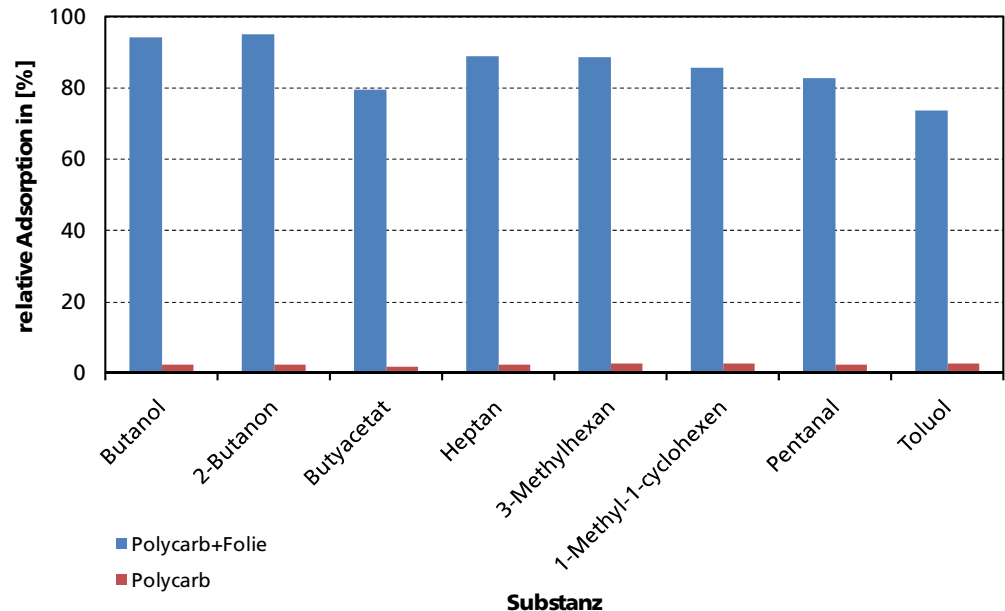


Abb. 53:
Wirksamkeit von Polycarb für unterschiedliche Substanzen

Die Substanzen wurden in gleichen Massenanteilen als Standard eingewogen und mittels Mikrodosierung in einen Trägerluftstrom zur Prüfkammerversorgung dosiert. Die Abbildungen für die einzelnen Substanzen zeigen die Senkenwirkung der gesinterten Aktivkohle (grüne Kurven). Die roten Kurven zeigen die Konzentration der Testsubstanzen in der Referenzkammer und die blauen Kurven von bedeckter Aktivkohle, wobei die Barriereigenschaften der polymeren Deckschicht (Polyethylen) für die Testsubstanzen verschiedener Polarität unterschiedlich ausgeprägt sind. In der Abb. 53 ist das Adsorptionsvermögen einer bedeckten und unbedeckten Polycarb-Platte für unterschiedliche Substanzklassen zusammengefasst.

6.3.2 Photokatalyse

Neben dem in einer ersten Version des Demonstrators als photokatalytisch aktive Komponente verbauten TiO_2 -beschichteten Glas wurden unterschiedliche TiO_2 -basierte Photokatalysatoren (Tabelle 1) auf ihre Wirksamkeit untersucht. Die Katalysatoren wurden am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) auf Aluminiumträger aufgebracht. Unbeschichtete Aluminiumträger dienten als photokatalytisch inaktive Referenz. In Exsikkatoren mit einem Volumen von ca. 23 L wurden je 2 Probenmuster und eine Kompakt-Leuchstofflampe Osram DULUX L BLUE UVA® 18W/78 mit einer UVA-Strahlungsleistung von 3 W eingebaut. Die Exsikkatoren wurden ihrerseits in einer Emissionsprüfkammer gelagert (Abb. 54). Aufgereinigte Pressluft (23 °C, 50 % r. F.)

wurde mit einer Mischung an ausgewählten flüchtigen organischen Stoffen angereicht. Der Luftstrom wurde kontrolliert auf die 5 Exsikkatoren aufgeteilt. Am Ausgang des jeweiligen Exsikkators erfolgte die Probenahme mittels Festphasenadsorber (Tenax TA®), die TVOC-Messung mit einem Prozess-FID. 3,3 h und 67 h nach Beginn der Dosierung wurden Luftproben auf Tenax-Adsorber gesammelt, anschließend thermisch desorbiert und die gesammelten VOC mittels GC/MS identifiziert und quantifiziert.

Tabelle 1:

Testmuster für die Untersuchung der katalytischen Wirksamkeit unterschiedlicher TiO₂-basierter Photokatalysatoren.

Probenbezeichnung	Substrat	Photokatalysator
E1510_1	Aluminium	photokatalytisch inaktive, Referenzprobe
E1510_2	Aluminium	Hombikat UV 100, 1%
E1510_3	Aluminium	Tronox 8602
E1510_4	Aluminium	Tronox A-DW 1
E1510_5	Aluminium	Hombikat UV 100, 5%

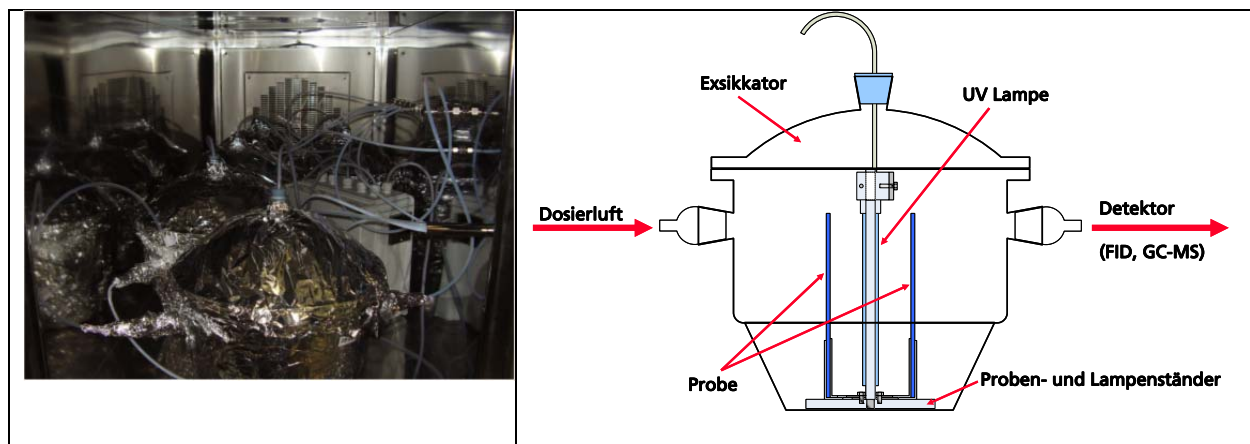


Abb. 54:

Versuchsaufbau zur Untersuchung der Abbauleistung der unterschiedlichen Photokatalysatoren auf Aluminiumträgern. Linke Abbildung: Exsikkatoren in der Prüfkammer, rechte Abbildung: schematischer Aufbau.

Die Prüfmuster E1510-2 und E1510-3 zeigten sowohl kurzfristig als auch über die Zeit die beste Abbauleistung (Abb. 55). Deutlich erkennbar ist bei diesen beiden Katalysatoren jedoch eine gewisse Unempfindlichkeit gegenüber unpolaren aromatischen Stoffen wie Styrol und Toluol. Pola-

re bzw. sauerstoffhaltige Verbindungen hingegen (1-Butanol, Butylacetat, MIBK) werden sehr gut abgebaut. Die Konzentrationen nach 67 h liegen über 60 % unter denen der Referenzkammer.

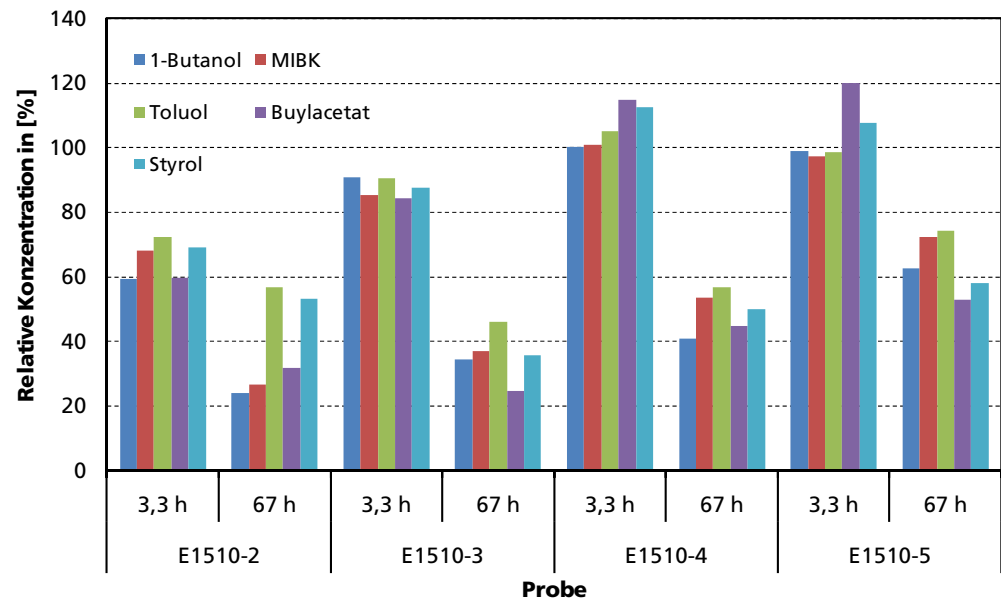


Abb. 55:

Abbauleistung der unterschiedlichen Photokatalysatoren für innenraumtypische Einzelstoffe. Die Konzentration in der Referenzkammer entspricht einer relativen Konzentration von 100 %.

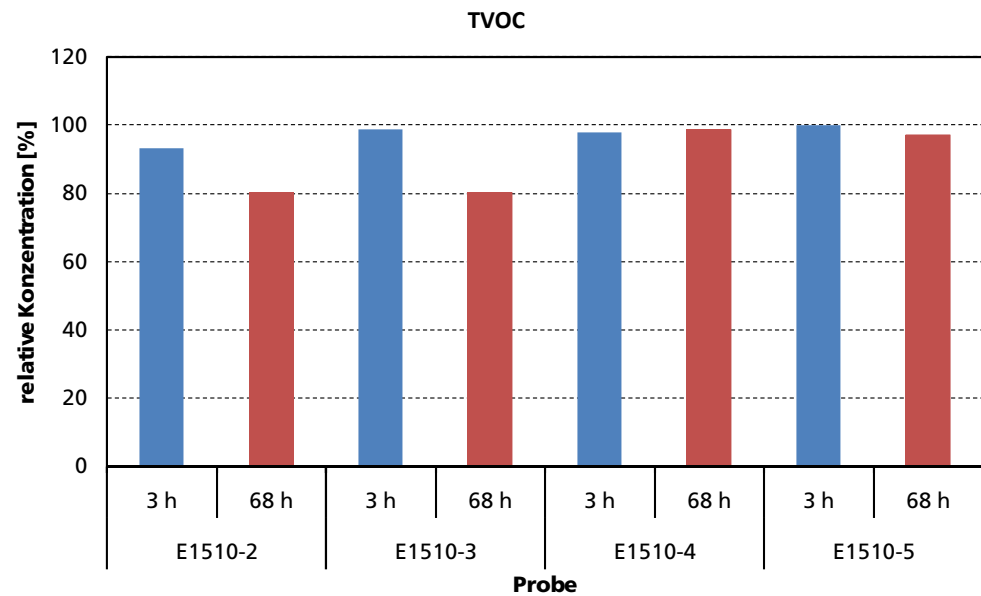


Abb. 56:

Einfluss der Photokatalysatoren auf den Gehalt an flüchtigen organischen Stoffen (TVOC). Die Konzentration in der Referenzkammer entspricht einer relativen Konzentration von 100 %.

Der Verlauf des TVOC (Abb. 56) spiegelt dieses Verhalten nicht in dieser Deutlichkeit wieder. Grund hierfür kann sein, dass die Katalysatoren die zugesetzten Ausgangsstoffe nicht bis zu CO_2 und Wasser abbauen können, die mit dem Prozess-FID nicht mehr detektiert werden können. Vielmehr ist anzunehmen, dass der photokatalytische Abbau auf der Ebene von Zwischenprodukten zum Erliegen kommt. Es kann aber festgestellt werden, dass photokatalytisch aktive Beschichtungen zur Verringerung der VOC-Luftkonzentration geeignet sind.

7 Demonstratoren

In Abb. 57 ist ein Modell dargestellt, das alle Funktionen erfüllt. Außerdem ist ein mögliches System zur photokatalytischen Beeinflussung der empfundenen Luftqualität veranschaulicht. Dieses ist so konstruiert, dass ein beliebiges thermisches bzw. akustisches Element eingesetzt werden kann. Über die gelochte Front wird die Luft aus dem Innenraum angesaugt und an den TiO_2 -beschichteten Flächen vorbeigeführt, die mit UV-Licht bestrahlt werden. Dabei kommt es zu photokatalytischen Reaktionen der oben genannten Komponenten, zersetzt dabei Geruchs- bzw. Schadstoffe und kann so dem Raum über die gelochte Front als „Frischlufte“ wieder zugeführt werden.



Abb. 57:
Modell eines Multifunktionalen Bauteils, Frontansicht (links) und geöffnet (rechts).

Die Voruntersuchungen mit Adsorbermaterialien wie z. B. Aktivkohle und mit photokatalytisch aktiven Oberflächen hatten gezeigt, dass beide Verfahren zur Verbesserung der Luftqualität ge-

nutzt werden können. Die folgenden Abbildungen zeigen die Evolution eines Demonstrators, der die Adsorption mit der Photokatalyse kombiniert. In der Abb. 58 links existieren beide Verfahren primär nebeneinander. Geruchsstoffe werden hauptsächlich durch das Adsorbermaterial festgehalten und erst durch eine thermische Desorption zur Oxidation an die photokatalytische Oberfläche unregelmäßig weitergeleitet. Im Modell auf der rechten Seite werden die desorbierten Stoffe mit einem Luftstrom im Zick-Zack-Kurs gezielt an der aktiven Oberfläche vorbeigeführt. Durch die Verlängerung des Weges soll eine vollständige Umsetzung der geruchsaktiven Komponenten in der Luft erzielt werden. Die Zukunft der multifunktionalen Bauteile ist in Abb. 59 dargestellt. Die Leuchtstoffröhren sind hier durch UV-LED's ersetzt. Momentan reicht deren Leistung jedoch noch nicht aus, um die katalytische Reaktion mit einem ausreichenden Stoffumsatz zu betreiben. Die zweite zukunftssträchtige Komponente bilden die transparenten porösen Kieselgele, so genannte photokatalytisch aktiven Adsorber.

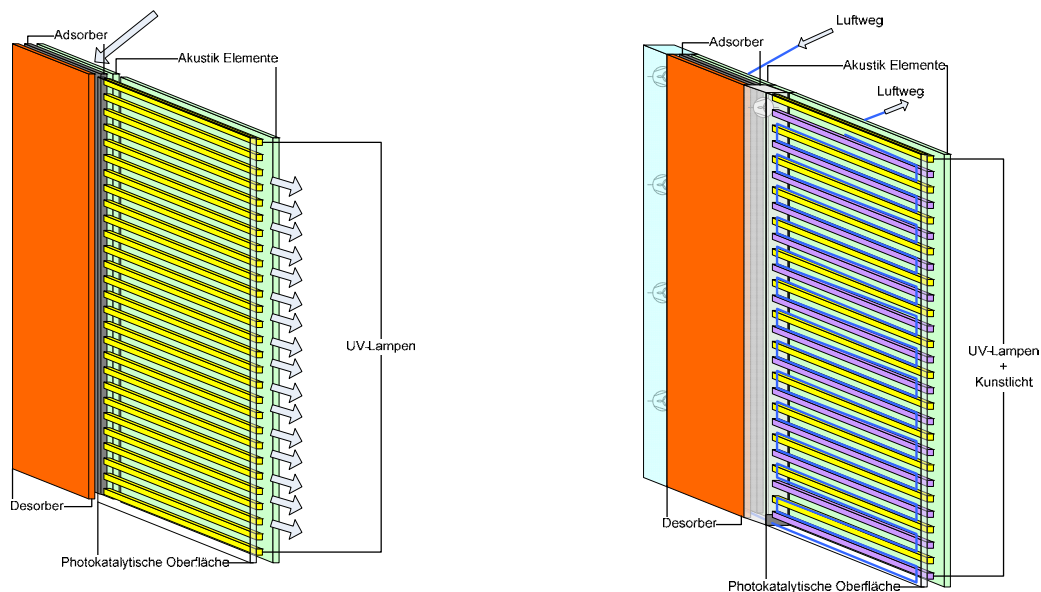


Abb. 58:
Weitere Entwicklungsmöglichkeiten des Demonstrators

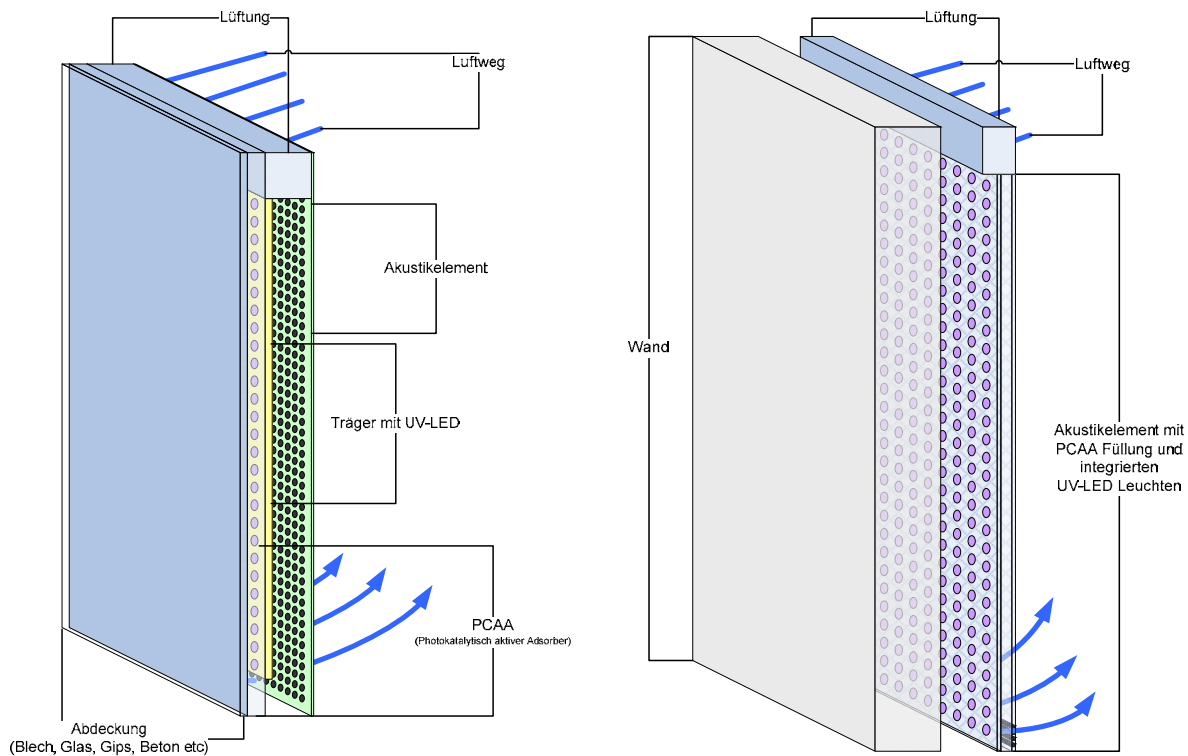


Abb. 59:

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten des Demonstrator bei Verfügbarkeit leistungsfähiger UV-A LEDs

Demonstrator

In dem multifunktionalen Demonstrator sollten die einzelnen Anforderungen an das Raumklima im speziellen die Temperatur, die Akustik und die Luftqualität vereinigt werden. Die Parameter Akustik und Temperatur sollten von einem für diese Zwecke mit PCM getränktem Basotect-Schaumstoff beeinflusst werden. Eine mit Leuchtstoffröhren bestrahlte photokatalytisch aktive Oberfläche sollte für die Verbesserung der Luftqualität sorgen.

Beim Demonstrator handelt es sich um eine Rahmenkonstruktion aus ITEM® Profilen (40 mm x 40 mm). Die Aussenabmessungen des Demonstrators betragen 1880 mm x 680 mm x 120 mm. Drei Lochblech-Kassetten mit der Grundfläche von 600 mm x 600 mm dienen zur Aufnahme der imprägnierten Basotect® Schaumstoffe. Als photokatalytisch aktive Oberfläche diente in erster Iteration eine Pilkington Aktiv® Glasscheibe (1500 mm x 600 mm x 6 mm). Sie wurde durch eine mit TiO₂ beschichtete Aluminiumplatte (Nadico TitanShield®) mit gleichen Abmessungen ersetzt. 6 Osram Eversun Leuchtstoffröhren (L 80, 80 W) dienen als Lichtquelle (UV-A). Für Luftzirkulation sorgt ein Querstromlüfter von EBM-PABST (QG030-303/12). In den folgenden Abbildungen (Abb. 60 und Abb. 61) sind die Konstruktionsskizzen wiedergegeben. In Abb. 57 ist der Demonstrator in geschlossenem und geöffnetem Zustand dargestellt.

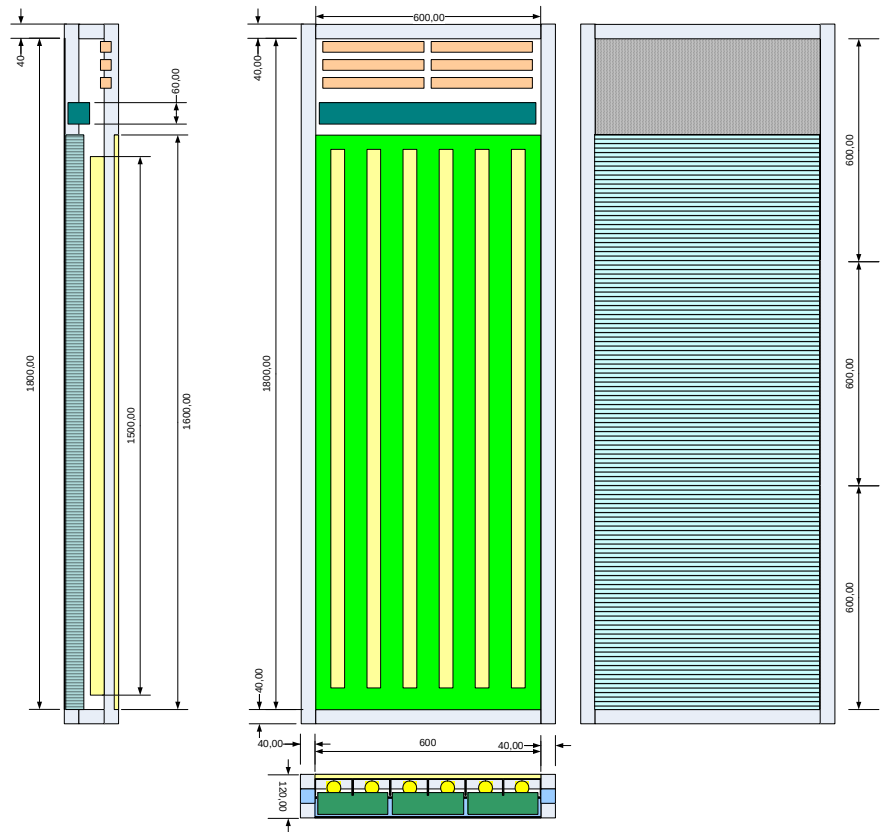


Abb. 60:
Konstruktionszeichnung Demonstrator

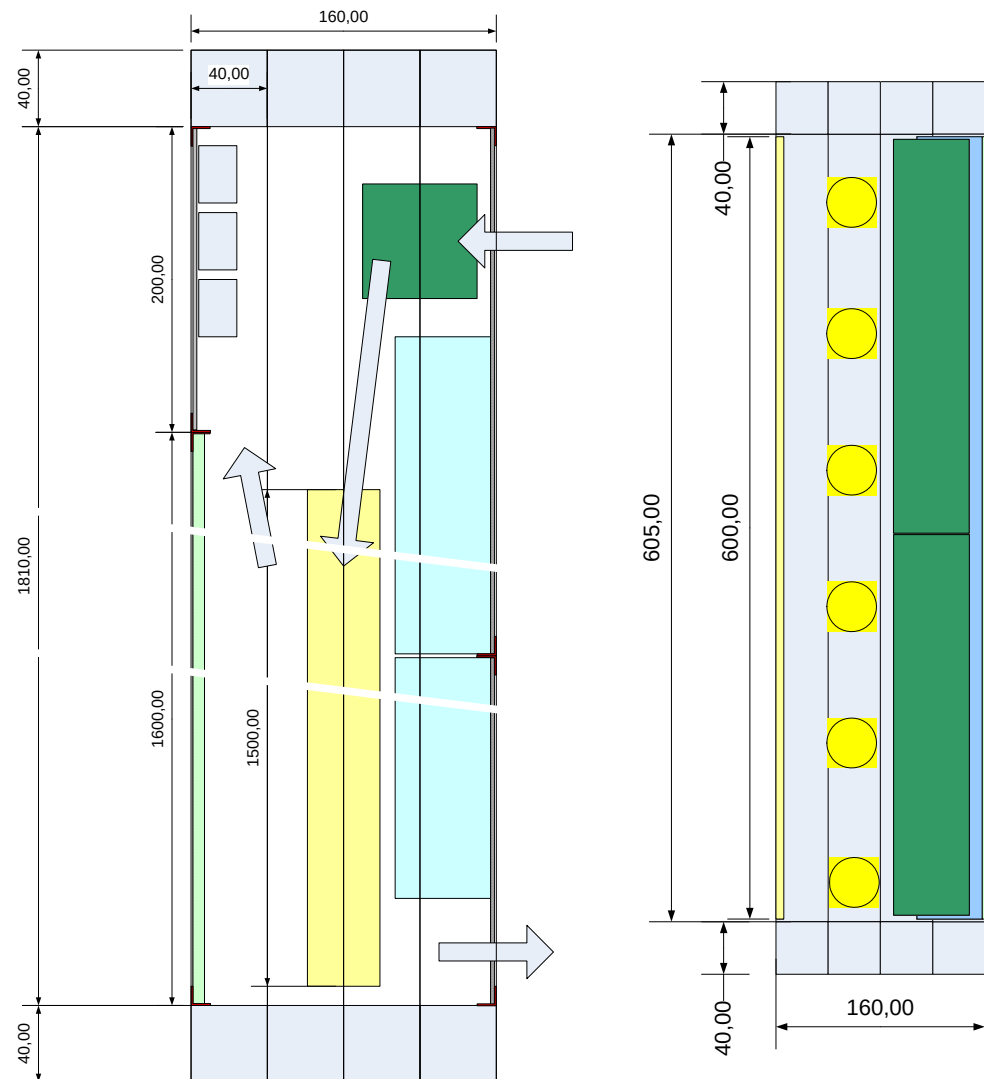


Abb. 61:
Konstruktionszeichnung Demonstrator: links von der Seite; rechts von Oben

Untersuchungen zur empfundenen Luftqualität

Die Untersuchungen zur Wirksamkeit des multifunktionalen Bauteils hinsichtlich der Verbesserung der empfundenen Luftqualität wurden am IBP-Standort Holzkirchen unter Realbedingungen durchgeführt. In einem Versuchshaus (Abb. 62) befinden sich 2 bezüglich Abmessungen und Ausstattung identische Räume. Beide Räume wurden bereits über mehrere Tage vor dem eigentlichen Versuch mit einer Mischung aus Innenraum-typischen flüchtigen organischen Verbindungen belastet. Die angewandte Mischung (Zusammensetzung siehe Tabelle 2) ist geruchlich auffällig und ähnelt in ihrer Geruchsnote dem Geruch neuer oder frisch renovierter Räume. In die Türen der Untersuchungsräume sind Olfaktometer, also Trichter zur Darbietung der zu bewertenden Luft, eingebaut, in denen wiederum Ventilatoren für den zur Beurteilung nötigen Luftstrom sorgen. Die Zuluftversorgung wird durch die Undichtigkeit der Räume sichergestellt. Dieses Vorgehen vermeidet eine Beeinflussung der Probanden durch den Sichtkontakt mit den zu beurteilenden Räumen.



Abb. 62:
Versuchsgebäude mit zwei identischen Räumen am IBP-Standort Holzkirchen



Abb. 63:
Versuchsräume mit (links) und ohne (rechts) Demonstrator

Stoff	CAS-Nr.	Geruchsnote	Volumen [ml]
Toluol	108-88-3	lösemittelartig	3
Butylacetat	123-86-4	bananenartig	3
1-Octen-3-ol	3391-86-4	pilzig	1
Propylacetat	109-60-4	birnenartig	3
Acetylaceton	123-54-6	buttrig, süß	3
Benzothiazol	95-16-9	gummiartig	1

Tabelle 2:

Zusammensetzung des VOC-Gemischs

Ergebnisse

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der kombinierten multifunktionalen Bauteile hinsichtlich der empfundenen Luftqualität wurden die Kenngrößen Akzeptanz, Geruchsintensität und hedonische Wirkung herangezogen. 15 Testpersonen bewerteten die empfundene Luftqualität in den beiden Räumen ohne und mit Demonstrator (siehe Abb. 63), sowie ohne und mit VOC-Zugabe (Zusammensetzung siehe Tabelle 2). Das Ergebnis zeigt Abb. 64.

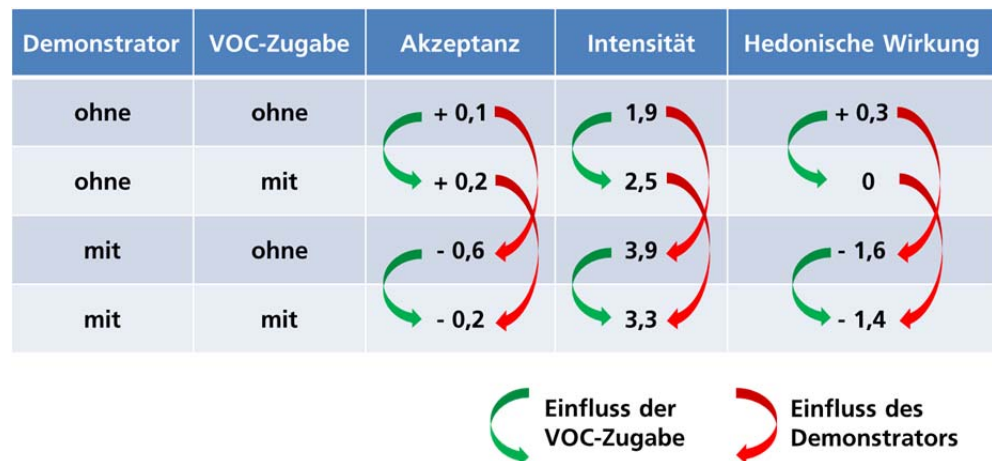


Abb. 64:

Beurteilung der Luftqualität in den Testräumen ohne und mit Demonstrator und ohne und mit VOC-Zugabe

Im leeren Raum verschlechterte sich durch das Einbringen des Demonstrators die Akzeptanz der Raumluft um 0,7 Einheiten, die Geruchsintensität nahm um 2,0 Einheiten zu und die hedonische Wirkung verschlechterte sich um 1,9 Einheiten. Durch das Einbringen der VOC-Mischung in den leeren Raum änderte sich die Akzeptanz der Raumluft unwesentlich. Die Geruchsintensität nahm um 0,6 Einheiten zu und die hedonische Wirkung verschlechterte sich um 0,3 Einheiten. Unter VOC-Zugabe war der Einfluss des Demonstrators auf die Luftqualität der Raumluft geringer: die Akzeptanz sank nur um 0,4 Einheiten, die Intensität nahm nur um 0,8 Einheiten zu und die hedonische Wirkung verschlechterte sich nur um 1,4 Einheiten. Dagegen zeigte sich die positive Wirkung des Demonstrators auf die VOC-Zugabe durch eine Verbesserung der Akzeptanz um 0,4 Einheiten, eine Verringerung der Geruchsintensität um 0,6 Einheiten und eine Verbesserung der hedonischen Wirkung um 0,2 Einheiten.

Dieser Versuch zeigt somit zwar einen (noch) erheblichen Einfluss des Demonstrators auf die empfundene Luftqualität - v. a. verursacht durch Wärmeproduktion der Vorschaltgeräte und damit verbundener Eigenemission, aber auch die (im Vergleich zum ersten Effekt zwar untergeordnete aber deutlich vorhandene) Wirksamkeit in der Luftqualitätsverbesserung durch Abschwächung der Belastung durch die VOC-Zugabe.

Die akustischen Messungen wurden im Versuchsraum (Raum 1) durchgeführt, um die Absorptionsvermögen des Prototyps zu quantifizieren. Die Raumabmessung ist ca. 3.2 x 2.8 x 2.5 m (ca. 22.4 m³); Die Abmessung des Prototyps ist ca. 1.93 x 0.68 m, Dicke ist 0.16 m.

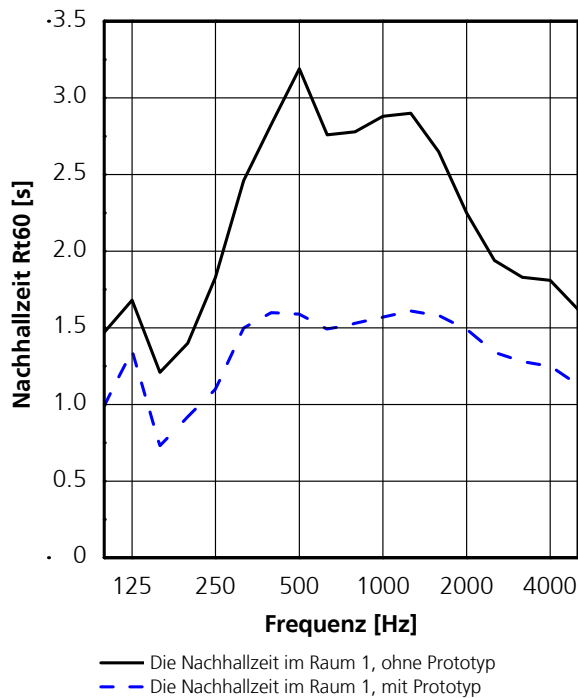


Abb. 65:
Die Nachhallzeit im Raum 1, mit und ohne Prototyp.

Die Nachhallzeiten im Raum 1, mit und ohne Prototyp wurden gemessen. Die Probe befindet sich in einer Raumecke, s. Abb. 65. Die Reduzierung der Nachhallzeit durch den Prototyp in diesem relativ kleinen Raum ist eindeutig.

Die abgeschätzte äquivalente Absorptionsfläche des Prototyps ist in Abb. 66 dargestellt. Der Prototyp zeigt breitbandiges Absorptionsspektrum und hohes Absorptionsvermögen. Der Einbruch bei 125 Hz und das große Maximum bei 160 Hz liegen vermutlich daran, dass der Prüfraum (Raum1) sehr klein (starker Einfluss von Raummoden ist nicht vermeidbar) ist, und sich der Prototyp in einer Raumecke befindet (der Eckeneffekt erhöht die Absorption der Probe bei bestimmten Frequenzen).

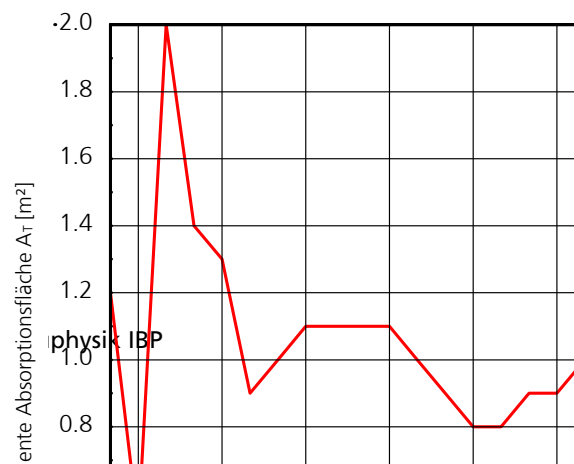


Abb. 66:

Die äquivalente Absorptionsfläche eines Prototyps (ca. 1.93 x 0.68 m).

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zur empfundenen Luftqualität im Rahmen des Konzepts "multifunktionale Bauteile" lieferten sowohl Ergebnisse für die Einzelfunktionalitäten an sich, als auch Hinweise auf

- (i) wichtige künftige Konstruktionsanforderungen für das Bauteil selbst und
- (ii) grundsätzliche Ableitungen für sinnvolle Einsatzkonzepte und Raumtypen.

Die reine Wirksamkeit der einzelnen Komponenten ist für die Bereiche

- Schallabsorption
- thermischer Komfort und
- Luftqualität

bereits gegeben und durch (Vor-) Versuche bestätigt.

Aus den durchgeführten Untersuchungen am Beispiel des konzipierten Demonstrators in einem Testraum mit einer Bewertung der empfundenen Luftqualität mit 15 Testpersonen (Abb. 64) hinsichtlich

- a) Wirkung der Raumluftsituation im Testraum (ohne / mit VOC-Zugabe, Zusammensetzung siehe Tabelle 2) und
- b) Wirkung des Demonstrators auf die Raumluftsituation (ohne / mit VOC-Zugabe)

können folgende weiterführende funktionelle, technologische und Applikations-Erkenntnisse nach (i) und (ii) abgeleitet werden:

1. Wärmeproduzierende Bauteilkomponenten, wie z. B. Vorschaltgeräte von verwendeten Leuchtmitteln, können zu einer Erhöhung der Raumlufttemperatur beitragen und erwartete positive Effekte kompensieren bis invertieren (i). Vorschaltgeräte sollten in einen separaten Schaltschrank außerhalb des Einsatzortes verbaut werden.
2. Mit 1. verbundene Veränderungen in der relativen Raumluftfeuchte haben ebenfalls einen Einfluss auf die Bewertung der empfundenen Luftqualität (i)
3. Eigenemissionen aus Bauteilkomponenten, wie Kunststoffbauteilen, lackierten Oberflächen, Klebe- und Montagehilfsmitteln können ebenfalls invertierend auf positive Effekte wirken (i)
4. Eine Reguliermöglichkeit der photokatalytischen Aktivität an sich könnte für künftige Optimierungen und Anpassungen auf die jeweilige Anwendungssituation einen wesentlichen Vorteil bieten (i). Technische Ansätze hierfür ergeben sich in erster Linie über:
 - die Wahl des Photokatalysators
 - die Wahl der UV-Leuchtmittel und Regulierbarkeit der Beleuchtungsstärke im aktiven Bereich z. B. über Dimmfunktionen
5. Einsatzkonzepte für Aufenthaltsräume für Menschen im gewerblichen und privaten Umfeld (ii)
6. Einsatzkonzepte für Räume mit bestimmungs- und nutzungsgemäßer "schlechter" Luftqualität wie z. B. Keller- und Lagerräume mit geringem oder keinem vorgesehenen Luftaustausch und gelegentlichem aber regelmäßigem Personenaufenthalt (definitionsgemäß keine Aufenthaltsräume) (ii)
7. Einsatzkonzepte für Sonderräume wie z. B. Wasch- und Toilettenräume, Raucherräume, Aufzugskabinen, Führerstände (definitionsgemäß keine Aufenthaltsräume) (ii)
8. Maschinenräume und Produktionsstätten mit besonderen Anforderungen an die Raumsituation (definitionsgemäß keine Aufenthaltsräume) (ii)

Die Bestimmung von Kenngrößen wie z.B. Absorptionsgrad des Prototyps stehen noch aus. Diese Prüfungen müssen unter normierten Bedingungen nach DIN in einem Hallraum erfolgen. Zu diesem Zweck muss ein Prototyp mit einer Fläche von mindestens 12 m² konstruiert werden..

8 Analyse und Beurteilung der gewählten Ansätze

Zur Beurteilung der einzelnen Bauteile und deren Funktionen wurde jeweils ein dreistufiger Maßstab (1, 2 und 3) angelegt. Dieser Maßstab ist nur ausgelegt, um die feinen Unterschiede zwischen den verschiedenen Aufbauten deutlich zu machen. Er hat mit den Erfahrungen bzw. Empfehlungswerten in der Praxis nicht unbedingt viel zu tun.

Zur Bewertung der Absorption wurde ein Einzahlwert $\underline{\alpha}$ über die gemittelten Oktaven von 250-2000 Hz wie folgt gebildet. Im Rahmen dieses Vorhabens, wurde für die akustische Bewertung das dreistufige Modell in Tabelle 3 festgelegt.

Parameter	Werte	Kommentar	Bewertung
$\underline{\alpha}$ (250-2k Hz)	$\underline{\alpha} < 0,35$	gering absorbierend	1
$\underline{\alpha}$ (250-2k Hz)	$0,35 \leq \underline{\alpha} \leq 0,7$	absorbierend	2
$\underline{\alpha}$ (250-2k Hz)	$\underline{\alpha} > 0,7$	hoch absorbierend	3

Tabelle 3:

Bewertungssystem für das Absorptionsvermögen der MF-Bauteile

Zur Bemessung des Latentwärmespeichers, wurde die Differenz aus der minimalen und maximalen Amplitudendämpfung der Temperatur (ΔT in [Kelvin]) aller simulierten Bauteile gebildet. Ein Drittel dieser Differenz wurde dem Minimalwert aufaddiert bzw. von dem Maximalwert subtrahiert und auf ganze Zahlen gerundet, somit ergibt sich für diese Arbeit die in Tabelle 4 dargestellten Bewertungsschemata für das PCM.

Parameter	Werte	Kommentar	Bewertung
ΔT	$\Delta T < 1,0 \text{ K}$	gering dämpfend	1
ΔT	$1,0 \text{ K} \leq \Delta T \leq 2,0 \text{ K}$	dämpfend	2
ΔT	$\Delta T > 2,0 \text{ K}$	hoch dämpfend	3

Tabelle 4:

Bewertungssystem für die Wärmespeicherungsfähigkeit der MF-Bauteile

Die Grenzwerte zur Bewertung der Flächenmasse (Tabelle 5) und Bauteildicke (Tabelle 6) erfolgten nach dem gleichen Berechnungsschema, wie für das PCM.

Parameter	Werte	Kommentar	Bewertung
Flächenmasse m'	$m' < 10 \text{ kg/m}^2$	leichte Bauart	3
Flächenmasse m'	$10 \text{ kg/m}^2 \leq m' \leq 15 \text{ kg/m}^2$	mittlere Bauart	2
Flächenmasse m'	$m' > 15 \text{ kg/m}^2$	schwere Bauart	1

Tabelle 5: Bewertungssystem für das Flächengewicht der MF-Bauteile

Parameter	Werte	Kommentar	Bewertung
Dicke D	$D < 90 \text{ mm}$	dünne Bauart	3
Dicke D	$90 \text{ mm} \leq D \leq 105 \text{ mm}$	mittlere Bauart	2
Dicke D	$D > 105 \text{ mm}$	dicke Bauart	1

Tabelle 6: Bewertungssystem für die Stärke der MF-Bauteile

Zur Vereinfachung der Bewertung der einzelnen Bauteile für den Bürobau ist in Tabelle 7 eine Übersicht dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung sind die Werte aus Tabelle 8 nochmals in Abb. 67 als Säulendiagramm abgebildet.

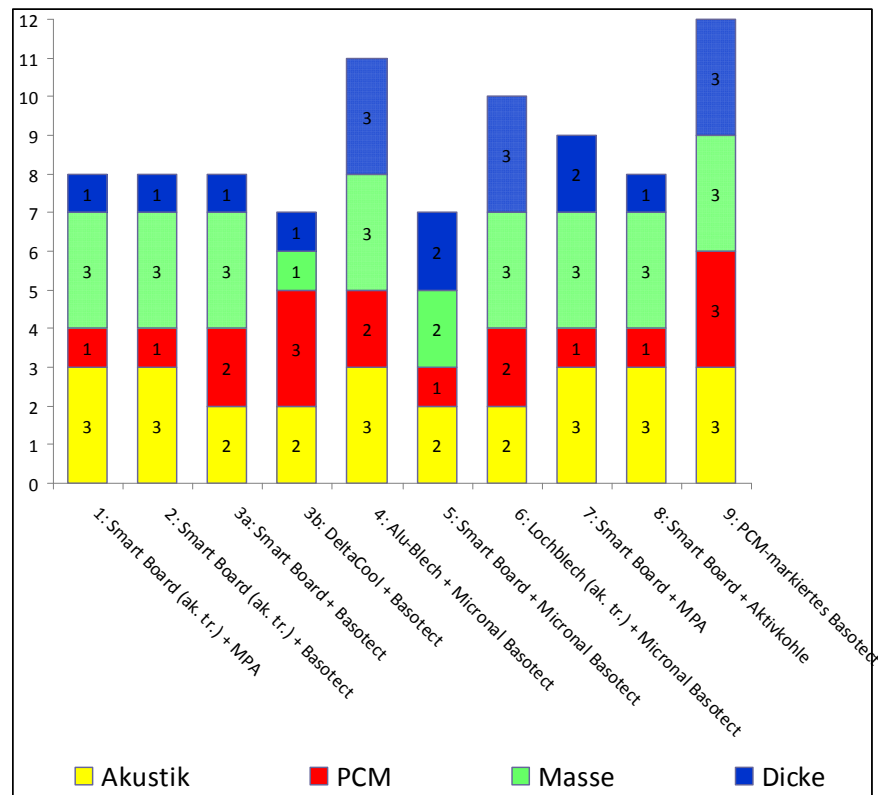


Abb. 67:
Säulendiagramm aller Bewertungskriterien

8.1 Akustik

Aus akustischer Sicht lassen sich mit vorherigen Berechnungen sehr gute Prognosen stellen. Letztendlich kann gesagt werden, dass bei allen Varianten gute bis sehr gute Absorptionsgrade erreicht werden. In der Kategorie hoch absorbierend lassen sich Variante 1, 2, 4, 7, 8 und 9 einordnen. Variante 3, 5 und 6 werden immerhin noch als absorbierend kategorisiert.

8.2 Wärme

Die Simulationsergebnisse zeigen bei fast allen Varianten, dass sich mit den PCM-Materialien unter den gewählten Randbedingungen wenig Potential zur Vermeidung sommerliche Überhitzungen ergibt. Mit der Micronal® PCM Smart Board™ kann eine maximale Dämpfung von 1,0 K (Kelvin) nach o.g. Abschätzung erreicht werden. Selbst bei der vollflächigen Belegung der Decke (ohne Schallabsorptionsvermögen) ist eine maximale Temperaturreduzierung von ca. 1,3 K unter den gegebenen Randbedingungen zu erreichen. Die thermische Wirkung dieser Platte ist in der Praxis nahezu vernachlässigbar.

Günstiger, aber dennoch optimierungsbedürftig sind die Konstruktionen, in denen das in Micronal® PCM getränkte Basotect® integriert ist. Die Dämpfung von ca. 1,7 K zeigt eine nutzbare thermische Wirksamkeit dieser Bauteile. Jedoch sollte bei der Metallabdeckung, zur besseren Absorption der Wärme, eine matte Oberflächenbeschichtung verwendet werden, um Reflexionen zu minimieren.

Das auf Salzhydrat basierende PCM von Dörken GmbH & Co. KG mit dem Produktnamen Delta-Cool® erweist sich aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit und hohen Schmelzenthalpie, mit einer Temperaturdämpfung ca. 2,4 K als vergleichsweise wirkungsvoll und stellt somit eine sinnvolle Alternative dar.

Das Basotect in einem von BASF entwickelten Verfahren mit einer Micronal® PCM haltigen Suspension getränkt. Der Flächenverbrauch an der Suspension lag bei 2 kg/m² bis 4 kg/m².

8.3 Empfundene Luftqualität

Im gewerblichen Umfeld ist derzeit davon auszugehen, dass insbesondere Büroräume ca. 12 h/Tag genutzt werden. In diesem Zeitraum sollen multifunktionale Bauteile mit dazu beitragen, die empfundene Luftqualität in einem Bereich zu halten, so dass es zu keinen Beeinträchtigungen oder Beschwerden der Nutzer kommt. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass sowohl der Weg über die Photokatalyse als auch der Ansatz der Adsorption erfolgversprechend sind.

8.4 Gestaltung

Die transparenten Vorsatzschalen in Variante 1 und 2 aus PCM-Gipskarton bzw. in Variante 6 aus Aluminium charakterisieren sich durch ihre einheitlich gelochte Fläche, die ggf. nachträglich mit Farbanstrichen entsprechend gestaltet werden können.

In der Kategorie Schlitzabsorber finden sich die Varianten 3 bis 5 wieder, die recht schmale Schlitz aufweisen und ebenfalls jederzeit farblich durch Anstriche/Lacke verändert werden können, sofern die Schlitz selbst frei bleiben.

Die Varianten 7 und 8 ergeben ein gleichmäßiges Wechselbild aus gelochter PCM- und mikroperforierter Wabenplatte bzw. Aktivkohleplatte. Dabei können lediglich nur die PCM-Gipskarton-Streifen nachträglich farblich angepasst werden, um keine gravierenden Verluste der akustischen Qualität einzugehen. Zumindest die Wabenplatte kann in der Herstellung farblich angepasst werden und aufgrund der Transluzenz zu lichttechnischen Zwecken eingesetzt werden.

Als Variante 9 mit dem höchsten Schallabsorptionsgrad kristallisierte sich der mit Mikronal® PCM modifizierte Basotect Schaumstoff. Der Schaumstoff wurde in einem von BASF entwickelten Verfahren mit einer Micronal® PCM haltigen Suspension getränkt. Die Eindringtiefe in das offenporige Melaminharzschaumgefüge betrug 5 mm bis 10 mm. Der Flächenverbrauch an der Suspension lag bei 2 kg/m² bis 4 kg/m². Hohe Schallabsorptionsgrade wurden mit Schaumstoffproben, deren Flächenverbrauch an PCM haltiger Suspension bei 3,5 kg/m² lag, erzielt. Das Verfahren ermöglicht sowohl eine vollflächige wie partielle Tränkung des Schaumstoffs mit der Suspension. Dadurch ergeben sich auch für die Zukunft Möglichkeiten mit denen sowohl der Schallabsorptionsgrad wie die Absenkung der maximalen Raumtemperatur gezielt angesteuert werden können

Für alle Modelle gilt jedoch, dass farbliche Behandlungen nur vorgenommen werden sollten, sofern diffusionsoffene Anstriche verwendet werden, um die luftreinigende Wirkung nicht wesentlich einzuschränken, wenn eine Keratin-Beschichtung zur passiven Nutzung aufgebracht ist. Im Übrigen sollte darauf geachtet werden, dass die porösen/mikroperforierten Bauteile durch Anstriche nicht „verstopft“ werden.

8.5 Gesamte Beurteilung

Die Varianten 1 und 2 machen sich durch eine gute Schallabsorption bemerkbar. Ein weiterer Vorteil überzeugt durch ein relativ geringes Flächengewicht. PCM ist in diesen Modellen mit einer Dämpfung von nicht ganz 1 K verbesserungswürdig und der recht dicke Aufbau erweist sich als eher unpraktisch. Aus gestalterischer Sicht ist ein vollflächiger Anstrich möglich. Variante 8 ist in der Bewertung identisch mit Variante 1 und 2, mit Ausnahme der geringeren Temperaturdämpfung, die bei ca. 0,6 K liegt. Die Aktivkohlestreifen heben die monotone Struktur im Gegensatz zu den oben genannten Varianten ab, sind jedoch nicht überstreichbar. Der Vorteil der Luftreinigung mit der Aktivkohle ist, dass es keine zusätzliche Energie kostet. Der Nachteil ist jedoch, dass die Saugfähigkeit der Aktivkohle mit der Zeit ausgeschöpft wird, so dass sie mit z.B. Brennvorfahren regeneriert werden muss. Das kostet zusätzlichen Aufwand.

Variante 3a verhält sich ähnlich zu den oben genannten Varianten, verliert jedoch einen Punkt wegen des geringeren Absorptionsvermögens. Dafür gewinnt sie aber wieder einen Bewertungspunkt durch eine Temperaturdämpfung von knapp über 1 K. Variante 4 überzeugt durch eindrucksvolle Werte in Absorption, Flächenmasse und Dicke. Der „Alu-Look“ könnte ggf. durch (thermisch reflexionsarme) Lacke den räumlichen Gegebenheiten angepasst werden. Die thermische Dämpfung liegt bei 1,7 K. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich Variante 6 lediglich durch die etwas geringere Absorption aufgrund der dickeren Platten. Ähnliche Eigenschaften zu den Varianten 1 und 2 sind bei Variante 6 durch die einheitlich gelochte Fläche gegeben, welche ebenso in verschiedenen Farbvariationen produzierbar ist.

Variante 7 findet sich in der Kategorie „absorbierend“ wieder. Der leichte Aufbau ist vorteilhaft und eher ein durchschnittlicheres Modell in Punkto Dicke. Die PCM-Elemente bringen einen Temperaturunterschied von nur 0,6 K, sind aber in Sachen Farbgebung noch nachträglich veränderbar. Die Wabenplatte jedoch kann bei der Herstellung farblich variabel angepasst werden und wegen der transluzenten Struktur lichttechnisch genutzt werden. Variante 5 liegt akustisch im Mittelfeld. Die Masse und Dicke sind ebenso im mittleren Bereich angesiedelt, allerdings lässt das PCM etwas zu wünschen übrig. Variante 3b unterscheidet sich zu Variante 3a wesentlich im Kriterium PCM, indem sich diese in der Wirkung mit 2,4 K sehr positiv abhebt. Dieser Vorteil geht allerdings zu Lasten der Flächenmasse, die sich dabei mehr als verdoppelt.

Die Verbesserung der Luftqualität kann sowohl mit einem passiven System (Adsorber) als auch mit einem aktiven System (Photokatalyse) erzielt werden. Die Versuche zeigen, dass die einzelnen Komponenten bezüglich der Anpassung von Luftqualität wirken. Mit der passiven Variante können sehr schmale integrale Systeme konstruiert werden. Ihr Nachteil ist, dass sich die Kapazität des Adsorbermaterials, was die Aufnahme von geruchsaktiven Substanzen betrifft, mit der Zeit erschöpft. Eine Regeneration ist nur über nachgeschaltete thermische Prozesse möglich. Die Photokatalyse benötigt dagegen keine Regeneration, aber eine Lichtquelle. Durch die Auswahl des

Leuchtmittels wird die Bautiefe des aktiven integralen Bauelements limitiert. Mit den kommerziell verfügbaren Leuchtmitteln sind momentan Bautiefen unter 120 mm nicht erzielbar.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass funktionsfähige multifunktionale Bauteile grundsätzlich keine Unmöglichkeit darstellen. Funktionen, wie Schall absorbieren, Temperaturspitzen glätten und gegebenenfalls einen Beitrag zur Lufthygiene leisten, können zusammen in einem Bauteil, bei gleichem Flächenangebot realisiert werden. Die akustischen Messergebnisse stimmen sehr gut mit den Berechnungsergebnissen überein, d.h. selbst durch Kombination mit thermischen Elementen kann dennoch eine hochwertige Absorption erreicht werden. Mithilfe von thermischen Simulationsprogrammen lassen sich ansatzweise Fähigkeiten der PCM prognostizieren, welche aber nochmals in der Praxis überprüft werden sollten. Nichtsdestoweniger hat sich im Vorfeld gezeigt, dass bei Latentwärmespeichern noch ein wesentlicher Optimierungsbedarf vorhanden ist. Problematisch ist hauptsächlich bei Paraffinen nach wie vor die Be- und Entladung aufgrund zu geringer Speicherkapazität bzw. geringer Wärmeleitfähigkeit. Der mitunter wichtigste Punkt hierbei ist allerdings die Gewährleistung der Entladungsmöglichkeit, beispielsweise über einen konstanten Luftwechsel oder einer erhöhten Nachtlüftung. Hohe Schallabsorptionsgrade wurden mit Schaumstoffproben, deren Flächenverbrauch an PCM haltiger Suspension bei 3,5 kg/m² lag, erzielt. Das Verfahren ermöglicht sowohl eine vollflächige wie partielle Tränkung des Schaumstoffs mit der Suspension. Dadurch ergeben sich auch für die Zukunft Möglichkeiten mit denen sowohl der Schallabsorptionsgrad wie die Absenkung der maximalen Raumtemperatur gezielt angesteuert werden können.

Die Laboruntersuchungen hatten gezeigt, dass die Verbesserung der Luftqualität sowohl mit einem passiven System (Adsorber) als auch mit einem aktiven System (Photokatalyse) erzielt werden kann. Das Langzeitverhalten beider Verfahren unter praxisnahen Bedingungen muss noch überprüft werden.

In einzelnen Voruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die einzelnen Komponenten bezüglich der Anpassung von Akustik, Wärme und Luftqualität wirken. Auch die konstruktive Integration der einzelnen Funktionen in einem flächigen Bauteil konnte umgesetzt werden. Im Betrieb zeigen die einzelnen Komponenten noch Optimierungspotentiale. Die Wärmeentwicklung kann mit einem Austausch der mechanischen durch elektronische Vorschaltgeräte gelöst werden. In wieweit dies mit den momentan eingesetzten Leuchtstoffröhren möglich ist muss noch geprüft werden. Die Entwicklungen im Bereich der LED-Lampen zeigen, dass langfristig auch die Leuchtstoffröhren ersetzt werden könnten. Neue Photokatalysatoren mit Lichtabsorptionsvermögen im sichtbaren Wellenlängenbereich stehen kurz vor der Marktreife. Somit kann zukünftig auf UV-Lampen als Lichtquelle verzichtet werden. Die Geräuschentwicklung des Querstromlüfters kann durch die Reduzierung des Volumenstroms und durch die Geometrie Ansaugöffnung angepasst werden.

Unbedingt zu beachten, sind auch die Anforderungen in Hinblick auf den baulichen Brandschutz. Da Paraffine brennbar sind, ist die Micronal® PCM Smart Board™ entsprechend Herstellerangaben der Baustoffklasse B2 zugeordnet, mit anderen Worten ein normalentflammbarer Baustoff. Gleichmaßen wurde das in Micronal® PCM getränkte Basotect® im „Schnelltest“ mit einem Feuerzeug auf Brennbarkeit geprüft, welches rasch zu brennen begann, somit in die gleiche Ka-

tegorie fällt. Daher eignen sich aus Brandschutzgründen eher Salzhydrate, wie z.B. DeltaCool. Im Datenblatt von BASF ist Basotect® wird als schwerentflammbar (B1) eingestuft.

Letzten Endes ist soweit der Grundstein für ein Multifunktionales Bauteil gelegt. Die Optimierung der Schallabsorption stellt heutzutage kein Problem mehr dar, da entsprechende Materialien auf dem Markt erhältlich sind. Hinsichtlich des Latentwärmespeichers besteht allerdings noch Optimierungsbedarf. Zudem, wie oben angedeutet, sollte das Konzept der Luftreinhaltung ebenso weiter ausgearbeitet werden.

10 Literatur

- [1] Quelle: www.micronal.de
- [2] Quelle: www.microsorber.de/microsorber.htm
- [3] Quelle: www.owa.de/de/menu/65/OWAtecta_systeme_perfora.html
- [4] Quelle: www.akustik-raum.com/de/dienstleistungen/index.html
- [5] Quelle: www.nimbus-group.de/rosso/products
- [6] Quelle: www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/content/products/foams/basotect
- [7] Quelle: www.micronal.de
- [8] Quelle: www.ilkazell.de/pdf/prospekt_ilkatherm.pdf
- [9] Quelle: www.doerken.de/bvf-en/produkte/pcm/index.php
- [10] Quelle: www.fermacell-greenline.de/index.html
- [11] Quelle: de.wikipedia.org/wiki/Aktivkohlefilter
- [12] Quelle: de.wikipedia.org/wiki/Photokatalytische_Selbstreinigung
- [13] Quelle: www.pcm-ral.de
- [14] Quelle: www.solaranlagen-bayern.de/sonnenenergie/waermespeicher/latentwaermespeicher
- [15] *Cremer L.; Müller H.A.*: Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band II, Kap. 2-4; S. Hirzel Verlag, Stuttgart (1974).
- [16] *Mechel, F. P.*: Schallabsorber Band I, II: S. Hirzel Verlag Stuttgart · Leipzig
- [17] *Zhou, X.; Heinz, R.*: Vereinfachte Rechenverfahren für einfache und geschichtete Resonanzabsorber. Interner Bericht des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (1996)
- [18] *Ford, R. D.; McCormick, M. A.*: Panel Sound Absorbers. J. Sound Vib. 10 (1969), S. 411-423; Englisch (Großbritannien)
- [19] *Maa, D.Y.*: Theory and design of microperforated panel sound absorbing constructions. Scientia Sinica 18 (1975), S. 55-71; Englisch (Großbritannien)
- [20] *Zha, X.; Zhou, X.; Kang, J.*: Akustische Eigenschaften und Auslegung mikroperforierter Plattenabsorber. Fortschritte der Akustik – DAGA '94. Bad Honnef: DPG-GmbH, 1994, S. 657-660
- [21] *Leistner, P.; Fuchs, H.V.*: Schlitzförmige Schallabsorber. Erscheint in Bauphysik 23 (2001), H. 6.
- [22] *Horst Kuchling*: Taschenbuch der Physik, 18. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig
- [23] Römpf Lexikon Chemie online Version 3.6, www.roempp.com; Thieme Verlag 2009
- [24] *Doll, T.* Photochemischer und photokatalytischer Abbau von Carbamazepin, Clofibrinsäure, lomeprol und Iopromid, Dissertation 2004

11 Anlagen

11.1 Anlage 1: Übersichtstabellen

Bauteil	Material	Dicke t [mm]	längenbez. Strömungs- widerstand [N s/m ⁴]	Schlitz-/ Loch- abstand b [mm]	Schlitzbreite/ Lochdurch- messer d [mm]	Perforation ② [%]	E-Modul [MPa]	Dichte ② [kg/m ³]	PCM- Anteil [M.-%]	Latent- wärme kapazität [kJ/m ²]
SmartBoard (ge- locht)	PCM-Gips	15	-	25	15	28.3	3.30E+09	767	33	236.6
SmartBoard (ge- locht)	PCM-Gips	15	-	10	5	19.6	3.30E+09	767	33	265.3
SmartBoard (ge- schlitzt)	PCM-Gips	15	-	40	15	37.5	3.30E+09	767	33	206.3
SmartBoard (ge- schlitzt)	PCM-Gips	15	-	40	10	25	3.30E+09	769	33	247.5
MPA-Folie	ETFE	0.7	-	3	0.3	0.79	1.20E+09	1700	-	-
Aluminium-Gitter	Aluminium	1	-	8	5	30.6	7.00E+10	2700	-	-
Stahl-Gitter	Stahl	1	-	30	25	69,5	2.10E+11	7800	-	-
Aluminium-Blech	Aluminium	1	-	40	15	37.5	7.00E+10	2700	-	-
Aktivkohle	Aktivkohle	5	220000	-	-	-	-	490	-	-
Basotect G (grau)	Melaminharz	100	9500	-	-	-	-	9	-	-
Micronal Basotect	PCM + Melaminharz	25	28000	-	-	-		185	95	917
PCM-markiertes Basotect	PCM + Melaminharz	30	12000	-	-	10-40		185	>95	>917

Tabelle 7: Parameter der verwendeten Materialien

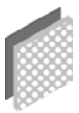
Typ	Variante		Beurteilungskriterien			
			Akustik	PCM	Masse	Dicke
MPA		1 (A) MPA, (W) Smart-Board, (L) Aktiv	3	1	3	1
PoA		2 (A) PoA, (W) Smart-Board, (L) Aktiv	3	1	3	1
SLA		3a (A) PoA, (W) Smart-Board + PCM-Basotect, (L) Aktiv	2	2	3	1
SLA		3b (A) PoA, (W) Smart-Board + PCM-Basotect, (L) Aktiv	2	3	1	1
SLA		4 (A) PoA, (W) PCM-Basotect, (L) Aktiv	3	2	3	3
STA		5 (A) PoA, (W) PCM-Basotect+ Smart Board, (L) Aktiv	2	1	2	2
PoA		6 (A) PoA, (W) PCM-Basotect, (L) Aktiv	2	2	3	3
STA		7 (A) STA, (W) PCM Basotect + Smart Board, (L) Aktiv	3	1	3	2
STA		8 (A) STA, (W) PCM Basotect + Smart Board, (L) Aktivkohleplatte	3	1	3	1
PoA		9 (A) PoA, (W) PCM Basotect, (L) Aktiv	3	3	3	3

Tabelle 8: Beurteilungsübersicht der einzelnen Varianten, Bedeutungen: (A) Akustik, (W) Wärmespeicherung, (L) empfundene Luftqualität

11.2 Anlage 2

Bauteil	Material	Dicke t [mm]	Dichte ρ [kg/m³]	λ [W/mK]
Innenwände/ Flurtrennwand	Gipskartonplatte	2x12,5	900	0,25
	Mineralfaser	80	50	0,04
	Gipskartonplatte	2x12,5	900	0,25
Trenndecke	Estrich	50	2000	1,20
	Trittschalldämmung	50	40	0,035
	Stahlbeton	200	2400	2,5
	Melaminharzschäum	100	6	0,04
	Gipskartonplatte	15	766	0,25
Außenwand	Innenputz	15	1400	0,56
	Hochlochklinker	175	2400	1,40
	Wärmedämmung	160	50	0,04
	Außenputz	30	300	1,00
Fenster	U_w [W/m²K]	U_g [W/m²K]	Rahmen-anteil	g-Wert
2-fach-Wärme-schutzverglasung (Argon)	1,4	1,0	30%	0,59

Tabelle 9:
Parameter des Referenzraumes

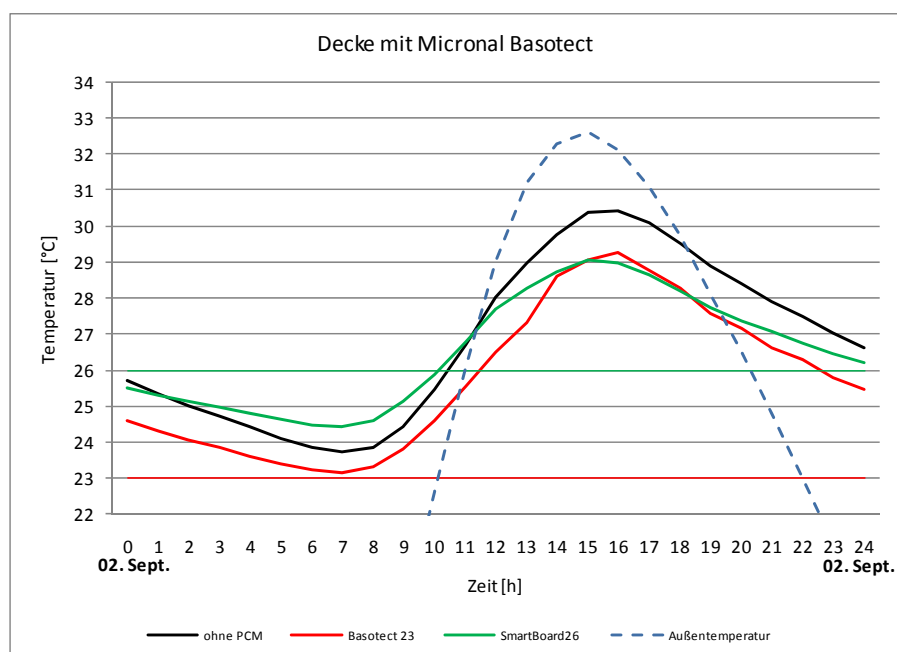


Abb. 68:
Temperaturverlauf für den Raum mit Micronal Basotect Decke für den 02. Sept.

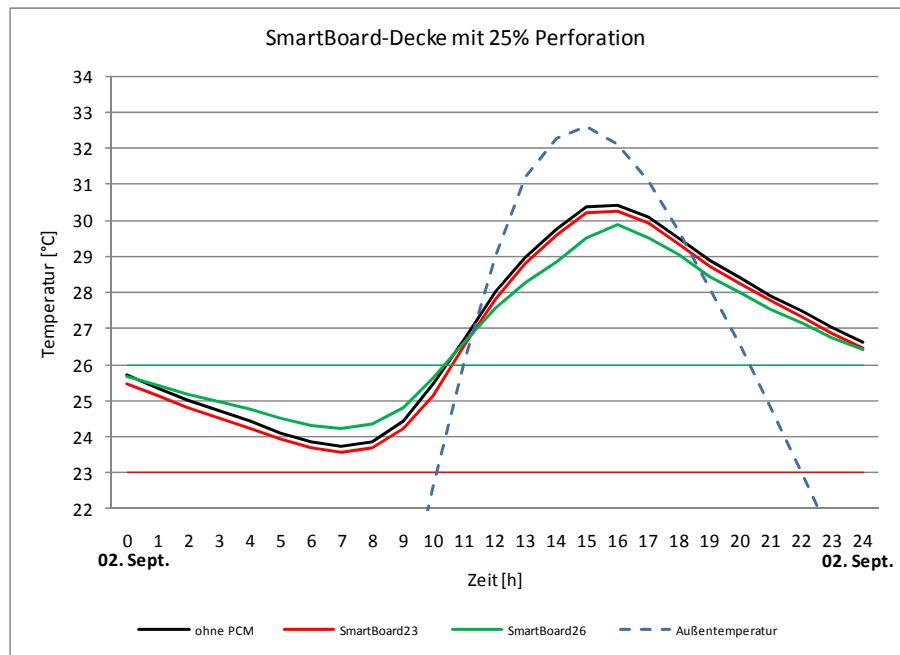


Abb. 69: Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke für den 02.Sept., 25% Perforation

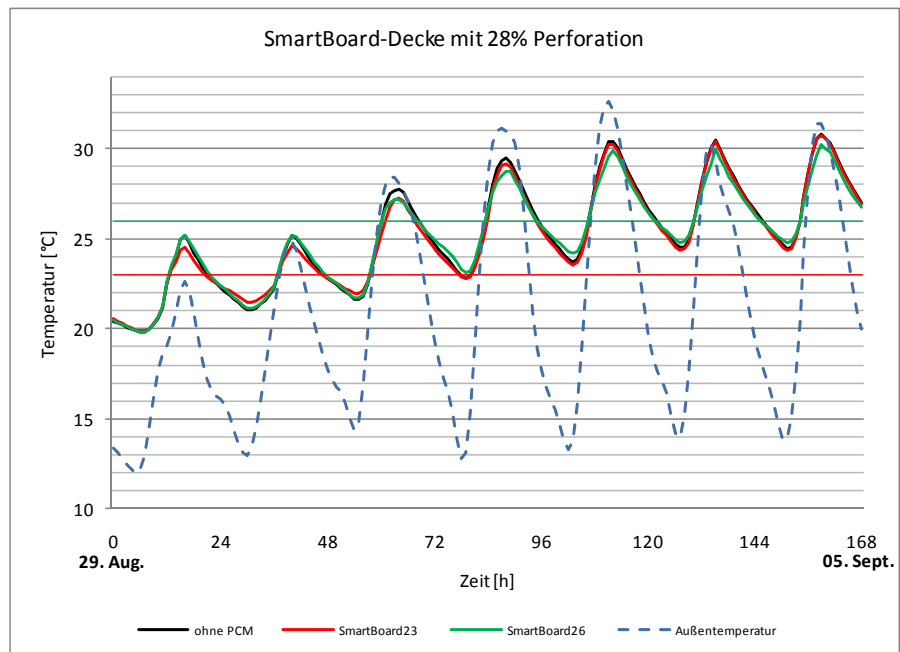


Abb. 70: Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke, 28% Perforation, mit Smart Board23: $\Delta T = -1,00$ K; Smart Board26: $\Delta T = -0,93$ K

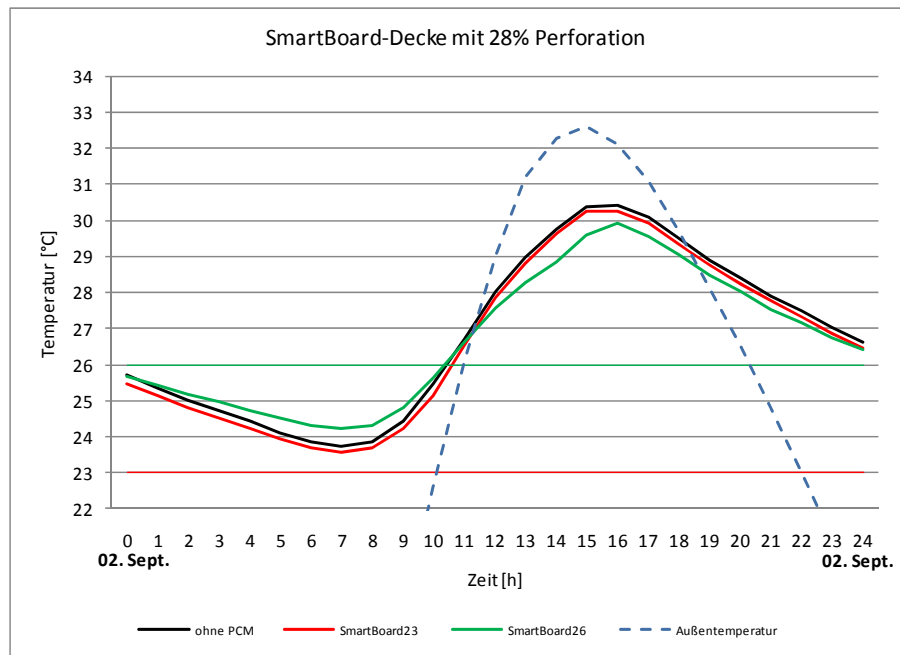


Abb. 71: Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke für den 02.Sept., 28% Perforation

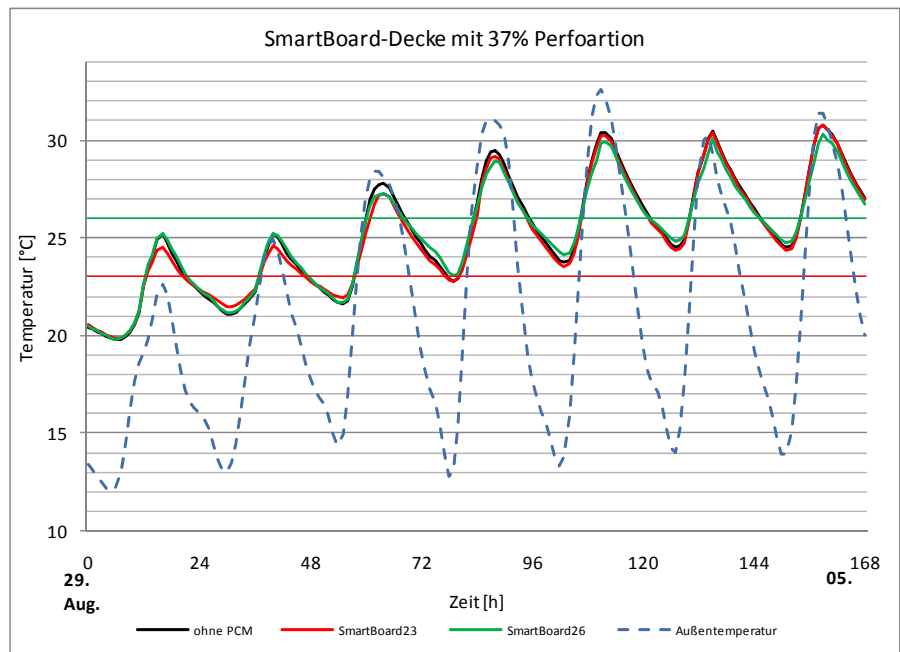


Abb. 72: Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke, 37% Perforation, mit Smart Board23: $\Delta T = -0,92 \text{ K}$; Smart Board26: $\Delta T = -0,88 \text{ K}$

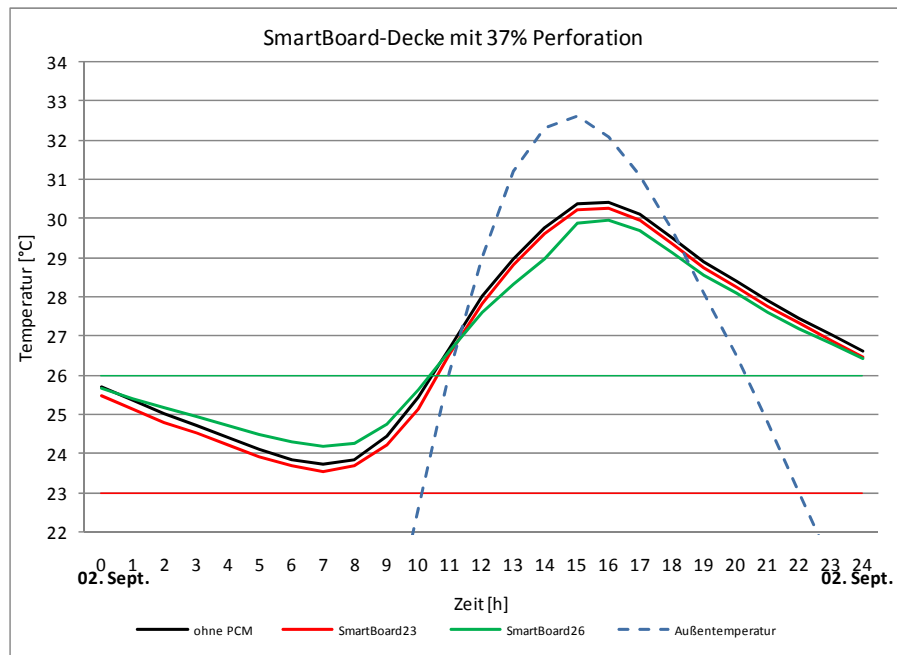


Abb. 73: Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke für den 02.Sept., 37% Perforation

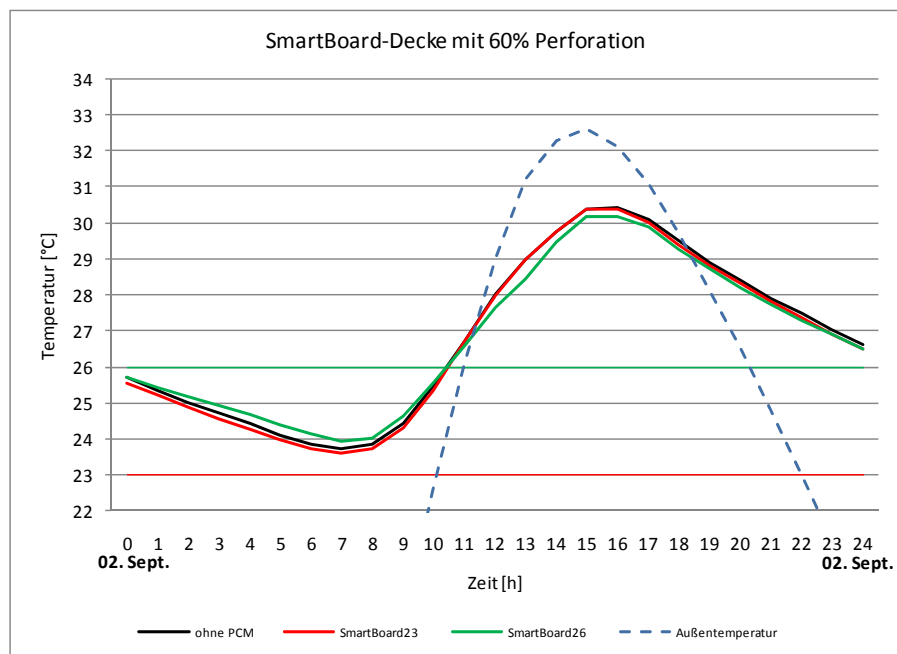


Abb. 74: Temperaturverlauf für den Raum mit Smart Board-Decke für den 02.Sept., 60% Perforation

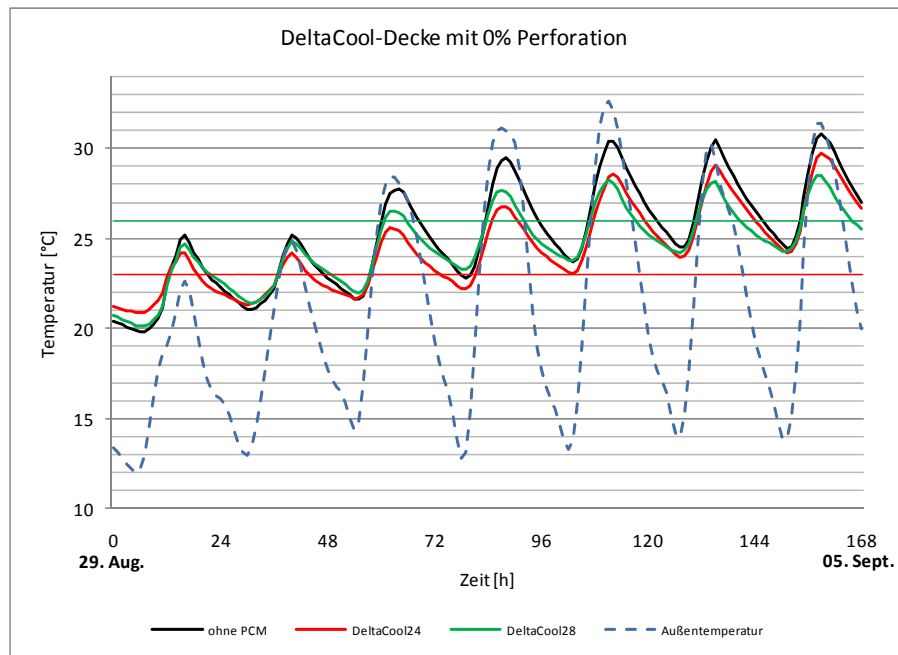


Abb. 75: Temperaturverlauf für den Raum mit Delta Cool-Decke, 0% Perforation, mit Delta Cool 24: $\Delta T = -2,70 \text{ K}$; Delta Cool 28: $\Delta T = -2,63 \text{ K}$

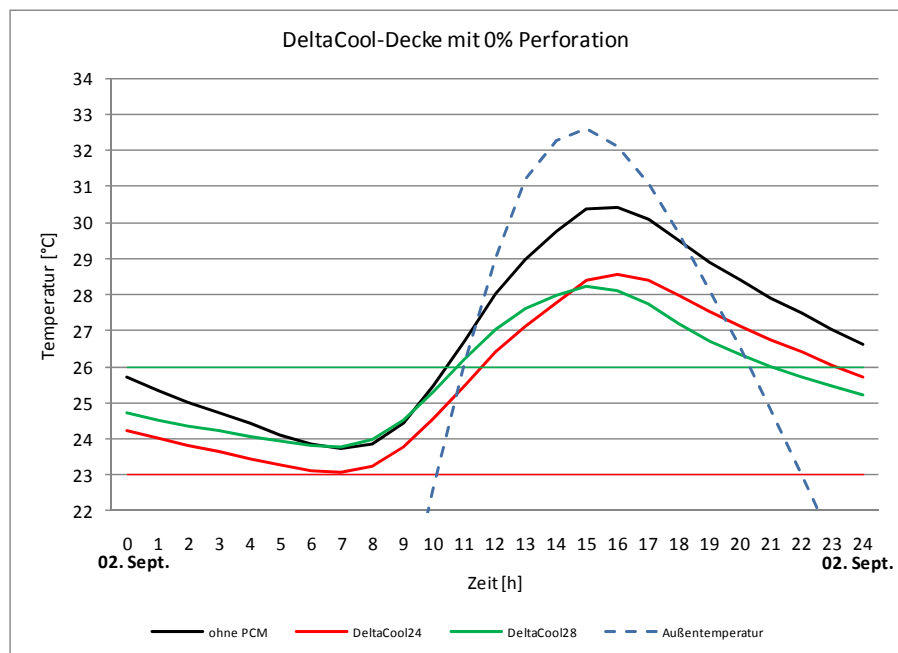


Abb. 76: Temperaturverlauf für den Raum mit Delta Cool-Decke für den 02.Sept., 0% Perforation

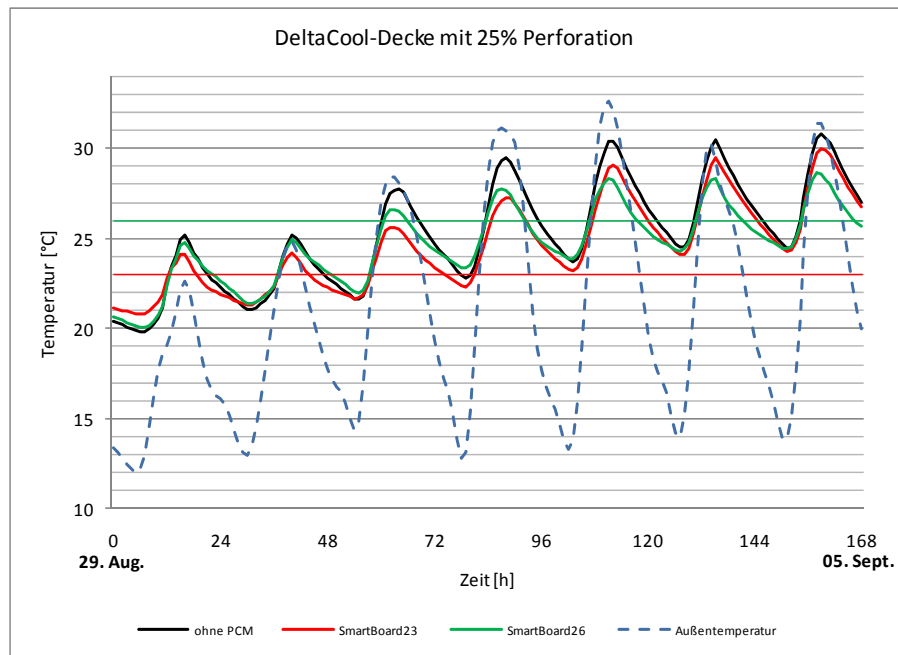


Abb. 77: Temperaturverlauf für den Raum mit Delta Cool-Decke, 25% Perforation, mit Delta Cool 24: $\Delta T = -2,33$ K; Delta Cool 28: $\Delta T = -2,44$ K

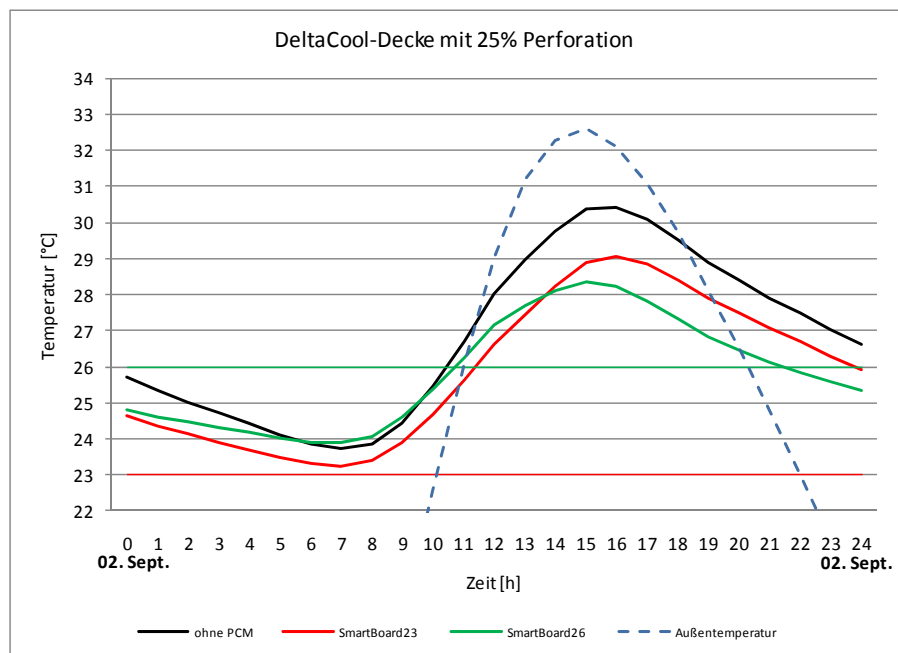


Abb. 78: Temperaturverlauf für den Raum mit Delta Cool-Decke für den 02.Sept., 25% Perforation

11.3 Anlage 3

Die Daten über die Wirkung der Keratin-Beschichtung wurden aus [14] entnommen. Zur Prüfung der Aufnahmefähigkeit von Carbonylverbindungen inklusive Formaldehyd wurde ein Prüfkörper aus FERMACELL greenline Gipsfaserplatten in einer Prüfkammer einer mit Carbonylverbindungen dotierten Atmosphäre ausgesetzt.

In der folgenden Tabelle 4 ist das Sorptionsverhalten bzw. in Tabelle 4 das Desorptionsverhalten gegenüber verschiedener Carbonylverbindungen dargestellt. Dabei ist die Konzentration der Carbonylverbindungen in der Prüfkammer in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

	dotierte Konzentration 0h	1h	4h	24h	48h
Methanal	988	96	40	14	11
Ethanal	776	624	591	318	295
Propenal	755	21	13	0	0
Propanal	814	629	548	267	240
2-Butenal	838	212	45	0	0
Isobutenal	808	701	539	222	173
2-Butanon	797	486	336	149	127
Butanal	797	383	312	136	121
2-Pentenal	817	288	144	24	16
Pentanal	786	297	218	94	84
2-Hexenal	829	224	112	16	10
Hexanal	792	403	310	152	139

Tabelle 10: Sorptionsverhalten Keratin-Beschichtung

	1h	4h	22,5	48h
Methanal	59	49	45	35
Ethanal	129	56	39	27
Propenal	0	0	0	0
Propanal	129	41	11	8
2-Butenal	18	11	0	0
Isobutenal	82	22	0	0
2-Butanon	116	45	13	3
Butanal	91	28	5	4
2-Pentenal	25	15	5	0
Pentanal	115	58	16	11
2-Hexenal	15	8	3	0
Hexanal	344	222	102	62

Tabelle 11: Desorptionsverhalten Keratin-Beschichtung

Die Daten über die Wirkung der Keratin-Beschichtung wurden aus [14] entnommen. Zur Prüfung der Aufnahmefähigkeit von Carbonylverbindungen inklusive Formaldehyd wurde ein Prüfkörper aus FERMACELL greenline Gipsfaserplatten in einer Prüfkammer einer mit Carbonylverbindungen dotierten Atmosphäre ausgesetzt.

In den folgenden Diagrammen (Abb. 79 bis Abb. 90) ist das Adsorptionsverhalten gegenüber verschiedener Carbonylverbindungen dargestellt.

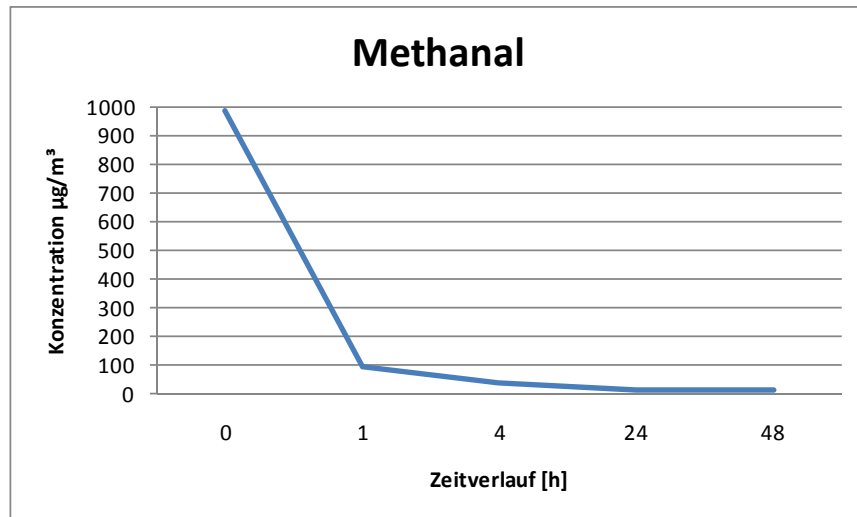


Abb. 79: Adsorptionsverhalten Methanal

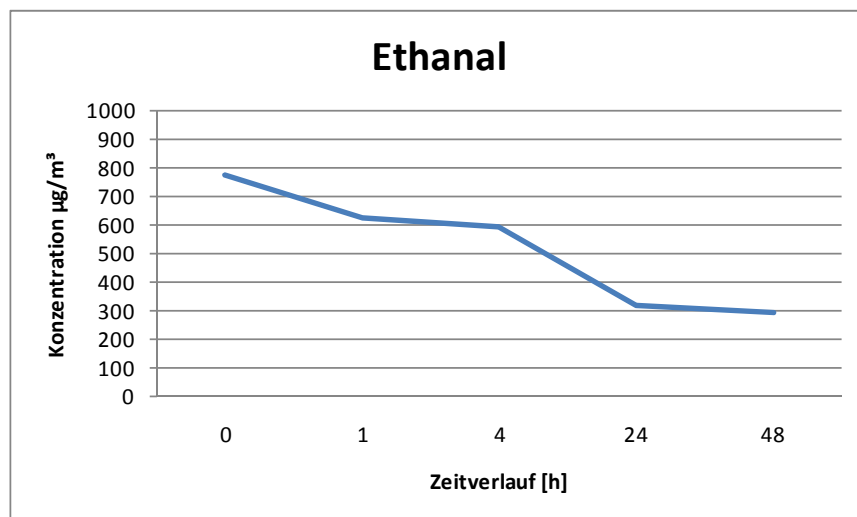


Abb. 80: Adsorptionsverhalten Ethanal

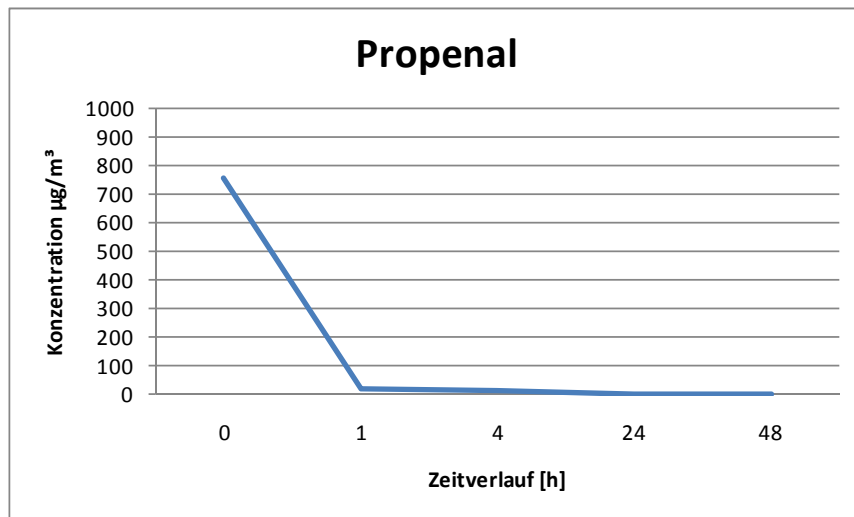


Abb. 81: Adsorptionsverhalten Propenal

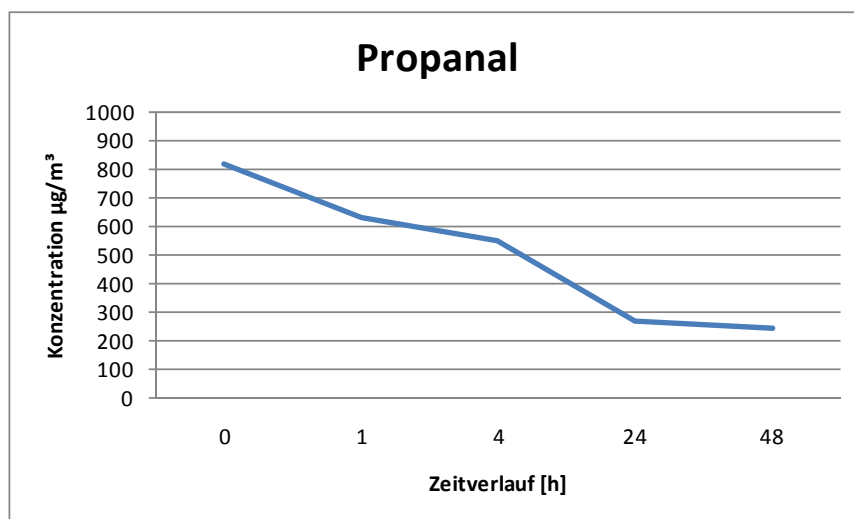


Abb. 82: Adsorptionsverhalten Propanal

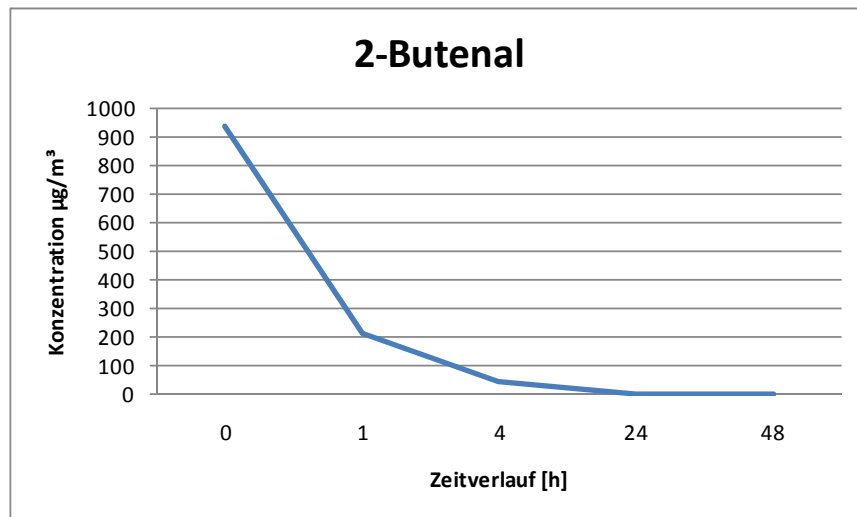


Abb. 83: Adsorptionsverhalten 2-Butenal

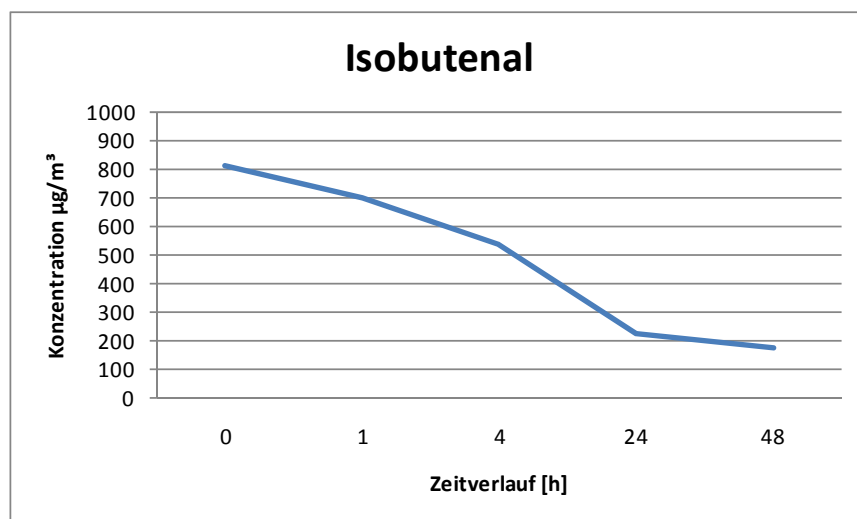


Abb. 84: Adsorptionsverhalten Isobutenal

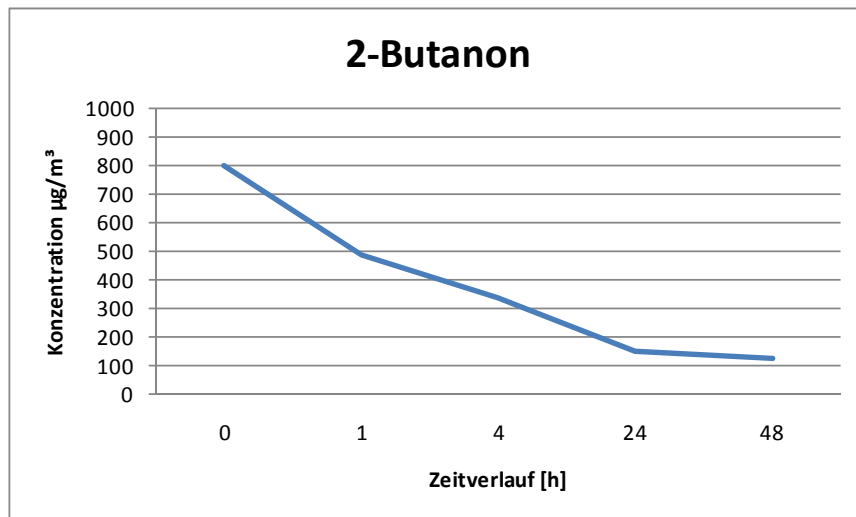


Abb. 85: Adsorptionsverhalten 2-Butanon

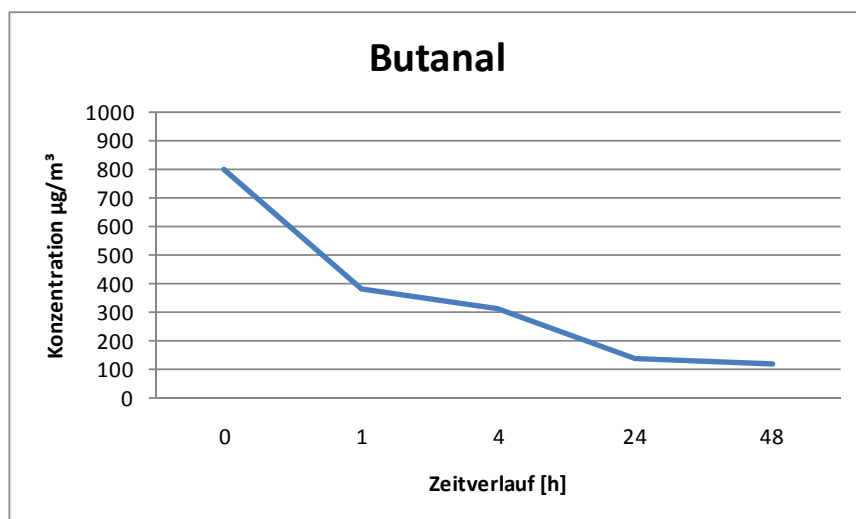


Abb. 86: Adsorptionsverhalten Butanal

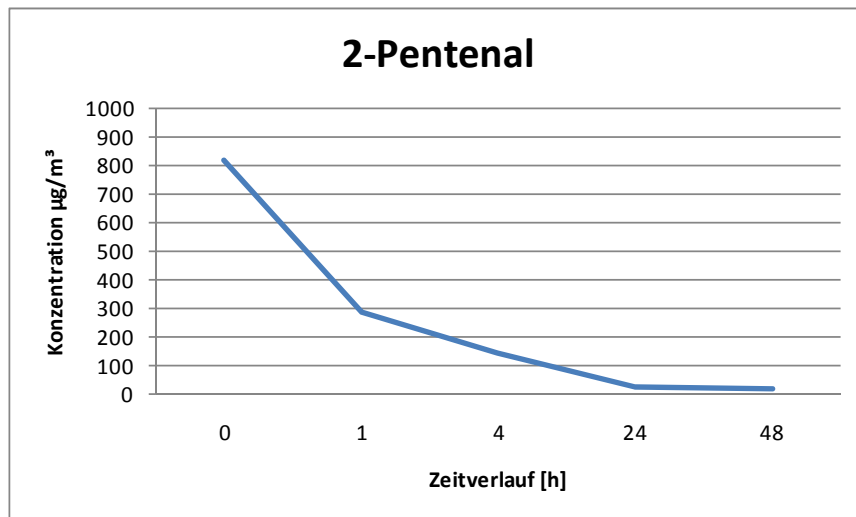


Abb. 87: Adsorptionsverhalten 2-Pentenal

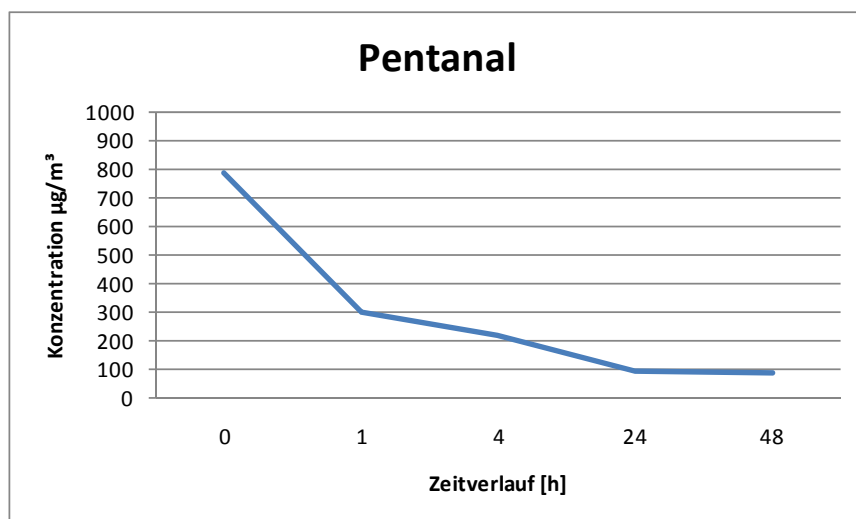


Abb. 88: Adsorptionsverhalten Pentanal

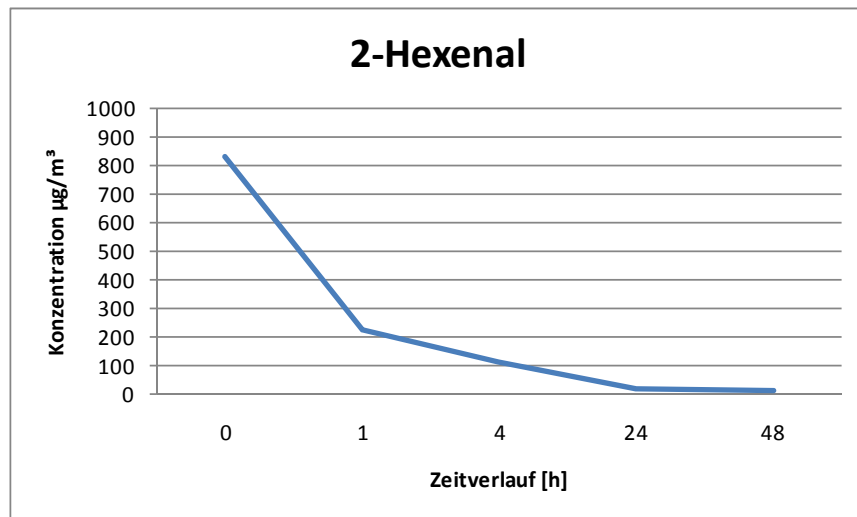


Abb. 89: Adsorptionsverhalten 2-Hexenal

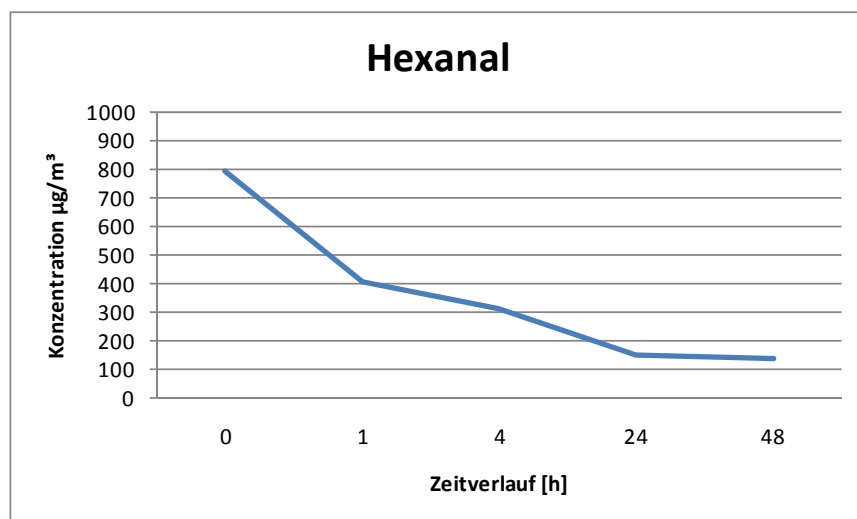


Abb. 90: Adsorptionsverhalten Hexanal