

Vakuumdämmung im Bauwesen

Vorlesungsumdruck

Block III

Bauphysik

angefertigt von der

Wolfgang Sorge IfB GmbH
Südwestpark 100
90449 Nürnberg

im Auftrag des
Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung e. V.

ZAE Bayern
Am Hubland
97074 Würzburg

Nürnberg, Juli 2010



Gefördert durch das



Nutzungsbedingungen

1) Urheberrechtshinweis

Copyright ©

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)

Am Hubland

97074 Würzburg

Alle Rechte vorbehalten.

Alle Urheberrechte der Webseite www.vip-bau.de und der vorliegenden Unterlagen für die Aus- und Weiterbildung liegen beim ZAE Bayern.

Diese Webseite, sowie die darauf eingestellten Dokumente dürfen kopiert, ausgedruckt und verteilt werden, vorausgesetzt:

- Sie werden nur zu Informationszwecken - insbesondere für die Aus- und Weiterbildung von Fachplanern, Architekten und Handwerkern - und nicht kommerziell verwendet, und
- jede Kopie - auch Auszüge - enthält den vorgenannten Urheberrechtshinweis.

2) Haftungshinweis

Das ZAE Bayern haftet nicht für die Inhalte externer Links, dafür sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich.

Das ZAE Bayern ist bemüht, sein Webangebot stets aktuell und inhaltlich richtig sowie vollständig anzubieten. Dennoch ist das Auftreten von Fehlern nicht völlig auszuschließen und das ZAE Bayern übernimmt daher keine Haftung für die Aktualität, die inhaltliche Richtigkeit sowie für die Vollständigkeit der eingestellten Informationen und Dokumente.

Geschützte Marken, Namen, Bilder und Texte werden in der Regel nicht als solche kenntlich gemacht. Das Fehlen einer solchen Kennzeichnung bedeutet aber nicht, dass es sich um einen freien Namen, ein freies Bild oder einen freien Text handelt.

3) Hinweis auf Fördermittelgeber

Der Aufbau und die Pflege der Informationsplattform www.vip-bau.de, wie auch die Ausarbeitung von Unterlagen für die Aus- und Weiterbildung werden und wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Forschungsschwerpunkts EnOB - Forschung für Energieoptimiertes Bauen - mit dem Forschungsakzent ViBau gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichungen liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Seite

2.1	Allgemeines	2
2.2	Wärmeschutz	3
	2.2.1 Motivation	3
	2.2.2 Mechanismen des Wärmetransports	4
	2.2.3 Wärmebrücken	13
2.3	Schallschutz	17
	2.3.1 Grundlegendes	17
	2.3.2 Schalldämmung von VIP	26
2.4	Brandschutz	35
	2.4.1 Gesetzliche Vorgaben	35
	2.4.2 Konventionelle Wärmedämmung	40
	2.4.3 Hocheffiziente Wärmedämmung - VIP	42

2.1 Allgemeines

Die Bauphysik ist ein Teilgebiet der Physik, das sich theoretisch und experimentell mit dem physikalischen Verhalten von Baustoffen, Bauteilen, Gebäudeteilen und Gebäuden sowie der umbauten Umwelt befasst. Im römischen Reich lebten die bauphysikalischen Grundgedanken durch den Baumeister Vitruv und den Schriftsteller Plinius auf [1]. So waren bereits dort die Aspekte des Raumklimas, die Theorie der Töne, die ausreichende Tageslichtversorgung von Räumen, die Nutzung der Sonnenstrahlen und die Vermeidung von Baufeuchte und Schimmel zentraler Bestandteil der Architektur. In den letzten Jahrzehnten hat sich die Bauphysik im In- und Ausland zu einer bedeutenden Fachdisziplin entwickelt. Sie umfasst die Phänomene von Wärme und Energie, Feuchte, Schall, Brand, Licht und Klima.

Bauphysik ist integraler Bestandteil jedes baulichen Entwurfes und ist in allen Bereichen des Bauwesens - vom Entwurf über die Planung, der praktischen Ausführung, der Nutzung, bis hin zum Abbruch - unerlässlich geworden. Die Nichtbeachtung bauphysikalischer Zusammenhänge führt zu Entwürfen, deren negative Folgen sich nicht nur bei der Bauerstellung, sondern in der langjährigen Nutzungsphase eines Bauwerks zeigen. Nur durch den Einsatz von entsprechendem Know-how können Bauschäden selbst bei traditionellen Bautechniken erfolgreich vermieden und nachträglich beseitigt werden.

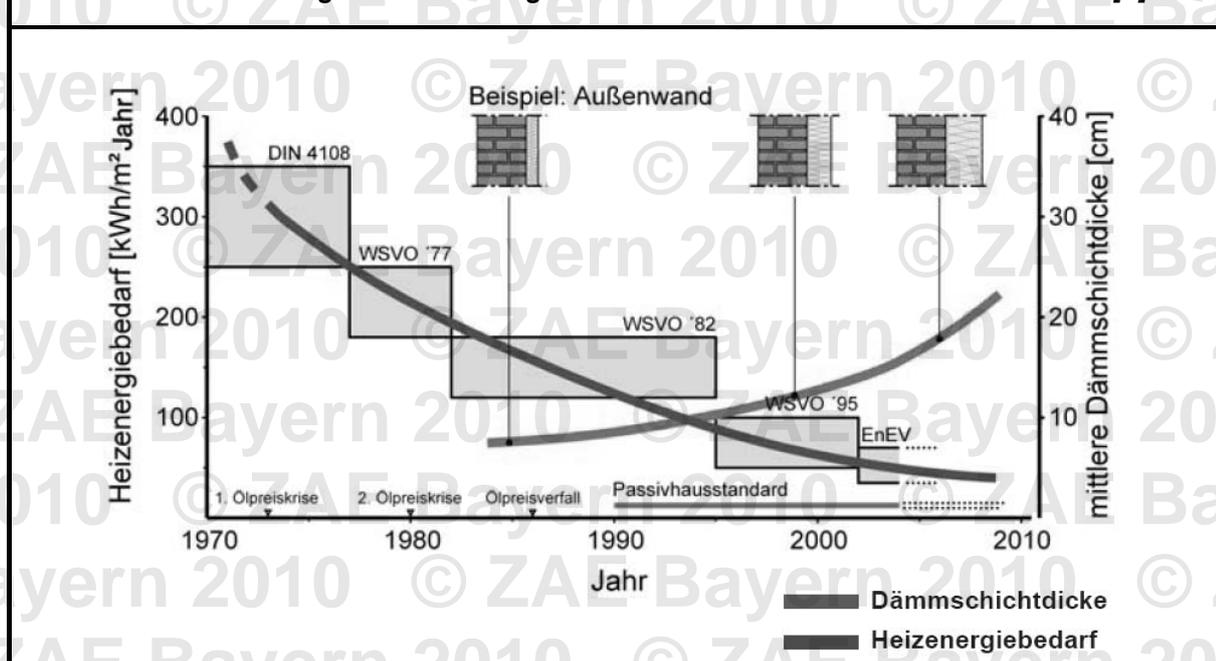
Die Einbeziehung der Bauphysik muss daher vom ersten Planungsschritt an erfolgen, um die an das Bauwerk gestellten Anforderungen zu erfüllen, zeitgemäß und menschengerecht zu entwerfen, aber auch um ökonomische und ökologische Nachteile zu vermeiden.

2.2 Wärmeschutz

2.2.1 Motivation

Der Wärmeschutz von Gebäuden ist sowohl für die Verminderung von winterlichen Wärmeverlusten und den damit verbundenen Heizkosten als auch für die Vermeidung sommerlicher Überhitzung erforderlich. Seit Jahrtausenden wird das Prinzip der geringen Wärmeleitfähigkeit ruhender Luftschichten zum Wärmeschutz angewandt. Kühlhäuser, die Anfang des 20. Jahrhunderts durch die Entwicklung der Kältetechnik möglich wurden, motivierten zum Einsatz von Dämmstoffen wie Kork, Glaswolle und Vulkanfaser. Aufgrund steigender Anforderungen an den Wohnkomfort und Feuchteschutz gewann der bauliche Wärmeschutz zunehmend an Bedeutung. Die Wärmedämmung von Gebäuden erhielt aufgrund der starken Erhöhungen des Rohölpreises in den Jahren 1973 und 1979/80 einen sehr hohen Stellenwert zur Energieeinsparung. Ihren bisherigen Höhepunkt in Entwicklung und Einsatz verdanken Wärmedämmstoffe der Passivhaustechnologie, in der Gebäude ohne aktive Heizsysteme betrieben werden.

Zeitl. Entwicklung des Heizenergiebedarfs und der Dämmstoffdicke nach [3]

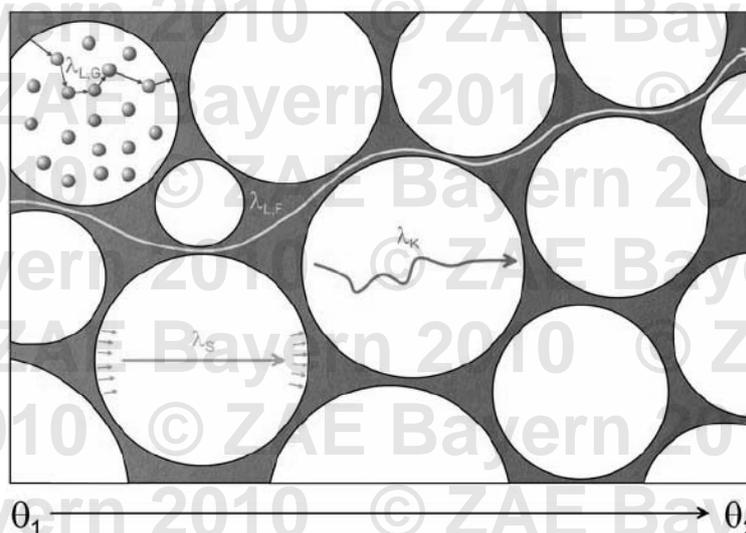


Dämmstoffdicken von bis zu 0,4 [m] werden dann benötigt, wenn Niedrigenergie- oder Passivhäuser mit konventionellen Dämmstoffen gebaut werden sollen. Zur Umsetzung wird dann ein hoher Platzbedarf erforderlich, welcher grundsätzlich teuer und im Sanierungsfall oftmals nicht vorhanden ist (siehe Ziffer 2.1). Werden hocheffiziente Wärmedämmstoffe wie VIP verwendet, kann die, von Seiten der Architekten gewünschte, schlanke Bauweise realisiert, und oftmals kritische Sanierungen durchgeführt werden. Bei der Wahl hocheffizienter Dämmstoffe ist nach [2] darauf hinzuweisen, dass sie nicht ausschließlich unter dem Aspekt einer erhöhten Energieeffizienz, sondern vielmehr in Hinblick auf gesundheitlich und ökologisch relevante Eigenschaften zu bewerten sind.

2.2.2 Mechanismen des Wärmetransports

Grundsätzlich unterscheiden sich die Wärmeübertragungsmechanismen von VIP und konventionellen, belüfteten Wärmedämmstoffen nicht. Unter Ziffer 2.3.1 sind die grundlegenden Wärmetransportprozesse von trockenen und belüfteten/evakuierten Wärmedämmstoffen beschrieben. Die physikalischen Prozesse der Wärmeübertragung in porösen Medien lassen sich entlang eines Temperaturgefälles ($\theta_1 > \theta_2$) nach [3] wie folgt darstellen:

Wärmeübertragung in porösen Medien nach [3]



In [4] wird der Wärmetransport in trockenen VIP aus dem Fourier'schen Erfahrungssatz des Wärmetransports in einem homogenen Kontinuum abgeleitet. So lässt sich auch für VIP die Wärmeleitfähigkeit als Diffusionsprozess beschreiben, solange die mittlere freie Weglänge (durchschnittliche Distanz, die ein Teilchen ohne Wechselwirkung mit anderen Teilchen zurücklegt), wesentlich kleiner als die Abmessung des betrachteten Volumens ist. Die einzelnen Wärmetransportvorgänge sind somit als Stöße von Teilchen oder Quasiteilchen vorstellbar.

Über das Diffusionsmodell können dann die drei wesentlichen Transportmechanismen in einem porösen trockenen Festkörper als Phononentransport im homogenen Festkörper ($\lambda_{L,F} \equiv \lambda_s$), als Photonentransport in optisch dicken Medien ($\lambda_s \equiv \lambda_r$) und als Molekültransport im ruhenden Gas ($\lambda_{L,G} \equiv \lambda_g$) abgeleitet und mathematisch beschrieben werden.

Um die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Transportmechanismen zu berücksichtigen, ist ein zusätzlicher Term λ_c einzuführen. Dieser beschreibt die Kopplungseffekte zwischen den einzelnen Wärmeleitfähigkeiten und kommt vor allem dann zum Tragen, wenn Punktkontaktwiderstände in einem Feststoffgerüst durch gut wärmeleitende Gase überbrückt werden [5], [6]. Unter Vernachlässigung eines Wärmetransportes über Konvektion (λ_k) kann der Laborwert der Wärmeleitfähigkeit in einem trockenen porösen Festkörper, wie bereits bekannt, durch

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_r + \lambda_g + \lambda_c$$

beschrieben und genau beziffert werden. Durch den Einfluss von Wasser überlagern sich beim Stoff- und Wärmetransport verschiedene Vorgänge, die die Wärmeleitfähigkeit von VIP deutlich erhöhen. Dieser Einfluss wurde für VIP mit pyrogener Kieselsäure erstmals in [4], unter Vernachlässigung eines Anstieges der Foliendurchlässigkeit infolge von Alterung, messtechnisch untersucht. Die feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit wird dort aufgrund des Gasdruckanstieges infolge einer erhöhten Gaswärmeleitung in den Poren, aufgrund einer verstärkten Festkörperwärmeleitung infolge der

Einlagerung von Wasser in Strukturverengungen sowie aufgrund eines Wärmetransportes durch Dampfdiffusion begründet. In [5] wird ein theoretisches Modell vorgestellt, das den Wärmestrom auf Grundlage der kinetischen Gastheorie für Molekularströmung und Oberflächendiffusion beschreibt. Hierdurch kann die feuchtebedingte Zunahme der Wärmeleitfähigkeit über einen Gasdruckanstieg infolge erhöhter Gaswärmeleitung und über einen Enthalpietransport schlüssig berechnet werden.

Trotz vorgenannter Arbeiten müssen aufgrund fehlender Langzeiterfahrungen über die Alterung von VIP sowie des über die Nutzungsdauer stattfindenden Gaseintrags Zuschläge auf den Laborwert der Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden. In den bisher erteilten bauaufsichtlichen Zulassungen für VIP [7], [8] fallen die Zuschläge, welche neben den Degradationseffekten auch die Wärmebrückenwirkung an den Paneelrändern berücksichtigen, derzeit noch verhältnismäßig hoch aus. Während der Laborwert der Wärmeleitfähigkeit typischer VIP zwischen $0,004$ bis $0,005$ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$] liegt, ergeben sich unter Berücksichtigung des zuvor genannten Zuschlages Bemessungswerte für die Wärmeleitfähigkeit von $0,008$ bis $0,011$ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Diese werden für den rechnerischen Nachweis des Wärmeschutzes von Gebäuden benötigt.

Zum besseren Verständnis werden nachfolgend die Berechnungsansätze der drei wesentlichen Transportmechanismen der Wärmeübertragung trockener poröser Festkörper, die unter Ziffer 2.3.1 verbal beschrieben sind, auf Grundlage der Arbeiten [4], [5], [6], [9] sowie [10] zusammengefasst.

Festkörperwärmeleitung

Der Wärmetransport über das Festkörpergerüst kann je nach Struktur des Materials über verschiedene Modellansätze beschrieben, zumindest jedoch abgeschätzt werden. Eine allgemeingültige quantitative Beschreibung des Festkörper-Wärmetransportes ist aufgrund der Vielfalt und möglichen Komplexität im Aufbau des Festkörpergerüsts nicht möglich. Im einfachsten Fall kann der Wärmetransportvorgang in einem nichtporösen, homogenen und nichtmetallischen Material über die Wechselwirkung von Gitterschwingungen

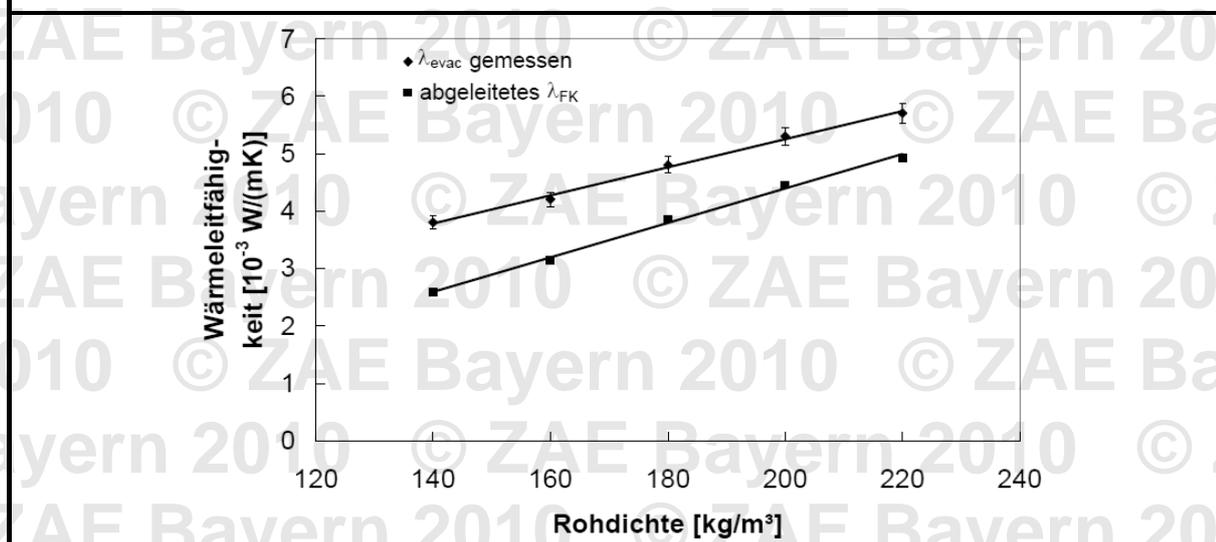
beschrieben und die Wärmeleitfähigkeit nach [11] über das Diffusionsmodell dann angegeben werden, wenn die mittlere freie Weglänge der Phononen deutlich kleiner als die Abmessung des Festkörpers ist. In [4] wurden die Partikel der untersuchten pyrogenen Kieselsäure als Festkörper angenommen, so dass ihre Wärmeleitfähigkeit über das Diffusionsmodell beschrieben werden kann zu

$$\lambda_0 = \frac{1}{3} v_m l_m \rho_0 c_v$$

mit v_m *mittl. Geschwindigkeit der Phononen*
 l_m *freie mittlere Weglänge der Phononen*
 ρ_0 *Dichte des Festkörpers*
 c_v *spez. Wärmekapazität*

Für poröse Materialien kann in erster Näherung eine proportionale Abhängigkeit zwischen Festkörper-Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte angenommen werden. So reduziert sich die Festkörperwärmeleitfähigkeit ($\lambda_S \equiv \lambda_{FK}$) mit steigender Porosität. Die Wärmeleitfähigkeit von Pulver kann zufriedenstellend über Phononendiffusionsmodelle abgebildet, die Festkörperwärmeleitung in Aerogelen durch die Perkulationstheorie beschrieben und für Schäume über das Glicksman-Modell abgeschätzt werden [4], [6].

rohichteabhängige Wärmeleitfähigkeit eines VIP (pyrogene Kieselsäure) aus [4]



Am Beispiel gemessener Wärmeleitfähigkeiten industriell gefertigter VIP aus pyrogener Kieselsäure ist die Proportionalität zwischen Festkörperwärmeleitfähigkeit und Rohdichte erkennbar. Während die Festkörperwärmeleitung für Schäume weitgehend unabhängig vom Belastungsdruck ist, hängt sie für Pulverschüttungen und Faserlagen stark von der mechanischen Belastung ab. Wird ein Pulver erstmalig belastet, so ändert sich die Rohdichte und Festkörperwärmeleitfähigkeit infolge Verpressung irreversibel. Diese Änderung kann für spätere Belastungen unter Berücksichtigung eine Hysterese bei Be- und Entlastung als reversibel angenommen werden [4].

Typische Werte für die Festkörperwärmeleitfähigkeit werden in [6] bei 1 [bar] Belastungsdruck für

- Fasern mit 0,001 bis 0,003 [W m⁻¹K⁻¹], für
- Pulver mit 0,003 bis 0,010 [W m⁻¹K⁻¹] sowie für
- Schäume mit 0,005 [W m⁻¹K⁻¹]

angegeben.

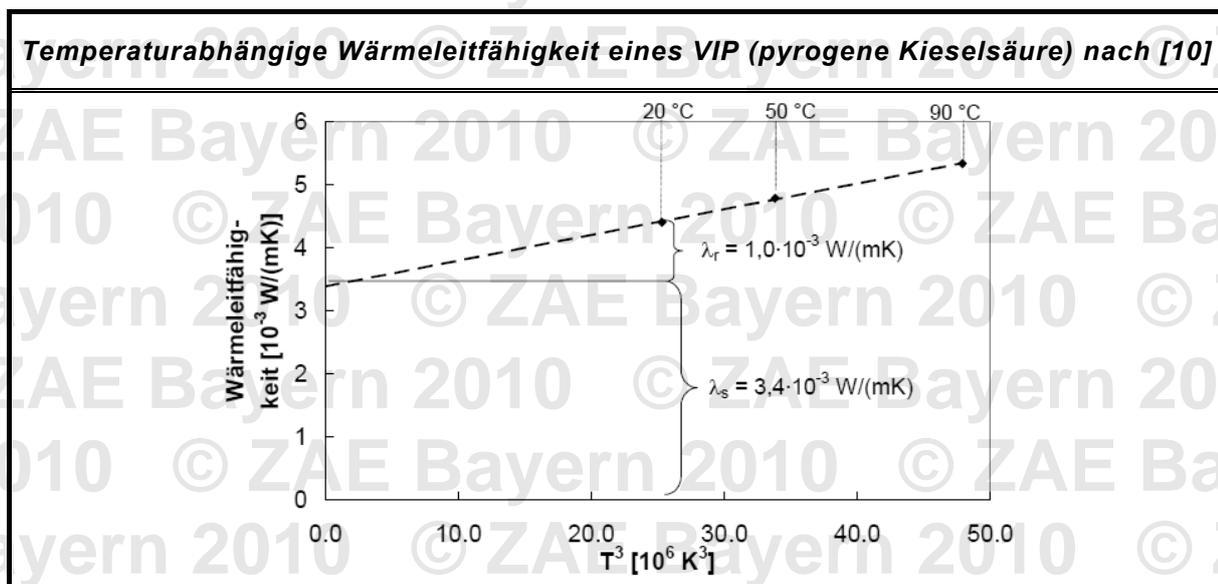
Strahlungswärmeleitung

Der Strahlungstransport kann für optisch dicke Materialien als Diffusionsprozess beschrieben werden. Ein Material gilt als optisch dick, wenn die mittlere freie Weglänge der Photonen aufgrund Streu- und Absorptionsprozesse deutlich kleiner als die Materialdicke ist. Nach [12] berechnet sich die Strahlungswärmeleitfähigkeit dann zu

$$\lambda_r = \frac{16}{3} n^2 \sigma \frac{T^3}{E}$$

mit n Brechungsindex
 σ Stefan-Boltzmann-Konstante
 T Temperatur
 E Extinktionskoeffizient mit $E \propto \rho$

Unter der Annahme, dass die Festkörperwärmeleitfähigkeit und die Extinktion näherungsweise temperaturunabhängig sind, kann die Strahlungswärmeleitfähigkeit durch Messung der Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen bestimmt werden. Ist die Probe evakuiert, bestimmt sich ihre Strahlungswärmeleitfähigkeit aus der Differenz zwischen gemessener Wärmeleitfähigkeit und ihrer Festkörperwärmeleitfähigkeit.



Bei der in [4] untersuchten Probe aus pyrogener Kieselsäure kann bei 20 °C eine Strahlungswärmeleitfähigkeit von $0,001 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ und eine Festkörperwärmeleitfähigkeit von $0,0034 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ abgeschätzt werden. Durch Zugabe von Infrarot-Absorber/Streuer wie Kohlenstoff oder Eisenoxid kann die massenspezifische Extinktion erhöht und somit die Strahlungswärmeleitfähigkeit optimiert werden [9], [10].

Gaswärmeleitung

Bei VIP findet die Gaswärmeleitung in den Poren des Kernmaterials statt, wobei die Wärmeleitfähigkeit des Porengases in Abhängigkeit der Knudsen-Zahl (Kn) bestimmt wird. Kn ist als Verhältnis der freien Weglänge der Gasmoleküle zum mittleren Porendurchmesser d definiert. Finden vorwiegend Molekül-Molekül-Stöße statt ($Kn \gg 1$), kann das Porengas als ein freier ruhendes Gas nach dem Diffusionsmodell betrachtet werden.

Unter Berücksichtigung der Boltzmannschen Transportgleichung für mehratomige Moleküle lautet nach [13] die Wärmeleitfähigkeit des freien Gases

$$\lambda_{G0} = \frac{5\pi}{16} \frac{9 \left(\frac{c_p}{c_v}\right) - 5}{4} \sqrt{\frac{\pi k_B T}{N_A M_{mol}}} \frac{c_{v,mol}}{\sigma_0}$$

mit c_p spezifische Wärmekapazität (konstanter Druck)

c_v spezifische Wärmekapazität (konstantes Volumen)

k_B Boltzmannkonstante

T Temperatur

N_A Avogadrokonstante

M_{mol} molare Masse

$c_{v,mol}$ molare Wärmekapazität

σ_0 Stoßquerschnitt der Gasatome

Sie ist vom Gasdruck unabhängig, und wird ausschließlich durch die Gasart und die vorherrschende Temperatur bestimmt. Wird das vorhandene Gas in den Poren, üblicherweise Luft, durch ein anderes Gas, beispielsweise Pentan, substituiert, kann die Gaswärmeleitung reduziert werden. Dämmstoffe aus Polyurethan basieren auf diesem Prinzip und werden beidseitig Alu-kaschiert, um ein Ausdiffundieren des substituierten Porengases zu minimieren. Wird hingegen, wie bei VIP, der Gas- bzw. Luftdruck reduziert, kann die Gaswärmeleitung wesentlich wirkungsvoller vermindert werden. Mit Abnahme des Gasdruckes nimmt Kn zu, so dass neben Molekül-Molekül-Stößen ebenfalls Molekül-Wand-Stöße auftreten können. In [4] wird auf Grundlage der Arbeiten von [14] und [15] die Wärmeleitfähigkeit des Restgases angegeben zu

$$\lambda_G(p_G) = \frac{\lambda_{G0}}{1 + 2\beta Kn} = \frac{\lambda_{G0}}{1 + \frac{p_1}{2} \frac{G}{p_G}}$$

mit λ_{G0} Wärmeleitfähigkeit des freien Gases

β gasartabhängiger Faktor

p_1 Halbwertsdruck des Gases

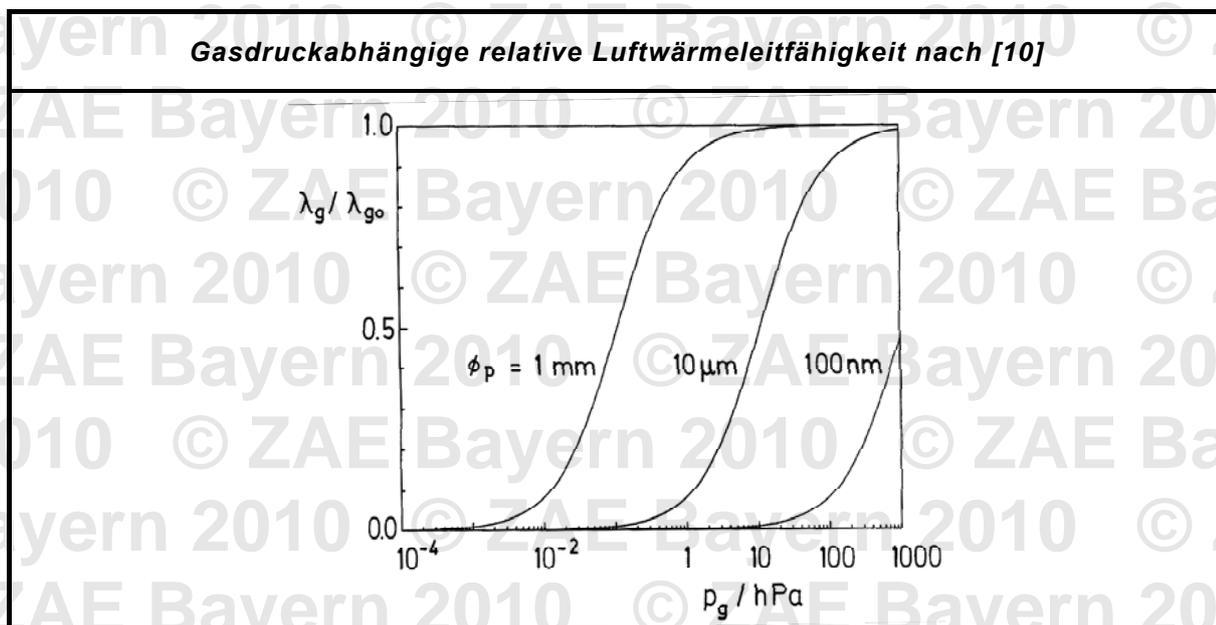
p_G Gasdruck

Für $Kn \ll 1$ finden überwiegend Molekül-Wand-Stöße statt, so dass dann die Wärmeleitfähigkeit des Restgases nach [6] durch

$$\lambda_G(p_G) = \frac{\lambda_{G0}}{2\beta Kn} = \lambda_{G0} \frac{p_G}{p_1^{\frac{1}{2}G}}$$

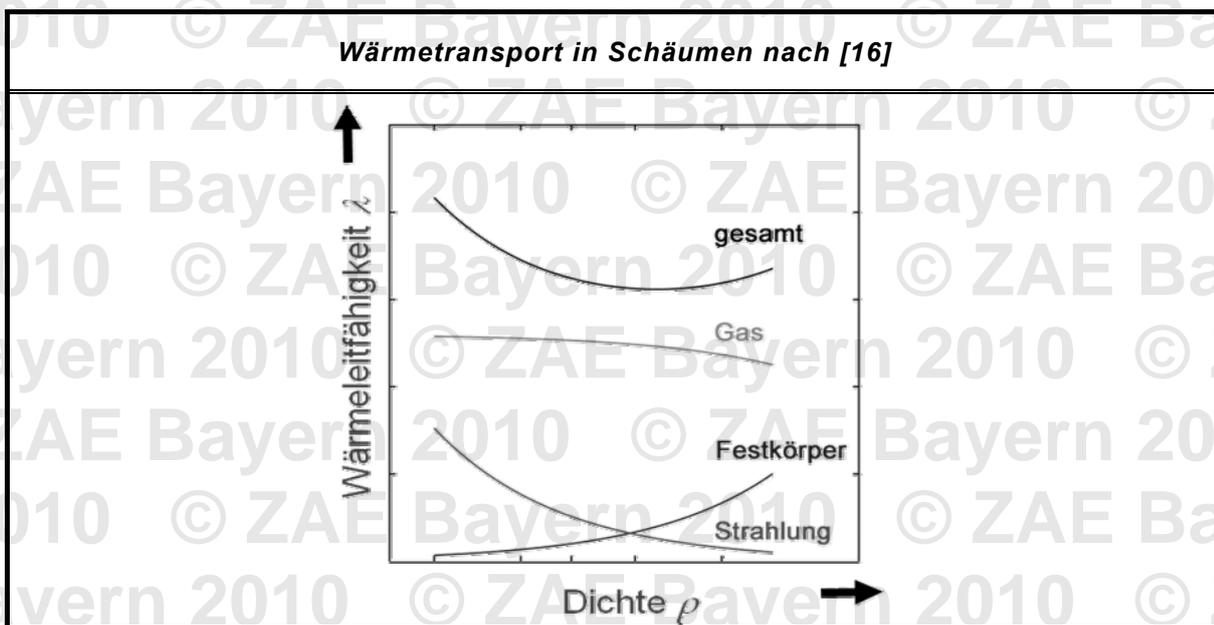
beschrieben werden kann. Im Unterschied zur Wärmeleitfähigkeit des freien Gases hängt die Wärmeleitfähigkeit des Restgases linear vom Gasdruck ab. Der Energieaustausch beim Stoß der Gasmoleküle mit dem Festkörpergerüst wird durch β beschrieben, der Halbwertsdruck gibt an, bei welchem Druck die Gaswärmeleitfähigkeit in den Poren halb so groß ist wie die des freien Gases.

In Ziffer 2.4.1 ist die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Füllmaterialien vom Gasdruck grafisch dargestellt. Diese ist durch nachstehende Grafik aus [6] zu ergänzen. Dargestellt ist die relative Luftwärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Gasdruck für verschiedene Porendurchmesser ϕ_p bei 300 [K]. Hierdurch können Aussagen über die erforderlichen Restgasdrücke zur Unterdrückung der Gaswärmeleitung getroffen werden. Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Poren des Kernmaterials, desto höhere Restgasdrücke sind zulässig. So können in nanostrukturierten Dämmmaterialien mit höheren Restgasdrücke (1 bis 10 [mbar]) ähnliche Effekte wie in polymeren Schäumen mit Restgasdrücken zwischen 0,01 bis 0,1 [mbar] erzielt werden.



Schlussfolgerung

Die zuvor beschriebenen Wärmetransportmechanismen, Festkörperwärmeleitung, Strahlungswärmeleitung und Gaswärmeleitung, lassen sich für Schäume in Abhängigkeit ihrer Rohdichte nach [16] wie folgt schematisch darstellen:



Aufgrund der hohen Porosität von Schäumen ist der Anteil der Festkörperwärmeleitung am gesamten Wärmetransport bereits optimiert, effiziente Infrarot-Absorber/Streuer reduzieren zusätzlich die Strahlungswärmeleitung. Bei thermisch optimierten, belüfteten Dämmstoffen hängt die Wärmeleitfähigkeit dann maßgeblich von der Gaswärmeleitung ab. Durch Senkung des Gasdrucks in den Poren (Evakuieren) dieser optimierten Dämmstoffe kann der Betrag der Gaswärmeleitung nahezu eliminiert werden, wobei der mittlere Porendurchmesser des Dämmstoffes die Höhe des zulässigen Restgasdruckes bestimmt. Bei nanostrukturierten Materialien, wie pyrogene Kieselsäure, verdoppelt sich die Gesamtwärmeleitung erst bei einem Restgasdruck von 100 [mbar]. Im belüfteten Zustand weisen sie noch Wärmeleitfähigkeiten von $0,018 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ auf. Somit ist die besonders feinteilige pyrogene Kieselsäure zur Herstellung eines hochwertigen Dämmstoffes, der als VIP die zur Zeit niedrigsten technisch erreichbaren Wärmeleitfähigkeiten zeigt, am besten geeignet.

2.2.3 Wärmebrücken

Wärmebrücken sind grundsätzlich als Schwachstellen in einer Baukonstruktion zu sehen. Sie werden in [17] als örtlich begrenzte Stellen bezeichnet, die im Vergleich zu den angrenzenden Bauteilbereichen eine höhere Wärmestromdichte aufweisen. Diese örtlich erhöhte Wärmestromdichte verursacht einen zusätzlichen Transmissionswärmeverlust im Vergleich zum ungestörten Bauteil und somit einen erhöhten Heizenergiebedarf des Gebäudes (bei Niedrigenergiehäusern um bis zu 40 % [18]). Zusätzlich führen Wärmebrücken in der Regel zu örtlich niedrigeren Innenoberflächentemperaturen. In [18] werden Wärmebrücken aufgrund ihrer physikalischen Ursache unterschieden in

- geometrisch bedingte Wärmebrücken,
- materialbedingte (stofflich bedingte) Wärmebrücken,
- umgebungsbedingte Wärmebrücken sowie
- massenstrombedingte Wärmebrücken.

Die Konsequenzen von wärmebrückenbehafteten Konstruktionen steigen mit der Energieeffizienz eines Gebäudes. Erhöhte Transmissionswärmeverluste wirken sich nicht nur auf die Heizenergiekosten aus, sondern können im Extremfall ein Gebäude nur unzureichend beheizbar machen. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Heizleistung ohne Berücksichtigung der vorhandenen Wärmebrücken bemessen wurde. Verringerte Oberflächentemperaturen im Bereich von Wärmebrücken beeinflussen nicht nur die thermische Behaglichkeit, sondern können zur dauerhaften Feuchteanreicherung des betroffenen Bauteils infolge Wasserdampfkondensation aus der Raumluft führen. Die Folgen sind bekannt und zeigen sich in der Praxis von einer erhöhten Staublagerung über Schimmelpilzbildung bis hin zum Bauschaden. Für den Planer ist daher wichtig zu erkennen, wo Wärmebrücken vorliegen, wie diese abgeschwächt werden können, an welchen Stellen sie zu vermeiden sind und wie sie beim Bau sorgfältig ausgeführt werden können.

Zur quantitativen Beurteilung der Auswirkung einer speziellen Wärmebrücke sind Aussagen zur raumseitigen relativen Oberflächentemperaturänderung und Aussagen über den zusätzlichen Transmissionswärmeverlust erforderlich. Dies kann für langjährig erprobte Produkte durch allgemein anerkannte oder technisch eingeführte Regeln der Bautechnik, durch Informationen über Wärmebrücken in der Fachliteratur (z. B. Wärmebrückenkataloge) oder durch eine detaillierte rechnerische Untersuchung der Wärmebrücke erfolgen.

Im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen weisen VIP eine erheblich niedrigere Wärmeleitfähigkeit bei deutlich geringerer Dicke auf. Dies führt im Bereich der Wärmebrücke zu wesentlich größeren Temperaturgradienten. Im Vergleich zu ungestörten, schichtenartigen Wandaufbauten sind die quantitativen Folgen von Wärmebrücken wesentlich komplexer und bisher nur schwer abschätzbar. Mittlerweile liegen für Konstruktionsdetails mit VIP zahlreiche rechnerische Untersuchungen [6], [9], [19], [21], [22], [23], [24], [25], [26] und [27], messtechnische Untersuchungen [19], [20] sowie einfache Abschätzverfahren zum thermischen Verhalten von VIP-Elementen [28] vor. Diese sind im Gegensatz zu Untersuchungen für Standardkonstruktionen bislang nur teilweise veröffentlicht, für die Praxis oftmals unvollständig und unstrukturiert und nur bedingt im Planungsprozess anwendbar. Aus diesem Grund wird empfohlen [29], bereits in der Planungsphase Wärmebrücken bei Konstruktionen mit VIP über thermische und hygrische Berechnungen detailliert zu beurteilen.

Kenngrößen von Wärmebrücken

Seit Inkrafttreten der Energieeinsparverordnung EnEV 2002 sind die durch Wärmebrücken bedingten Transmissionswärmeverluste im Nachweis des baulichen Wärmeschutzes zu berücksichtigen. Die zusätzlichen Wärmeverluste werden über einen Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} zum mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U der gesamten wärmeübertragenden Umfassungsfläche berücksichtigt. Für konventionelle Bauteilaufbauten kann dieser ohne Nachweis pauschal zu $\Delta U_{WB} = 0,10$ [$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$] und bei Ausführung der Anschlussdetails gemäß Beiblatt 2 zur DIN 4108 pauschal zu $\Delta U_{WB} = 0,05$

[W m⁻²K⁻¹] angesetzt werden. Alternativ und insbesondere bei Konstruktionsdetails ohne Langzeiterfahrung kann der Wärmebrückenzuschlag rechnerisch ermittelt werden. Unter Berücksichtigung punktbezogener oder längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizienten, die mittels mehrdimensionaler Wärmestromberechnung auf Basis finiter Elemente oder Differenzen nach DIN EN ISO 10211 zu berechnen sind, ergibt sich der Wärmebrückenzuschlag zu

$$\Delta U_{WB} = \frac{\sum_i l_i \psi_i + \sum_k n_k \chi_k}{A_{WB}}$$

mit

- l_i Länge der i -ten, linienförmigen Wärmebrücke
- ψ_i längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient
- n_k Anzahl der k -ten, punktförmigen Wärmebrücke
- χ_k punktbezogener Wärmedurchgangskoeffizient
- A_{WB} betrachtete Bauteilfläche

Da für jede Wärmebrücke die relative Abkühlung unter stationären Bedingungen, bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenluft auch bei sich ändernden Klimarandbedingungen gleich bleibt, wird zur weiteren Bewertung von Wärmebrücken eine objekt- und detailspezifische, dimensionslose Bewertungsgröße f_{RSi} eingeführt. Sie ist in DIN EN ISO 10211-1 als Temperaturfaktor definiert zu:

$$f_{RSi} = \frac{\theta_{Si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

mit

- $\theta_{Si,min}$ minimale raumseitige Oberflächentemperatur im Bereich der Wärmebrücke
- θ_e Außenlufttemperatur
- θ_i Raumlufttemperatur

Bei bekanntem f_{RSi} ist somit unter stationären Verhältnissen für beliebige Klimarandbedingungen die minimale Oberflächentemperatur im Bereich der Wärmebrücke berechenbar. Zur Vermeidung von Schimmelbildung auf Bauteiloberflächen ist nach DIN 4108-2 zudem $f_{RSi} \geq 0,70$ gefordert.

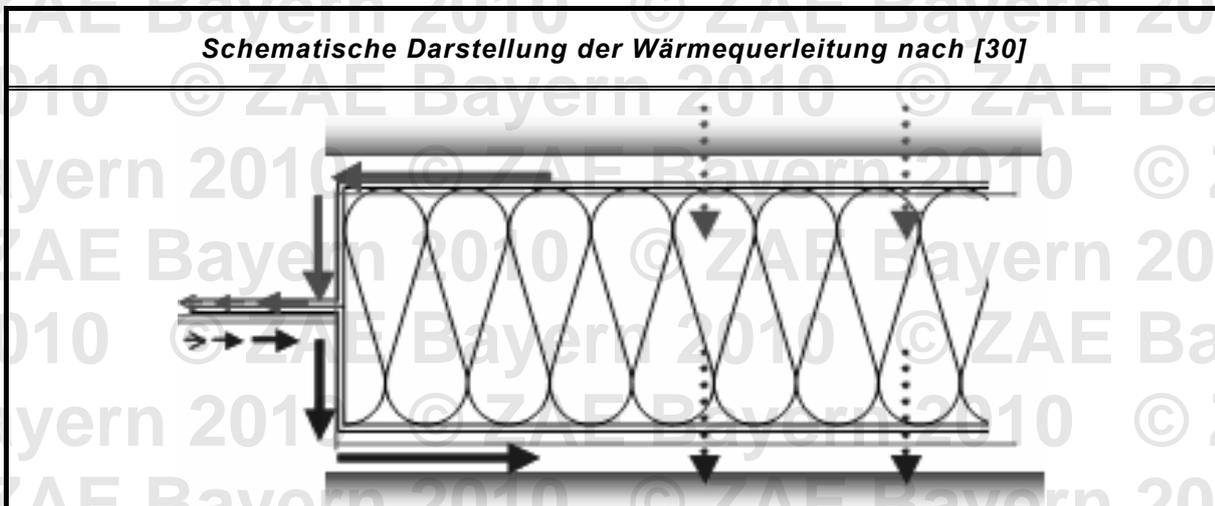
Wärmebrücken bei Konstruktionen mit VIP

Eine der wichtigsten Planungsaufgaben beim Entwerfen mit VIP ist die korrekte Bestimmung des Wärmedurchgangs durch VIP-Schichten und Bauteile mit eingebauten VIP. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Komponenten ist VIP ein ausgesprochen inhomogener Dämmstoff. Beim konstruktiven Einsatz und der Wahl eines geeigneten VIP ist der Einfluss folgender Wärmebrücken zu beachten:

- Randeffekte in der VIP-Schicht durch die umlaufende Hüllfolie (bei bauaufsichtlich zugelassener VIP-Produkte ist dieser bereits im Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit enthalten)
- Luftschichten im Stoßbereich (falls nicht satt gestoßen)
- Konstruktive Unregelmäßigkeiten (Durchdringungen)
- Anschlusssituation an angrenzende Bauteile

Die erstgenannte Wärmebrücke ist VIP-spezifisch und kann als systembedingte Wärmebrücke betrachtet werden [6]. Aufgrund der Inhomogenität des Dämmstoffes treten am Rand der VIP Wärmebrückeneffekte auf, die im Bereich der Paneelkante durch Querleitungseffekte verstärkt werden können. Wie stark dieser Effekt ausfällt, hängt primär von den verwendeten Materialien der Umhüllung ab, und war Bestandteil zahlreicher Untersuchungen zur Optimierung der VIP wie in [6], [9], [19], [22] oder [30] angegeben:

Schematische Darstellung der Wärmequerleitung nach [30]



2.3 Schallschutz

2.3.1 Grundlegendes

Die Bauakustik hat als Teilgebiet der Bauphysik ihre eigenen Begriffe für die Beschreibung von physikalischen Vorgängen in der Bautechnik. Die nachfolgenden Erläuterungen der wichtigsten Begriffe stammen aus [1], [38], [39] und [40] und sind zum Verständnis der späteren praktischen Konstruktions- und Berechnungs-Anwendungen erforderlich.

Schallwellen sind longitudinale Druckwellen, die sich durch Deformation der Teilchendichte in Gasen ausbreiten. Diese Druckschwankungen können durch schwingende Gegenstände erzeugt werden. Lässt man zum Beispiel ein über die Tischkante hinausragendes Lineal schwingen, so wird die Luft über dem Lineal in rascher Folge verdichtet oder verdünnt, d. h. der Druck schwankt periodisch. Im physikalischen Sinn wird der Schall dabei je nach Art der Schwingung als Ton, Klang, Geräusch oder Knall bezeichnet.

Geschwindigkeit von Schallwellen ist dabei abhängig von der Wechselwirkung zwischen den Gasmolekülen. Je geringer der Gasdruck ist, desto schlechter ist die Schallausbreitung. Die Schallausbreitung kann somit durch ein absolutes Vakuum in der Theorie unterbunden werden. In der Praxis stellen allerdings die notwendigen Wandungen und Stützkörper eines Bauteils erhebliche Schallbrücken dar, so dass die Schallweiterleitung nicht unterbunden werden kann. Im Medium Luft kann sich unter Normaldruck bei 0 [°C] Schall mit einer Geschwindigkeit von 331 [m s⁻¹] fortbewegen. Im dichteren Medium Wasser beträgt die Schallgeschwindigkeit 1.464 [m s⁻¹].

Der Schallschutz bezieht sich auf den Schutz von Räumen gegenüber Lärm von benachbarten Räumen und Außenlärm. Dazu sind Kenntnisse über schalldämmende Eigenschaften von Bauteilen eine wichtig planungstechnische Voraussetzung.

Beim Oberbegriff "Schalldämmung" ist prinzipiell zwischen Trittschalldämmung Luftschalldämmung zu unterscheiden. In vielen Fällen erfolgt die Schalldämmung durch schallreflektierende Hindernisse, eben durch eine Wand oder Stellwand. Vor allem für die Trennung von Wohnungen sind aber u. U. besondere Maßnahmen erforderlich. Der Schallschutz im Eigenheimbau ist freigestellt. Für Mehrparteien-Bauten ist der Schallschutz in der DIN 4109 geregelt.

Mindestanforderungen an den Schallschutz in Wohngebäuden gem. DIN 4109

Bauteil	erf. bew. Schalldämmmaß R_w in dB	erf. Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ in dB
Decken unter allgemein nutzbaren Dachräumen, z. B. Trockenböden, Abstellräumen und ihren Zugängen	≥ 53	≤ 53
Wohnungstrenndecken und Decken zwischen fremden Arbeitsräumen bzw. vergleichbaren Nutzungseinheiten	≥ 54	≤ 53
Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen	≥ 53	-
Treppenraumwände und Wände neben Hausfluren	≥ 52	-
Treppenläufe und -podeste	-	≤ 58
Türen, die von Hausfluren oder Treppenräumen unmittelbar in Aufenthaltsräume - außer Flure und Dielen - von Wohnungen führen	≥ 37	-

Luftschallschutz:

Massivbauwände erzeugen in der Regel einen guten, ausreichenden Luftschallschutz. Leichtbauwände dagegen müssen durch einen mehrschichtigen Aufbau oder geeignete Zwischenschichten (z. B. Zellstoff) schalldämmend konstruiert werden. Bei Außenwänden können unterschiedliche Unterbrechungen des Mauergefüges, z. B. Rollladenkästen, Fenster, Heizkörpernischen den Schallschutz der Wand verschlechtern. Diese Schallnebenwege lassen sich nur durch gut ausgeführte Konstruktionen vermeiden. [43]

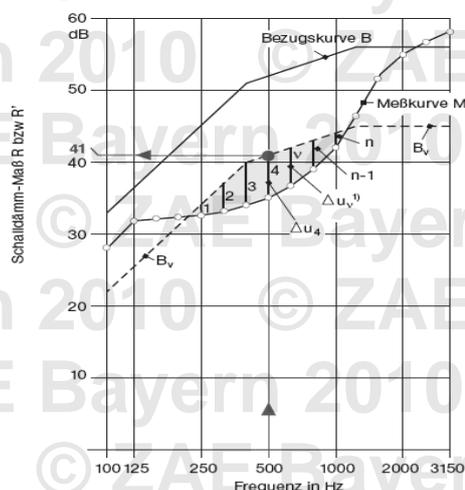
Bewertetes Schalldämm-Maß R_w bzw. R'_w :

Die luftschalldämmende Eigenschaft eines Bauteils wird durch das Schalldämm-Maß R gekennzeichnet. Die Einheit dieses Schalldämm-Maßes und der weiteren zu besprechenden Schalldämm-Maße ist das Dezibel (Kurzzeichen [dB]). Das mit Apostroph gekennzeichnete Schalldämm-Maß R' berücksichtigt zusätzlich zur Schallübertragung durch das trennende Bauteil

- die Schallübertragung durch "flankierende Bauteile" wie Wände und Decken,
- die Schallübertragung durch weitere "Nebenwege" wie Undichtigkeiten, Kanäle, Schächte, Rohre u. a.

Das Schalldämm-Maß R' beschreibt somit die Schalldämmung, wie sie z. B. in einem Wohngebäude zwischen aneinander grenzenden Räumen besteht. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w bzw. R'_w kennzeichnet die schalldämmenden Eigenschaften eines trennenden Bauteils bzw. die Schalldämmung zwischen Räumen durch einen einzigen Zahlenwert. Zur Ermittlung dieses Wertes wird die Messkurve des Schalldämm-Maßes R bzw. R' nach dem Verfahren der Norm DIN 52210-4 mit der dort festgelegten Bezugskurve B verglichen.

Bestimmung des bewerteten Schalldämm-Maßes R_w bzw. R'_w aus [39]



¹⁾ Δu_v ... Unterschreitung der verschobenen Bezugskurve

Trittschallschutz:

Unter Trittschalldämmung wird die Minderung der Übertragung von Körperschall verstanden, der z. B. beim Begehen einer Decke oder beim Stühlerücken erzeugt wird. Der Trittschallschutz wird durch das Gewicht der Decke und durch eine elastisch federnde Zwischenschicht unter dem Gehbelag erreicht. Hier kommen oft extrudierte Polystyrol-Hartschäume zum Einsatz.

Grundsätzlich werden drei Kenngrößen unterschieden:

- Der bewertete Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ bzw. $L'_{n,w}$ beschreibt die Trittschalldämmung gebrauchsfertiger Decken, d. h. der Rohdecke einschließlich der Deckenauflage (z. B. schwimmender Estrich, Teppichboden).
- Der äquivalente bewertete Norm-Trittschallpegel $L_{n,w,eq}$ kennzeichnet das Trittschallverhalten von Rohdecken.
- Die Trittschallminderung ΔL beschreibt die trittschalldämmenden Eigenschaften von Deckenauflagen (z. B. schwimmender Estrich, Teppichboden).

Feststellung der Schalldämmung:

Die bauakustische Qualität eines Bauteils kann durch Messung oder Berechnung festgestellt werden:

Luftschall:

Das Schalldämm-Maß R eines Bauteils wird im Prüfstand entsprechend den Vorgaben der Norm DIN 52210 ermittelt. Der Prüfstand ist so ausgelegt, dass der Schall nur durch das zu prüfende Bauteil und nicht über die daran angrenzenden bzw. "flankierenden" Bauteile übertragen wird.

Das Schalldämm-Maß R ist gleich der Schallpegeldifferenz zwischen Sende-
raum (Schallpegel L_1) und Empfangsraum (Schallpegel L_2) plus eines Korrek-
turwerts, der die Fläche S des zu prüfenden Bauteils und die äquivalente Ab-
sorptionsfläche A im Empfangsraum berücksichtigt:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg (S/A) \text{ in [dB].}$$

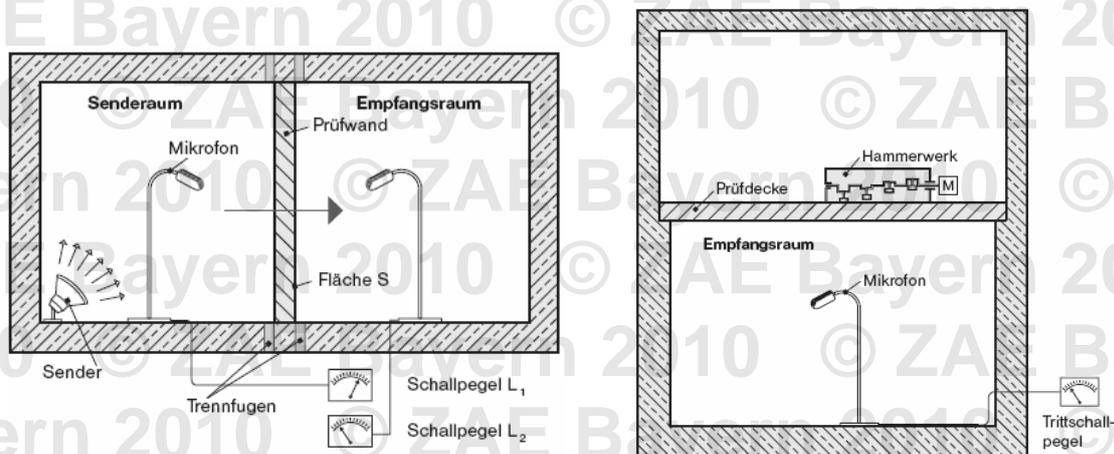
Trittschall:

Der Norm-Trittschallpegel L_n ist derjenige Trittschallpegel, der bei der Anre-
gung einer Decke mit dem Norm-Hammerwerk im Empfangsraum eines Prüf-
standes ohne Flankenübertragung gemessen und auf eine Absorptionsfläche
 A_0 von 10 m^2 bezogen wird. Hat der Empfangsraum eine äquivalente Absorp-
tionsfläche A und beträgt der Messwert bei dieser Absorptionsfläche L_T , so
ergibt sich der Norm-Trittschallpegel L_n aus

$$L_n = L_T + 10 \lg (A/A_0) \text{ in [dB].}$$

Er kennzeichnet die Trittschalldämmung einer Decke mit oder ohne Decken-
auflage und ohne Schallübertragung über flankierende Bauteile.

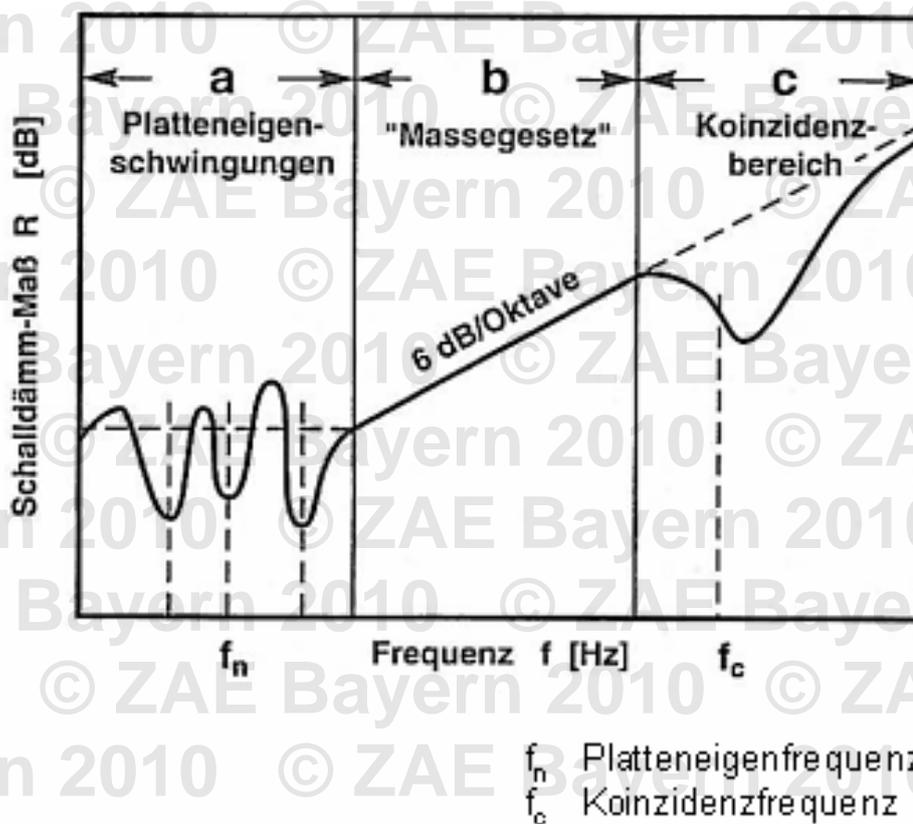
Schematische Darstellung eines Prüfstandes zur Ermittlung des Schalldämm-Maßes R einer Wand ohne Berücksichtigung der flankierenden Bauteile (links) und des Trittschallpegels einer Decke (rechts) aus [39]



Berechnungsverfahren:

Zur rechnerischen Ermittlung der Schalldämmung wird für massive einschichtige Bauteile das Berger'sche Massengesetz angewandt. Das Massegesetz beschreibt den Anstieg der Schalldämmung mit der Masse des einschichtigen Bauteils. Einbrüche in der Schalldämmung beruhen hier meist auf Eigenschwingungen der Bauteile (Platteneigenfrequenz), den Auswirkungen der Koinzidenz, der Spuranpassung (Koinzidenzfrequenz) oder einer hohen Biegesteifigkeit.

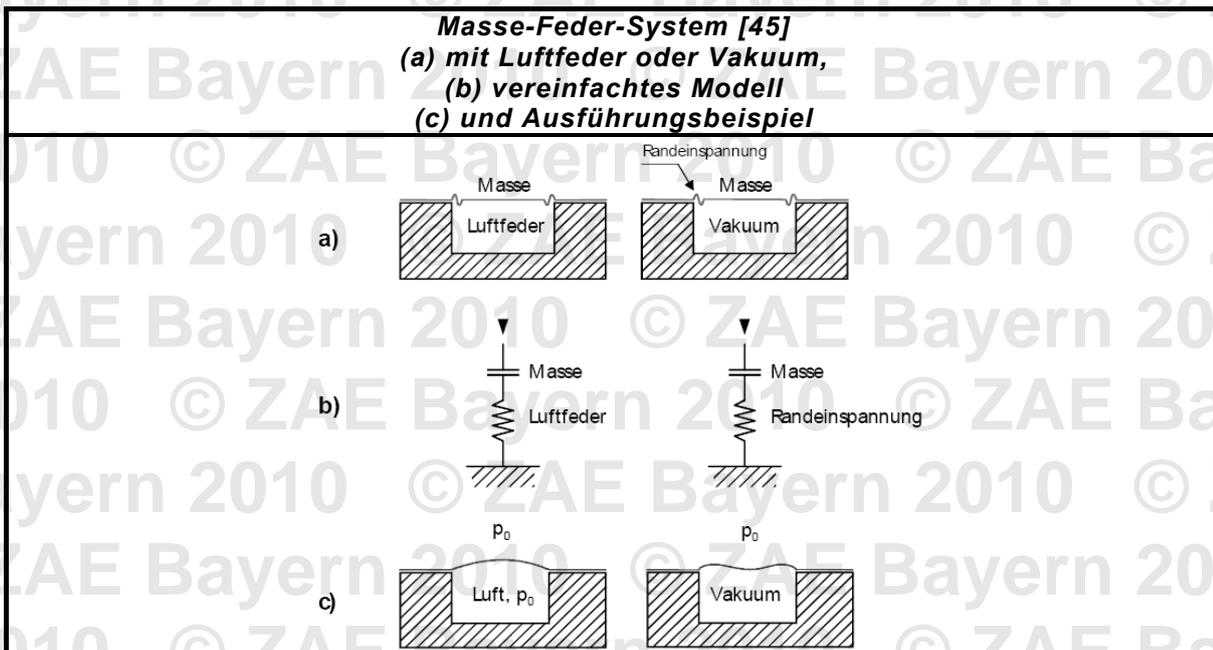
Kennzeichnende Frequenzbereiche der Schalldämmung einschaliger Bauteile aus [41]



Zur Beurteilung von zwei- oder mehrschichtigen Bauteilen können rheologische Modelle verwendet werden. Die Resonanzfrequenz f_0 eines Masse-Feder-Systems (a) ergibt sich unter Vereinfachungen aus der flächenbezogenen Masse m' und der Nachgiebigkeit $n' = d/(\rho c^2)$ z. B. der Luftfeder (b) wie folgt:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m' \cdot \frac{d}{\rho c^2}}}$$

f_0	Resonanzfrequenz
m'	flächenbezogene Masse
ρ	Dichte
c	Schallgeschwindigkeit
d	Dicke des geschlossenen Luftkissens (Feder) hinter der Masse, z. B. Platte.



Das Schalldämmmaß von Sandwich-Paneeelen ist mehr oder weniger vom Masse-Gesetz abhängig. Abweichungen zum tatsächlichen Schwingungsverhalten kommen aufgrund von Resonanz- und Koinzidenzeffekten zustande. Der wichtigste Effekt - die Resonanz bei gleichen Deckschichten als Masse sowie der Kern als Feder - wird im Folgenden näher betrachtet.

Die Resonanzfrequenz kann nach [47] näherungsweise bestimmt werden zu:

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4E_k}{d_k(2\rho_f d_f + \frac{\rho_k d_k}{3})}} \quad (1b)$$

mit

f_d Resonanzfrequenz in [Hz]

E_k dynamischer Elastizitätsmodul des Kerns in [N/m²]

d_k Dicke des Kerns in [m]

ρ_k Dichte des Kerns in [kg/m³]

d_f Dicke der Deckschicht in [m]

ρ_f Dichte der Deckschicht in [kg/m³]

Dagegen gibt [48] für f_d vor:

$$f_d = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2E_k}{d_k \rho_f d_f}} \quad (1a)$$

Die beiden vorgenannten Beispiele zeigen bereits, dass die Ergebnisse verschiedener Abschätzverfahren für f_d um einen Faktor von bis zu zwei voneinander abweichen können. Aus [47] folgt, dass im Bereich der Resonanz die Schalldämmung zwischen 10 und 15 [dB] abnimmt. Die Resonanzen eines Panels werden maßgeblich durch seine Steifigkeit bestimmt. Im niederfrequenten Bereich ist nur die erste Eigenfrequenz von Bedeutung.

$$f_{1,1} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D_p}{m_p} \cdot \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right)} \quad (2)$$

Im niederfrequenten Bereich ist nach [49] D_p für ein ideales Sandwich-Paneel:

$$D_p = \frac{E_f}{1-\nu_f^2} \cdot \left(\frac{d_f(d_k + d_f)^2}{4}\right) \quad (3)$$

Die Resonanz des Panels tritt nur auf, wenn die Geschwindigkeit der Biege- welle c_p für $f_{1,1}$ die Schallgeschwindigkeit in der Luft, c , überschreitet.

Dies führt zu folgender Anforderung:

$$f_{1,1} > \frac{c^2}{2\pi\sqrt{D_p m_p}} \quad (4)$$

Für ein ideales Sandwich-Paneel ergibt sich die Koinzidenzfrequenz zu:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi(d_k + d_f)} \sqrt{\frac{2m_p}{d_f E_f}} \quad (5)$$

Mit Hilfe von numerischen Berechnungsverfahren wie z. B. LAYERS lässt sich zeigen, wie störende Minima im Verlauf der Schalldämmung vermieden werden können - nämlich durch eine geringe Gesamtbiegesteife bei gleichzeitig hoher Steife in Dickenrichtung - so dass sowohl Dickenresonanz als auch Koinzidenzeinbruch jenseits von 5 [kHz] liegen. Durch eine ausreichende Entkopplung der Schichten untereinander können sogar Biegewellen über den gesamten Aufbau im bauakustisch relevanten Frequenzbereich vermieden werden. Empfehlungen zur Verbesserung der Schalldämmung von VIP-Fassadenpaneelen und die Möglichkeit einer rechnerischen Prognose mit LAYERS sind vorhanden-an der technischen Umsetzung wird noch gearbeitet.

Das Programm LAYERS rechnet den frequenzabhängigen Verlauf der Schalldämmung für eine zweiseitig unendlich ausgedehnte mehrschichtige Platte und liefert daher für tiefe Frequenzen die Ergebnisse des Massegesetzes. Aus diesem Grunde ist eine Nachbildung von bauakustischen Messungen erst ab ungefähr 400 [Hz] sinnvoll. Jedes VIP wird als eine homogene Schicht betrachtet, die Umhüllung wird also nicht separat modelliert. Die Massendichte der Platten ist bekannt, ihre Biegesteife jedoch nicht. Sie kann jedoch aus dem Koinzidenzeinbruch grob abgeschätzt, und durch Anpassung des Minimums genauer bestimmt werden. Entsprechend wird der Verlustfaktor bestimmt.

2.3.2 Schalldämmung von VIP

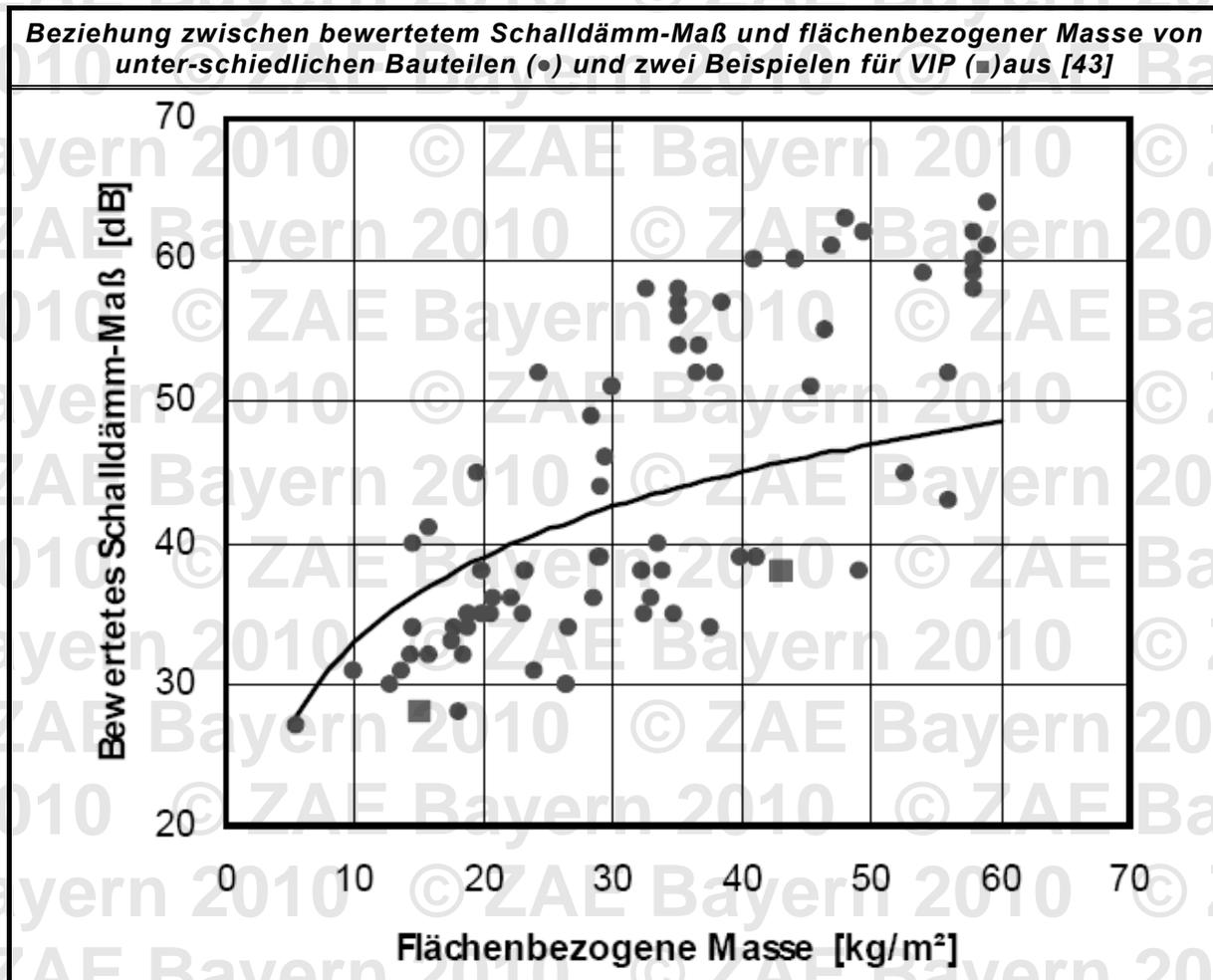
Theoretische Betrachtungsweise

Werden die akustischen Eigenschaften eines VIP mit Hilfe des Programms LAYERS untersucht, so ist eine entscheidende Vereinfachung zwischen realem VIP und VIP im Modell zu beachten: Mit LAYERS können ausschließlich mehrschichtige anisotrope, in gewissen Grenzen auch inhomogene Platten abgebildet werden, deren Abmessungen senkrecht zur Plattendicke unendlich groß sind. In der Realität sind die einzelnen VIP entlang der Paneelflächen sowie an den seitlichen Rändern auf Abstand gehalten. Die Anregung, Übertragung und Abstrahlung von Körperschall sind an diesen Fügungen somit unvermeidbar, bestenfalls reduzierbar. In Bezug auf die Körper-/Schallübertragung ist die Bedeutung der Randausbildung sowie die Bedeutung der Abmessungen von konventionellen Bauteilen bzw. Bauweisen weitestgehend bekannt.

Konstruktionen mit evakuierten VIP sind sehr steif, dies gilt sowohl für die einzelne Platte wie für einen mehrschichtigen Aufbau mit VIP. Neben den Eigenschwingungen der Platten sind aufgrund der hohen Biegesteifigkeit tieffrequente Koinzidenzeffekte und entsprechende Einbrüche im Verlauf der frequenzabhängigen Schalldämmung zu erwarten. Hinzu kommt die nicht nur akustisch relevante Frage der Dauerhaftigkeit, die zu Vakuum-Bauteile führt, welche doch weit vom eingangs skizzierten Ideal, dem unendlichen VIP, entfernt liegen.

Um einen ersten Vergleich der Schallschutzwirkung einer VIP-Konstruktion mit einem konventionellen Plattenbauteil zu erhalten, sollte die Bauteileigenschaft betrachtet werden, die vorrangig mit der erzielbaren Schalldämmung in Verbindung gebracht wird - die flächenbezogene Masse. So kann für einschalige Konstruktionen als erster Anhaltspunkt das zuvor beschriebene Massegesetz angewendet werden.

Nachfolgend ist das bewertete Schalldämm-Maß verschiedener ein- und mehrschichtiger Konstruktionen über deren flächenbezogene Masse dargestellt - die durchgezogene Kurve markiert das so genannte Massegesetz für die Schalldämmung einschaliger Bauteile:

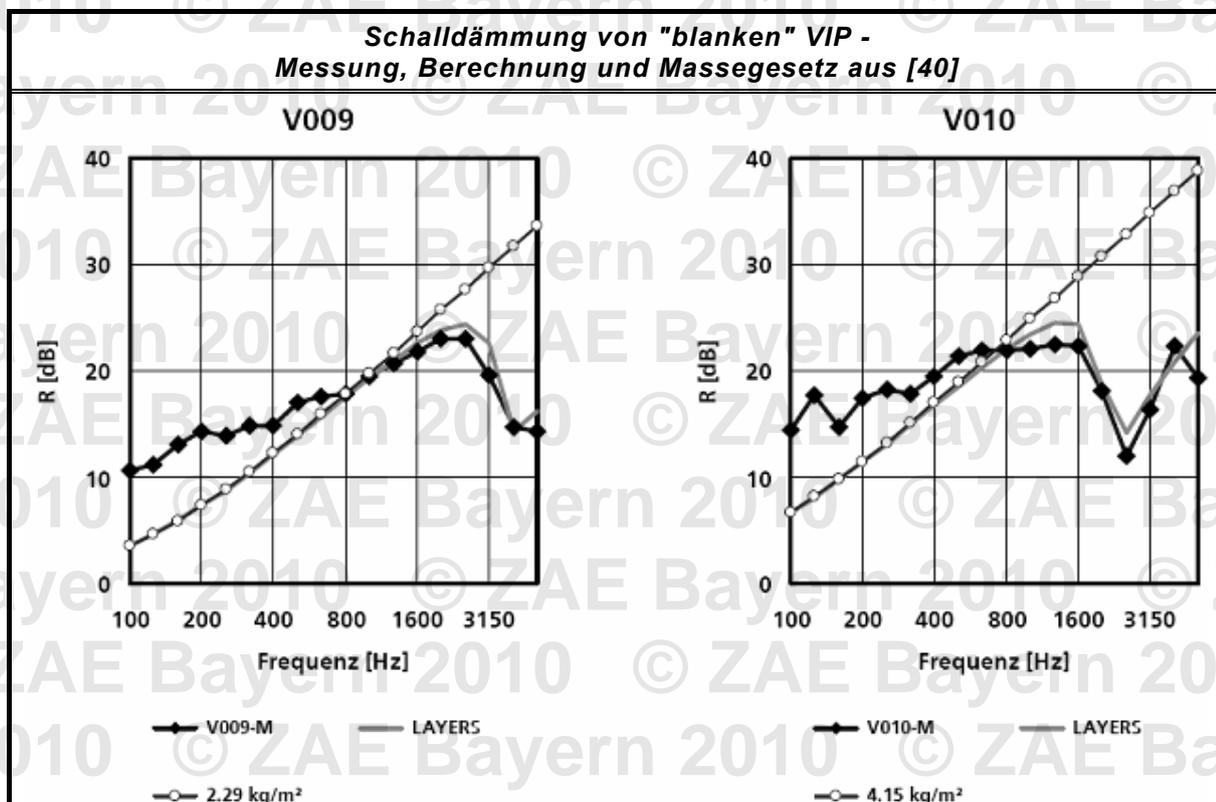


Die große Punkteschar gibt die jeweiligen Wertepaare für Bauteile wieder, die sich durchaus als konventionelle Bauteilaufbauten bezeichnen lassen. Dazu zählen Metall-, Holzwerkstoff-, Kunststoff- und Gipskartonplatten, aber auch mehrschichtige Konstruktionen, bei denen bekanntermaßen noch andere akustische Einflussgrößen als nur die flächenbezogene Masse bestehen. Insgesamt ist eine repräsentative Auswahl dargestellt, die in sich bereits große Unterschiede trägt.

Zusammenfassend ist nach [43] festzustellen, dass das bewertete Schalldämm-Maß verschiedener Bauteile mit gleicher flächenbezogener Masse um mehr als 20 [dB] variieren kann. Andersherum betrachtet kann mit Bauteilen, die um 40 [kg/m²] leichter sind, das gleiche Schalldämm-Maß erzielt werden. Somit ist anhand der flächenbezogenen Masse eines VIP keine belastbare Aussage in Bezug auf das erzielbare Schalldämm-Maß möglich.

Schalldämmung von blanken VIP

Der Vergleich der erzielbaren Schalldämmung eines blanken VIP mit der zu erwartenden Schalldämmung gemäß dem Massegesetz einschaliger Bauteile ist ernüchternd. Trotz ihrer Mehrschichtigkeit - mehrschichtige Bauteile haben bei gleicher flächenbezogener Masse eine bessere Schalldämmung als einschichtige Bauteile - liegen sie noch fast 10 [dB] unterhalb der entsprechend ihrer flächenbezogenen Masse zu erwartenden Schalldämmung.



Schalldämmung von verschiedenen VIP Konstruktionen

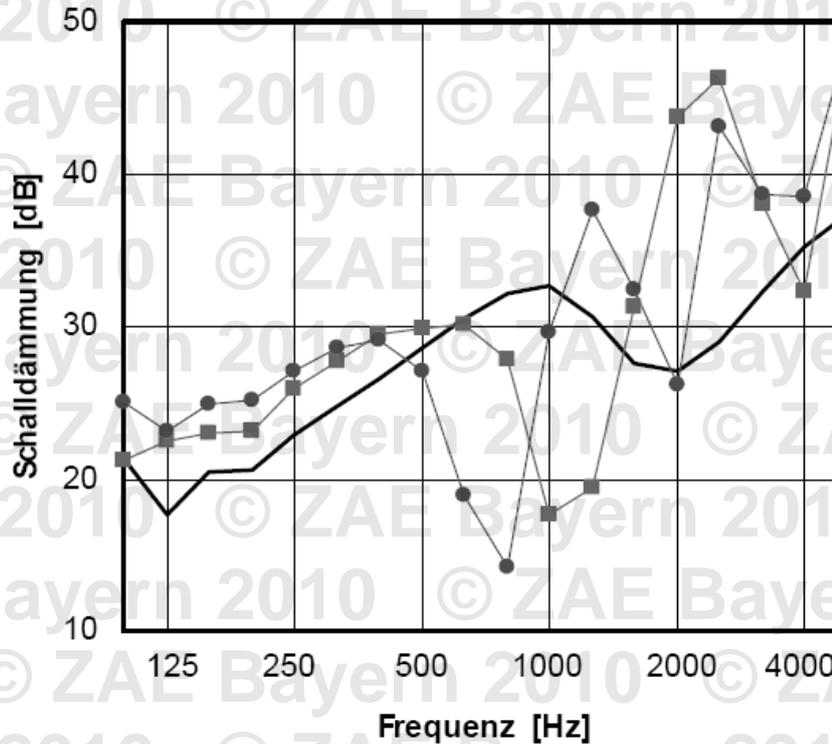
Weitere Anhaltspunkte für die Folgen der bereits angedeuteten konstruktiven Ausführung von VIP liefern die frequenzabhängigen Verläufe der Schalldämmung. Um die untersuchten VIP einzuordnen, wurden diese mit einer 16 [mm] dicken Spanplatte - ein schalltechnisch keineswegs überdurchschnittliches Bauteil - verglichen.

Ihrer flächenbezogenen Masse in etwa entsprechend, startet die Schalldämmung mit dem üblichen Anstieg bei tiefen Frequenzen bis etwa 400 [Hz]. Im Vergleich zum koinzidenz-bedingten Einbruch der Spanplatte bei etwa 2.000 [Hz] zeigen sich bei den VIP Minima, die sowohl bei tieferen Frequenzen auftreten als auch mit deutlich niedrigeren Schalldämmwerten verbunden sind.

In erster Konsequenz bedeuten diese schalltechnischen Eigenheiten von VIP entweder Zusatzaufwand bei einer akustisch anspruchsvollen Gesamtkonstruktion oder die Beschränkung auf Einsatzfälle ohne Schallschutzansprüche.

Nachfolgend sind die Ergebnisse aus [43] dargestellt. Sie zeigen die gemessene Schalldämmung einer Holzspanplatte $t = 16$ [mm], $m' = 13$ [kg/m²], $R_w = 30$ [dB] sowie von zwei doppelschaligen Metall-Vakuum-Isolationspaneelen: (●) $t = 40$ [mm], $m' \approx 15$ [kg/m²], $R_w = 28$ [dB] und (■) $t = 20$ [mm], $m' \approx 15$ [kg/m²], $R_w = 28$ [dB]. Alle Konstruktionen waren 1,5 [m] breit und 1,25 [m] hoch und wurden unter gleichen Bedingungen gemessen:

Ergebnisse der messtechnisch ermittelten frequenzabhängigen Verläufe der Schalldämmung aus [43]

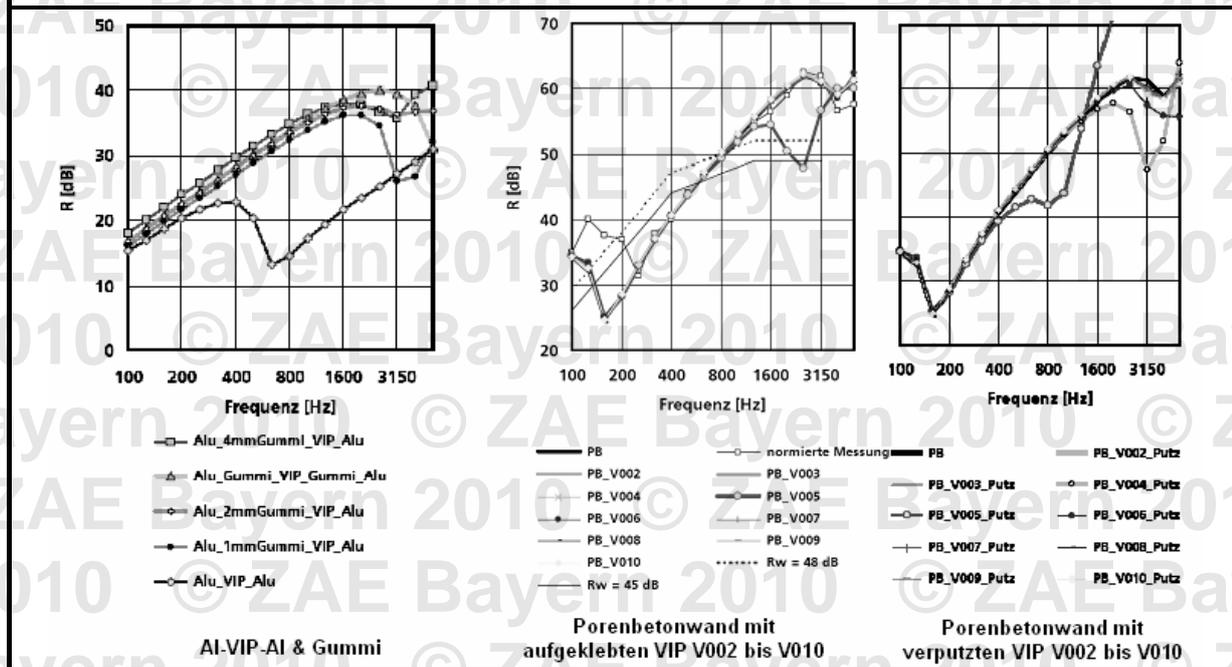


In [40] wurde eine Vielzahl von leichten VIP Konstruktionen bezüglich ihrer bauakustischen Eigenschaften gemessen und rechnerisch überprüft. Ein Vergleich zwischen intakten und belüfteten VIP hat ergeben, dass bei intakten, unbeschädigten VIP die Koinzidenzfrequenz abnimmt. Ursache hierfür ist der vorherrschende Unterdruck. Durch diesen wird die Hüllfolie mit dem Kern zusammengepresst, was die mechanische Biegeeigenschaften, die Dehnfähigkeit des Kerns sowie die dynamischen Steifigkeit beeinflusst.

Die schalldämmenden Eigenschaften von VIP sind mittlerweile messtechnisch erfasst und rechnerisch untersucht worden. Messungen der Schalldämmung von unversehrten VIP ergaben ein Verhalten entsprechend des Massegesetzes. Der Koinzidenzeinbruch liegt - je nach Stützmaterial und Dicke des VIP - bei 2.000 [Hz] oder höher. Es wurde versucht, die gemessenen Schalldämmmaße bis 5.000 [Hz] mit LAYERS rechnerisch nachzubilden.

Dabei wurde ein VIP als homogene Platte mit frequenzunabhängigen isotropen Eigenschaften betrachtet. Die Ergebnisse lauten im Verlauf:

Gemessene und berechnete Schalldämmung verschiedener Konstruktionen [40]



Der Schalldämmverlauf lässt sich ungefähr als "Massegesetz mit anschließendem Koinzidenz- oder Dickenresonanzeinbruch" charakterisieren. Während die Schalldämmungsmaxima rechnerisch recht gut wiedergegeben werden, bereiten die Minima etwas größere Schwierigkeiten. Für eine genauere rechnerische Nachbildung müssen vermutlich frequenzabhängige Materialeigenschaften und möglicherweise auch Anisotropie der elastodynamischen Eigenschaften berücksichtigt werden.

Da ein VIP in der Praxis durch zusätzliche Schichten vor Beschädigung geschützt werden muss, ist weniger die Schalldämmung eines nackten VIP als die eines mehrschichtigen Aufbaus mit integriertem VIP von Interesse. Messungen ergeben bewertete Schalldämm-Maße von 30 bis 32 [dB] mit charakteristischen Einbrüchen der Schalldämmung bei 400 [Hz].

Somit liegen die Ergebnisse um bis zu 5 [dB] geringer als nach dem Massegesetz zu erwarten wäre. Berechnungen mit LAYERS zufolge sollten - beispielsweise durch geeignet dimensionierte Gummischichten - die Werte des Massegesetzes erzielbar sein.

Wie sich eine VIP-Bekleidung einer Massivwand auf deren Schalldämmung auswirkt, wurde in [40] rein rechnerisch untersucht. Als massive Außenwand diente eine 25 [cm] dicke Porenbetonwand mit $177 \text{ [kg/m}^2\text{]}$, die mit LAYERS bereits realistisch modelliert wurde. Da das VIP auf der Außenseite vor mechanischen Beschädigungen geschützt werden muss, wurde in der Rechnung 10 [mm] Putz berücksichtigt. Auf diese Weise entsteht ein Masse-Feder-Masse-System, dessen Resonanz die Schalldämmung deutlich verschlechtern kann. In den betrachteten Fällen trat dies nur bei den VIP mit Polyurethan auf.

Bei den übrigen VIP-Varianten änderte sich die Schalldämmung der Massivwand durch die Bekleidung praktisch nicht. Diese Beobachtung konnte durch Messungen im Rahmen einer Sanierung mit VIP Großelementen [42] bestätigt werden.

Untersuchung der Schalldämmung von Großelementen mit VIP:

Zur Untersuchung der Schalldämmung gegen Außenlärm erfolgten Luftschallmessungen der Fensterelemente an der Straßenfront. Da für die Fenster keine Vergleichsmessungen im Laborprüfstand oder in der Einbausituation vor der Renovierung existieren, wurde zur Beurteilung der Fenster die zu erwartende Schalldämmung entsprechend der konstruktiven Details nach Tabelle 40 aus Beiblatt 1/A1 der DIN 4109:2003-09 ermittelt.

Untersuchung der Schalldämmung von Grobelementen mit VIP aus [42]



Auf Grundlage eines Vergleichs zwischen den gemessenen Werten und den Erwartungswerten wurde die schalltechnische Eignung der Fassadenkonstruktion beurteilt. Da bei der Fensterkonstruktion mehr Wert auf eine gute Wärmedämmung als auf eine gute Schalldämmung gelegt wurde, sind in der Konstruktion Scheiben eingesetzt worden, die keinen erhöhten Schalldämmungsanforderungen genügen. Daher ist die Aussagekraft der durchgeführten Messungen auf Fenster mit einer eher durchschnittlichen Schalldämmung beschränkt.

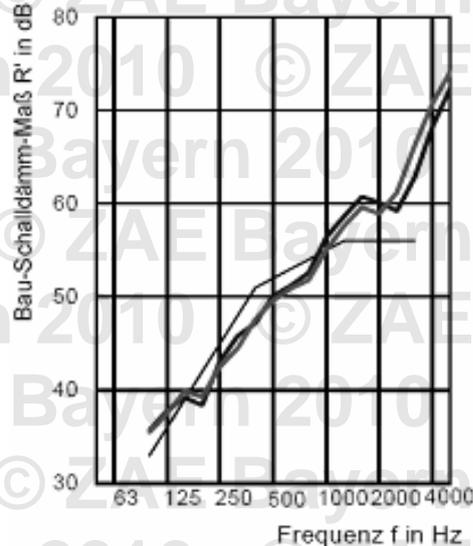
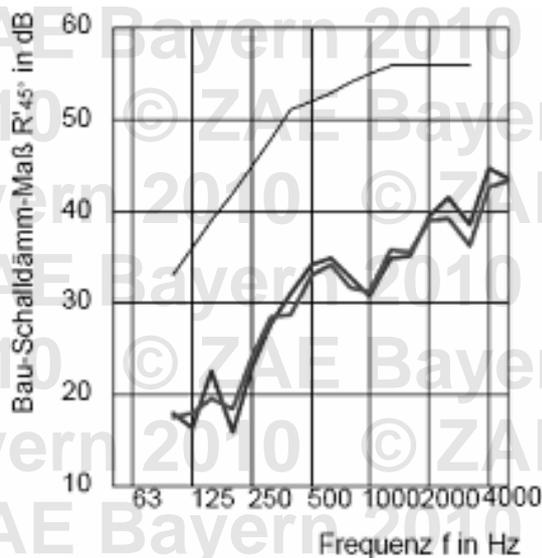
Zur Beurteilung der Flankenübertragung durch das Fassadensystem mit VIP erfolgten Messungen des Bau-Schalldämm-Maßes der Wohnungstrenndecken. Da bei der Bestimmung des Bau-Schalldämm-Maßes auch die Schallübertragungen über flankierende Bauteile mit gemessen wird, können hierdurch Aussagen über einen Einfluss der Fassadensysteme gewonnen werden. Da keine Messergebnisse über die Schalldämmung vor der Sanierung des Objekts vorliegen, musste für die Beurteilung der Situation eine Vergleichsmessung in benachbarten Räumen durchgeführt werden.

Die baulichen Gegebenheiten in den untersuchten Räumen waren im Wesentlichen gleich, mit einer Ausnahme: die straßenseitigen Außenwände wurden mit einem Fassadensystem aus VIP ausgeführt, die gartenseitigen Außenwände wurden mit einem konventionellen WDVS ausgeführt.

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Der Einfluss der VIP-Großelemente auf die Schalldämmung der Fenster konnte in [42] nicht zufrieden stellend nachgewiesen werden. Die untersuchten Fenster zeigten nahezu ein deckungsgleiches spektrales Verhalten. Ebenso konnte für die Flankenübertragung über die Außenwand keine Verschlechterung durch den Einsatz von VIP im Vergleich zum konventionellen WDVS festgestellt werden. Auch hier konnten von 100 bis 1.600 [Hz] nahezu identische Werte gemessen werden.

Untersuchungsergebnisse der Schallübertragung über eine Fenster (links) und der Flankenübertragung über die Außenwand (rechts) aus [42]



2.4 Brandschutz

2.4.1 Gesetzliche Vorgaben

Die bisher behandelten Teilgebiete der Bauphysik können über Erfahrungswerte oder über analytische und numerische Verfahren quantifiziert sowie auf Grundlage bundesweit einheitlich festgeschriebener Regelwerke bewertet werden. Obwohl der bauliche Brandschutz ebenfalls einheitlich beschrieben werden kann, wird dieser in Deutschland aufgrund gesetzlicher Vorgaben derzeit länderspezifisch bewertet. Inwieweit diese Bewertung zukünftig einheitlich auf Bundesebene erfolgen kann, bleibt im Zuge der europäischen Harmonisierung abzuwarten.

Allgemein:

In Deutschland können die Länder innerhalb ihrer Kompetenzbereiche, wie dem Bauordnungsrecht, selbst bestimmen. So werden länderspezifisch die bauordnungsrechtlich geschuldeten Brandschutzanforderungen in Gesetzen, dazugehörigen Verordnungen sowie in Verwaltungsvorschriften und eingeführten Technischen Baubestimmungen beschrieben [51]. Über Erlasse werden die Technischen Baubestimmungen und Verwaltungsvorschriften eingeführt, durch Gesetze und Verordnungen verknüpft sowie mit Richtlinien und Durchführungs- beziehungsweise Sonderverordnungen ergänzt.

Die Musterbauordnung (MBO) und Muster-Sonderbauverordnungen werden von Vertretern der obersten Baubehörden der einzelnen Bundesländer in der ARGEBau länderübergreifend erarbeitet. Seit 1999 werden die dort festgelegten Muster-Richtlinien in den Mitteilungsblättern des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) als technische Baubestimmung veröffentlicht. Damit stehen sie den Bundesländern zur Verfügung, sind allgemein anwendbar und Stand der Technik.



Forschung
Energie

Gebäude

Bauliche Anlagen zum Schutz von Menschen, Tieren, Sachen

Gebäude der Gebäudeklasse 1 bis 5
Gebäude mit < 30 m Höhe, welche nicht als Sonderbauten gelten

Sonderbauten

Bauliche Anlagen und Räume besonderer Art und Nutzung

Versammlungsstätten
bauliche Anlagen > 30 m Höhe
Verkaufsstätten > 800 m²
Gebäude für > 100 Personen
Beherbergungsstätte > 12 Betten
Gebäude > 1.600 m² Geschossfläche (außer Wohngebäude)
Regallager > 7,5 m Lagerguthöhe
Krankenhäuser, Hochhäuser, Schulen
Industriebauten, Garagen

Brandschutzanforderungen

Brandschutzanforderung

unmittelbar wirksames Recht und gelten auch dann, wenn im Zuge der Genehmigung nicht darauf verwiesen wird. Die Schutzziele der einzelnen LBO leiten sich unter anderem aus dem LBO ab. Dort wird gefordert, dass der

Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch

Musterliste der eingeführten technischen Baubestimmungen (LTB)

Die bauaufsichtlichen Brandschutzanforderungen sowie [53] wie folgt auf:

Bauaufsichtlich eingeführte Muster-Verordnungen
Muster-Richtlinien

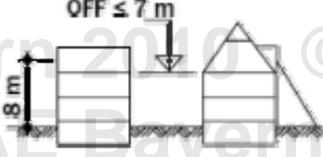
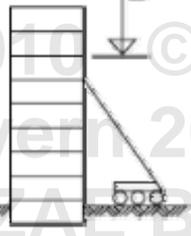
sonstige techn. Richtlinien

Bauaufsichtlichen Brandschutzanforderungen

Bauregelliste A, Liste B und Liste C

Alle Landesbauordnungen, die dazugehörigen Durchführungsverordnungen sowie die Verwaltungsvorschriften unterscheiden nach Gebäuden normaler Art und Nutzung und Gebäuden besonderer Art und Nutzung. In der MBO, Stand 2002, werden Gebäude normaler Art und Nutzung in Abhängigkeit der Gebäudehöhe, der Nutzungsfläche, der Nutzungsart sowie der Anzahl der Nutzungseinheiten in fünf Gebäudeklassen unterteilt:

Übersicht der Gebäudeklassen nach MBO2002 aus [52]

Gebäudeklassen				
1	2	3	4	5
Wohngebäude frei stehend	Gebäude geringer Höhe Anleitbarkeit $H \leq 8$ m		Gebäude mittlerer Höhe $H > 8$ m	Hochhäuser
1 WE	≤ 2 WE	≥ 3 WE		
	OFF ≤ 7 m Feuerwehreinsatz mit Steckleitern möglich		> 7 m OFF ≤ 22 m	mind. 1 Aufent- haltsraum > 22 m über OFF
				

In Abhängigkeit der zugrunde zu legenden LBO kann diese Einteilung der Gebäudeklassen unterschiedlich ausfallen. Die an Bauteile beziehungsweise Baustoffe zu stellende Brandschutzanforderung leitet sich wiederum aus der Gebäudeklasse ab, deren bauaufsichtliche Benennung der Bauregelliste zu entnehmen ist. Dort werden Begriffe wie feuerhemmend, hochfeuerhemmend, feuerbeständig, und in seltenen Fällen hochfeuerbeständig genannt.

In der jeweiligen LBO werden zusätzlich Sonderbauten definiert, an die besondere Anforderungen zu stellen, bestenfalls sogar Erleichterungen möglich sind. Diese Anforderungen werden in Sonderverordnungen definiert und gegebenenfalls durch Richtlinien und Ausführungsbestimmungen länd-

spezifisch ergänzt. Sind Sonderverordnungen oder Richtlinien in Ländern nicht eingeführt, wird in der Regel auf die entsprechende Musterrichtlinie beziehungsweise die vom DIBt veröffentlichten Richtlinien als Stand der Technik zurückgegriffen. Alternativ können nach [52] Sonderregelungen im Einzelfall mit der Bauaufsicht abgestimmt werden.

Bauprodukte:

Die brandschutztechnisch erforderlichen Mindestanforderungen an einzelne Bauteile und Baustoffe - diese sind im Zuge der europäischen Harmonisierung unter dem Begriff Bauprodukte zusammengefasst - sind Ländersache. In Abhängigkeit der zuvor beschriebenen Gebäudeklassen werden Anforderungen an die Konstruktion gestellt. Die Entstehung und Weiterleitung eines Brandes hängt unter anderem von der Brennbarkeit eines Bauproduktes ab. So sind zusätzlich Anforderungen an die verwendeten Materialien zu stellen.

Die technische Umsetzung dieser Anforderungen erfordert eine Zuordnung der bauordnungsrechtlichen Begriffe zu Klassen von Bauprodukten. Diese ergeben sich auf Grundlage von Brandversuchen nach den technischen Regeln [54] bzw. [55] in Form von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen, Prüfbescheiden mit Prüfzeichen oder durch Einordnung eines Baustoffes entsprechend Teil 4 der DIN 4102.

Bauaufsichtlichen Anforderungen der Baustoffklassen nach [54] und [55]				
bauaufsichtliche Anforderung	Baustoffklasse DIN 4102-1	Euroklasse DIN EN 13501-1	Anforderungsniveau	Zusatzanforderungen Anmerkungen
nichtbrennbar	A1	A1	kein Beitrag zum Brand	-
	A2	A2	vernachlässigbarer Beitrag zum Brand	Rauchentwicklung, brenn. Abtropfen
schwerentflammbar	B1	B	sehr geringer Beitrag zum Brand	Rauchentwicklung, brenn. Abtropfen
		C	geringer Beitrag zum Brand	Rauchentwicklung, brenn. Abtropfen
normalentflammbar	B2	D	hinnehmbarer Beitrag zum Brand	Rauchentwicklung, brenn. Abtropfen
		E	hinnehmbares Brandverhalten	brenn. Abtropfen
leichtentflammbar	B3	F	keine Anforderungen	nicht im Bauwesen verwendbar

Die Kennzeichnung der Baustoffklassen erfolgt in [54] durch die Buchstaben A (nichtbrennbar) und B (brennbar) und wird durch die Zahlen 1 bis 3 ergänzt. Das europäische Klassifizierungssystem regelt zusätzlich zum Brandverhalten die Brandnebenerscheinungen. In den Anlagen 0.1 und 0.2 zur Bauregelliste A Teil 1 werden den bauaufsichtlichen Benennungen die jeweiligen Klassen nach [54] und [55] sowie Leistungsstufen zugeordnet, die zur Erfüllung des deutschen Sicherheitsniveaus mindestens erfüllt sein müssen.

Die europäische Klassifizierung ist somit im bauaufsichtlichen Verfahren alternativ zu den Klassifizierungen nach [54] dann anwendbar, wenn deutsche Verwendbarkeitsnachweise vorliegen. Übergangsregelungen erlauben eine nationale Klassifizierung noch etwa fünf bis zehn Jahre, so dass Hersteller oder Anwender bis dahin die Möglichkeit besitzen, Nachweise zum Brandverhalten oder zum Feuerwiderstand auf Grundlage beider Regelwerke zu führen. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die so definierten Baustoffklassen sich ausschließlich auf die Brennbarkeit des geprüften Materials beziehen. Auf Grundlage der Baustoffklasse lässt sich nicht die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile, für die das Material verwendet wird, schließen.

Verbundwerkstoffe:

Bauprodukte werden derzeit in Deutschland sowohl für den reinen Anlieferungszustand als auch für den fertigen, eingebauten Zustand klassifiziert. Leichtentflammbare Bauprodukte dürfen in Deutschland nicht verwendet werden, ausgenommen jene, die im eingebauten Zustand in Verbindung mit anderen Bauprodukten mindestens normalentflammbar sind.

Verbundbaustoffe müssen grundsätzlich in ihrer Gesamtheit geprüft werden, da sich das Brandverhalten eines Baustoffs im Verbund mit anderen Stoffen ändern kann. Somit ist eine einfache Auflistung der Baustoffklassen der Einzelbaustoffe nicht ausreichend. In den Prüfbescheiden muss jeweils angegeben werden, für welches Bauprodukt oder für welchen Verbund der Nachweis geführt wurde.

2.4.2 Konventionelle Wärmedämmung

Homogene Dämmstoffe

Damit ein Dämmstoff im Baubereich eingesetzt werden kann, muss das verwendete Material mindestens der bauaufsichtlichen Anforderung "normal-entflammbar" genügen. Leichtentflammbare Bauprodukte sind im Baubereich nur dann verwendbar, wenn das Bauprodukt werksmäßig mit anderen Baustoffen zu mindestens normal entflammbaren Bauprodukten verarbeitet werden kann.

Die Mindestanforderung an die Baustoffklasse von Dämmstoffen leitet sich aus der jeweiligen LBO in Abhängigkeit der Einbausituation und der Gebäudeklasse ab. So dürfen Fassaden, sofern brandschutztechnisch keine Bedenken bestehen, bei Gebäuden geringer Höhe aus normalentflammbaren Bauprodukten und bei Gebäuden mittlerer Höhe aus schwerentflammbaren Bauprodukten hergestellt werden. Die Notwendigkeit nichtbrennbarer Brandbarrieren oder Brandriegel innerhalb von Fassaden bestimmen ebenfalls die Bauvorschriften der jeweiligen Länder.

Bei Sonderbauten sind grundsätzlich die Sonderanforderungen der LBO an Bauprodukte und die Anforderungen der Richtlinie für die Verwendung brennbarer Baustoffe im Hochbau zu beachten. So dürfen Fassaden von Hochhäusern und Einrichtungen mit viel Personenverkehr nur aus nichtbrennbaren Baustoffen wärme gedämmt werden. Dies gilt ebenfalls für Dämmstoffschichten in notwendigen Treppenträumen.

In [56] wird empfohlen, auch bei brandgefährdeten Gebäuden, beispielsweise Holzhäuser, ein Dämmmaterial mit besonderen Brandschutzeigenschaften zu verwenden.

Vorhangfassaden:

Die brandschutztechnischen Anforderungen hinterlüfteter Fassadenkonstruktionen leiten sich ebenfalls aus der LBO sowie geltender Musterverordnungen ab. So werden an die Verankerung, die Unterkonstruktion, den Dämmstoff sowie die Außenbekleidung jeweils getrennte Anforderungen in Abhängigkeit der Gebäudeklasse gestellt:

Anforderungen für hinterlüftete Systeme aus [58]				
Bauteil	$n = 1$ Geschoß	$n \leq 2$ Geschosse	$n > 2$ Geschosse, < Hochhäuser	Hochhäuser ($OK_{FB} > 22$ m)
Verankerung	A	A	A	A
Unterkonstruktion	B2	B2	B1	B1
Wärmedämmung	B2	B2	B2	B1
Bekleidung	B2	B2	B1	A

Wärmedämmverbundsystem (WDVS):

Die Wärmedämmung von WDVS muss je nach Gebäudeklasse nicht brennbar, schwer entflammbar oder normalentflammbar sein. Maßgebend ist auch hier jeweils die entsprechende LBO. Der Verwendbarkeitsnachweis für WDVS wird durch bauaufsichtliche Zulassungen geregelt. WDVS werden brandschutztechnisch in ihrer Gesamtheit als Verbundwerkstoff betrachtet. Mischsysteme führen somit zum Verlust der Zulassung.

Anforderungen für Wärmedämmverbundsysteme aus [58]				
Bauteil	$n = 1$ Geschoß	$n \leq 2$ Geschosse	$n > 2$ Geschosse, < Hochhäuser	Hochhäuser ($OK_{FB} > 22$ m)
WDVS	B2	B2	B1	A

2.4.3 Hocheffiziente Wärmedämmung - VIP

Das Brandverhalten von VIP als Verbundwerkstoff ist abhängig vom Feuerwiderstand des Hüll- und Stützkernmaterials. Entsprechend ihrer Lage kommt den Feuerwiderstandseigenschaften der Hülle eine entscheidende Bedeutung zu, da diese im Brandfall direkt dem Feuer ausgesetzt ist. Für die Zulassung eines Produktes für den Baubereich ist eine Beurteilung des Gesamtsystems erforderlich, so wurde zum Beispiel modifizierter Polystyrol-Schaum (B3 nach DIN 4102-6) in einem System mit einer Hülle aus Edelstahl (A1) in die Klasse B1 (schwerentflammbar) eingestuft, was den Einsatz eines solchen Systems im Baubereich möglich macht. Einige Untersuchungen in [36], [57], [59] und [60] haben derzeit verfügbare VIP geprüft und entsprechend ihres Brandverhaltens klassifiziert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden zur Übersicht im Folgenden zusammengefasst.

Kernmaterial:

Im Zuge von [36] wurde das Brandverhalten verschiedener Kernmaterialien an 0,4 x 0,3 [m] großen Proben nach dem Französischen Standard NF P 92-501 gemessen und als nicht brennbar eingestuft. Aufgrund des geringen Restgasdruckes im Kern des VIP kommen hier nur druckstabile Materialien in Frage. Derzeit wird als Stützkörper für im Baubereich eingesetzte VIP überwiegend die pyrogene Kieselsäure verwendet. Pyrogene Kieselsäure ist von Natur aus feuerbeständig bzw. nicht brennbar und erfüllt nach DIN 4102-2 die Anforderungen der Baustoffklasse A1. Das alternativ mögliche Kernmaterial aus PUR-Schaum wird in die Baustoffklasse B2 (normal entflammbar) eingestuft.

Hüllmaterial:

Die beiden bauaufsichtlich zugelassenen VIP der Fa. Porextherm und der Fa. va-Q-tec werden in ihrer Zulassung aus brandschutztechnischer Sicht gemäß DIN 4102-1 als B2-Bauteil klassifiziert. Diese Klassifizierung beruht im Wesentlichen auf der Tatsache, dass die dünnen Hüllfolien der VIP nicht in der Lage sind, die mit einem Feuer verbundenen Temperaturen aufzunehmen.

VIP Hüllfolien weisen aufgrund ihrer Materialität auf Polymerbasis ein ungünstiges Brandverhalten auf. Feuer kann sich auf dem Hochbarrierelaminat rasch ausbreiten. Mit der einhergehenden Beschädigung der Hüllfolie steigt der Restgasdruck im VIP und das Elastizitätsmodell des VIP sinkt um einen Faktor von bis zu zwei [50]. Wird das VIP, wie in Sandwich-Konstruktionen, biegebeansprucht, so führt dies zu einer erhöhten Durchbiegung der Konstruktion. Zwar wurde das Brandverhalten von VIP im Zuge von Bauaufsichtlichen Zulassung gemäß DIN 4102 bestimmt, dennoch sind Veröffentlichungen über ausführliche brandschutztechnischen Untersuchungen insbesondere hinsichtlich des verwendeten Hüllmaterials und in Bezug auf das Verhalten infolge des Druckverlustes bislang kaum vorhanden.

Baustoffklassen verschiedener Hüllmaterialien für VIP
lambdasave GmbH, Schüco International KG, Wipak Walsrode GmbH & Co. KG



Edelstahlhülle (A1)



Glas (A1)



Hochbarrierelaminat (A2-B2)

Erzielbare Baustoffklasse:

Obwohl das Kernmaterial von VIP ein Hochtemperaturdämmstoff der Klasse A1 ist, haben die Brandversuche nach DIN 4102 für das mit Folie umhüllte VIP eine Baustoffklasse B3 ergeben. Die Einstufung von VIP in eine Baustoffklasse hängt maßgeblich von der verwendeten Umhüllung ab. Geprüft wird immer das komplette VIP, nicht die Barrierefolie alleine. Würde die Barrierefolie alleine geprüft werden, so stellt die Erfüllung der Baustoffklasse B2 keine allzu schwierige Aufgabe dar. Wird aber das komplette VIP geprüft, so liegen andere Randbedingungen zugrunde. Durch die Tatsache, dass der Kern eines VIP ein schlechter Wärmeleiter ist, wird die durch ein Brandereignis vorherrschende Temperatur nicht abgeführt und bleibt lokal an der Stelle vorhanden.

Hierdurch erfährt die Folie eine unweit höhere thermische Beanspruchung im Vergleich zu einer Prüfung ohne Stützkörper [57]. Somit kann das folienumhüllte VIP ohne Modifikation nicht als Dämmstoff im Baubereich eingesetzt werden.



Durch einfache Modifikation, z. B. Aufkleben einer Aluminiumverbundfolie auf der Vorder- und Rückseite, ändert sich das Brandverhalten und die Prüfungen ergeben hierfür die Baustoffklasse B2. Insgesamt zeigen die Untersuchungen zur Brandsicherheit, dass ein zusätzlicher Brandschutz oder eine Modifikation der Folie (Zugabe von Brandhemmungsmitteln) erforderlich ist, damit VIP im Baubereich eingesetzt werden können.

Optimierungspotentiale:

Durch den Einsatz von VIP in Wärmedämmverbundsystemen sind extrem schlanke WDVS möglich. Das drei-lagige WDVS-Produkt von Variotec und Maxit hat eine Dicke von 70 Millimeter. Umschlossen wird das VIP auf der außen liegenden Seite von einer 30 Millimeter und auf der innen liegenden Seite von einer 10 Millimeter dicken Lage aus Polystyrol. Das WDVS erreicht eine Feuerwiderstandsklasse von B1.

Einsatzmöglichkeiten im Bausektor

Besonders interessant sind Lösungen, bei denen das Material, das den Brandschutz übernimmt, zugleich einen mechanischen Verarbeitungsschutz sicherstellt. Wie bei den Standsicherheitsanforderungen sind die Brandschutznachweise für jedes System letztlich im Rahmen der Zulassungsprüfungen, bei Einzelzulassungen oder bei allgemein bauaufsichtlichen Zulassungen, zu erbringen. Erst dann dürfen die Systeme im Baubereich eingesetzt werden.

Der Einsatz von VIP als "blanke" Elemente in der Gebäudehülle ist in den Außenwänden entsprechend den brandschutztechnischen Anforderungen nur bis zu einer Höhe von 7,00 m möglich. Mit einer Kaschierung oder besser noch einer Umschäumung der Elemente wie bei WDVS wird B1 Qualität und somit der Einsatz der Elemente bis zur Hochhausgrenze (oberster Fußboden auf einer Höhe von $\leq 22,00$ m) ermöglicht.

Für Konstruktionen mit nicht zugelassenen VIP sind Abweichungen von den Bau- und allgemeinen Verordnungen sowie Sonderbauvorschriften möglich, wenn durch Brandschutzkonzepte nachgewiesen wird, dass die bauaufsichtlich geforderten Schutzziele trotz Abweichung dennoch erreicht werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Gertis, K.: Die Lehre Bauphysik (2002), Lehrstuhl für Bauphysik
- [2] Baunetz Wissen; 2009-04-06
- [3] Willems, W.M., Schild, K.: Vakuumdämmung: schlanke Wände - warme Zimmer, Ingenieurwissenschaften (2004), Rubin, S. 45 ff
- [4] Schwab, H.: Vakuumisolationspaneele - Gas- und Feuchteeintrag sowie Feuchte- und Wärmetransport. Dissertation, Julius-Maximilian-Universität, Würzburg 2004
- [5] Beck, A., Binder, M.: Wärme- und Feuchtetransport in Vakuumisolationspaneelen, Bauphysik 30, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2008
- [6] Fricke, J., Beck, A., Binder, M.: Vakuu-Isolations-Paneele für Gebäude (2007), ZAE-Bayern
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-1657. Vakuu-Wärmedämmplatten aus Kieselsäure "va-Q-vip B". Berlin 2007, erweitert 2008
- [8] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-1662. Vakuu-Wärmedämmplatten aus Kieselsäure "Vacupor NT-B2". Berlin 2007
- [9] Willems, W. M.: Vakuumdämmung, Bauphysik Kalender 2004
- [10] Zimmermann, M., Bertschinger, H.: High Performance Thermal Insulation (HiPTI) - Vacuum Insulated Products (VIP) (2001), EMPA

- [11] Kittel, C.: Einführung in die Festkörperphysik, Oldenburg Verlag (1973)
- [12] Fricke, J., Borst, W.L.: Energie - Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen, 2. Auflage, Oldenburg Verlag (1984), München
- [13] Hirschfelder, J.O., Curtiss, C.F.: Molecular Theory of Gases and Liquids, John Wiley & Sons (1966), NewYork
- [14] Kaganer, M.G.: Thermal Insulation in Cyrogenic Engineering, IPST Press (1969), Jerusalem
- [15] Caps, R., Heinemann, U., Ehrmanntraut, M., Fricke, J.: Evacuated Insulation Panels Filled with Pyrogenic Silica Powders - Properties and Application, High-Temperatures-High Pressures (2001), volume 33, S. 151 ff
- [16] Heinemann, U., Weinläder, H., Ebert, H.-P.: Energieeffiziente Gebäudehüllen: Neue Materialien und Komponenten, DPG Frühjahrstagung 2009 - Arbeitskreis Energie (AKE), Hamburg
- [17] Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf, Petzold: Lehrbuch der Bau-physik (2002), B.G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden
- [18] Dietrich, B.: RWE Bau-Handbuch (2008), VWEW Energieverlag GmbH, Frankfurt/Main
- [19] Binz A., Moosman, A., Stenke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler, H., Brunner, S., Ghazi, K., Bundi, R., Heinemann, U., Schwab, H., Cauberg, H., Tenpierik, M., Johannesson, G., Thorsell, T., Erb, M., Nussbaumer, B.: Vacuum Insulation in the Building Sector, Systems and Applications, Annex 39 "HiPTI - High Performance Thermal Insulation" of IEA/ECBCS-Implementation Agreement, Report on Subtask B, published on www.vip-bau.de, 2005

- [20] Willems, W., Skottke, T.: Lineare Wärmebrücken in vakuumgedämmten Konstruktionen, Bauphysik 30, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2008
- [21] Großklos, M., Diefenbach, N.: Wärmebrücken in vorgefertigten Dämmelementen mit Vakuümdämmung für die Bestandssanierung, Institut Wohnen und Umwelt GmbH
- [22] Beck, A., Oswald, F.: Auswirkungen von Wärmebrücken beim Einsatz hocheffizienter Vakuüm-Isolationspaneelen am Bau, VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis" (2005), Wismar
- [23] Beck, A.: Wärmebrücken - die planerische Herausforderung beim Einsatz von Vakuüm-Wärmedämmelementen, VIP-Bau: 3. Fachtagung (2007), Würzburg
- [24] Hoffman, C., Erb, M.: VIP - Deklaration und Auslegung Wärmebrückenkatalog (2009), Bundesamt für Energie BFE, Bern
- [25] Winkler, H.: Einfluss von Wärmebrücken bei VIP-Konstruktionen, VIP-Bau: 1. Fachtagung (2003), Rostock-Warnemünde
- [26] Eberlein, J.: Wärmebrückenkompendium: VIP und "In Isothermen Veritas" Variotec
- [27] Cremers, J.: Einsatzmöglichkeiten von Vakuüm-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle. Dissertation, TU München 2005
- [28] Tenpierik, M., Van der Spoel, W., Cauberg, H.: Analytical Model for Predicting Thermal Bridge Effects due to Vacuum Insulation Panel Barrier Envelopes, Bauphysik 30, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2008

- [29] IfB Sorge GmbH, unveröffentlicht
- [30] Gutzwiller, S.: Hochisolierende Vakuumpaneele im Gebäudebau
- [31] Hohmann, Setzer, Wehling: Bauphysikalische Formeln und Tabellen (2004), Wernerverlag
- [32] Technische Information Vacupor® Vakuumdämmung; Porextherm Dämmstoffe GmbH
- [33] Heinemann, U.: Vakuumisolationspaneele - Potentiale und Besonderheiten, VIP-Bau: 3. Fachtagung (2007), Würzburg
- [34] Willems, W.M., Skottke: Lineare Wärmebrücken in vakuumgedämmten Konstruktionen (2008), Bauphysik 30 Heft 6
- [35] va-Q-tec AG: Allgemeine Verarbeitungs- und Anwendungshinweise Vakuumdämmplatte für Bauanwendungen (2008)
- [36] Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K., Mukhopadhyaya, P., Quénard, D., Sallée, H., Stramm, C., Tenpierik, M., Cauberg, H., Erb, M.: Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications, Annex 39 "HiPTI - High Performance Thermal Insulation" of IEA/ECBCS-Implementation Agreement, Report on Subtask A, published on www.vip-bau.de, 2005
- [37] Willems W., Schild, K., Dinter S.: Vieweg Handbuch der Bauphysik Teil 1 - Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2006
- [38] Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf, Petzold: Lehrbuch der Bauphysik, 5. Auflage, Teubner GmbH, Wiesbaden 2002

- [39] Dietrich, B.: RWE Bau-Handbuch, 13. Ausgabe, VVEW Energieverlag, Frankfurt am Main 2004
- [40] Maysenhölder W.; Schallschutz mit Vakuu-Isolationspaneelen; 2009
- [41] Fasold W., Veres E.; Schallschutz+Raumakustik in der Praxis; 2. Auflage, Berlin 2003
- [42] Mayr J., Leuschner I., Reyer E., Kröger R., Bemberger C., Großklos M., Diefenbach N., Lohmann G., Reuther S., Weber C., Stölzel C., Thoms H.; Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim, Förderkennzeichen 0329750V, Endbericht, Darmstadt, November 2007
- [43] Lenz, K., Leistner, PhL., Sedlbauer, K., König, N.: Vakuu-Isolationspaneele aus hygrothermischer und akustischer Sicht, VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis" (2005), Wismar
- [44] Leistner, P.; Fuchs, H. (2001): Schlitzförmige Schallabsorber. Bau-physik 23 (2001), S. 333-337.
- [45] Bschorr, O.; Laudien, E. (1992): The Silator – A small Volume Resonator. Journal of Sound and Vibration. (1992) 152, S. 81-92.
- [46] Cauberg, H., Tenpierik, M.: Sound reduction of vacuum insulation based sandwich panels, 8th International Vacuum Insulation Symposium (2007)
- [47] Davies J.M.: Lightweight sandwich constructions, CIB W056 Sandwich Panels
- [48] Ford, R.D., Lord, P., Walker, A.W.: Sound transmission through sandwich constructions, Journal of sound and vibration (1967), S. 5 ff

- [49] Moore, J.A., Lyon, R.H.: Sound transmission loss characteristics of sandwich panel constructions (1991), J. Acoust. Soc. Am. 89 (2)
- [50] Tenpierik, M., Van Timmeren, A., Van der Spoel, W., Cauberg, H.: Vacuum insulation panels and architecture: cradle-to-cradle facade systems (2009), 3rd CIB International Conference on Smart and Sustainable Build Environment, Delft
- [51] Schneider, U., Franssen, J. M., Lebeda, C.: Baulicher Brandschutz, 2. Auflage (2008), Bauwerk Verlag GmbH, Berlin
- [52] Hahn, C.: Planung, Konstruktion, Ausführung, Kapitel 13: Brandschutz, (2008), Bundesverband Kalksandstein e. V., Hannover
- [53] Girkes, H.-W.: Brandschutz-Arbeitshilfe 61.0 Bauaufsichtliche Bestimmungen, (2008), Bauen mit Stahl e. V., Düsseldorf
- [54] DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, 1998
- [55] DIN EN 13501-1: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2007
- [56] Informationsdienst Holz: Brandschutz im Hallenbau (2004)
- [57] Kaczmarek, D.: Barrierefolien für Vakuum-Isolationspaneele im Bauwesen, VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis" (2005), Wismar

- [58] Vogdt, F. U.: Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) - Qualitätssicherung und Vermeidung von Schäden, Fachtagung: Wärmedämmung - qualitätssicher und energiesparend (2006), IEMB, Berlin
- [59] Willems, W.: Neue Technologien bei der Fassadendämmung - Anforderungen, Handhabung und Verarbeitung
- [60] Gellert, R.: Bauaufsichtliche Anforderungen an Dämmstoffe am Beispiel von Vakuumdämmplatten, VIP-Bau: 1. Fachtagung (2003), Rostock-Warnemünde