



Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau



ZAE BAYERN

Vakuumdämmung im Bauwesen

Block III

Bauphysik

Teil 1/4: Wärmeschutz

angefertigt von der Wolfgang Sorge IFB GmbH / Nürnberg
im Auftrag des ZAE Bayern / Würzburg

Stand: Juli 2010

Gefördert durch das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

© ZAE Bayern



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

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.



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Gliederung

- Allgemeines
- Motivation
- Mechanismen des Wärmetransports
- Wärmebrücken
- Wärmebrücken bei VIP



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Allgemeines

- Anfänge bauphysikalischer Betrachtungsweisen mit röm. Baumeister Vitruv (1. Jahrhundert v. Chr.):

- Raumklima,
- Theorie der Töne,
- Tageslichtversorgung von Räumen,
- Nutzung von Sonnenstrahlen,
- Vermeidung von Baufeuchte und Schimmel.



Quelle:
Geschichte der Architekturtheorie



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Allgemeines

- Bauphysik heute integraler Bestandteil:
 - vom Entwurf über die Planung und der Nutzung bis zum Abriss unerlässlich,
 - Vernachlässigung kann zu Bauschäden bei der Bauerstellung und v. a. in der Nutzung führen,
 - zeitgemäßes und menschengerechtes Entwerfen,
 - Vermeidung ökonomischer und ökologischer Nachteile.



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Motivation

■ Wärmeschutz:

- Ziel ist
 - die Verminderung von winterlichen Wärmeverlusten,
 - die Vermeidung sommerlicher Überhitzung;
- Ressourcenverknappung und Rohstoffkosten als Antrieb zur Energieeinsparung (Ölpreiskrise 1973 und 1979/80),
- heute steht vor allem die Reduzierung der Emission von klimaschädlichen Treibhausgasen im Fokus,
- ständige Steigerung von Dämmstandards bis zur heutigen Passivhaustechnologie:
 - bis zu 40 cm Dämmstoffdicke mit konventionellen Dämmstoffen (WLG 040),
 - Ausschluss für schlanke Bauweisen.



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau

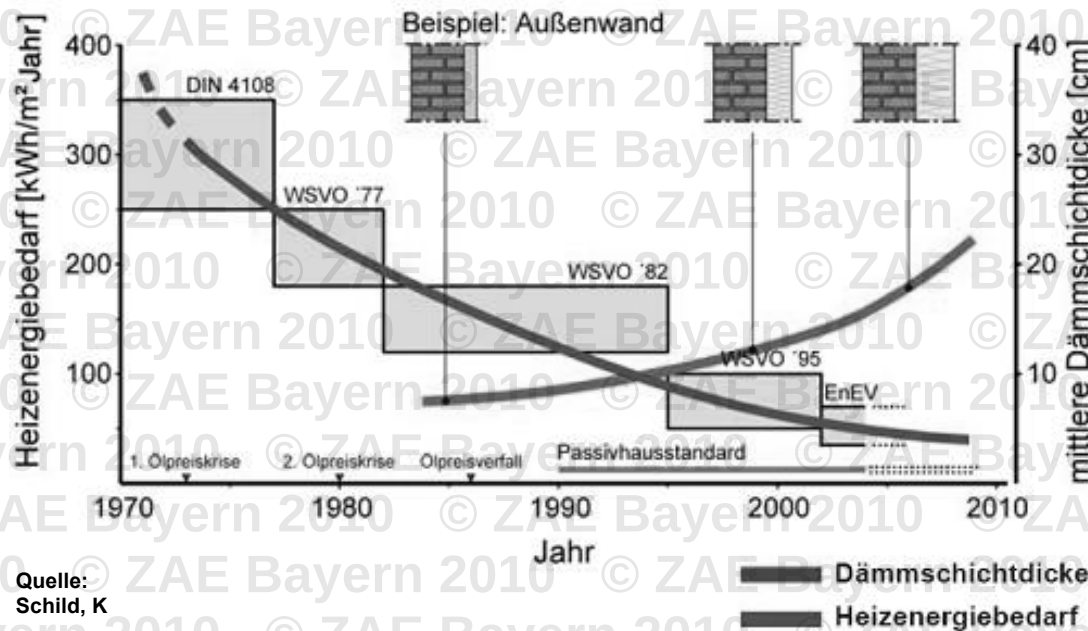


VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

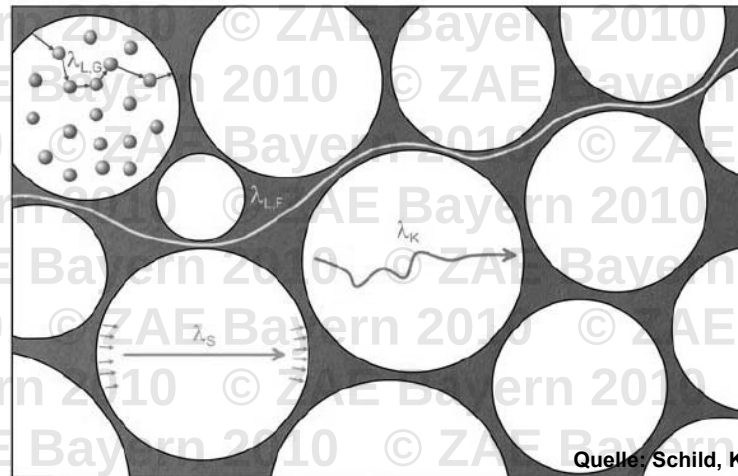
Motivation

- Entwicklung des Heizenergiebedarfs und der Dämmstoffdicke:



Mechanismen des Wärmetransports

- Prozesse der Wärmeübertragung in porösen Medien:
 - Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Konvektion,



θ_1 ————— θ_2

- Ableitung des Wärmetransports in trockenen VIP aus dem Fourier'schen Erfahrungssatz des Wärmetransports in einem homogenen Kontinuum.

Mechanismen des Wärmetransports

- Wärmeleitfähigkeit von VIP:

- Wärmeleitfähigkeit als Diffusionsprozess:

- mittlere freie Weglänge (durchschnittliche Distanz, die ein Teilchen ohne Wechselwirkung mit anderen Teilchen zurücklegt) ist wesentlich kleiner als die Abmessung des betrachteten Volumens;

- wesentliche Transportmechanismen im Diffusionsmodell:

- **Phononentransport** im homogenen Festkörper ($\lambda_{L,F} \equiv \lambda_s$),

- **Photonentransport** in optisch dicken Medien ($\lambda_s \equiv \lambda_r$),

- **Molekültransport** im ruhenden Gas ($\lambda_{L,G} \equiv \lambda_g$),

- **Kopplungseffekte** zwischen den einzelnen Wärmeleitfähigkeiten (λ_c).

Mechanismen des Wärmetransports

- Wärmeleitfähigkeit in einem trockenen porösen Festkörper:
(Konvektion ist im allgemeinen unterdrückt)

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_c$$

mit λ_{eff} : effektive Gesamtwärmeleitfähigkeit

λ_s : Wärmeleitfähigkeit des Festkörpergerüsts ($\sim T_1 \sim 1/T$)

λ_g : Beitrag des Gases zu λ ($\sim T^{0.5}$)

λ_r : Beitrag der Wärmestrahlung zu λ ($\sim T^3$)

λ_c : Berücksichtigung von Kopplungseffekten $\lambda_c = \lambda_c(\lambda_s, \lambda_g)$



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Mechanismen des Wärmetransports

- Wärmeleitfähigkeit in einem trockenen porösen Festkörper:
 - Alterung (Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit)
 - aufgrund eindringender trockener Gase,
 - aufgrund eindringenden Wasserdampfs;
 - Zuschläge auf den Laborwert der Wärmeleitfähigkeit:
 - **Laborwert** der Wärmeleitfähigkeit typischer Kieselsäure-VIP von 0,004 bis 0,005 [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$],
 - **Bemessungswerte** für die Wärmeleitfähigkeit von 0,008 bis 0,011 [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$].



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Mechanismen des Wärmetransports

■ Festkörperwärmeleitung:

- exakte Beschreibung des Festkörper-Wärmetransportes aufgrund der Komplexität des Festkörpergerüsts im allgemeinen analytisch kaum möglich (Näherungen),
- Beschreibung der Wärmeleitfähigkeit im Basismaterial über das Diffusionsmodell:

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

mit

v_m

mittl. Geschwindigkeit der Phononen

l_m

freie mittlere Weglänge der Phononen

ρ_0

Dichte des Festkörpers

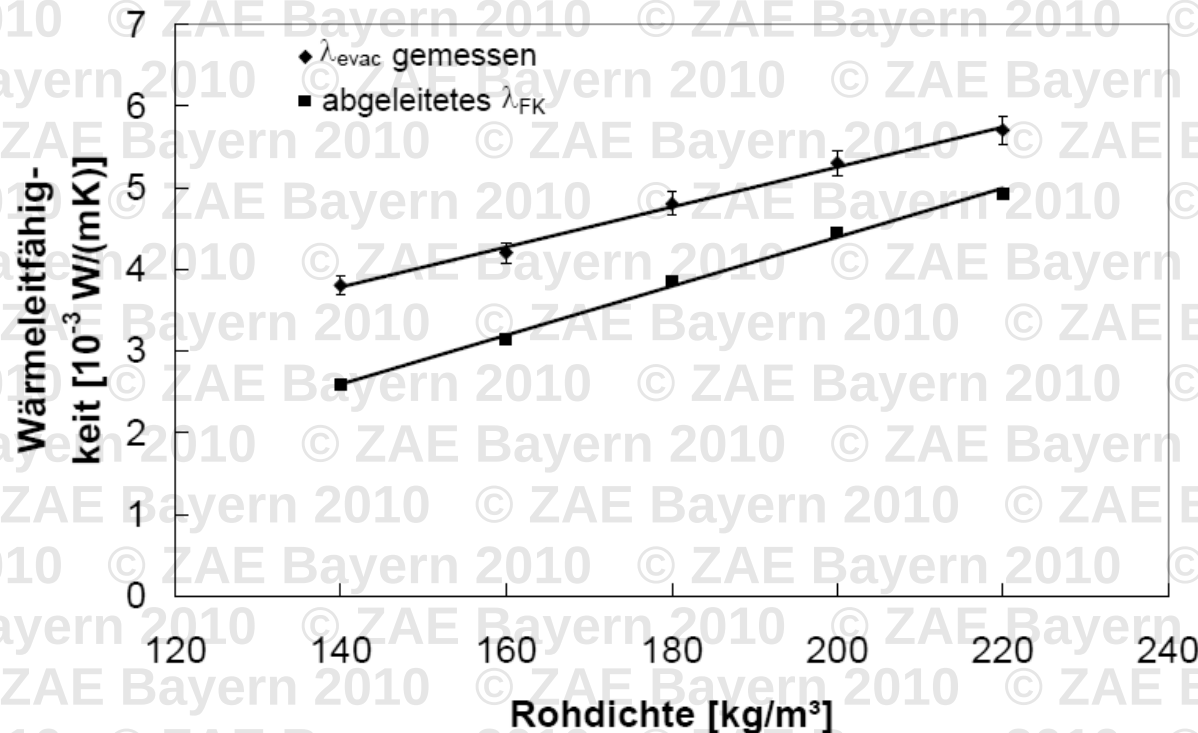
c_v

spez. Wärmekapazität

Mechanismen des Wärmetransports

■ Festkörperwärmeleitung:

- rohdichteabhängige bzw. porositätsabhängige Wärmeleitfähigkeit eines VIP (pyrogene Kieselsäure):



Quelle:
Schwab, H

Mechanismen des Wärmetransports

■ Festkörperwärmeleitung:

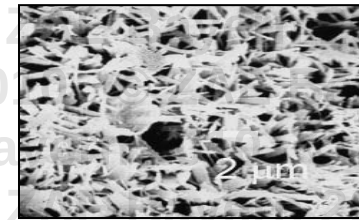
Zufriedenstellende Abschätzung der Wärmeleitfähigkeit von

➤ Pulver durch Phononendiffusionsmodelle,

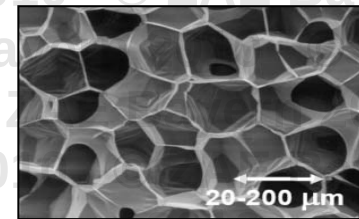
➤ Aerogelen durch die Perkulationstheorie,

➤ Schäume durch das Glicksman-Modell,

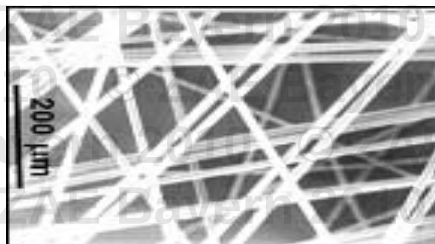
➤ Fasern durch das Zellenmodell.



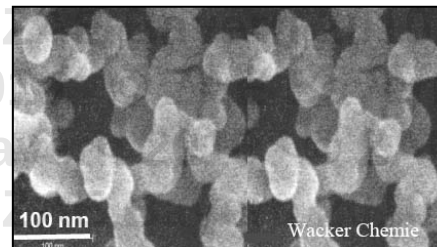
Typisches CaSiO_3 -Gefüge



PU-Schaum



Glasfaser



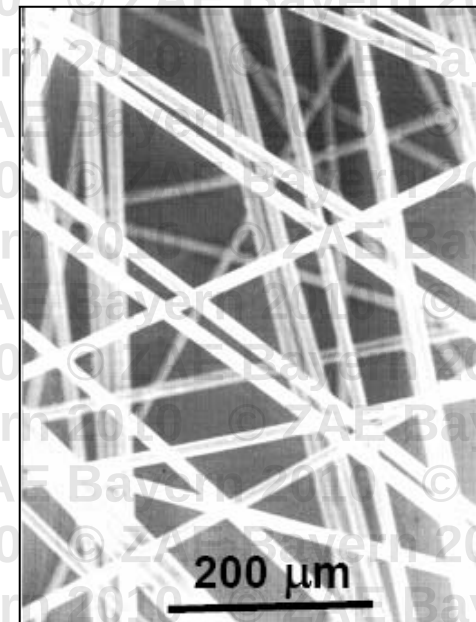
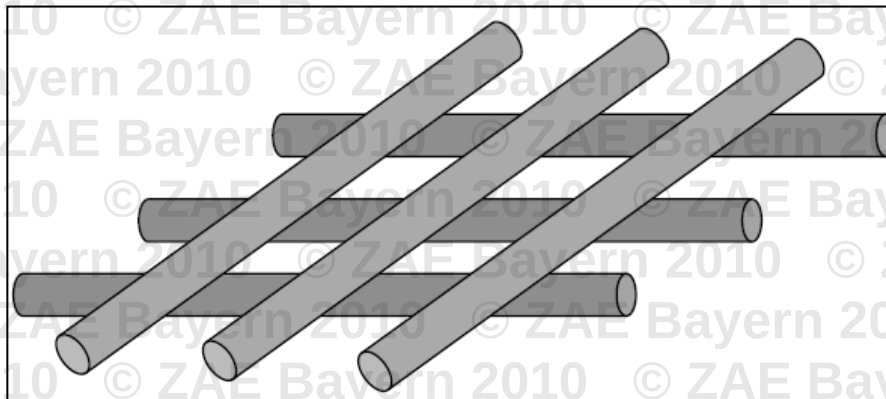
Pyrogene Kieselsäure



Quelle: ZAE Bayern

Mechanismen des Wärmetransports

- Zellenmodell für Fasern:
 - Darstellung durch ein Gittermodell:



Quelle: ZAE Bayern

- Berechnung der Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda_s = \lambda_b \frac{16}{\pi^2} \cdot \frac{1}{1/4 \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^3 + \left[3\pi^2 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^4 \cdot \frac{(1-\mu^2)}{Y \cdot p_{ext}} \right]^{1/3}}$$

Mechanismen des Wärmetransports

■ Perkolationsmodell für das Feststoffgerüst:

➤ Berechnung der Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda_s = (\rho / \rho_0)^\alpha \cdot C_1 / (C_2 + T) \quad \begin{matrix} (poly-)kristallin \\ \sim c_p(T) \quad amorph \end{matrix}$$

Geometriefaktor · Festkörperwärmeleitfähigkeit

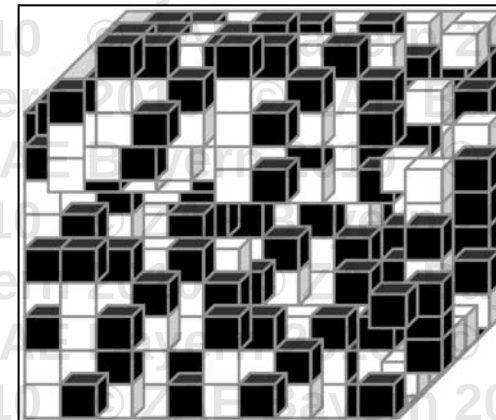
ρ Dichte des porösen Festkörpers

ρ_0 Festkörperdichte ohne Porositäten

α Skalierungsexponent

c_p spezifische Wärmekapazität

➤ Darstellung des Perkolationsmodelles:



Quelle: ZAE Bayern



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Mechanismen des Wärmetransports

- Typische Werte für die Festkörperwärmeleitfähigkeit sind bei 1 [bar] Belastungsdruck für

- Schäume $0,005 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$, für



Quelle: Fa. Steinbacher

- Pulver $0,002$ bis $0,010 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$ sowie für



Quelle: Thermofloc

- Fasern $0,0005$ bis $0,003 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}]$.



Quelle: Knauf Insulation

Mechanismen des Wärmetransports

- Strahlungsbeitrag zur Wärmeleitfähigkeit:
 - für optisch dicke Materialien als Diffusionsprozess,
 - optisch dick: mittlere freie Weglänge der Photonen deutlich kleiner als die Materialdicke, Behinderung des Strahlungstransports durch Streu- und Absorptionsprozesse;
 - Beschreibung der Wärmeleitung durch Strahlung:

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

mit

n

Brechungsindex

σ

Stefan-Boltzmann-Konstante

T

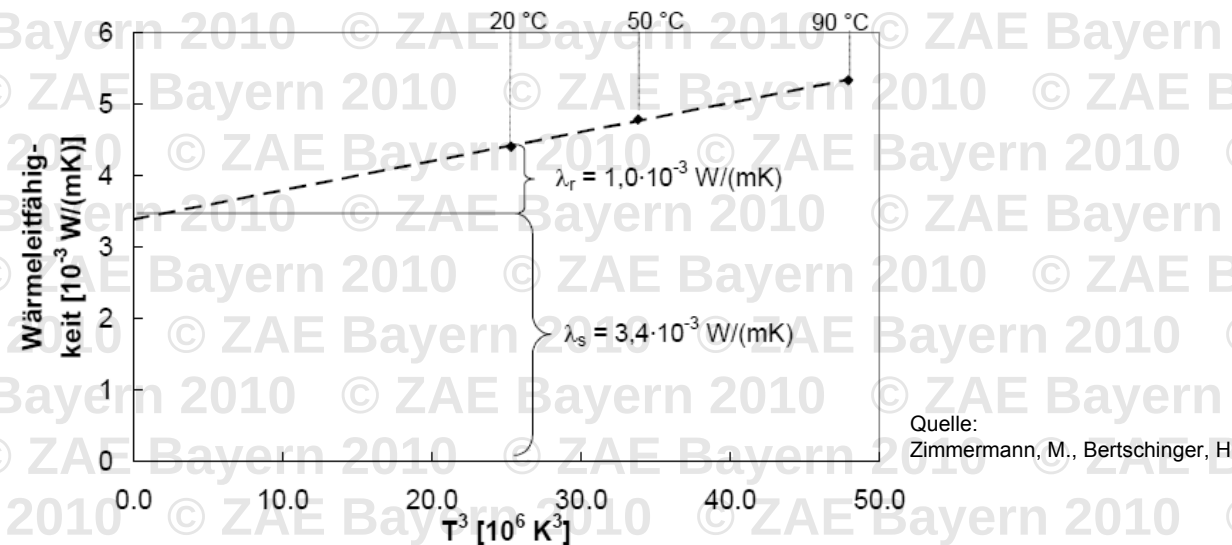
Temperatur

E

Extinktionskoeffizient mit $E \propto \rho$

Mechanismen des Wärmetransports

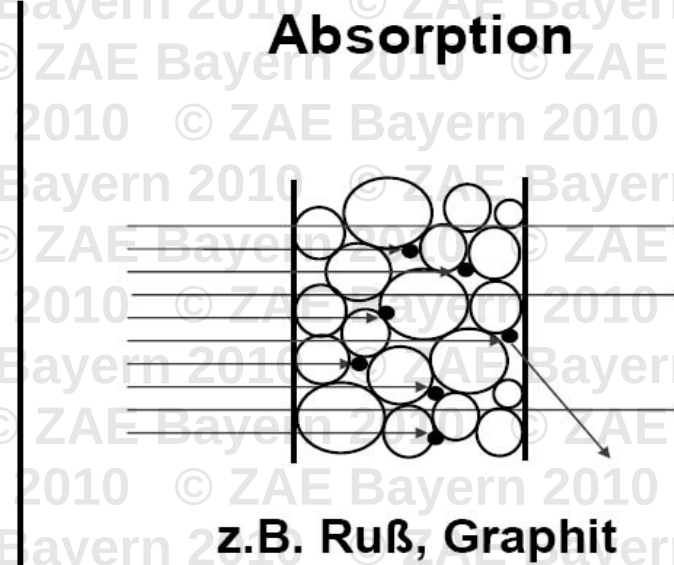
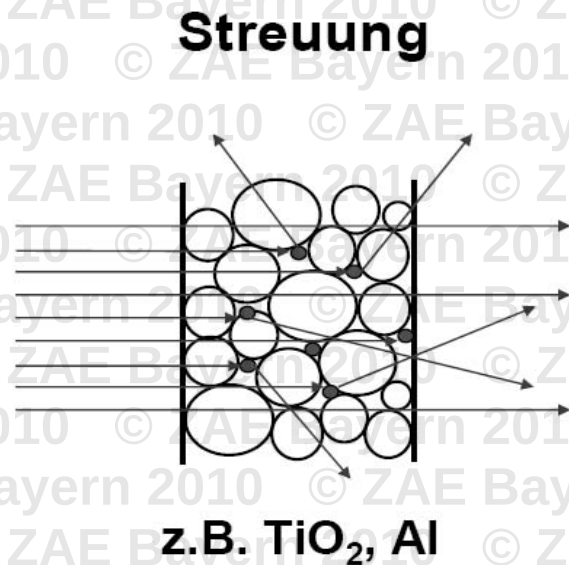
- Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit eines VIP (pyrogene Kieselsäure):



- Reduzierung von λ_r durch
 - Erhöhung der Dichte ρ ,
 - Erhöhung der spezifischen Extinktion $e(T)$,
Einsatz von IR-Trübungsmitteln.

Mechanismen des Wärmetransports

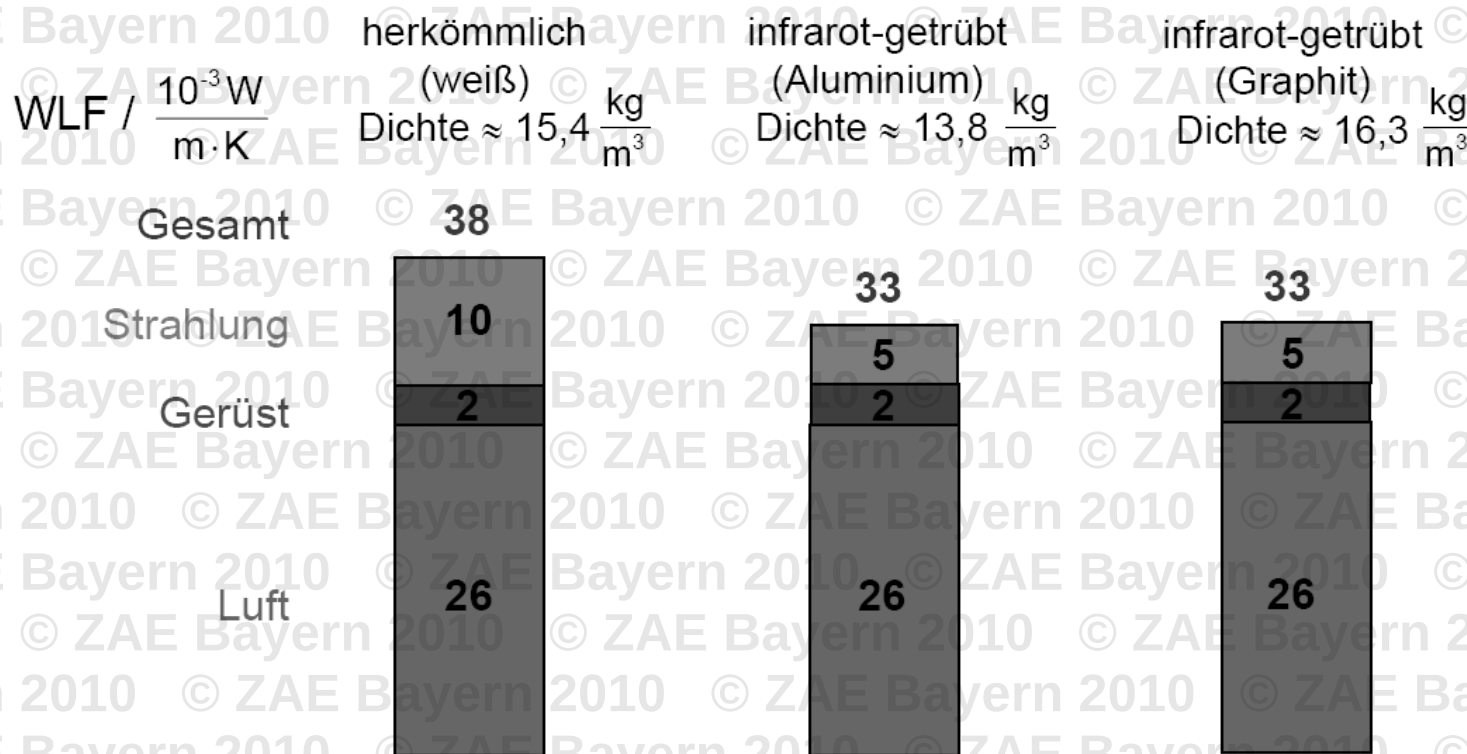
- Wirkungsweise von IR-Trübungsmitteln:



Quelle: ZAE Bayern

Mechanismen des Wärmetransports

Wärmeleitfähigkeit von IR-getrübten EPS:



Quelle: ZAE Bayern



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



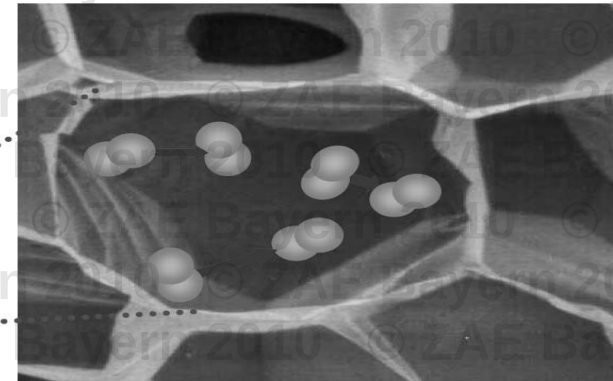
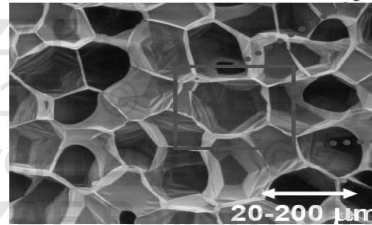
VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

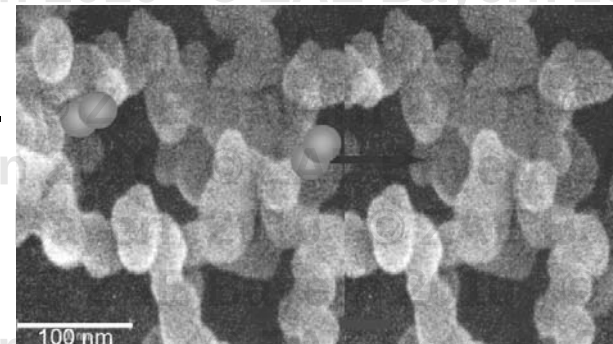
Mechanismen des Wärmetransports

- Gasbeitrag zur Wärmeleitfähigkeit:

- Schäume mit
Porendurchmesser 20 - 200 μm ,



- nanostrukturierte Pulver
Porendurchmesser 200 - 500 nm.



Quelle: ZAE Bayern

Mechanismen des Wärmetransports

■ 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

Quelle: Curtiss, C.F.

Mechanismen des Wärmetransports

Wärmeleitfähigkeit des Restgases:

Wärmeleitfähigkeit des Porengases in Abhängigkeit der Knudsen-Zahl (Kn : Verhältnis der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle zum Porendurchmesser):

$$\lambda_G(p_G) = \frac{\lambda_{G0}}{1 + 2\beta Kn} = \frac{\lambda_{G0}}{1 + \frac{p_{1/2}}{p_G}} \quad \xrightarrow{\text{überwiegend Molekül-Wand-Stöße}} \quad \lambda_G(p_G) = \frac{\lambda_{G0}}{2\beta Kn} = \lambda_{G0} \frac{p_G}{p_{1/2}}$$

mit λ_{G0} Wärmeleitfähigkeit des freien Gases

β gasartabhängiger Faktor

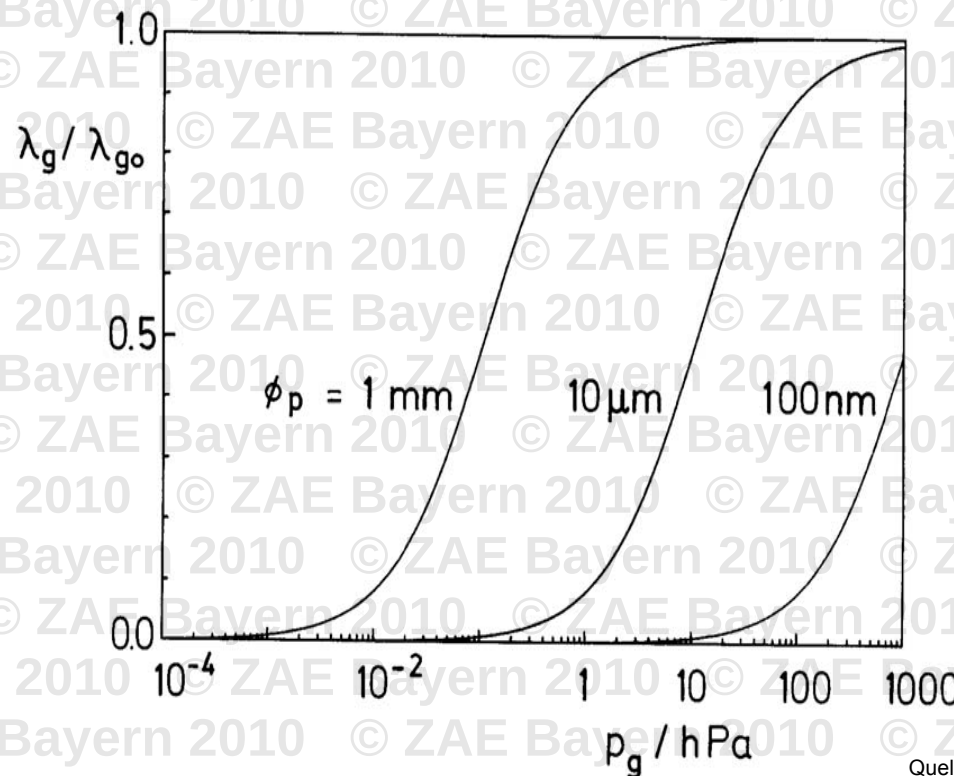
$p_{1/2}$ Halbwertsdruck

p_G Gasdruck

$$\lambda_G \sim p_G$$

Mechanismen des Wärmetransports

- Gasdruckabhängige
relative Luftwärmeleitfähigkeit:



Quelle: Zimmermann, M., Bertschinger, H.

Mechanismen des Wärmetransports

■ Schlussfolgerung:

➤ Festkörperwärmeleitung bei Schäumen
bereits am Optimum → Porosität,

➤ weitere Reduktion der Strahlungswärmeleitung durch effiziente Infrarot-Absorber/Streuer.

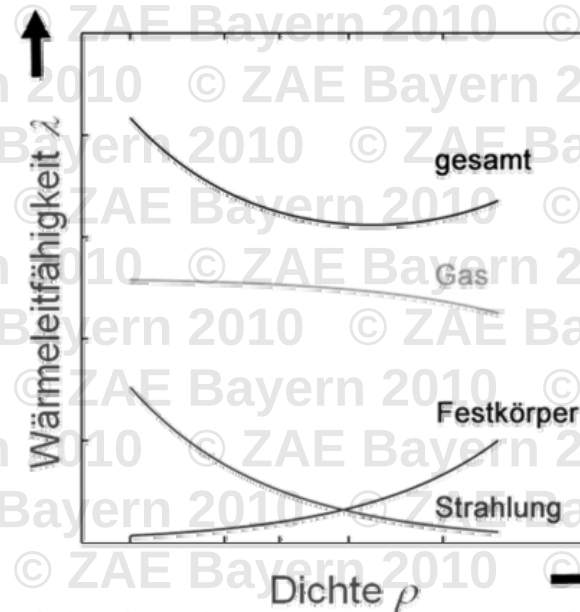


Quelle: Porextherm GmbH



Quelle: Porextherm GmbH

IR Trübungsmittel



Quelle: Heinemann, U., Weinläder, H.



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

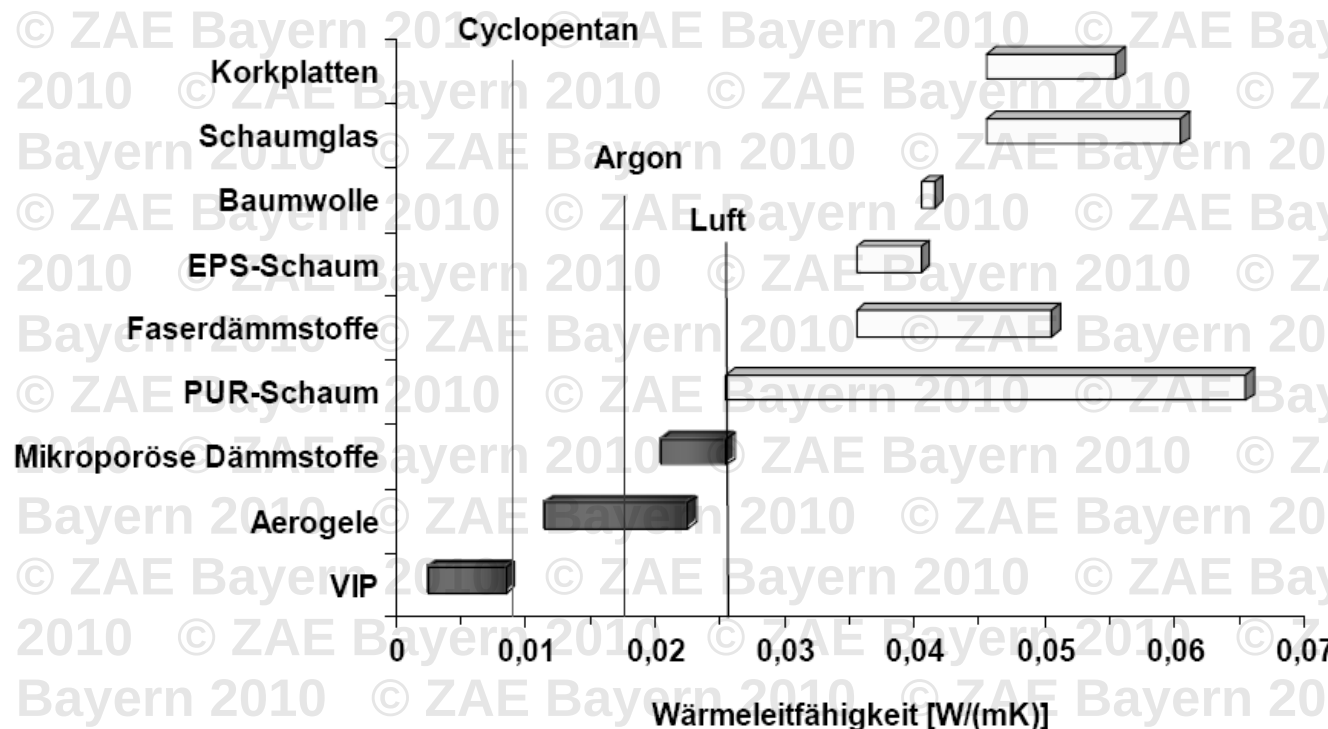
Mechanismen des Wärmetransports

■ Schlussfolgerung:

- Anteil von Gasleitung : Strahlung : Festkörperleitung :
 - bei herkömmlichen Dämmstoffen (PS) 25 : 13 : 2;
 - bei evakuierter Dämmung mit pyrogene Kieselsäurekern (VIP) 0 : 1 : 3;
- Einfluss des Restgasdrucks auf die Wärmeleitfähigkeit abhängig vom mittleren Porendurchmesser,
- Verdopplung der Gaswärmeleitung bei nanostrukturierten Materialien erst bei einem Restgasdruck von 100 [mbar] (z. B. pyrogene Kieselsäure; Wärmeleitfähigkeit bereits unter Normaldruck (1 [bar]) $0,018 \text{ [W m}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)]}$,
- Wegen der geringen Anforderungen an die Dichtigkeit der Hülle sind pyrogene Kieselsäurekerne daher besonders gut für den Einsatz in VIP geeignet.

Mechanismen des Wärmetransports

- Leistungsfähigkeit von derzeitigen Dämmstoffen:





EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

- physikalische Ursachen für Wärmebrücken:

- geometrisch bedingte Wärmebrücken

- (Beispiel Außenecke),

- materialbedingte Wärmebrücken

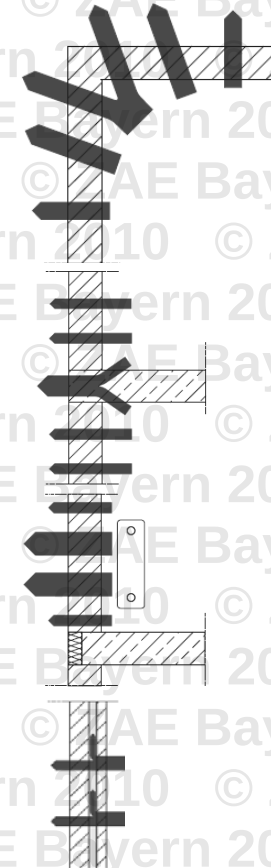
- (Beispiel einbindende Betondecke ohne Stirndämmung),

- umgebungsbedingte Wärmebrücken sowie

- (Beispiel Heizkörper vor Außenwand)

- massestrombedingte Wärmebrücken

- (Beispiel Kaltwasserrohr in Außenwand).



Quelle: RWE Bauhandbuch



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



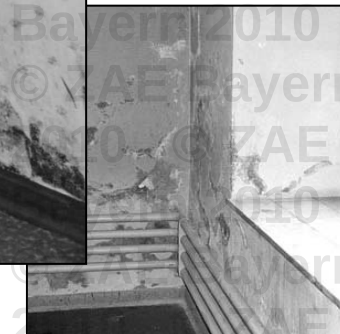
ViBau



VIP-BAU.DE
Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

- wärmebrückenbehaftete Konstruktionen:
 - mit steigender Energieeffizienz eines Gebäudes steigende Konsequenzen:
 - erhöhte Transmissionsverluste über Wärmebrücken wirken sich auf die Heizkosten aus,
 - unzureichende Beheizung des Gebäudes (Oberflächentemperaturen zu gering),
 - Feuchteanreicherungen;
 - Folgen:
 - Stauablagerung,
 - Schimmelpilzbildung,
 - Bauschaden.





EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



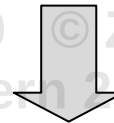
VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

- **Hocheffiziente Wärmedämmungen:**

- Wärmeleitfähigkeit deutlich geringer
als bei konventionellen Dämmstoffen.



**Temperaturgradienten im Bereich der Wärmebrücken
wesentlich größer.**



**Im Vergleich zu ungestörten, schichtenartigen
Wandaufbauten komplexere quantitative
Einflüsse von Wärmebrücken.**



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



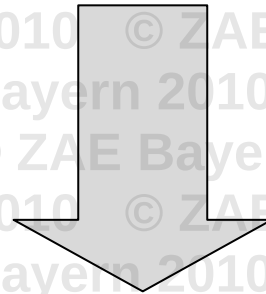
VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

- **Hocheffiziente Wärmedämmungen:**

- Wärmeleitfähigkeit deutlich geringer
als bei konventionellen Dämmstoffen.



**Detaillierte Beurteilung von Wärmebrücken
bei Konstruktionen mit VIP über thermische
und hygrische Berechnungen erforderlich:**

**Detaillierte Abbildung des VIP (Kern & Hülle)
Verwendung der physikalischen Kenndaten (nicht λ_{BW})**



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

■ Kenngrößen:

Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} im baulichen

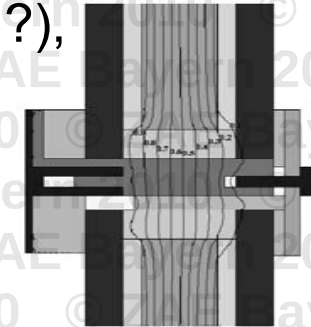
Wärmeschutznachweis seit EnEV 2002:

➤ $\Delta U_{WB} = 0,10 \text{ [W m}^{-2}\text{K}^{-1}]$ pauschal für konventionelle Bauteilaufbauten ohne Nachweis (und für VIP ?),

➤ $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ [W m}^{-2}\text{K}^{-1}]$ bei Ausführung von Anschlussdetails gemäß DIN 4108 Beiblatt 2 (aktuelle Fassung: keine VIP !),

➤ Alternativ: rechnerische Ermittlung des Wärmebrückenzuschlages:

- punktförmige Wärmebrücken,
- linienförmige Wärmebrücken,
- flächenförmige Wärmebrücken.





EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

- rechn. Ermittlung des Wärmebrückenzuschlags:

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

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



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

- Temperaturfaktor f_{RSi} (DIN EN ISO 10211):
 - Kenngröße zur Abschätzung der Tauwasser- bzw. Schimmelpilzgefahr,
 - konstante, dimensionslose, bauspezifische Größe,
 - temperaturunabhängig,
 - zur Vermeidung von Schimmelbildung
gem. DIN 4108-2 $f_{RSi} \geq 0,70$.



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE
Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

- Temperaturfaktor f_{RSi} (DIN EN ISO 10211):

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

mit $\theta_{Si,min}$ *minimale raumseitige Oberflächentemperatur
im Bereich der Wärmebrücke*

θ_e *Außenlufttemperatur*

θ_i *Raumlufttemperatur*



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken

- Normen und Vorschriften:

- EnEV 2007: 24. Juli 2007

- Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) in der Fassung

- EnEV 2009: 29. April 2009

- Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung

- DIN 4108-2,4,6: 2003-07

- Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden

- DIN 4108 Beiblatt 2: 2004-01

- Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden;
Wärmebrücken, Planungs- und Ausführungsbeispiele

Wärmebrücken

- **Normen und Vorschriften:**

- **DIN EN ISO 6946: 2003-10**

- Bauteile -

- Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient

- **DIN EN ISO 10211: 2008-04**

- Wärmebrücken im Hochbau; Wärmeströme und
Oberflächentemperaturen; Detaillierte Berechnungen



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken bei VIP

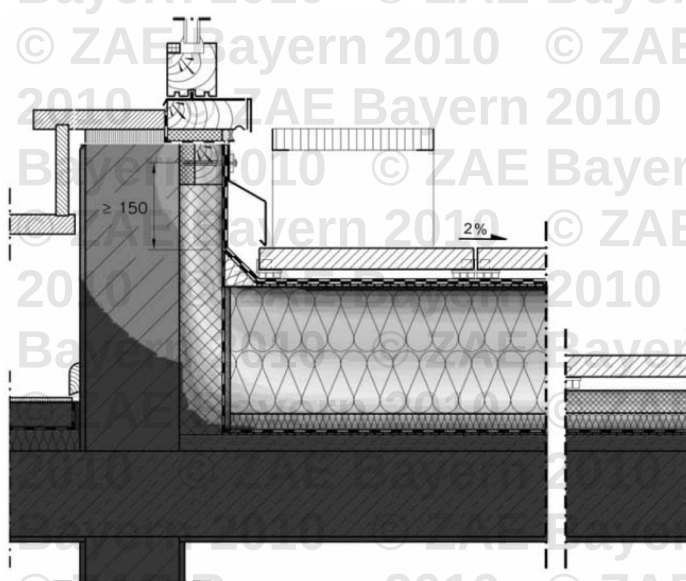
- Besonderheiten bei der Wärmebrückenberechnung:

VIP sind nicht ein homogener Werkstoff, sondern Elemente mit unterschiedlichen Eigenschaften von Kern und Hülle!

- Für stumpf gestoßene VIP ohne Spalte oder konstruktive Durchdringungen ist der Wärmebrückeneinfluss der Hülle großzügig abschätzend bereits im Bemessungswert enthalten.
- Für genaue Berechnungen auch des Einflusses von Durchdringungen oder Spalten sind erforderlich:
 - die Abbildung der Spalte und Durchdringungen (z. B. Befestigungselementen und Passstücken),
 - eventuell auch detaillierte Abbildung von VIP-Kern und Hüllfolie, mit den Laborkennwerten für Kern und Hülle.

Wärmebrücken bei VIP

Beispiele:



Quelle: Willems



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken bei VIP

■ Einfluss des Randbereiches:

- rechnerische Darstellung der Wirkung der Randausbildung (Spalte, Durchdringungen) wird häufig vernachlässigt,
- Bild rechts:
Wärmebrücken im Randbereich sind mit Infrarot deutlich zu sehen und messbar (hier: Stoßfuge mit Kompriband),
- Zur Beschreibung des Wärmebrückeneffektes von Luftspalten, Durchdringungen in den Fugen oder Passtücken aus anderen Materialien können Wärmebrückenkataloge orientierend angewendet werden, für genauere Bewertungen sind detaillierte Wärmebrückenberechnungen erforderlich.



Quelle: ZAE Bayern



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE
Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken bei VIP

Analytische Bestimmung:

$$\psi_{vip,edge} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_c}{\alpha_1 d_p} + \frac{\lambda_c}{\alpha_2 d_p}} \times \left[\frac{\alpha_1 (N_1^2 - B)}{\frac{\phi d_p \lambda_f}{\lambda_e} (N_1^2 N_2^2 - B^2) - \lambda_1 \sqrt{N_1^2 N_2^2 - B^2} \left(1 + \frac{2B}{\sqrt{D}}\right) - \lambda_2 \sqrt{N_1^2 N_2^2 - B^2} \left(1 - \frac{2B}{\sqrt{D}}\right)} \right]$$

d Dicke des VIP

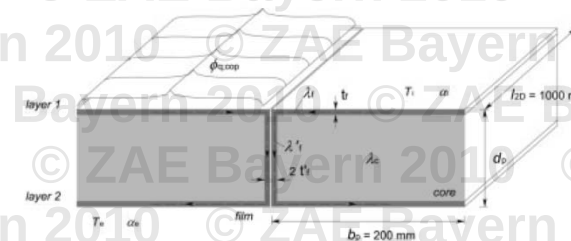
α Übergangswiderstand

λ Wärmeleitfähigkeit

ϕ Verhältnis Dicke der Hüllfolie in der Paneelfläche zu Dicke der Hüllfolie im Eckbereich

$N = \frac{\frac{\alpha_i}{t_i \lambda_f} + \frac{\lambda_c}{t_i \lambda_f d_p}}{\frac{\lambda_c}{t_i \lambda_f d_p}}$

B



Quelle: Tenpierik



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



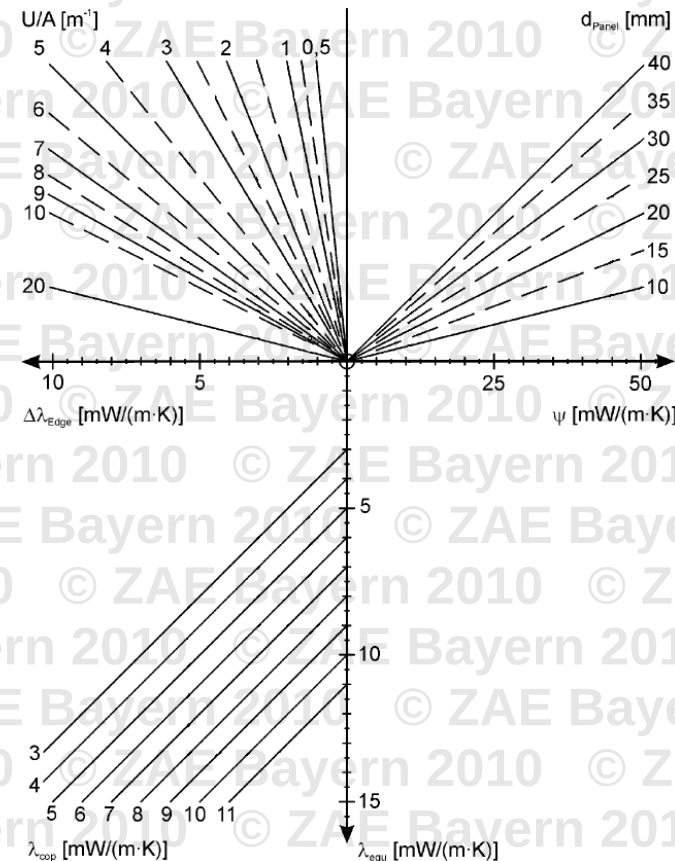
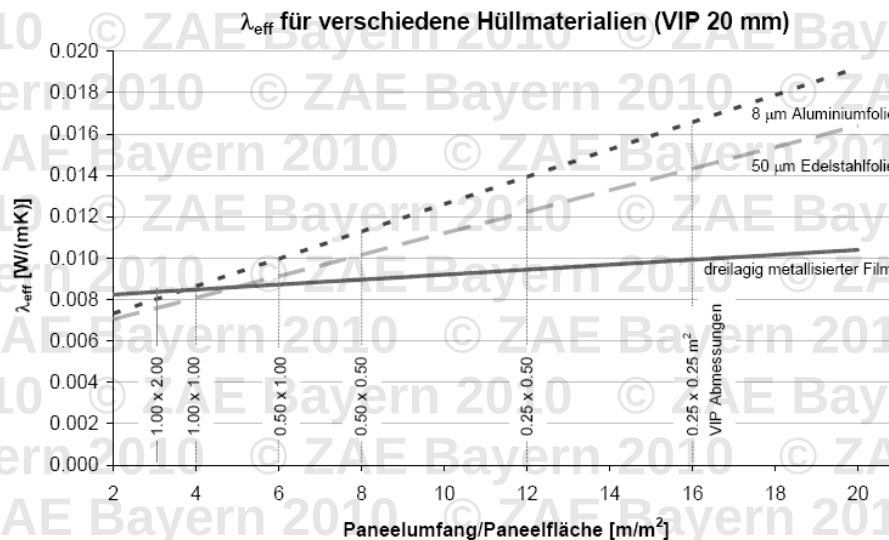
VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken bei VIP

■ Grafische Bestimmung über ein Nomogramm:

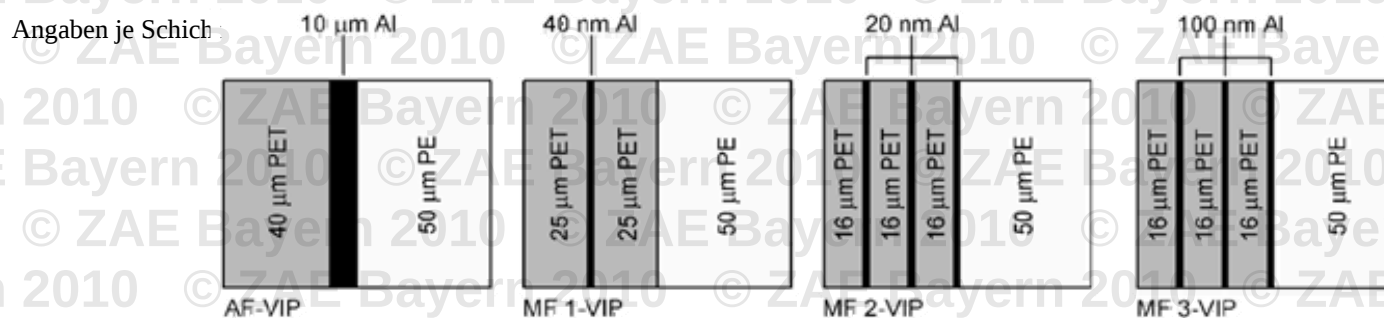
- Wärmedurchgangskoeffizient Ψ ,
- effekt. Wärmeleitfähigkeit.



Quelle: Willems

Wärmebrücken bei VIP

Einfluss der Hüllmaterialien:



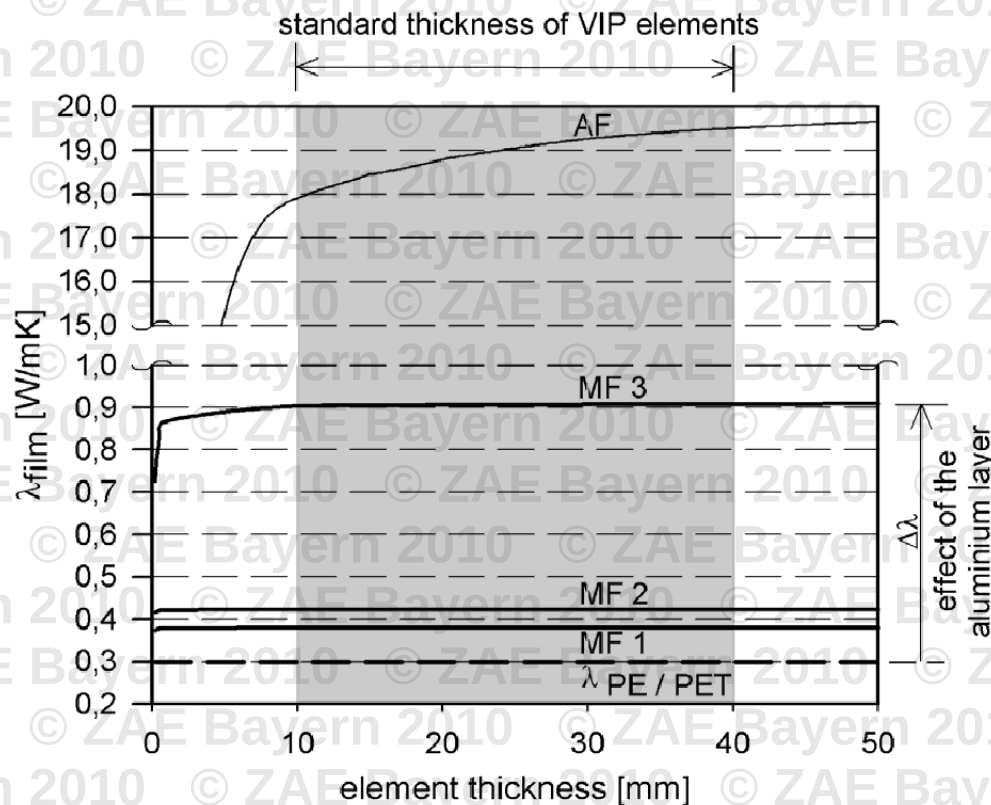
ψ [W/mK]	AF ($\lambda_{\text{film}} = \text{var.}$)	MF 1 ($\lambda_{\text{film}} = 0,38$)	MF 2 ($\lambda_{\text{film}} = 0,42$)	MF 3 ($\lambda_{\text{film}} = 0,90$)
d_{VIP} [mm]	No imperfections estimated			
10	0,049	0,011	0,011	0,020
20	0,047			0,017
30	0,042	0,010	0,010	0,014
40	0,038			0,013
	Aluminium-Verbundfolie	Metallisierte Polymerfolie	Metallisierte Polymerfolie	Metallisierte Polymerfolie

Angaben zu den angesetzten Übergangsbedingungen: bitte den angegebenen Quellen entnehmen (siehe Quellenverweise)

Quelle: Willems

Wärmebrücken bei VIP

- Durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit des Hochbarrierelaminats

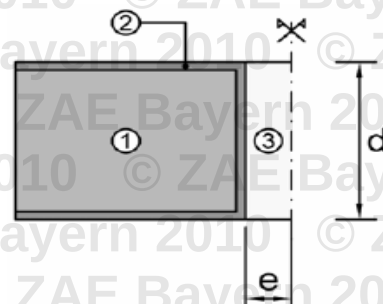


Quelle: Willems

Wärmebrücken bei VIP

Einfluss eines Luftspalts zwischen VIP:

- 1: Kernmaterial
- 2: Barriere
- 3: Luftspalt

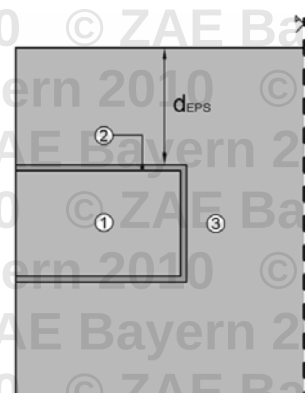


ψ [W/mK]	AF ($\lambda_{\text{eff}} = \text{var.}$)		MF 1 ($\lambda_{\text{eff}} = 0,38$)		MF 2 ($\lambda_{\text{eff}} = 0,42$)		MF 3 ($\lambda_{\text{eff}} = 0,90$)	
	e_{air} [mm]							
	d_{VIP} [mm]	2,5	5,0	2,5	5,0	2,5	5,0	2,5
10	0,054	0,058	0,016	0,021	0,016	0,021	0,025	0,027
20	0,053	0,058					0,021	0,024
30	0,047	0,052					0,019	0,022
40	0,043	0,049					0,017	0,020

Wärmebrücken bei VIP

■ Einfluss von Ummantelungen:

- 1: Kernmaterial
- 2: Barriere
- 3: EPS Ummantelung

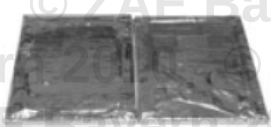


MF 1 ($\lambda_{\text{eff}} = 0,38$)			
d_{EPS} [mm]			
d_{VIP} [mm]	10	20	30
10	0,020	0,025	0,027
20	0,017	0,021	0,024
30	0,014	0,019	0,022
40	0,013	0,017	0,020

- weitere Ψ -Werte sind in der Fachliteratur verfügbar

Wärmebrücken bei VIP

■ Einfluss der Stoßfuge (Messwerte):

Probekörper	Gesamtdicke [mm]	Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} [mW/(mK)]	Linearer Wärmedurchgangskoeffizient ψ [W/(mK)]	Messbereich [mm × mm]	Anpressdruck [Pa]
Stoß: VIP, blank 	20	9,7	0,023	150 × 150	500
Stoß: VIP, einseitig kaschiert 	40	13,3	0,003	150 × 150	500
Stoß: VIP, beidseitig kaschiert 	50	16,0	0,009	150 × 150	500
Stoß: VIP, blank Fuge kaschiert 	40	13,2	0,003	150 × 150	500
Stoß: VIP, Nut-Feder- System 	40	14,2	0,006	150 × 150	500

Die Werte wurden über Messungen, die mit einem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät erfolgten, gewonnen.

Quelle: Willems



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken bei VIP

■ Quellenverweise - Teil 1:

- Willems, W. M.:
Vakuumdämmung, Bauphysik Kalender 2004
- Willems, W., Schild, K., Hellinger, G.:
Numerical Investigation on Thermal Bridge Effects in
Vacuum Insulating Elements
- Willems, W., Skottke, T.:
Lineare Wärmebrücken in vakuumgedämmten Konstruktionen,
Bauphysik 30, Ernst&Sohn Verlag, Berlin 2008
- Willems, W.:
Vakuumdämmung - eine Standortbestimmung, Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- Hoffman, C., Erb, M.:
VIP - Deklaration und Auslegung Wärmebrückenkatalog (2009),
Bundesamt für Energie BFE, Bern
- Eberlein, J.:
Wärmebrückenkompendium: VIP und "In Isothermen Veritas" Variotec
- Großklos, M., Diefenbach, N.:
Wärmebrücken in vorgefertigten Dämmelementen mit Vakuumdämmung
für die Bestandssanierung, Institut Wohnen und Umwelt GmbH



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



ViBau



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau

Wärmebrücken bei VIP

■ Quellenverweise - Teil 2:

- Fricke, J., Beck, A., Binder, M.:
Vakuum-Isolations-Paneele für Gebäude (2007), ZAE-Bayern
- Beck, A., Oswald, F.:
Auswirkungen von Wärmebrücken beim Einsatz hocheffizienter Vakuum-Isolationspaneelen am Bau, VIP-Bau: 2. Fachtagung "Erfahrungen aus der Praxis" (2005), Wismar
- Beck, A.:
Wärmebrücken - die planerische Herausforderung beim Einsatz von Vakuum-Wärmedämmelementen, VIP-Bau: 3. Fachtagung (2007), Würzburg
- Winkler, H.:
Einfluss von Wärmebrücken bei VIP-Konstruktionen, VIP-Bau: 1. Fachtagung (2003), Rostock-Warnemünde
- Cremers, J.:
Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle. Dissertation, TU München 2005
- 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



Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



VIP-BAU.DE

Vakuum-Isolations-Paneele am Bau



ZAE BAYERN

Vakuumdämmung im Bauwesen

Bauphysik

Teil 1/4: Wärmeschutz

Fragen?

Gefördert durch das



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

© ZAE Bayern