

Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle

Technologische, bauphysikalische
und architektonische Aspekte

JAN CREMERS

LEHRSTUHL FÜR GEBÄUDETECHNOLOGIE · PROF. THOMAS HERZOG



DISSERTATION

AUS DEM INSTITUT FÜR ENTWERFEN UND BAUTECHNIK
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN • FAKULTÄT FÜR ARCHITEKTUR

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Institut für Entwerfen und Bautechnik
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie

**Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im
Bereich der Gebäudehülle -
technologische, bauphysikalische und architektonische Aspekte**

Jan Cremers

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Hermann Kaufmann

Prüfer der
Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

Die Dissertation wurde am 24. Oktober 2005 bei der Technischen
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur
am 30. Januar 2006 angenommen.

Das Bauen, das letzten Endes ein materieller Kampf gegen die zerstörenden Kräfte der Natur ist, verpflichtet, aus den Fortschritten der Wissenschaft, den Entdeckungen und Erfindungen der Technik die Konsequenzen zu ziehen, um durch alle erreichbaren Hilfsmittel und Methoden, die neuen Gesetze der Harmonie zwischen Masse und Raum zu erkennen.

Konrad Wachsmann¹

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand nach einer intensiven berufspraktischen Phase als Architekt während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie von Professor Thomas Herzog in dem Bestreben, die erneute Zeit an der Universität für eine vertiefte Beschäftigung mit den technologischen Aspekten des Bauens im Sinne einer weiteren Qualifikation für das Berufsbild Architekt bestmöglich zu nutzen.

Besonderer Dank gilt Herrn Professor Thomas Herzog für das kontinuierlich große Interesse an der Arbeit, für die Betreuung und die Übernahme des Hauptreferates und das damit entgegengebrachte Vertrauen. Er bot mit seinem Lehrstuhl, den dort stattfindenden, anregenden Diskussionen, seiner Person und seinem Werk einen für die Arbeit entscheidenden Rahmen.

Herrn Professor Gerhard Hausladen danke ich für die engagierte Begleitung der Arbeit als Co-Referent.

Robert Rieger hat als verantwortlicher Werkstattleiter des Lehrstuhls viel Zeit und Erfahrung in die Herstellung der Prototypen investiert, wofür ihm besonderer Dank gebührt.

Von meinen weiteren Kollegen am Lehrstuhl möchte ich besonders Caroline Illinger, Dr.-Ing. Daniel

Westenberger und Peter Bonfig für die vielen Stunden der diskursiven Auseinandersetzung danken, die ich als sehr fruchtbar empfunden habe.

Desweiteren danke ich Dr.-Ing. Werner Lang für die stets äußerst angenehme Zusammenarbeit und für den allzeit verfügbaren, wertvollen Rat.

Dr.-Ing. Helge Hartwig aus unserem Institut, Jørgen M. Schulz von der Technischen Universität Dänemark (DTU) und Dr. Peter Nitz vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) waren insbesondere für die thermischen Simulationen und deren Einschätzung eine große Hilfe, wofür ihnen ebenfalls großer Dank gebührt.

Tim Wessbecher danke ich sehr für die Hilfe beim Bau der Formen für die Kunststofflamelle.

Zu Dank verpflichtet bin ich außerdem folgenden Herren, Firmen und Einrichtungen für zahlreiche informative Gespräche und teilweise materielle Unterstützung der Arbeit:

Donald Beck, Nanogel / Cabot
Dr. Roland Caps, va-Q-tec AG
Gregor Erbenich, Porextherm
Dr. Ulrich Heinemann, ZAE-Bayern
Josef Kloo, Microtherm
Johannes Maier, B&O Hightex
Stephan Paetz, SAES Getters
Hubert Schwab, ZAE-Bayern

Hinweise zum Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist nach Kenntnisstand des Verfassers die erste umfassende Aufbereitung und Darstellung des Themenkomplexes ‚Vakuum-Dämmsysteme‘ aus Sicht eines Architekten im Rahmen eines Promotionsvorhabens.

Sie besteht aus einzelnen Teilen, die in ihrer Zielsetzung in horizontale und vertikale Betrachtungen unterschieden werden können, wie dies Abb. 1 zeigt:

Erstere haben die Darstellung der jeweiligen thematischen Breite zum Ziel (Teile I-IV), während letztere aus dieser Kenntnis heraus einzelne ausgewählte Aspekte und Gedanken zum Anlass nehmen, möglichst weit in die Tiefe vorzudringen (Teile V-VII).

Neben dem knappen Gesamtinhaltsverzeichnis auf der folgenden Seite findet sich mit dem Ziel einer besseren Orientierung vor jedem Teil ein eigenes Inhaltsverzeichnis, das jeweils die ersten vier Gliederungsebenen abbildet.

Zwei einzelne Anhänge, die übergeordneten Charakter haben und sich daher nicht schlüssig in den Aufbau der Arbeit integrieren lassen, schließen sich einer Zusammenfassung mit einem Ausblick und dem zentralen Literaturverzeichnis an.

Soweit nicht anders vermerkt, stammen alle Zeichnungen, Diagramme, Tabellen, Fotografien und anderen Abbildungen vom Verfasser. Alle diese unterschiedlichen Darstellungen werden einheitlich als Abbildungen (Abb.) bezeichnet und sind teilbezogen nummeriert.

Die Anmerkungen finden sich jeweils zugeordnet und gesammelt am Ende der einzelnen Teile.

Wird hierin auf eine im Literaturverzeichnis gelistete Quelle verwiesen, so wird in den Anmerkungen eine (für die Benutzung mit dem Literaturverzeichnis) eindeutige, aber verkürzte Darstellungsform gewählt (in der Regel Autor, Titel und Jahr) mit dem Ziel, die den Teilen zugeordneten Anmerkungen nicht unnötig durch redundante Informationen zu überfrachten.

Anmerkung

1. aus Wachsmann, Konrad:
Wendepunkt im Bauen, 1959, S. 12

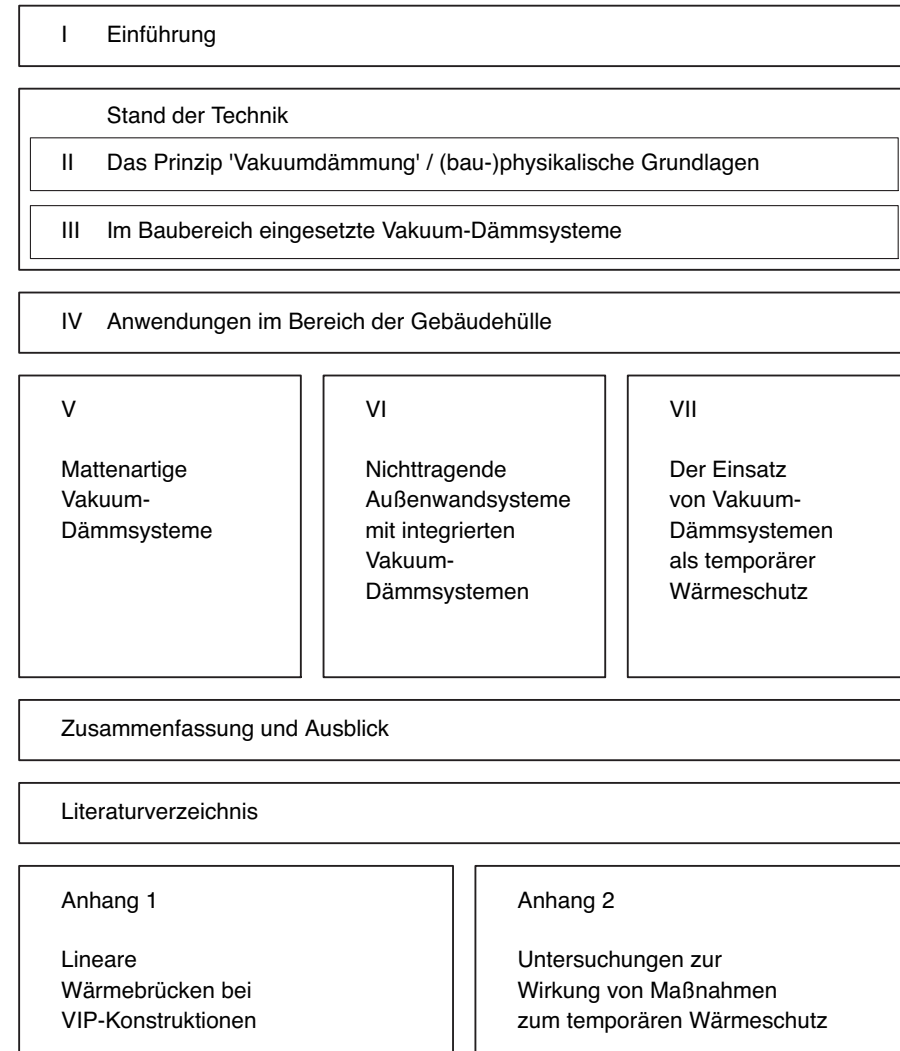


Abb. 1 Aufbau der Arbeit

Gesamtinhaltsverzeichnis

Inhalt	Seite	Inhalt	Seite
Teil 1 Einführung	7	Teil 6 Nichttragende Außenwandsysteme mit integrierten Vakuum-Dämmsystemen	141
1 Begriffe und begrifflicher Kontext	8	1 Ausgangslage	142
2 Die Wärmedämmung von Gebäuden	9	2 Lösungsansätze	142
3 Aufgeworfene Fragestellungen	12	3 Weitere Anmerkungen zu den vorgestellten Varianten	143
Teil 2 Das Prinzip der ‚Vakuumdämmung‘ und die physikalischen Grundlagen	15	4 Beispielhafte Varianten	144
1 Funktionsweise von Wärmedämmstoffen	16	5 Resumee und Ausblick	156
2 Das Prinzip der Vakuumdämmung	25	Teil 7 Der Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen als temporärer Wärmeschutz	159
Teil 3 Im Baubereich eingesetzte Vakuum-Dämmsysteme	41	1 Vorüberlegungen	160
1 Typologien der zum Einsatz kommenden Systeme	42	2 Untersuchungen verschiedener Lamellentypen	166
2 Vacuum-Insulation-Panels (VIP)	45	3 Abschätzung des Wirkungspotenzials von temporärem Wärmeschutz	175
3 ‚Vakuum-Verglasung‘	70	4 Detailliertere Untersuchungen und prototypische Entwicklung einzelner Lamellen	176
4 Thermische Messverfahren für Vakuum-Dämmsysteme	72	Zusammenfassung und Ausblick	193
Teil 4 Anwendungen im Bereich der Gebäudehülle	79	Literaturverzeichnis	197
1 Wo können Vakuum-Dämmsysteme eingesetzt werden?	80	Anhänge	
2 Betrachtete Beispielanwendungen - Übersicht	95	A1 Lineare Wärmebrücken bei VIP-Konstruktionen	205
3 Zur Anwendung lichtundurchlässiger Systeme	98	1 Anlass für die Untersuchungen	206
4 Zur Anwendung lichtdurchlässiger Systeme	106	2 Untersuchungsaufbau	206
5 Zusammenfassung der gegebenen Planungshinweise	107	3 Ergebnisse	216
6 Ausblick	108	4 Weitere Verwendung der Ergebnisse	217
Teil 5 Mattenartige Vakuum-Dämmsysteme	113	A2 Untersuchungen zur Wirkung von Maßnahmen zum temporären Wärmeschutz	221
1 Vorüberlegungen	114	1 Basis-Szenario	222
2 Ein neuer Ansatz: kontinuierliche Herstellung von VIP	114	2 Simulationsergebnisse	225
3 Untersuchungen zur Geometrie	117	3 Schlussbetrachtungen zu diesem Teil	245
4 Wärmetechnische Untersuchungen der vorgeschlagenen Vakuumdämmungsmatten	120		
5 Zusammenführung der Geometrieuntersuchungen mit den Simulationsergebnissen	129		
6 Weiteres Optimierungspotenzial	132		
7 Weitere Aspekte	133		

Inhaltsverzeichnis

Teil 1 Einführung

Abschnitt	Seite	
1	Begriffe und begrifflicher Kontext	8
1.1	„Isolierung“ und Dämmung	8
1.2	Vakuum	8
1.3	Dämmsystem	9
1.4	Gebäudehülle	9
2	Die Wärmedämmung von Gebäuden	9
3	Aufgeworfene Fragestellungen	12
Anmerkungen		13

Teil 1

Einführung

In dieser Einführung zur vorliegenden Arbeit sollen die in der Formulierung des Themas verwendeten Begriffe geklärt und die Zielsetzung der Arbeit dargelegt werden.

Außerdem wird der Versuch einer ersten Abschätzung des grundsätzlichen Potenzials der Arbeit unternommen.

1 Begriffe und begrifflicher Kontext

Im Sinne einer erforderlichen Schärfe und Eindeutigkeit erscheint es angebracht, die für diese Arbeit (einschließlich des Titels) relevanten Schlüsselbegriffe im Rahmen der Einführung so weit wie möglich zu definieren.

Die Definition der in dieser Einleitung nicht behandelten Begriffe erfolgt in den einzelnen Teilen, soweit dies notwendig scheint.

1.1 ‚Isolierung‘ und Dämmung

Der Verwendung des Begriffes ‚Isolierung‘ ist im üblichen deutschen Sprachgebrauch heterogen.¹

Im Zusammenhang mit konventioneller Wärmedämmung ist die Verwendung zwar weit verbreitet, aber aus Sicht des Autors für die vorliegende Arbeit nicht ausreichend

genau, da der hier betrachtete wirksame Energiestrom (Wärmeenergie) nicht unterbunden wird wie es der Begriff nahelegt, sondern nur eingeschränkt wird.

Im Englischen wird der analoge Begriff ‚isolation‘ nur im elektrischen Zusammenhang gebraucht (galvanic or electrical isolation). Wärmedämmung ist korrekt mit ‚thermal insulation‘ zu übersetzen, wofür es entymologisch im Deutschen keine Entsprechung gibt.

Hier fehlt eine vergleichbare Differenzierung zwischen zwei auf dasselbe lateinische Ursprungswort ‚insula‘ (Insel) zurückzuführenden Wortbedeutungen. Die phonetische Nähe des englischen ‚insulation‘ zum deutschen ‚Isolierung‘ hat im Verlauf von Übertragungen und Übersetzungen häufig zu verwirrenden und unkorrekten Verwendungen und teilweise unerfreulichen Wortneuschöpfungen geführt.

Nicht zuletzt auf diesen Zusammenhang ist es zurückzuführen, dass das Prinzip der Vakuumdämmung unter dem Begriff ‚Vakuuminisolierung‘ im deutschen Sprachgebrauch sehr häufig anzutreffen ist. Man könnte ihn daher als eingeführt und etabliert ansehen. Das gilt auch für den englischen Begriff des ‚Vacuum-Insulation-Panels‘ (VIPs), der im allgemeinen mit ‚Vakuuminisulationspaneel‘ übersetzt wird.

Vielleicht könnte man im Zusammenhang von Vakuumdämmung

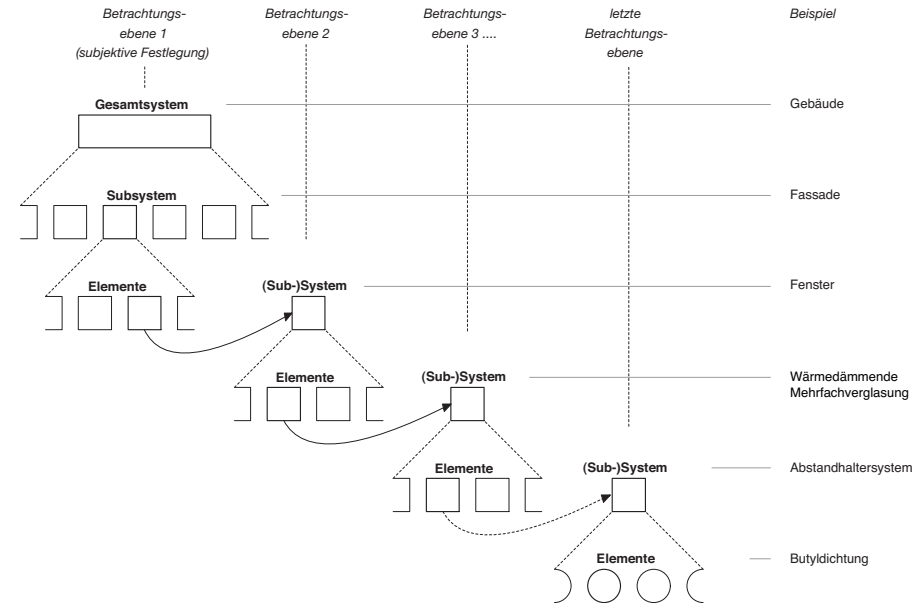


Abb. 1.1 Der Systembegriff (mit einem Beispiel), wie er der vorliegenden Arbeit zugrunde liegt.

tatsächlich am ehesten von ‚Isolierung‘ sprechen, da hier die wärmeren, energiereicheren Teilchen durch die Trennschicht des Vakuums wirklich nahezu ‚isoliert‘ werden, im Sinne der möglichen Bedeutung ‚Entkopplung‘.

Dennoch wird im Sinne begrifflicher Schärfe und Eindeutigkeit für die vorliegende Arbeit der deutsche Begriff ‚Isolierung‘ zugunsten des im Deutschen eindeutigen Ausdrucks (Wärme-) Dämmung vermieden, der aus Sicht des Autors die Bedeutung unmissverständlich auf eine Reduzierung des Energiestroms legt, denn eine wirkliche energetische Trennung kann selbst durch Vakuuminisulationspaneel nicht erreicht werden.

Entsprechend wird auch nicht von ‚Vakuuminisulationspaneelen‘ die Rede sein, sondern es wird - auch im Hinblick auf den Konsens mit einem maßgeblichen Anteil bereits vorhandener Literatur - der eindeutige, englische Ausdruck ‚Vacuum-Insulation-Panel‘ (VIP) verwendet.

1.2 Vakuum

Der Begriff ‚Vakuum‘, historisch durchaus umstritten², bedarf hier keiner besonderen Erklärung, da er heute weder mehrdeutig noch unscharf ist. Dennoch erscheint eine technische Definition insbesondere im Hinblick auf den Umgang mit Messgrößen geboten. Diese findet sich neben den physikalischen Grundlagen in Teil 2.

1.3 Dämmsystem

An diesem Begriff bedarf der Wort-anteil ‚System‘ einer näheren Betrachtung. Wie in Teil 2 ausgeführt, wirkt jedes Material in einem gewissen Maß wärmedämmend.

Unter Dämmsystemen sollen hier Materialkombinationen und -fügungen verstanden werden, die durch ihr Zusammenwirken als Ganzes vor allem die Aufgabe der Wärmedämmung erfüllen sollen. Dabei kann und sollte das Ergebnis des Systems in dieser Hinsicht besser sein als die Summe der Effekte der einzelnen Materialien. Was die vorliegende Arbeit anbelangt, erfolgt dies im Wesentlichen durch das Aufrechterhalten des Unterdruckes im System.

Dies bedingt eine sorgfältige Abstimmung der einzelnen ‚Komponenten‘ eines Systems. Der Begriff des ‚Systems‘ wird in der vorliegenden Arbeit gemäß üblicher Definitionen der naturwissenschaftlichen und technischen Systemtheorie verwendet, das heißt darunter wird jeweils eine „Gesamtheit von materiellen Objekten verstanden, die sich in einem ganzheitlichen Zusammenhang befinden“. ³

Dies findet ausdrückliche Erwähnung, da die Arbeit sehr verschiedene gestufte Betrachtungsabstände umfasst, auf denen jeweils Systeme anzutreffen sind, die hierarchisch ineinander greifen, siehe hierzu Abb 1.1.

Auf die gerade im Baubereich häufig anzutreffenden (Zwischen-) Begriffe wie ‚Bauteil‘, ‚Baukomponente‘ oder ‚Bausystem‘ wird in der vorliegenden Arbeit wegen der oben genannten, unterschiedlichen ‚Zoom‘-Stufen in besonderem Maße bestehender Gefahr der Unschärfe soweit wie möglich verzichtet.

1.4 Gebäudehülle

Versteht man ein Gebäude als einen Eingriff in die Natur, in dessen Verlauf ein raumbildendes Volumen künstlich geschaffen wird, so lässt sich seine ‚Hülle‘ als die Summe aller Grenzflächen dieses Volumens definieren. ⁴

2 Die Wärmedämmung von Gebäuden

Die Schaffung eines geeigneten Temperatur - und Feuchtigkeitsmilieus im Gebäudeinneren und der dazu notwendige Wärme- bzw. Kälteschutz gehört zu den Kernfunktionen der Gebäudehülle, siehe Abb. 1.2, wobei eine im Vergleich zu anderen Anforderungen besonders starke Abhängigkeit von den von außen wirksamen, lokalen klimatischen Bedingungen besteht.

Die Befriedigung der physiologischen Bedürfnisse im Gebäudeinneren bedingt Energieströme, die im Hinblick auf die Gebäudebestandssituation in der Summe einen erheblichen Verbrauch an Energieressourcen bedeuten.

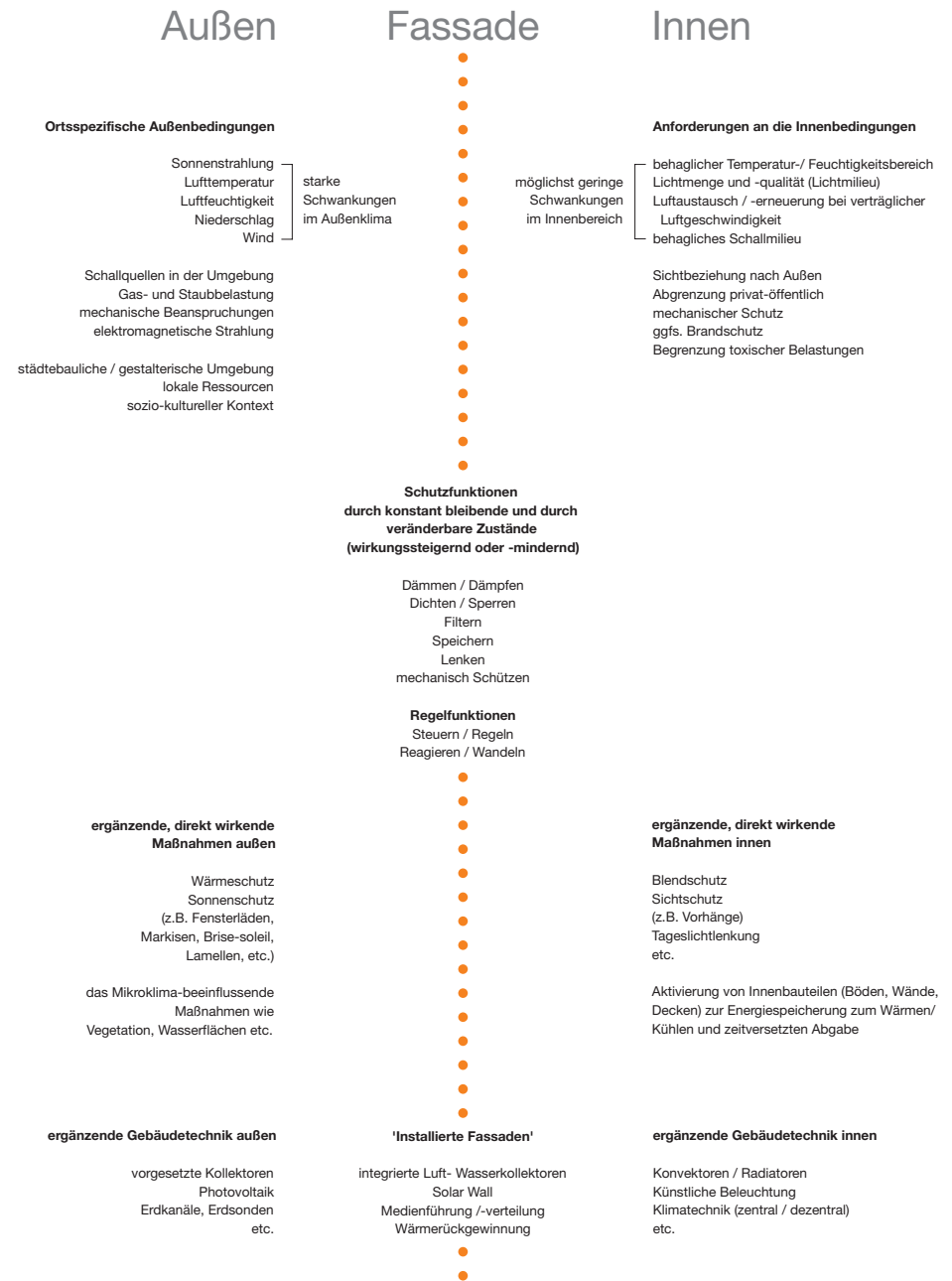


Abb. 1.2 Schutz- und Regelfunktionen der Fassade in Abhängigkeit von externen Bedingungen und internen Anforderungen ⁵

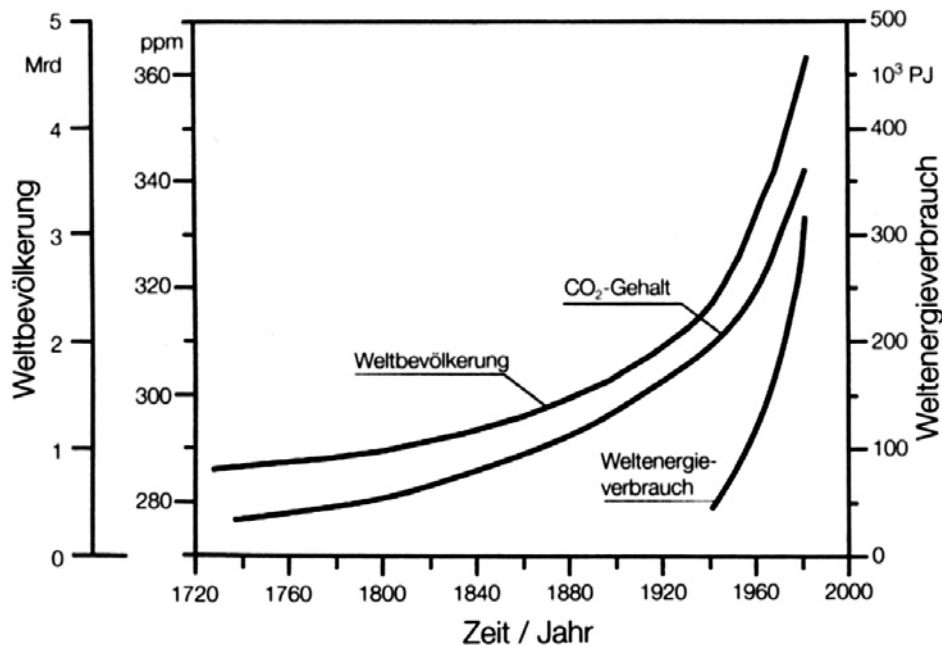


Abb. 1.3
Entwicklung der Weltbevölkerung, des Energieverbrauches und des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre⁶

Abb. 1.3 verdeutlicht dabei den Zusammenhang zwischen der globalen Bevölkerungsentwicklung, dem weltweiten Energieverbrauch und dem CO₂-Gehalt der Atmosphäre.

Der derzeitige Energieverbrauch in Gebäuden hat am Gesamtenergieverbrauch in Deutschland ungefähr einen Anteil von 30%. Davon fließen ca. 75% in die Beheizung.⁷ Eine genauere Zusammenstellung findet sich in Abb. 1.5.

Ca. 80% der mehr als 15 Millionen deutschen Wohngebäude sind bis Mitte der achtziger Jahre mit sehr geringem Wärmeschutz erbaut worden. Umgerechnet auf den

Quadratmeter ergibt sich ein flächenbezogener Verbrauch von 23 Liter Heizöl (bzw. entsprechender anderer Energieträger) im Durchschnitt.⁸

Der tatsächliche Verbrauch hängt neben den Außenbedingungen und den baulichen Gegebenheiten vor allem von den Nutzer-Anforderungen ab: Fortschritte in der Bautechnik, im durchschnittlichen Lebensstandard, aber auch gestiegene Ansprüche an den Komfort, haben dazu geführt, dass die durchschnittlichen winterlichen Wohnraumtemperaturen stetig angestiegen sind (vergl. Abb. 1.4).

Die weit verbreitete Unkenntnis über die Zusammenhänge zwischen der baulichen und anlagentechnischen Situation, den Außenbedingungen, den inneren Anforderungen und dem resultierenden Energieverbrauch führen zu dem derzeit in der Umsetzung befindlichen Vorhaben⁹ der Einführung eines sogenannten ‚Energiepasses‘ für Gebäude, einem Zertifikat, wie es beispielsweise zur Kennzeichnung von Kühlschränken seit langem Anwendung findet.

Die vergangenen drei Jahrzehnte waren zudem durch eine kontinuierliche Verschärfung der gesetzlichen Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz geprägt (vergl. Abb. 1.6), eine Entwicklung, die sich allerdings vermutlich nicht in dem Maße fortsetzen wird.¹⁰

Doch bereits das jetzt erreichte Niveau und der nichtlineare Zusammenhang zwischen Dämmschichtstärke und Dämmvermögen führen zu einem gesteigerten Interesse an effektiveren Lösungen für den Wärmeschutz, die geringere Außenwandstärken ermöglichen.

Dies gilt in erhöhtem Maße für die Sanierungen von Altbestand, da in diesem Bereich ein deutlich höherer Heizbedarf die Regel ist und daher ein entsprechend größeres Einsparpotenzial besteht.

Jeder Neubau erhöht zudem prinzipiell den kumulierten Gesamtenergiebedarf durch Erstellung und

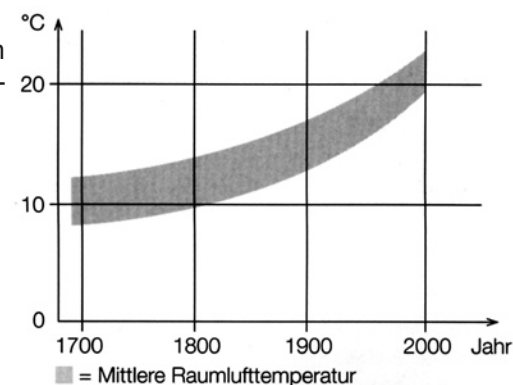


Abb. 1.4
Entwicklung der winterlichen Raumlufttemperaturen¹¹

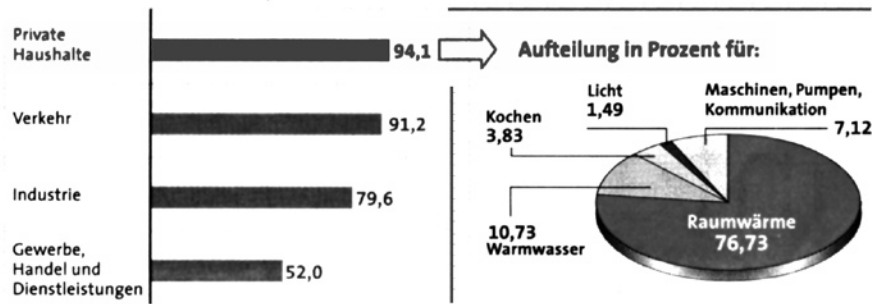


Abb. 1.5
 Die verschiedenen Bereiche, in denen Energie verbraucht wird (Angaben für Deutschland, in Mill. t Steinkohleeinheiten im Jahr 2002) ¹²

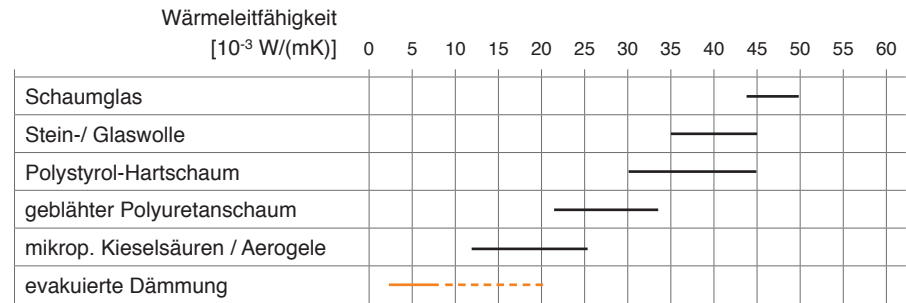


Abb. 1.7
 Wärmeleitfähigkeit verschiedener Dämmstoffe und Dämmsysteme (Auswahl).

Material	Verbrauch im Baubereich im Jahre 2001	
	...in Deutschland in m ³	...in Europa in m ³
Mineralfaser	16.254.000	64.804.000
EPS	9.550.000	28.396.000
PU / Polyisocyanurate	1.600.000	5.864.800
XPS	1.100.000	3.900.900
Perlite	260.000	655.370
Schaumglas	130.000	296.160
Vermiculite	44.000	71.820

Abb. 1.8
 Verbrauch an verschiedenen Dämmstoffen (Auswahl) für den Baubereich im Jahre 2001. ¹³

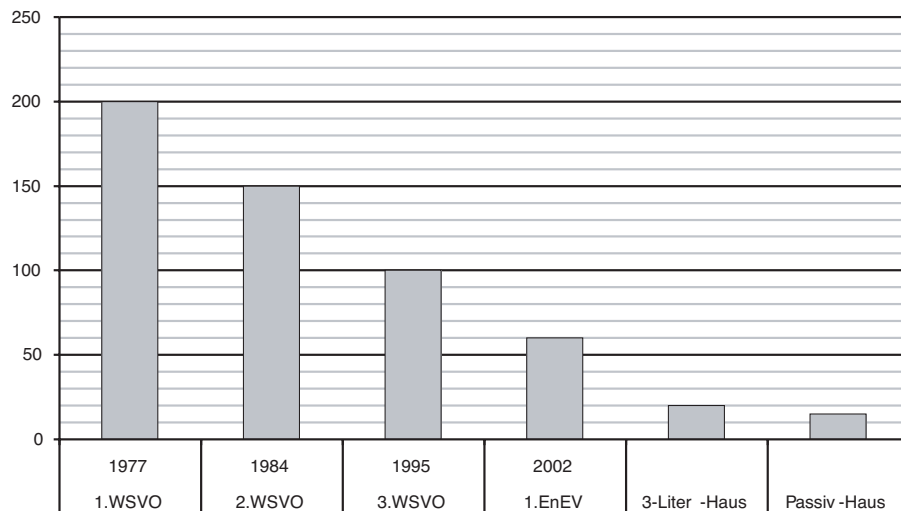


Abb. 1.6
 Entwicklung der gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz, ungefährender maximal zulässiger Jahresprimärenergiebedarf [kWh/m²]

Verbrauch. Das gilt nur dann nicht, wenn für die Neubaumaßnahme gleichzeitig ein entsprechender Rückbau stattfindet, was in der Regel aber nicht der Fall ist.

Somit führen in diesem engen Sinn nur Verbesserungen der Altbausubstanz zu wirklichen Energieeinsparungen.

Die Menge an Dämmstoff, die jährlich verbaut wird, ist nicht gering. Das Research-Unternehmen IAL

Consultans¹⁴ beziffert den Bedarf an konventionellen Dämmstoffen im Baubereich in Europa mit über 109 Mio. m³, siehe auch Abb. 1.8.

Nahezu 30% dieser Menge werden in Deutschland eingesetzt.¹⁵

Im Jahre 2002 wurden in Deutschland laut Angaben der Firma Porextherm Dämmstoffe GmbH (Kempten) ungefähr folgende Mengen verschiedener Fassadenkonstruktionen erstellt¹⁶:

- 32 Mio. m² Wärmedämmverbundsysteme (WDVS), davon mehr als 90% unter Verwendung von Mineralwolle oder Polystyrol, mit einer durchschnittlichen Dämmstoffstärke von ca. 100 mm (U-Wert von ca. 0,25 W/m²K)
- 18 Mio. m² vorgehängte hinterlüftete Fassaden
- 0,5-1 Mio. m² Pfosten-Riegel-Fassaden

3 Aufgeworfene Fragestellungen

Vakuum-Dämmsysteme verfügen über äußerst geringe Wärmeleitfähigkeiten, wie Abb. 1.7 verdeutlicht. Dies lässt sie für den Einsatz im Baubereich sehr interessant erscheinen.

Die bisher verfügbaren Produkte befinden sich allerdings noch in einem mehr oder weniger frühen Entwicklungsstadium.

Obwohl sich namhafte Institutionen¹⁷ und zahlreiche Firmen seit mindestens einer Dekade intensiv mit dem Thema auseinandersetzen, hier ist zuvorderst die wegberaubende Arbeit des ZAE-Bayern unter der Führung von Prof. Dr. Jochen Fricke zu nennen, gibt es bislang keine zusammenfassende Darstellung der Thematik aus der Sicht eines Architekten.¹⁸

Eine solche umfassende Aufbereitung und Darstellung des aktuellen

Standes der Technik bildete somit einen wesentlichen Kern und Ausgangspunkt für die vorliegende Arbeit, siehe Teile 2 und 3.

Eine weitere Aufgabe bestand darin, die Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle mit zwei wesentlichen Zielsetzungen zu systematisieren (Teil 4):

1. Erfassung des größtmöglichen Anwendungsspektrums hinsichtlich Art und Zweck, insbesondere unter Einschluss der Möglichkeiten, die über die einfache Substitution konventioneller Dämmstoffe durch vakuumdämmende Systeme hinausgehen

2. Aufbereitung der wesentlichen Kriterien und Charakteristika für den planenden Architekten, um ihn in die Lage zu versetzen, Vakuum-Dämmsysteme bautechnisch richtig und sinnvoll einsetzen zu können

Sind in Kenntnis dieser Anwendungsmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen darüber hinaus Verbesserungen oder grundsätzlich andere Wege vorstellbar, um wesentliche der aufgezeigten Nachteile zu überwinden?

Dieser Fragestellung widmen sich die Teile 5 bis 7, die - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - einzelnen ausgewählten Aspekten gleichsam auf den Grund gehen.

In Teil 5 wird hierzu ein neuartiger Ansatz des Verfassers vorgestellt und erörtert, mit dem grundlegende Nachteile von Vakuum-Isolationssystemen, die sich aus der üblichen diskontinuierlichen Herstellung ergeben, überwunden werden könnten.

Bisherige Anwendungen von Vakuum-Dämmsystemen beschränken sich in der Regel auf die Substitution konventioneller Dämmstoffe in üblichen Außenwandaufbauten. Doch wie könnten Konstruktionen aussehen, die einem umgekehrten Ansatz folgen und aus den speziellen Eigenschaften von Vakuum-Dämmsystemen entwickelt sind? Dieser Frage widmet sich Teil 6 am Beispiel nichttragender Außenwandkonstruktionen.

Eine weitere, aus den systematischen Überlegungen in Teil 4 resultierende Frage bestand darin, ob und mit welchem Potenzial solche Dämmsysteme zum temporären Wärmeschutz herangezogen werden können. Nach einer durchgeführten, grundlegenden Potenzialabschätzung solcher Maßnahmen, die gedämmte Manipulatoren zu einfachen, konventionellen Systemen in Vergleich bringt (Anhang 2), wurden in Teil 7 vakuum-gedämmte Lamellen als Beispiel hierfür genauer betrachtet und in zwei Varianten bis zu einem frühen Prototypstadium entwickelt.

Anhang 1 setzt sich mit dem Problem linearer Wärmebrücken in

Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen in einer Parameter-Studie auseinander. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den Folgen für mehrschichtige Wandaufbauten und nicht auf der Ebene der Systeme selbst.

Anmerkungen

1. Lt. Duden ‚Das Große Fremdwörterbuch‘; Mannheim: Dudenverlag, 1994, S. 666 leitet sich das Wort ‚isolieren‘ aus dem italienischen ‚isolare‘ ab, es beinhaltet das Wort ‚isola‘ (Insel), daher die eigentliche Bedeutung ‚zur Insel machen‘. (Über das lateinische Ursprungswort ‚insula‘ lässt sich bis heute der Zusammenhang mit dem englischen ‚insulation‘ herstellen.)

Die heutige Bedeutung ist laut o.g. Quelle ‚einen Isolator anbringen‘, wobei ein Isolator definiert wird als ‚ein Stoff, der Energieströme schlecht oder gar nicht leitet‘.

Diese über den elektrischen Wirkungszusammenhang hinausgehende Bedeutung lässt eine Verwendung des Begriffes für einen Wärmedämmstoff durchaus möglich erscheinen.

2. vergl. Ausführungen in Teil 2, Abschnitt 2.2.3.

3. zu ‚System‘ gemäß ‚Meyers Großes Taschenlexikon in 24 Bänden‘; Bibliografisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich; Ausgabe 1983

4. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Teil der Gebäudehülle, der der Außenluft ausgesetzt ist, also dem, was man - vereinfacht - als Dach und Fassade bezeichnen kann. Der erdberührende Bereich der Gebäudehülle wird in der vorliegenden Arbeit weitgehend ausgeklammert, da für die hier erfolgte Untersuchung die Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen aus diversen Gründen nicht von vorrangigem Interesse zu sein scheint. Dieser Zusammenhang wird in Teil 4 erörtert.

5. Darstellung von Herzog, Thomas und Cremers, Jan aus: Herzog, Krippner, Lang: Fassadenatlas (2004), S. 18

6. vergl. Bonk, Michael; Anders, Frank: Reihe Schadenfreies Bauen, Band 32, Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz (2004), dort Abb. 3, S. 13

7. vergl. Erbenich, Gregor: Anwendungen von VIP im Bauwesen (2003), S. N4

8. vergl. Vorholz, Fritz: Gütesiegel für Heim und Heizung. Aus DIE ZEIT, Nr. 46, 4. Nov. 2004, S. 26

9. Gemeint ist die Einführung der Energie-Einsparverordnung (EnEV) 2006 als Nachfolge der EnEV 2002 und 2004, die als Umsetzung der europäischen Richtlinie 2002/91/EG, der sog. Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), derzeit geplant wird und die bis 04.01.2006 in nationales Recht umzusetzen ist.

10. Die EnEV 2006 soll nach derzeitigem Diskussionsstand die konkreten Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz gegenüber dem Standard der EnEV 2002 nicht weiter anheben, sehr wohl aber diejenigen an die Anlagentechnik und die Verbrauchsquellen Kälteerzeugung und künstliche Beleuchtung.

11. vergl. Bonk, Michael; Anders, Frank: Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz (2004), dort Abb. 1, S. 11

12. durch den Verfasser grafisch modifizierte Darstellung, entnommen aus Vorholz, Fritz: Gütesiegel für Heim und Heizung. Aus DIE ZEIT, Nr. 46, 4. Nov. 2004, S. 26

13. vergl. Erbenich, Gregor: Vacuum Insulation Panels in Building and Construction Applications (2003), Folie 5-6

14. Das englische Unternehmen gehört zur Business Research Group, siehe <http://www.brg.co.uk> <02.2005>

15. vergl. Erbenich, Gregor: Anwendungen von VIP im Bauwesen, Firma Porextherm-Dämmstoffe GmbH, Kempten; Rostock (VIP-Bau), 2003, Tagungsband, S. N3

16. ebd.

17. Hier sind v.a. folgende Einrichtungen zu nennen (Auswahl):

- Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), <http://www.zae-bayern.de>
- Faunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg, <http://www.ise.fhg.de/>
- Eidgenössische Materialprüfungsanstalt, CH-Dübendorf, <http://www.empa.ch/>
- Institut für Energie, Fachhochschule beider Basel (FHBB), CH-Muttenz, <http://www.fhbb.ch>

18. Am ehesten werden einer solchen Anforderung die seit September 2005 vorliegenden Abschlussberichte des IEA-Verbundprojektes ‚HiPTI - High Performance Thermal Insulation, IEA/ECBCS Annex 39‘ gerecht: Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-Components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), beteiligte Firmen und Institutionen: EMPA - Schweiz, ZAE-Bayern - Deutschland, NRC - Canada, CSTB - Frankreich, Fraunhofer IVV -

Deutschland, TU Delft - Niederlande, Dr. Eicher+Pauli AG - Schweiz, und Vacuum Insulation in the Building Sector (Subtask B), beteiligte Firmen und Institutionen: FHBB - Schweiz, EMPA - Schweiz, ZAE-Bayern - Deutschland, TU Delft - Niederlande, KTH Stockholm - Schweden, Dr. Eicher+Pauli AG - Schweiz.
Beide Reports sind als Online-Veröffentlichungen über www.vip-bau.ch verfügbar <09.2005>

Inhaltsverzeichnis

Teil 2

Das Prinzip der ‚Vakuumdämmung‘ und die physikalischen Grundlagen

Abschnitt	Seite	Abschnitt	Seite		
1	Funktionsweise von Wärmedämmstoffen	16	2	Das Prinzip der Vakuumdämmung	25
1.1	Wärmetransport	16	2.1	Grundlagen	25
1.1.1	Wärmemenge	16	2.1.1	Gasförmiger Zustand der Materie	25
1.1.1.1	Wärmestrom	16	2.1.2	Zusammensetzung der Atmosphäre	25
1.1.1.2	Wärmestromdichte	16	2.1.3	Luftdruck und Partialdruck	25
1.1.2	Wärmeleitung	16	2.1.3.1	Luftdruck	25
1.1.3	Wärmestrahlung	16	2.1.3.2	Partialdruck	25
1.1.4	Wärmeströmung (Konvektion)	17	2.1.4	Relevante Gasgesetze	26
1.1.5	Gasstransport durch Druckgefälle	17	2.1.4.1	Die allgemeine Zustandsgleichung der Gase	26
1.2	Wärmeleitfähigkeit	17	2.1.4.2	Das Boyle-Mariottesche Gesetz	26
1.2.1	Weitere Begriffe und Definitionen	17	2.1.4.3	Die Gay-Lussacsche Gesetze	26
1.2.1.2	Wärmedurchlasskoeffizient	17	2.1.4.4	Das Daltonsche Gesetz	26
1.2.1.3	Wärmedurchlasswiderstand	18	2.1.4.5	Das Avogadrosche Gesetz	26
1.2.2	Verhältnis der Wärmeübertragungswege	18	2.1.4.6	Mol und Molare Masse	26
1.2.3	Zusammenhang im Falle porösen Materials	18	2.1.4.7	Molares Normvolumen	26
1.2.3.1	Wärmetransport in porösem Dämmstoff	19	2.1.4.8	Das allgemeine Gasgesetz	26
1.2.3.2	Der Einfluss des Feuchtegehaltes	19	2.1.5	Dichte der Luft	27
1.2.3.3	Der Einfluss des molekularen Aufbaus	19	2.1.6	Mittlere freie Weglänge	27
1.2.3.4	Strategien zur Optimierung von porösem Dämmstoff	19	2.1.7	Wärmeübertragung im Gasraum	27
1.3	Der bauliche Zusammenhang	20	2.1.8	Wärmeübertragung in evakuierten Dämmstoffen	29
1.3.1	Weitere Grundlagen und -begriffe	20	2.1.8.1	Porosität und Zellgasdruck	29
1.3.1.1	Wärmeübergangswiderstand und -koeffizient	20	2.1.8.2	(Infrarot-)Strahlungsdurchlässigkeit	30
1.3.1.2	Wärmedurchgangswiderstand und -koeffizient	20	2.1.8.3	Offenzelligkeit bei evakuierten Dämmstoffen	30
1.3.1.3	Wärmedurchgangskoeffizient und Dämmstoffstärke	21	2.2	Vakuum	31
1.3.1.4	Wasserdampfteildruck	21	2.2.1	Einheiten	31
1.3.1.5	Wasserdampf-sättigungsdruck	21	2.2.2	Kräfte auf evakuierte Platten	31
1.3.1.6	Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand	21	2.2.3	Exkurs: Von der Beschäftigung mit dem Vakuum	32
1.3.1.7	Wasserdampf-Diffusionsstromdichte	21	2.2.3.1	Das Phänomen Vakuum	32
1.3.2	Der Temperatur- und Dampfteildruckverlauf	21	2.2.3.2	Vakuum(luft-)pumpen	34
1.3.3	Wärmebrücken	22	2.2.3.3	Vakuum-Messgeräte	34
1.3.3.1	Berechnung von Wärmebrücken, U-Wert	22	2.2.4	Vakuum - weitere Anwendungen	35
1.3.3.2	Zusammenhang mit der Dämmstärke	23			
1.3.3.3	Konstruktive Problemstellung	24	Anmerkungen		37
1.3.4	Ziele und Auswirkungen von Wärmedämm-Maßnahmen	24			
1.3.4.1	Funktionen des Wärmeschutzes	24			

Teil 2

Das Prinzip der ‚Vakuumdämmung‘ und die physikalischen Grundlagen.

1 Funktionsweise von Wärmedämmstoffen

Kerneigenschaft eines Wärmedämmstoffes ist die möglichst umfassende Unterbindung des Wärmetransports.

Die für das Verständnis der Funktionsweise vakuumdämmender Systeme relevanten Zusammenhänge sollen im Folgenden dargestellt werden. Hinsichtlich der speziellen Gesetzmäßigkeiten zur Wärmeübertragung im Gasraum siehe Abschnitt 2.1.7 in diesem Teil.

Die hier erläuterten Begriffe zum Überthema ‚Wärmeschutz‘ sind in DIN 4108 - Teil 1, 2 und 3 sowie in DIN EN ISO 7345 geregelt und ausführlich beschrieben. Da die meisten dieser Begriffe in der vorliegenden Arbeit immer wieder von großer Bedeutung sind, soll hier dennoch eine möglichst knappe, einführende Darstellung erfolgen, zumal einige dieser grundlegenden Festlegungen in der Literatur durchaus widersprüchlich gebraucht werden.

1.1 Wärmetransport

Wärmetransport ist eine Form von Energiefluss und findet stets von

der wärmeren, und damit energiereicheren, zur kälteren Seite statt (Abb. 2.1).

Für eine betrachtete Schicht ist die übertragende Energiemenge pro Zeit abhängig von

- der Temperaturdifferenz zwischen den angrenzenden Seiten
- der Weglänge (Schichtdicke)
- der Wärmeleitfähigkeit der die Schicht bildenden Materialien.

Der Transport von Wärme erfolgt grundsätzlich über die drei Wege

- Wärmeleitung (Gasleitung λ_g und Festkörperleitung λ_s),
- Wärmestrahlung λ_r und
- Wärmeströmung λ_v (Konvektion).

Der Anteil dieser drei Mechanismen (Abb. 2.2) am Gesamtenergietransport ist unter anderem von Temperatur und Material abhängig.¹

1.1.1 Wärmemenge

Die Wärmemenge Q wird als Energieform in der Einheit Joule angegeben.

1.1.1.1 Wärmestrom

Der Wärmestrom Φ ist definiert als die pro Zeiteinheit übertragene Wärmemenge.

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [\text{W}]$$

1.1.1.2 Wärmestromdichte

Die Wärmestromdichte q kann pro Fläche A oder je Länge l angegeben werden:

$$q_A = \frac{\Phi}{A} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

bzw.

$$q_l = \frac{\Phi}{l} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}} \right]$$

1.1.2 Wärmeleitung

Für den Wärmetransport in festen Körpern und stehenden Flüssigkeiten ist die Wärmeleitung maßgeblich. Sie erfolgt zum einen durch thermische Gitterschwingungen, zum anderen durch frei bewegliche Elektronen, wobei sich der Energieträger selbst nicht bewegt.

In Dämmstoffen kommt es während dieses Prozesses zu Wärmeleitung über die in den Poren befindlichen Gase und zu Festkörperleitung über das Porengerüst.

1.1.3 Wärmestrahlung

„Die Wärme- oder Temperaturstrahlung ist die Ursache für einen Wärmetransport, der durch einen Austausch elektromagnetischer Strahlungsenergie zwischen zwei Körperoberflächen erfolgt, die

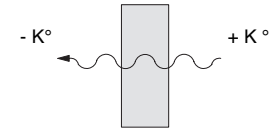


Abb. 2.1
Wärmetransport²

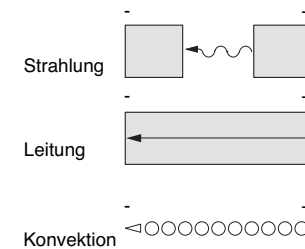


Abb. 2.2
Grundprinzipien der Wärmeübertragung

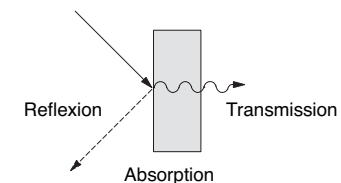


Abb. 2.3
Transport von Strahlungsenergie (Wärmestrahlung)

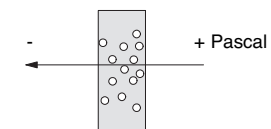


Abb. 2.4
Transport von Gasen (insbesondere auch Wasserdampf)

unterschiedliche Temperaturen aufweisen und durch ein strahlungsdurchlässiges Medium (z.B. Luft) getrennt sind.“³

Die auf eine Oberfläche auftreffende Strahlungsenergie kann reflektiert, absorbiert (aufgenommen) oder transmittiert (übertragen) werden, wobei alle Anteile dieser Einzelvorgänge in der Summe 100% ergeben, da keine Energie verloren gehen kann (Abb. 2.3).

Für die Übertragung von Wärmeenergie durch Strahlung spielt der Temperaturunterschied der beiden gegenüberliegenden Grenzflächen eine besondere Rolle, da er quantitativ in der vierten Potenz in das Ergebnis eingeht, siehe hierzu Abschnitt 2.1.7 in diesem Teil.

Dies führt zum Beispiel in Räumen mit stark strahlungsdurchlässigem oberen Raumabschluss (zum Beispiel Dachverglasung) bei klarem Nachthimmel (eine äußerst kalte Grenzfläche) besonders auch im Sommer zu erheblichen Strahlungswärmeverlusten.

1.1.4 Wärmeströmung (Konvektion)

Hier findet der Wärmetransport über Strömungsvorgänge größerer Mengen sich bewegendem Teilchen statt. Man unterscheidet in ‚freie Konvektion‘, die durch natürlichen Auftrieb entsteht, das heißt durch Dichteunterschiede bedingt als Folge von Temperaturunterschie-

den, und ‚erzwungene Konvektion‘, hervorgerufen durch äußere Einwirkung wie zum Beispiel Wind oder Ventilatoren.⁴

‚Freie Konvektion‘ ist auch innerhalb luftdurchlässiger Dämmstoffe wirksam, da hier die im Material befindliche Luft ein zusammenhängendes System bildet und das anliegende Temperaturgefälle zu thermisch bedingten Strömungsvorgängen führt.

1.1.5 Gastransport durch Druckgefälle

Gase, die selbst auch über ihre Masse Energie transportieren, diffundieren durch Stoffe aufgrund eines anliegenden Druckgefälles (siehe hierzu ausführliche Darstellung im Abschnitt 2.1.3 dieses Teils).

Währenddessen findet die Diffusion immer vom höheren in Richtung des niedrigeren Druckbereiches statt, siehe Abb. 2.4.

Im Zusammenhang mit Wärmedämmstoffen ist hier insbesondere der Transport von Wasserdampf von Bedeutung, da dieser aufgrund der besonders hohen Wärmespeicherfähigkeit von Wasser viel Energie aufnehmen kann.

1.2 Wärmeleitfähigkeit

Nur bei homogenen und isotropen Materialien erfolgt der Wärmetransport ausschließlich über Wärme-

leitung. Daher weist Walter Cammerer zu Recht darauf hin, dass der Begriff der ‚Wärmeleitfähigkeit‘ streng genommen nur bei dieser Stoffgruppe zutreffend anzuwenden sei.⁵

Bei allen anderen Materialien kommen weitere Mechanismen des Wärmetransportes hinzu, dennoch spricht man auch bei diesen von ‚Wärmeleitfähigkeit‘ und meint damit die aufsummierten Effekte der einzelnen wirksamen Mechanismen gemäß der Definition in Abschnitt 1.1 (vergl. Abb. 2.2).

Die Wärmeleitfähigkeit λ eines Materials wird grundsätzlich definiert durch die Menge Energie (in Joule), die eine angenommene Schichtdicke von einem Meter auf einer Fläche von einem Quadratmeter bei einem Temperaturgefälle von 1 Kelvin pro Sekunde durchfließt:

$$\lambda \text{ in } \left[\frac{\text{J} \cdot \text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}} = \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Somit ergibt sich für die Wärmeleitfähigkeit λ als Messgröße die Einheit [W/(mK)].

In Abb. 2.5 finden sich Werte zur Wärmeleitfähigkeit ausgewählter fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe.

Abb. 2.6 zeigt eine Darstellung des Verhältnisses von Wärmeleitfähigkeit (y -Achse, logarithmische Darstellung) und Rohdichte ρ (x -Achse,

linear) ausgewählter Materialien. Um diesen Zusammenhang unter Miteinbeziehung der für diese Arbeit wichtigen Gruppe der Metalle grafisch darstellen zu können, wurde die x -Achse im Bereich zwischen ca. 3000 und 18000 kg/m³ unterbrochen.

Im Bauwesen wird als Grundlage für Berechnungen in der Regel der sogenannte Rechenwert λ_R nach Norm oder Zulassung angesetzt, der insbesondere eine gewisse Restfeuchte des Dämmstoffes berücksichtigt.

1.2.1 Weitere Begriffe und Definitionen

Auf der Betrachtungsebene der Materialien gibt es weitere geläufige und in den einschlägigen Normen (u.a. DIN 4108 - Teil 1, DIN EN ISO 7345, DIN EN ISO 9229 und DIN EN ISO 10077) definierte Begriffe, die im Folgenden kurz erläutert werden sollen, da sie für die vorliegende Arbeit von Bedeutung sind.

1.2.1.2 Wärmedurchlasskoeffizient

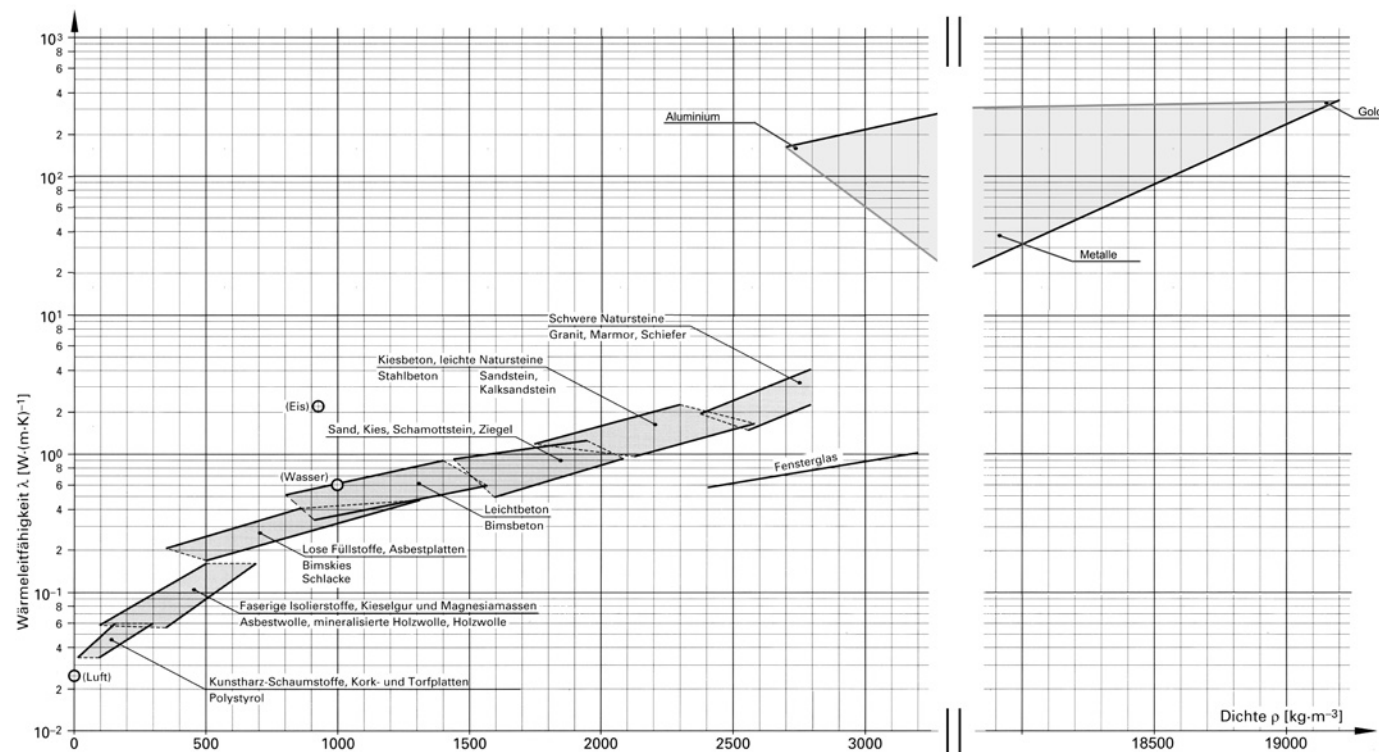
Der flächenbezogene Wärmedurchlasskoeffizient Λ gibt an, welche Wärmemenge durch einen Quadratmeter einer Schicht der Dicke s bei einem Temperaturgefälle von 1 Kelvin pro Stunde strömt:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{s} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

feste Stoffe bei 20°C	
Kupfer	305
Aluminium	221
Eisen	80
Edelstahl	15
Normalbeton	2,1
Mauerwerk	0,2-1,3
Fensterglas	0,8
Holz	0,13-0,2
Kunststoffe	0,16-0,4
Eis (bei 0°C)	2,2
Flüssigkeiten bei 20°C	
Wasser	0,60
Alkohol	0,17

Abb. 2.5 Wärmeleitfähigkeit⁶ verschiedener Materialien (Auswahl) in [W/(mK)]

Abb. 2.6 Darstellung des Verhältnisses von Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte ρ ausgewählter Materialien.⁷



1.2.1.3 Wärmedurchlasswiderstand

Der flächenbezogene Wärmedurchlasswiderstand gibt den Widerstand an, den das Bauteil dem Wärmestrom entgegensetzt.

Dies entspricht dem Kehrwert des Wärmedurchlasskoeffizienten:

$$R_{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda} \left[\frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$$

1.2.2 Verhältnis der Wärmeübertragungswege

Das Verhältnis der Wärmeübertragungswege am Gesamtenergie-

transport sind stoffspezifisch. Für die Wärmedämmstoffe Mineralfaser, Polyurtehan und Kieselsäure (evakuiert auf ca. 1 mbar) setzt sich die Wärmeübertragung anteilig gemäß Abb. 2.7 zusammen.

1.2.3 Zusammenhang im Falle porösen Materials

Bezogen auf einen porösen Dämmstoff ergibt sich eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit aus den Anteilen

- der Wärmeleitung über das Feststoffgerüst,
- über das ruhende Gas,
- durch Konvektion des Gases und/

oder Gas-Feststoff-Wechselwirkungen,
 • durch Strahlung zwischen den Begrenzungswänden und den Feststoffteilchen selbst.

In welchem Umfang Wärmeübertragung im Material stattfindet, hängt von mehreren Faktoren ab, unter anderem von

- der spezifischen Dichte ρ ,
- der mineralogischen Struktur,
- dem Feuchtigkeitsgehalt,
- der Art, Größe und Verteilung der Poren,
- dem Luftdruck,
- der Temperatur des Stoffes.

Die Wärmeleitfähigkeit von ruhender Luft liegt mit 0,024 W/mK deutlich unter der der meisten festen Materialien.

Daher beruht die Funktionsweise von konventionellen Dämmstoffen grundsätzlich auf dem Prinzip eines möglichst hohen Anteils ruhender Luft.

Zusätzlich steigt die Dämmwirkung weiter, wenn das die ruhende Luft umgebende Gerüstmaterial selbst über eine geringe Wärmeleitfähigkeit verfügt und dessen volumenbezogener Anteil soweit wie möglich minimiert ist.

Desweiteren muss dieses Gerüst Konvektion innerhalb der Hohlräume unterdrücken und den Strahlungsdurchlass reduzieren, denn hinsichtlich dieser beiden Mechanismen ist ruhende Luft nicht wirksam.

In der Praxis werden durch in dieser Hinsicht optimierte Kombinationen wie leichte Schäume oder Fasermatten Wärmeleitfähigkeiten erreicht, die nahe an den Werten für ruhende Luft liegen.

Hierbei liegt der volumenbezogene Gasanteil im allgemeinen deutlich über 90%.

1.2.3.1 Wärmetransport in porösem Dämmstoff

Auf poröse Dämmstoffe bezogen lässt sich der in Abschnitt 1.1 aufgezeigte Zusammenhang wie folgt spezifizieren:

Der Gesamtwärmetransport (λ) setzt sich in diesem Fall zusammen aus Festkörperwärmeleitung (λ_s), Gaswärmeleitung (λ_g), thermischer Strahlung (λ_r), Konvektion (λ_v) und

	$\lambda_{ges\ eff.}$ [mW/(mK)]	Wärmeleitung		Strahlung	Konvektion
		Gasleitung	Festkörperleitung		
		λ_g	λ_s	λ_r	λ_v
Mineralfaser	40	63 %	5 %	32 %	~ 0 %
Polyurethan	25	44 %	8 %	48 %	~ 0 %
Kieselsäure (evak.1 mbar)	5	~ 0 %	60 %	40 %	~ 0 %

Abb. 2.7 Anteile an der Wärmeübertragung bei verschiedenen Dämmstoffen⁹

sogenannten Kopplungseffekten (λ_c), wobei gilt:

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

Folgende Abhängigkeiten bestehen⁸:

λ_s	Struktur, Dichte, Druck auf Material
λ_g	Gasart, Porosität, Struktur und Porengröße
λ_r	Dichte, Partikelgröße, Temperatur
λ_v	Gasart, Porosität, Struktur und vor allem Porengröße
λ_c	λ_s und λ_g

1.2.3.2 Der Einfluss des Feuchtegehaltes

Durch Feuchtigkeitsaufnahme wird Wasser in die Materialstruktur des Dämmstoffes eingelagert. Damit steigt die Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffes bedingt durch die relativ gute Wärmeleitung von Wasser von 0,60 W/(mK) an.

Materialien können in diesem Zusammenhang als hydrophil

(wasseranziehend, Feuchtigkeit aufnehmend, in Wasser löslich) oder hydrophob (wasserabstoßend, nicht in Wasser löslich) klassifiziert werden.

Die Eigenschaft eines Materials, Wasser ‚anzuziehen‘, wird auch als hygroskopisch bezeichnet:

„Bezeichnung für das mehr oder weniger stark ausgeprägte Bestreben vieler fester oder flüssiger anorganischer oder organischer Verbindungen, bei längerer Lagerung an normaler Luft das in dieser Luft enthaltene Wasser („Luftfeuchtigkeit“) an sich zu ziehen. (...) [Solche Verbindungen] ... werden als Trockenmittel z.B. in Exsikkatoren, Trockentürmen und Waschflaschen verwendet.“¹⁰

Bei einer Untersuchung pulverförmiger Dämmstoffe an der Universität Dortmund lagen die erzielbaren Wärmeleitfähigkeitswerte von feuchtem Material um den Faktor 5-7 höher gegenüber trockenem.¹¹

1.2.3.3 Der Einfluss des molekularen Aufbaus

Auch die Struktur der Feststoffe auf molekularer Ebene hat Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit:

Gitterbaufehler, Einlagerungen von Fremdstoffen, niedrige Symmetrien des Kristallgitters oder Störungen darin, aber auch Mikrorisse und Poren führen zu einer geringeren Wärmeleitfähigkeit.¹²

1.2.3.4 Strategien zur Optimierung von porösem Dämmstoff

Aus den vorangegangenen Abschnitten lassen sich folgende Optimierungsstrategien für poröse Dämmstoffe bezogen auf die einzelnen Wärmetransportwege ableiten:

1. Die Festkörperwärmeleitung λ_s wird durch ein Material mit einer geringen spezifischen Wärmeleitfähigkeit minimiert, also durch eine möglichst trockene, nicht-kristalline Struktur mit punktförmigen Materialübergängen und von möglichst geringer Dichte.
2. Die Gaswärmeleitung λ_g (nicht Konvektion) kann wirkungsvoll durch die Wahl eines Gases mit geringer Wärmeleitung reduziert werden, sowie durch ein Gerüstmaterial maximaler Porosität mit minimalen Porengrößen. Mikro-poröse Materialien wie Aerogele (vergl. Teil 3, Abschnitt 2.2.3) oder pyrogene Kieselsäurepulver (vergl. Teil 3, Abschnitt 2.2.4.2) erreichen hierdurch Wärmeleitfähigkeiten, die mit ca. 0,018 W/(mK) bereits deutlich unter der ruhender Luft liegen.
3. Die thermische Strahlung λ_r hingegen kann nur durch die gleichmäßige Verteilung eines für Infrarotstrahlung undurchlässigen Materials hoher Dichte (sog. Trübungsmittel) im Dämmstoffgerüst eingeschränkt werden.

Da die Gasleitung einen relativ hohen Anteil an der Gesamtwärmeübertragung hat (siehe Abschnitt 1.2.2), ist neben einer Gasmen- genreduzierung (Evakuierung) eine wirksame Strategie die Wahl eines Gases mit geringer Leitfähigkeit (das dann natürlich auch möglichst dauerhaft in den Poren verbleiben muss).

Hierzu finden sich ausgewählte Werte in Abb. 2.8.

Gas	λ_g in mW/(mK)
Wasserstoff (H ₂)	175
Helium (He)	143
Luft, Stickstoff (N ₂), Sauerstoff (O ₂)	26
Argon (Ar)	16
Pentan	13
Krypton	9,5
Trichlorfluormethan (R11)	8,5
(Vakuum)	(0)

Abb. 2.8 Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Gase

1.3 Der bauliche Zusammenhang

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich in erster Linie auf homogene Materialgefüge und wärmetechnische Fragen.

Im baulichen Zusammenhang spielt die Betrachtung von mehrschichtigen und -schaligen Aufbauten, Kombinationen und Durchdringungen, wie sie bei nahezu jeder konstruktiven Fügung entstehen, eine entscheidende Rolle.

Hier muss außerdem der Aspekt Wasserdampfdruck- und Wasserdampfsättigungsverteilung Berücksichtigung finden, da im baulichen Zusammenhang immer von vorhandener Luftfeuchtigkeit ausgegangen werden muss.

1.3.1 Weitere Grundlagen und -begriffe

Ergänzend zu den oben definierten Begriffen wie zum Beispiel Wärmeleitfähigkeit, Wärmedurchlasskoeffizient und Wärmedurchlasswiderstand ergeben sich durch die Betrachtungsebene im baulichen Zusammenhang weitere Grundlagen und -begriffe¹³, die im Folgenden erläutert werden.

1.3.1.1 Wärmeübergangswiderstand und -koeffizient

Der flächenbezogene Wärmeübergangskoeffizient gibt an, welcher Wärmestrom in einer Stunde von

einem Quadratmeter eines Materialgefüges bei einem Temperaturgefälle von einem Kelvin an die angrenzende Luft bzw. an die nächste Schicht übergeht.

Dabei wird zwischen außen und innen unterschieden:

α_i (innen) und α_a (außen)

Die Einheit ist [W/(m²K)].

Der flächenbezogene Wärmeübergangswiderstand (R_i bzw. R_a) gibt den Widerstand an, den die jeweilige Materialgefügeoberfläche bei der Wärmeübertragung bietet.

Obwohl dieser Effekt bei allen Schicht-Übergängen auftritt, ist er vor allem beim Übergang zwischen Innenluft und erster Schicht sowie zwischen letzter Schicht und Außenluft von Bedeutung.

Dabei gilt:

$$R_i = 1 / \alpha_i \text{ und } R_a = 1 / \alpha_a \text{ [(m}^2\text{K)/W]}$$

Die anzusetzenden Werte sind in DIN 4108-2:2003-07, 6.2 und in DIN 4108-3:2001-07, Anhang A, A.2.3 geregelt.

1.3.1.2 Wärmedurchgangswiderstand und -koeffizient

Der flächige Wärmedurchgangswiderstand R errechnet sich aus dem Wärmedurchlasswiderstand des Materialgefüges (siehe Abschnitt 1.2.1.3) und den beidseitigen Wärmeübergangswiderständen R_i und R_a .

Wird ein mehrschichtiger Aufbau betrachtet, so sind die entsprechenden schichtbezogenen Durchlasswiderstände (im Beispiel für s_1 bis s_3) im Verhältnis der einzelnen Schichtstärken zu addieren:

$$R = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_i}$$

mit der Einheit [(m²K)/W].

Dieses Verfahren ist vereinfachend, da die Wärmedurchgangswiderstände der einzelnen Schichten als konstant und homogen angenommen werden und da die Wärmeübergangswiderstände zwischen den einzelnen Schichten vernachlässigt werden.

Der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes ist der sogenannte Wärmedurchgangskoeffizient, besser bekannt als ‚U-Wert‘ (früher ‚k-Wert‘):

$$U = 1 / R \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$$

Im Hinblick auf die vorliegende Arbeit ist zu beachten, dass es sich um einen rein flächenbezogenen Wert handelt, für den zum Beispiel Randverlust-Effekte nur pauschal über prozentuale Abschläge oder eine detaillierte Einzelfallberechnung berücksichtigt werden können.

Es sei weiterhin betont, dass für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Vakuum-Dämmsysteme in der Regel nur reine Messwerte für die Wärmeleitfähigkeit vorliegen (und eben keine verbindlichen Rechenwerte).

Das heißt, es sind keine Zuschlagwerte (zum Beispiel für die Berücksichtigung von Alterungsvorgängen) enthalten (vergl. hierzu Abschnitt 2.9.3 in Teil 3).

1.3.1.3 Wärmedurchgangskoeffizient und Dämmstoffstärke

Der Zusammenhang zwischen Dämmstoff-Schichtdicken und damit erzielbaren U-Werten ist wegen der Kehrwertbeziehung $U = 1 / R$ nicht linear.

Diese für den architektonischen Gestaltungsspielraum unter energetischen Aspekten bedeutsame Tatsache ist in Abb. 2.9 für verschiedene Dämmstoffe grafisch verdeutlicht.

1.3.1.4 Wasserdampfteildruck

Der Wasserdampfteildruck p ist das Produkt aus temperaturabhängi-

gem Wasserdampf-Sättigungsdruck p_s und relativer Luftfeuchtigkeit ϕ (als Dezimalbruch)

$$p = p_s \cdot \phi \quad [\text{Pa}]$$

Siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.3.2 (Partialdruck) in diesem Teil.

1.3.1.5 Wasserdampf-Sättigungsdruck

Luft kann Wasserdampf aufnehmen, bis der Wasserdampf-Sättigungspunkt erreicht ist. Dieser ist von der Temperatur abhängig ('relative Luftfeuchtigkeit').¹⁴

Wird der Sättigungspunkt überschritten, fällt der Wasserdampf in Form von Tauwasser aus.

1.3.1.6 Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand

Der Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand Z einer Schicht wird für 10°C (Bezugstemperatur) gem. DIN 4108-3 nach folgender Gleichung ermittelt:

$$Z = 1,5 \cdot 10^6 \cdot \mu \cdot d \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}) / \text{kg}]$$

μ materialspezifische Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl¹⁵

d Schichtdicke

Das Produkt $s_d = \mu \cdot d$ wird als 'wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke' bezeichnet:

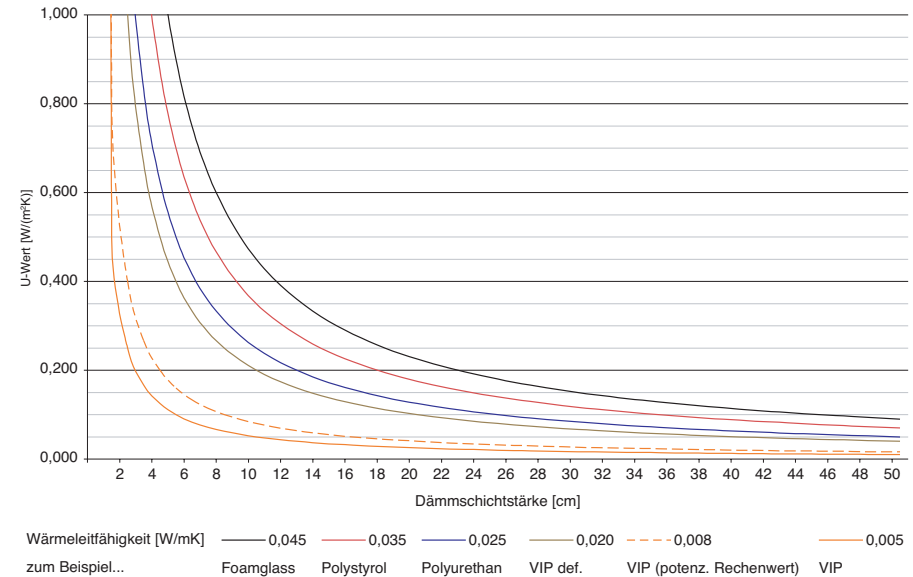


Abb. 2.9

Zusammenhang Dämmschichtdicke und U-Wert (vereinfacht, ohne Deckschichten, Randeffekte, Wärmeübergangskoeffizienten) für Dämmstoffe verschiedener Wärmeleitfähigkeit¹⁶

s_d [m]	Schicht-Klassifizierung nach DIN 4108-3:2001-07, 3.1.4ff
$\leq 0,5$	diffusionsoffen
0,5 - 1500	diffusionshemmend
≥ 1500	diffusionsdicht

Bei der Anordnung einzelner Schichten in einem mehrlagigen Aufbau ist darauf zu achten, dass der Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand der einzelnen Schichten in Richtung der Seite mit niedrigerem Wasserdampfteildruck abnimmt.

1.3.1.7 Wasserdampf-Diffusionsstromdichte

Analog zur Wärmestromdichte q kann auch eine Wasserdampf-

Diffusionsstromdichte g definiert werden:

$$g = \frac{p_i - p_e}{Z} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

p_i raumseitiger Wasserdampf-teildruck

p_e außenseitiger Wasserdampf-teildruck

1.3.2 Der Temperatur- und Dampfteildruckverlauf

Die Kenntnis über den Temperatur- und Dampfteildruckverlauf eines mehrschichtigen Aufbaus ist vor allem für die Abschätzung von eventuell anfallendem Tauwasser von Bedeutung und für die Bestimmung des Ortes, an dem dies geschieht.

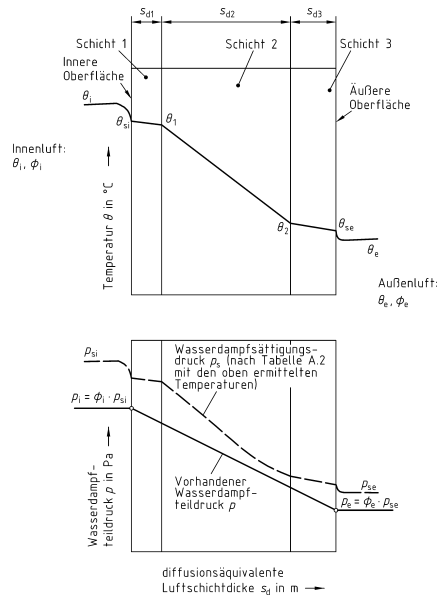


Abb. 2.10
Temperaturverteilung über den Querschnitt eines mehrschichtigen Bauteils nach Glaser (aus DIN 4108-3:2001-07, Bild A2, S. 21)

Für rein flächige Anordnungen ist dies relativ leicht zu ermitteln, siehe Abb. 2.10.

Im Falle von linearen und vor allem komplexen dreidimensionalen Geometrien, aber auch für Aussagen mit sehr hoher Genauigkeit sind in der Regel EDV-gestützte Berechnungen (auf Basis von FE-Modellen) erforderlich.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass ein über das Glaserverfahren ermittelter Taupunkt noch keine verbindliche Aussage darüber zulässt, ob es an der ermittelten Stelle tatsächlich zu Tauwasserbildung kommen wird.

Beispielsweise weist eine Darstellung eines Vakuum-Dämmsystems nach dem Glaserverfahren in der Regel einen theoretischen Tauwasserausfall innerhalb des Kernmaterials aus.

Da sich hier aber (soweit das System nicht defekt ist) kein Wasserdampf befinden kann, kann es innerhalb funktionierender Vakuum-Dämmsysteme auch nicht zu Tauwasserausfall kommen.

1.3.3 Wärmebrücken

Als ‚Wärmebrücke‘ wird eine Stelle mit einem - relativ gesehen - deutlich höheren Wärmefluss gegenüber dem betrachteten Gesamtgefüge bezeichnet.

In einem homogenen und flächigen Gefüge kann es also per definitionem keine Wärmebrücken geben, selbst wenn die Wärmeleitfähigkeit absolut gesehen sehr hoch ist.

Bei räumlichen, nicht flächigen Gefügen kann es zu ‚geometrischen Wärmebrücken‘ kommen, und zwar in Kanten und Ecken (siehe Abb. 2.11a und b). Der erhöhte Wärmefluss begründet sich hier allein aus der im Verhältnis zu innen größeren Wandoberfläche außen.

Die Ausführungen am Anfang dieses Teiles beziehen sich auf eine molekulare Betrachtungsebene. Auch hier könnte man beispielsweise die Stege im Materialgerüst

eines Dämmstoffes als Wärmebrücken bezeichnen.

Im allgemeinen findet der Begriff aber in einem anderen Betrachtungsmaßstab, nämlich in konstruktiven Zusammenhängen Anwendung¹⁷: In der Kombination und Fügung verschiedener Materialien.

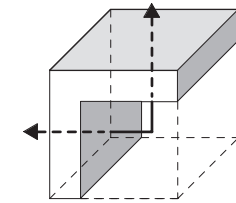
Daher spricht man auch von ‚baulichen‘ oder ‚konstruktiven‘ Wärmebrücken. Diese sind entweder linear (Abb. 2.11c), punktförmig (Abb. 2.11d) oder Kombinationen hieraus.

1.3.3.1 Berechnung von Wärmebrücken, U-Wert

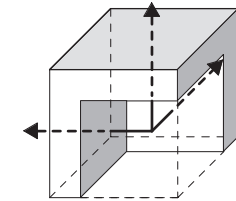
Besonders im Themenzusammenhang der vorliegenden Arbeit ergeben sich Wärmebrücken auch aus der plattenförmigen Geometrie der Vakuum-Dämmsysteme, deren Ränder prinzipiell eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als die (ungestörten) Systemmitten. Der Effekt ist abhängig von

- der genauen Randausbildung des Systems,
- der Geometrie und den Abmessungen und
- der jeweiligen Einbausituation.

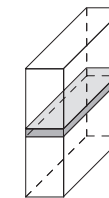
Der Wärmefluss über diese ‚Sonderstellen‘ wird entweder durch vereinfachende Verfahren abgeschätzt oder genauer durch FEM-Berechnungen ermittelt und dann über einen linearen (längenbezogenen) Wärmedurchgangskoeffizienten



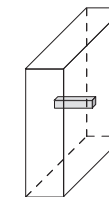
a Geometrische Wärmebrücke (2D)



b Geometrische Wärmebrücke (3D)



c Lineare Wärmebrücke



d Punktförmige Wärmebrücke

Abb. 2.11
Prinzipielle Arten von Wärmebrücken

oder eine effektive (sog. modifizierte) Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) in die Gesamtbetrachtung einbezogen¹⁸:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{1-\text{Dim}} + \frac{\Psi_K \cdot \Sigma \ell \cdot s}{A} \left[\frac{W}{\text{mK}} \right]$$

mit

- λ_{eff} effektive Wärmeleitung
- $\lambda_{1-\text{Dim}}$ Wärmeleitung in der Fläche
- Ψ_K linearer Wärmedurchgangskoeffizient im Randbereich
- $\Sigma \ell$ Umfang des Elements in m
- s Dicke des Elements in m
- A Fläche des Elements in m²

Das Ergebnis ist dann ein effektiver (sog. modifizierter) U-Wert, der abhängig von den Parametern Umfang, Fläche und Dicke und damit für jedes betrachtete System unterschiedlich ist.

Der Wert der effektiven Wärmeleitfähigkeit (λ_{eff}) stellt einen nur für ein bestimmtes System gültigen Mittelwert dar.

Nach derzeitigem Stand der Literatur (z.B. nach W.M. Willems¹⁹) ist es daher in der Regel zu bevorzugen, U-Werte für Regelquerschnitte anzugeben und den längenbezogenen linearen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ_K für die jeweilige Einbausituation (also die jeweilige spezifische Wärmebrückensituation) getrennt zu ermitteln (zum Beispiel durch FEM-Berechnungen) und im Rahmen der energetischen Gesamtbilanz (nach DIN EN 832) entsprechend zu berücksichtigen²⁰:

$$H_T = \sum_i F_{xi} \cdot A_i \cdot U_i + \sum_k F_{xk} \cdot \ell_K \cdot \Psi_K$$

mit

- H_T spezifischer Transmissionwärmeverlust nach DIN EN 832 [W/K]
- $F_{xi,k}$ Temperatur-Korrekturfaktor nach EnEV
- A_i Fläche des Elements [m²]
- U_i Wärmedurchgangskoeffizient nach DIN EN ISO 6946 [W/(m²K)]
- ℓ_K Länge der Wärmebrücke [m]
- Ψ_K linearer Wärmedurchgangskoeffizient im Randbereich [W/(mK)]

Bei dieser getrennten Betrachtung der flächenbezogenen Wärmeleitfähigkeit und der linearen Wärmebrückenwirkung bleiben die flächenbezogenen Anteile mit anderen Dämmstoffen vergleichbar.

1.3.3.2 Zusammenhang mit der Dämmstärke

Beim Einsatz von Hochleistungsdämmungen wie zum Beispiel Vakuum-Dämmssystemen kommt es aufgrund einer relativen Verschiebung zu einer Verschärfung der Wärmebrückenproblematik:

Die deutlich geringere Dämmstärke bei gleichzeitiger Minimierung der Wärmeleitung in der Fläche hat zur Folge, dass jede Wärmebrücke relativ betrachtet stärker ins Gewicht fällt als bei konventionellen Dämmstoffen.

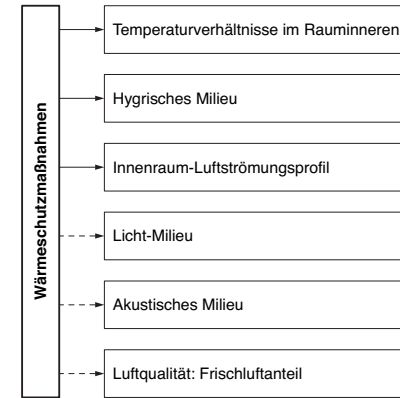


Abb. 2.12 Bereiche, die in Wechselbeziehungen zu Wärmeschutzmaßnahmen stehen können

Im Rahmen von Wärmeschutzmaßnahmen gibt es potentielle Konfliktfelder im Bereich von..., v.a. im Zusammenhang mit...

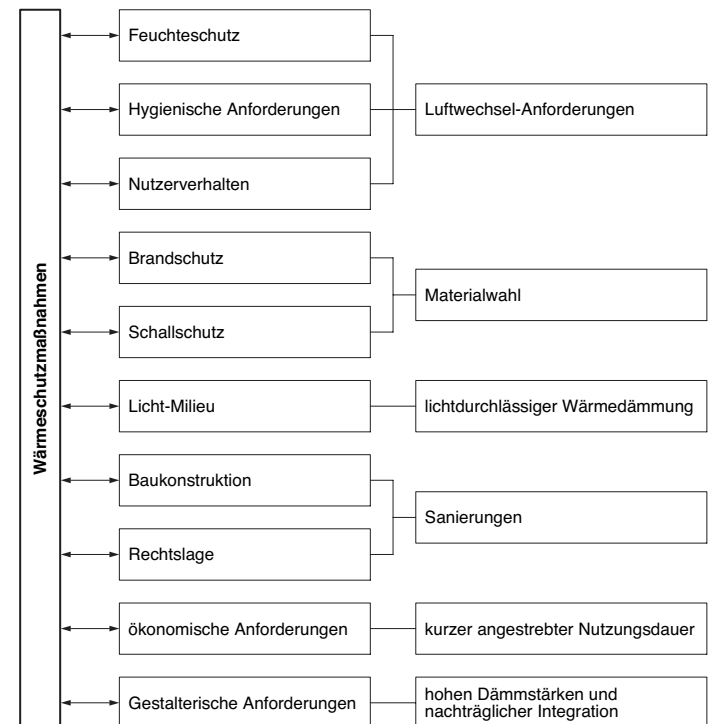


Abb. 2.13 Potenzielle Konfliktfelder im Rahmen von Wärmeschutzmaßnahmen

Aus diesem Grunde wurde vom Verfasser eine systematische Untersuchung der Auswirkungen von linearen Wärmebrücken für die Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen durchgeführt, die im Anhang 1 zusammengestellt ist.

1.3.3.3 Konstruktive Problemstellung

Auch wenn es innerhalb von Vakuum-Dämmsystemen selbst, wie oben ausgeführt, nicht zu Tauwasserbildung kommen kann, so bilden die Fügungen systembedingt um so größere Schwachstellen. An diesen Stellen ist das schadensfreie Diffusionsverhalten sorgfältig im Detail nachzuweisen.

Jede Wärmebrücke bedeutet eine Absenkung des durchschnittlichen Wärmedämm-Niveaus, zusätzlichen Energiebedarf und die Gefahr von Kondensationserscheinungen (dadurch evtl. Schimmelbildung, Tauwasser, Bauschäden...).

Untersuchungen haben gezeigt, dass schon Temperaturen deutlich oberhalb der Tauwassergrenze zu gefährlicher Schimmelbildung führen können.²¹



Abb. 2.14 Funktionen des Wärmeschutzes

1.3.4 Ziele und Auswirkungen von Wärmedämm-Maßnahmen

1.3.4.1 Funktionen des Wärmeschutzes

Warum eigentlich ist man bestrebt, den Wärmedurchgang durch die Gebäudehülle zu reduzieren?

Die Gründe sind vielfältig und gehen weit über den vermeintlich primären Anlass des Energiesparens hinaus; viele stehen zueinander in Beziehung.

Die wichtigsten Funktionen des Wärmeschutzes sind unter Andeutung einiger Querbezüge in Abb. 2.14 zusammengestellt.

Die physiologischen Funktionen dienen der Schaffung eines hinreichend hygienischen und behaglichen Innenraumes.

Im Rahmen jeder Wärmeschutzmassnahme werden andere Bereiche tangiert und beeinflusst, siehe Abb. 2.12. Diese Effekte müssen bedacht und kontrolliert werden. Gleichzeitig gibt es eine Reihe von potenziellen Konfliktfeldern, die es zu bewältigen gilt. Dieser Zusammenhang findet sich in Abb. 2.13.

Da die maßgeblichen Außenbedingungen, die auf ein Gebäude einwirken, nicht statischer sondern dynamischer Natur sind, entziehen sich Wärmedämmmaßnahmen rein statischen Betrachtungen (auch wenn sie bislang in den einschlä-

gigen Vorschriften so behandelt werden).

Insbesondere ergeben sich Wechselwirkungen im Zusammenhang mit solaren Energieeinträgen über transluzente und transparente Gebäudehüllenausschnitte und den Wärmespeicherungseigenschaften von Bauteilen.²²

Wärmeschutzmaßnahmen leisten - gerade bei wenig vorhandener Wärmespeichermasse - einen wesentlichen Beitrag zum Ausgleich von Tag- und Nachtschwankungen der Rauminnentemperatur.



Abb. 2.15
Quecksilberbarometer des
Evangelista Torricelli²³

2 Das Prinzip der Vakuumdämmung

2.1 Grundlagen

2.1.1 Gasförmiger Zustand der Materie

Hinsichtlich der uns umgebenden Stoffe sind vier Zustände (Aggregatzustände oder Phasen) unterscheidbar:

- fest (z.B. Eis)
- flüssig (z.B. Wasser)
- gasförmig (z.B. Dampf)
- plasmaförmig (z.B. Gasentladungslampe, Sonne)

Hierfür ist die mit der Energiezufuhr steigende sogenannte thermodynamische Temperatur von Bedeutung, die ab dem absoluten Nullpunkt (-273,15 °C) gerechnet und meist in Kelvin angegeben wird.

Der gasförmige Zustand zeichnet sich aus durch

- geringe Stoffdichte,
- hohe Volumen-Elastizität bei Druckänderungen und
- hohe Volumen-Dehnung bei Temperaturänderungen.

2.1.2 Zusammensetzung der Atmosphäre

Die atmosphärische Luft, die unsere gasförmige Umgebung bildet, setzt sich volumen- und massebezogen im Durchschnitt wie folgt zusammen²⁴:

Gas	Anteil in		
	Masse-%	Vol.-%	
Stickstoff	N ₂	75,47	78,03
Sauerstoff	O ₂	23,20	20,99
Argon	Ar	1,28	0,93
Kohlendiox.	CO ₂	0,046	0,03
Wasserst.	H ₂	0,001	0,01
Neon	Ne	0,0012	0,0018
Helium	He	0,00007	0,0005
Krypton	Kr	0,0003	0,0001
Xenon	Xe	0,00004	0,000009

Die Angaben beziehen sich auf trockene Luft.

2.1.3 Luftdruck und Partialdruck

2.1.3.1 Luftdruck

Der Druck p ist per Definition die senkrechte Kraft (Normalkraft) auf eine Fläche ($p = F / A$). Neben dem Volumen (V) und der Temperatur (T) ist der Druck (p) die dritte sogenannte ‚Zustandsgröße‘, die den Zustand einer Gasmenge beschreibt. Luftdruck wird allgemein verstanden als der Druck, der die Lufthülle der Erde infolge ihrer Gewichtskraft ausübt, er beträgt im Mittel auf Meeressniveau (NN) 1013,2 mbar.²⁵

Anders ausgedrückt ist Luftdruck die Summe der Kräfte, die dauernd in Bewegung befindliche Gasmoleküle und -atome senkrecht auf eine Fläche ausüben. Der vor allem in meteorologischen Zusammenhängen wichtige Luftdruck in der

Atmosphäre ist abhängig von der Höhe über dem Meeresspiegel (barometrische Höhenformel) und von der Lufttemperatur (Temperaturkorrektur).

Da der Luftdruck eine flächenabhängige Größe ist, verhält er sich analog der Gewichtskraft einer gedachten ‚Säule‘ eines gewählten Materials mit einer bestimmten Höhe und beliebigem Durchmesser. Üblicherweise wählt man hier Wasser oder Quecksilber (Hg).

Daher finden sich Angaben zum Luftdruck in entsprechenden ‚Vergleichsgrößen‘: Der oben genannte durchschnittliche Luftdruck von ca. 1013,2 mbar wird zum Beispiel auch in 760 mm Hg-Säule oder 10,33 m Wassersäule angegeben.²⁶

Vor Einführung der zugehörigen SI-Einheit (Pascal) wurde Luftdruck üblicherweise in mm Hg-Säule angegeben, weil man diesen Wert direkt anhand der Länge der Quecksilbersäule am Barometer (siehe Abb. 2.15) bestimmen konnte (daher auch die Einheit 1 Torr = 1 mm Hg-Säule).²⁷

2.1.3.2 Partialdruck

‚Partialdruck‘ ist definiert als der Druck, den eine einzelne Gasart in einem Gasgemisch hat. Für Gasgemische ist an jedem Ort des Raumes die Gemischzusammensetzung die gleiche und damit auch der Partialdruck.

2.1.4 Relevante Gasgesetze

„Gasgesetze“ sind eine Sammelbezeichnung für die das Verhalten von idealen oder realen Gasen beschreibenden physikalischen Gesetze. Eine Auswahl der für die vorliegende Arbeit relevanten Gesetze und Grundlagen ist in diesem Abschnitt zusammengestellt.

2.1.4.1 Die allgemeine Zustandsgleichung der Gase

Grundsätzlich wird der Zustand eines Gases durch die Zustandsgrößen Druck (p), Temperatur (T) und Volumen (V) bestimmt, wobei ein theoretisches „ideales Gas“ die thermische Zustandsgleichung

$$p \cdot V = n \cdot R_0 \cdot T$$

(ideales Gasgesetz) genau erfüllt.

Hierbei ist

p der Druck [Pa],
 V das Volumen [Liter],
 n die Stoffmenge [mol],
 T die Temperatur [K],
 R_0 die „universelle Gas-konstante“ mit

$$R_0 = 8,3153 \text{ J / (mol K)} \\ = 0,083153 \text{ bar Liter / (mol K)}.$$

Man unterscheidet zwischen der von der Art des betrachteten Gases abhängigen speziellen Gaskonstante und der stoffunabhängigen, auf 1 Mol eines Gases bezogenen

allgemeinen oder universellen Gas-konstante (Formelzeichen R_0).

Viele reale Gase und Gasgemische wie zum Beispiel auch (trockene) Luft verhalten sich bei ausreichend hohen Temperaturen und geringen Dichten nahezu wie ideale Gase.

Gemäß dem „Idealen Gasgesetz“ verhält sich ein Gas „ideal“, wenn

- zwischen den Teilchen keine Kräfte wirken, und wenn
- das Volumen der Teilchen vernachlässigbar klein gegenüber dem Gasraum ist.

Sobald ein Gas in die Nähe seines Kondensationspunktes (Siedepunktes) gerät, so verhält es sich nicht mehr ideal.

2.1.4.2 Das Boyle-Mariottesche Gesetz

Das Boyle-Mariottesche Gesetz für ideale Gase sagt aus, dass bei konstanter Temperatur auch das Produkt aus dem Druck p und dem Volumen V konstant ist:

$$p \cdot V = \text{const.}$$

2.1.4.3 Die Gay-Lussacsche Gesetze

Bei konstanten Volumina gilt für ideale Gase:

$$p = \text{const.} \cdot T$$

2.1.4.4 Das Daltonsche Gesetz

Den Zusammenhang zwischen Partialdruck und Gesamtdruck beschreibt das Dalton-Gesetz. Für ideale Gase gilt danach:

$$p_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n p_i$$

Der Gesamtdruck eines Gasgemisches ist gleich der Summe der Partialdrücke.

2.1.4.5 Das Avogadro'sche Gesetz

Gleiche Volumina idealer Gase enthalten bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleich viele Teilchen.

Diese Teilchenzahl ist die sogenannte Avogadro-Konstante:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

2.1.4.6 Mol und Molare Masse

Ein Mol einer Substanz beinhaltet $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen.

Die Molare Masse ist genau die Masse, die ein Mol Teilchen eines Stoffes einnehmen (siehe Abb. 2.16):

$$M_{\text{mol}} = m / n \text{ [g / mol]}$$

Stoff		M_{mol}
Wasserstoff	H ₂	2
Helium	He	4
Wasser	H ₂ O	18
Kohlenmonoxid	CO	28
Stickstoff	N ₂	28
Luft (trocken)		29
Sauerstoff	O ₂	32
Argon	Ar	40
Kohlendioxid	CO ₂	44

Abb. 2.16 Molare Masse einiger Stoffe²⁸

2.1.4.7 Molares Normvolumen

Ein Mol eines idealen Gases nimmt bei

$$p_0 = 1013,2 \text{ hPa} = 1 \text{ atm und} \\ T_0 = 0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$$

ein Volumen V_0 von 22,414 Liter ein.

2.1.4.8 Das allgemeine Gasgesetz

Aus dem idealen Gasgesetz lässt sich somit folgendes ableiten:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0}$$

mit

$$p_0 = 101325 \text{ Pa} = 1 \text{ atm,} \\ T_0 = 0^\circ\text{C} = 273 \text{ K,} \\ V_0 = 22,414 \text{ Liter.}$$

2.1.5 Dichte der Luft

Die Luftdichte von reiner, trockener Luft beträgt für einen Druck von 1013,2 mbar und 0°C:

$$1,292 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3 (= 1,292 \text{ g/Liter})$$

2.1.6 Mittlere freie Weglänge

In einem abgeschlossenen Raum, zum Beispiel in den Poren eines Feststoffgerüsts, „ruht“ ein Gas, wenn es nicht angetrieben wird (zum Beispiel durch Temperaturunterschiede). Es kommt dabei zu keiner gerichteten Strömung, wohl aber zu kontinuierlicher Diffusion, die durch Stoßprozesse der thermischen Molekularbewegung eine ständige Durchmischung des Gases bewirkt.

Die konvektive Wärmeleitung in den gasgefüllten Bereichen innerhalb des Feststoffgerüsts erfolgt über solche Stoßprozesse zwischen den Gasmolekülen.

Die mittlere Geschwindigkeit eines Gasteilchens hängt unter der Bedingung konstanter Temperatur nur von seiner Masse, nicht aber von der Anzahl aller Gasteilchen ab. Dagegen werden mit abnehmender Anzahl der Teilchen die Wege zwischen zwei Zusammenstößen länger.²⁹

Die mittlere freie Weglänge bezeichnet die Distanz, die ein Gasmolekül im Mittel zurücklegt, bis es auf ein anderes Gasmolekül

trifft. Sie nimmt ab mit zunehmender Teilchenzahl pro Volumen und mit zunehmender Molekülgröße, gemessen in einem mittleren Querschnitt.

Jedes Gas besitzt eine spezifische freie Weglänge, die von der Gas-temperatur, der Größe des Moleküls und dem vorhandenen Druck abhängig ist (siehe Abb. 2.17).

Die mittlere freie Weglänge (MFP: „mean free path“) von Luft berechnet sich bei 20°C wie folgt³⁰:

$$\text{MFP} = \frac{6,8 \cdot 10^{-3} [\text{mbar}] [\text{cm}]}{P [\text{mbar}]}$$

P: herrschender Gasdruck [mbar]

Bei Atmosphärendruck bedeutet dies für Luft: MFP = 0,068 μm

Teilchen, die unter Atmosphärendruck alle zehntausendstel Millimeter zusammenprallen, treffen in einem Vakuum von 10⁻⁹ mbar im Mittel nur noch alle 68 km aufeinander. In einem Hochvakuum wird die mittlere freie Weglänge somit so groß, dass die Gasmoleküle untereinander statistisch gesehen kaum noch kollidieren, und somit auf dem oben beschriebenen Weg nahezu keine Energie mehr übertragen.

2.1.7 Wärmeübertragung im Gasraum

In evakuierten Räumen kann Wärmeenergie über Strahlung und das

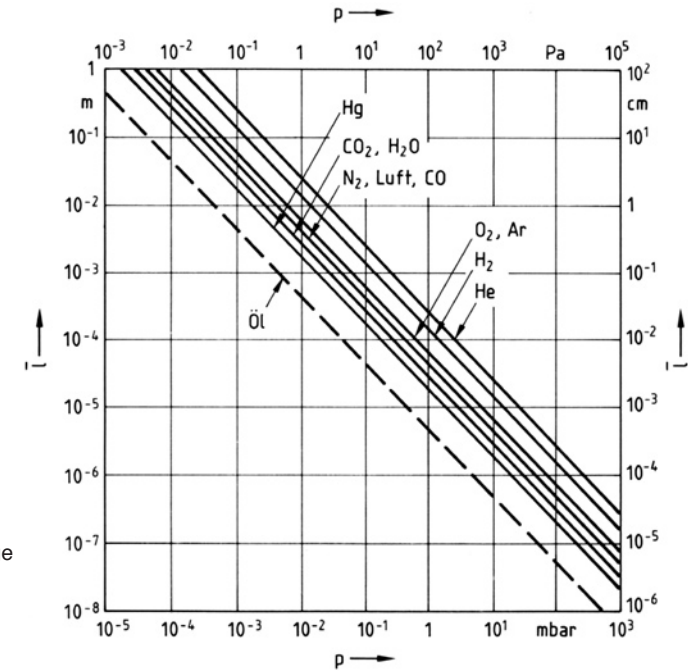


Abb. 2.17
Mittlere freie Weglänge verschiedener Gase in Abhängigkeit vom Druck bei 20°C.³¹

Restgas übertragen werden. Nach dem Strahlungssatz von Stefan und Boltzmann emittiert eine Oberfläche A der Temperatur T die Gesamtstrahlungsleistung

$$P_s = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

σ ist die sogenannte Stefan-Boltzmann-Konstante und beträgt

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4\text{)}.$$

ε ist der Emissionsgrad und berücksichtigt die Strahlungsfähigkeit der Oberfläche. Ein idealer (theoretischer), sog. „schwarzer Strahler“ hat einen Emissionsgrad von $\varepsilon = 1 = 100\%$. Reale Oberflächen sind sog. „graue Strahler“, weniger intensive Strahler mit $0 < \varepsilon < 1$.

Liegen sich zwei gleiche Flächen ($A_1 = A_2 = A$) mit gleichen Werten für ε gegenüber, so gilt für den von A_1 nach A_2 übertragenen Wärmestrom:

$$\Delta P_s = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Bei hinreichend tiefen Drücken erfolgt die Wärmeübertragung im Gasraum nahezu ausschließlich durch Strahlung. Der Absorptionsgrad einer Fläche entspricht dem Emissionsgrad. Gute Strahler absorbieren auch gut.³²

Die weitere Form der Wärmeübertragung in Gasen hängt vom Gasdruck ab. Von Konvektion spricht man dann, wenn größere zusammenhängende Gasmassen

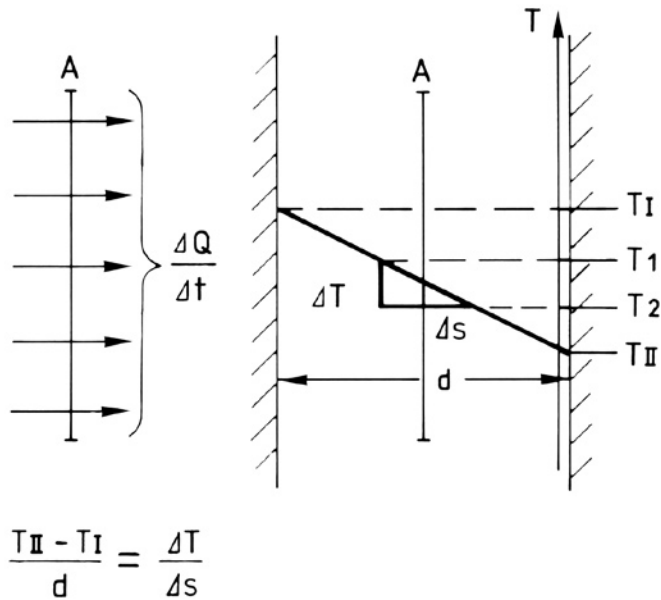


Abb. 2.18
Wärmeleitung über Querschnitt A, Temperaturprofil zwischen Oberflächen.³³

sich gemeinsam in eine Richtung bewegen, wie man es zum Beispiel von Raumheizkörpern kennt (Abschnitte 1.1 und 1.2).

Wird entweder der Umgebungsdruck vermindert oder das Volumen des umgebenden Raumes reduziert, finden ab einem bestimmten Zeitpunkt nahezu keine konvektiven Vorgänge mehr statt. Nun kann der Wärmetransport nur noch über die Wärmeleitung im ruhenden Gas erfolgen. Die Energie wird hierbei durch die Stöße zwischen den Gasteilchen weitergegeben. So stellt sich beispielsweise im Gas zwischen Oberflächen verschiedener (fixer) Oberflächentemperaturen ein stationäres Temperaturfeld ein.

Ändert sich die Temperatur im Inneren eines Stoffes (auch eines Gases) längs einer Strecke Δs um $\Delta T = T_1 - T_2$, dann fließt Wärmeenergie über den Querschnitt A in Richtung der niedrigeren Temperatur (siehe Abb. 2.18). Man nennt die in einer gewissen Zeitspanne Δt transportierte Wärmemenge ΔQ den Wärmestrom Φ (vergleiche allgemein Abschnitt 1.1.1.1).

Dabei gilt:

$$\Phi = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta s}$$

Die Wärmeleitfähigkeit, der stoffabhängige Proportionalitätsfaktor λ in obiger Gleichung, steigt für

Gase mit der mittleren Teilchengeschwindigkeit und der Temperatur. Sie ist aber unabhängig vom Druck, solange die mittlere freie Weglänge im Verhältnis zum Abstand der Flächen klein ist.

Wärmeleitfähigkeits-Werte zu einzelnen Gasen finden sich in Abb. 2.8.

Wird bei sinkendem Druck die mittlere freie Weglänge größer als der Abstand der Flächen zueinander, stoßen die Gasteilchen praktisch nicht mehr untereinander zusammen, sie bewegen sich nur noch zwischen den Wänden hin und her. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt dann proportional zu ihrer Anzahl und damit zum Druck ab und wird schließlich sehr klein. In diesem Bereich (zwischen ca. 10 mbar und 10^{-3} mbar) wird diese Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit auch zur Druckmessung benutzt (siehe Abschnitt 2.2.3.3 und Teil 3 Abschnitt 2.6.1).

Abb. 2.19 und 2.20 zeigen eine bekannte Nutzung der Prinzipien der Wärmeübertragung im Gasraum (mit Unterdruck): Aufbewahrungsgefäße nach Sir James Dewar³⁴ (zum Beispiel Thermosflaschen). Hier wird der Raum zwischen den beiden Gefäßwänden auf einen Druck unter 10^{-4} mbar evakuiert und möglichst oft quer zur Wärmedurchgangsrichtung abgeteilt.

Alle inneren Flächen des Vakuumraumes werden hochreflektiv



Abb. 2.19
Gefäß für die Aufbewahrung von flüssigem Helium.³⁵



Abb. 2.20
Aufgeschnittenes Gefäß für den Betrieb eines supraleitenden Magneten bei ca. 4 K Umgebungstemperatur.³⁶

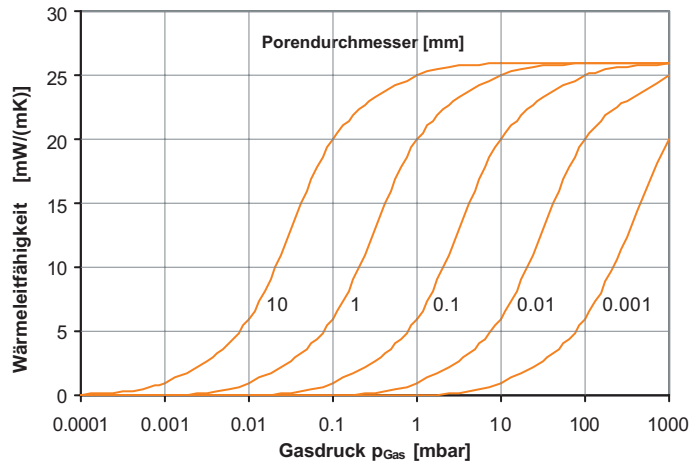


Abb. 2.21
Effektive Wärmeleitfähigkeit von Luft in Abhängigkeit von Porengröße (Durchmesser) und Druck.³⁷

versilbert. So wird der Wärmetransport über den Gasraum maximal reduziert, Wärmeenergie wird nahezu ausschließlich über die Verbindung der beiden Gefäße, meist im Bereich des Verschlusses, übertragen. Der Zwischenraum von Thermosflaschen mit einem Abstand zwischen innerer und äußerer Wand von ca. 1 cm muss ungefähr auf einen Druck von 10^{-4} mbar evakuiert werden, um die Gasleitung wirkungsvoll zu unterdrücken.³⁸

2.1.8 Wärmeübertragung in evakuierten Dämmstoffen

2.1.8.1 Porosität und Zellgasdruck

Insbesondere innerhalb von leichten und grobporigen Dämmstoffen

erfolgt der Wärmetransport vor allem über Konvektion und Strahlung. Das Material zwischen den Poren ist so dünn, dass es der Wärmestrahlung nur wenig Widerstand bieten kann. Daher wird ein Wärmedämmstoff im allgemeinen mit geringerer Rohdichte immer leichter durchstrahlbar.

Zweitens nimmt mit zunehmender Porengröße die Konvektion innerhalb der Poren zu. Da dieser Vorgang in Abhängigkeit von der freien Weglänge der in den Poren eingeschlossenen Gasmoleküle steht, ist die zweite maßgebliche Größe für die Relevanz der Konvektion der in der Pore herrschende Druck des Zellgases.

Das Optimierungsziel ist somit den Zellgasdruck zu minimieren und gleichzeitig die Porengröße auf ein Maß zu reduzieren, dass sie kleiner

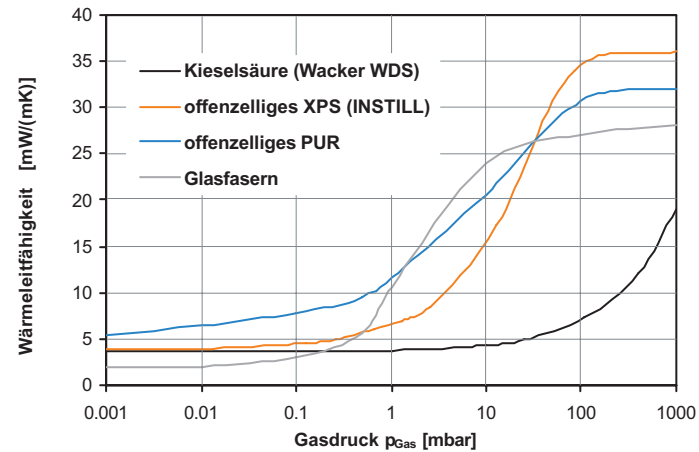


Abb. 2.22
Wärmeleitfähigkeit (Messwerte, keine Rechenwerte) verschiedener Kernmaterialien in Abhängigkeit vom Zellgasdruck.³⁹

als die druckabhängige mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle wird. Hierdurch wird der Wärmetransport über Konvektion nahezu unterbunden. Die Moleküle des Zellgases stoßen nur noch sehr selten elastisch gegen die Porenwände, nahezu ohne Energie zu übertragen.

Zusätzlich kommt hierbei der sogenannte Smoluchowski-Effekt⁴⁰ zum tragen: Gasmoleküle sind in nächster Nähe der Wand in ihrer Bewegung behindert, so dass bei den Zusammenstößen von Gas- und Wandmolekül nur ein unvollkommener Ausgleich der kinetischen Energie stattfindet. Mit abnehmendem Druck fällt die effektive Wärmeleitfähigkeit der Luft stark ab.

Dieser Abfall erstreckt sich bei den verschiedenen Porengrößen jeweils

über ca. zwei Zehnerpotenzen des Druckes. Je größer die Porengröße, um so weiter verschiebt sich der Bereich der Wärmeleitfähigkeitsabnahme hin zu kleineren Drücken.⁴¹

Die effektive Wärmeleitfähigkeit von Luft in einem Porengefüge steht also im wesentlichen in Abhängigkeit von Porengröße und Druck (siehe Abb. 2.21). Vergrößert man die Porengröße um eine Zehnerpotenz, so muss man den Druck um den Faktor 10 verringern, um die Wärmeleitfähigkeit beizubehalten.

Anders ausgedrückt bedeutet dies: Je kleiner die Poren, je größer das Wärmedämmvermögen bei gleichem Zellgasdruck.

Andererseits gilt auch: Je kleiner die Poren, um so größer darf der

Gasdruck ausfallen, um eine bestimmte Wärmeleitfähigkeit zu erreichen, das heißt die Anforderungen an das Vakuum sind geringer.

Aus den dargelegten Prinzipien folgt ein theoretisch optimales Material, dessen Poren so klein und optimal verteilt sind, dass eine Wärmeübertragung über das Zellgas schon bei Normaldruck (Athmosphärendruck) unterbunden wird. Solch ein ideales Material gibt es allerdings (noch) nicht.

Aus Abb. 2.22 wird ersichtlich, dass der Effekt einer Absenkung der Wärmeleitfähigkeit durch einen reduzierten Zellgasdruck für die betrachteten Gerüstmaterialien mit Ausnahme der Kieselsäure erst unterhalb von 100 mbar voll zum Tragen kommt.

Hier nähert man sich dem Druck, bei dem die sich ergebende mittlere freie Weglänge für einen Zusammenstoß zweier Gasmoleküle dem für einen Zusammenstoß zwischen Molekül und Porenwand entspricht.

Bei ca. 0,1 mbar liegen die Werte für die Wärmeleitfähigkeit gegenüber denen unter Atmosphärendruck noch bei ca.:

- 11% für Glasfasern
- 13% für offenzelliges XPS
- 22% für Kieselsäure
- 25% für offenzelliges PUR

Dass sich die Materialien aus Abb. 2.22 wie dargestellt unterscheiden,

liegt neben der unterschiedlichen Porengröße an der materialspezifischen Porenverteilung, der Gerüstleitung und der Infrarotstrahlungsdurchlässigkeit.

Für den Einsatz in Vakuum-Dämmsystemen ergibt sich aus Abb. 2.22 eine besondere Eignung von Kieselsäuren, da hier aufgrund der besonders kleinen Poren die Anforderungen an das Vakuum (zu sehen an der flacheren Kennlinie) besonders gering sind. Bei Porenweiten kleiner als $0,5 \mu\text{m}$ liegt die Wärmeleitfähigkeit auch schon bei Normaldruck bei sehr niedrigen 18-25 mW/(mK).

2.1.8.2 (Infrarot-)Strahlungsdurchlässigkeit

Für den Anteil der Wärmeübertragung über Strahlung gilt näherungsweise⁴²:

$$\lambda_r \approx \frac{T^3}{E} = \frac{T^3}{\rho e}$$

mit

- λ_r Wärmeübertragung durch Strahlung zwischen Porenwänden [W/(mK)]
- T thermodynamische Temp. [K]
- E Extinktion in m^{-1}
- ρ Rohdichte des Dämmstoffes [kg/m^3]
- e massenspezifische Extinktion [m^2/kg]

Da T durch den jeweiligen Einsatzbereich vorgegeben wird, kann λ_r nur durch eine Optimierung von E

und/ oder ρ erfolgen. Da ein größeres ρ zu einer Erhöhung der Festkörperwärmeleitung führen würde, bleibt nur eine Vergrößerung der massenspezifischen Extinktion.

Bei Vakuum-Dämmsystemen ist also die Strahlungsdurchlässigkeit des Systems im Infrarotbereich (Wärmestrahlung) von Bedeutung. Diese kann die resultierende Wärmeleitfähigkeit maßgeblich beeinflussen. Daher werden im Kernmaterial sog. Trübungsmittel (siehe Teil 3 Abschnitt 2.2.5.1) eingesetzt. Kommen die in Teil 3 Abschnitt 2.2.4 aufgeführten mikroporösen Kieselsäuren zum Einsatz, lässt sich durch die Beimischung von Trübungsmitteln (zum Beispiel Titanoxid, TiO_2) die Wärmeleitfähigkeit bei Normaldruck auf unter 18 mW/(mK) reduzieren.

An dieser Stelle sei der Hinweis gegeben, dass entgegen einer oft vernommenen Annahme ein vollständiger Verzicht auf ein Kernmaterial (im Sinne einer Minimierung der Festkörperleitung) eine Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaften bedeuten würde, denn neben der wichtigen ‚Stützfunktion‘ dient das Kernmaterial zu einem wesentlichen Anteil auch der Vermeidung von Wärmeübertragung durch Strahlung.⁴³

2.1.8.3 Offenzelligkeit bei evakuierten Dämmstoffen

Eine wesentliche Voraussetzung für die Evakuierbarkeit eines Dämm-

stoffes ist seine möglichst vollständige Offenporigkeit, da es sonst unmöglich ist, die Anzahl der in den Poren eingeschlossenen Gasmoleküle zu reduzieren. Die Offenzelligkeit ist abhängig vom Material und dem gewählten Herstellungsprozess.

Gelingt es nicht, den Dämmstoff durchgehend offenzellig herzustellen, verbleiben einzelne geschlossene und aufgrund der Herstellungsbedingungen mit Gas gefüllte Poren im Gefüge.

Wird ein solches Material evakuiert, kommt es im Material zwischen offenen und geschlossenen Zellen zu einem deutlichen Druckgefälle.

Es besteht dann die Gefahr, dass die geschlossenen Zellen dem Druck nicht dauerhaft standhalten und das eingeschlossene Gas langsam in die offenzellige Struktur entweicht, in Folge dessen es zu einem Druckanstieg (also zu einer Reduzierung des Vakuums) und damit einhergehend zu einer Reduzierung des Wärmedurchgangswiderstandes kommen kann.

Zu kleine Verbindungen zwischen den einzelnen Poren verlängern zudem die Evakuierungszeiten erheblich.

Im Gegensatz zu geschäumten Kunststoffen sind Pulver- und Fasermaterialien aufgrund ihrer strukturellen Eigenschaften a priori offenzellig.⁴⁴

2.2 Vakuum

Unter Vakuum [zu lat. vacuum ‚leerer Raum‘] versteht man - vereinfacht ausgedrückt - den thermodynamischen Zustand in einen Raumbereich, in dem ein Druck herrscht, der unter dem der Atmosphäre liegt.⁴⁵ Eine obere Druckgrenze, also eine quantitative Festlegung eines Bezugsatmosphärendruckes ist nicht exakt definiert, da dieser von anderen Bedingungen abhängig und somit nicht konstant ist.

Pumpt man Gas aus einem Behälter, so reduziert man die Anzahl der Gasmoleküle und -atome darin im Verhältnis zum Außenraum. Diesen Vorgang nennt man ‚evakuieren‘. Da man unmöglich alle Gasmoleküle und -atome aus dem Behälter pumpen kann, sorgen die verbleibenden Gasteilchen für einen positiven Restdruck, auch wenn dieser nur noch sehr klein sein mag.

Einen (absoluten) ‚Unterdruck‘ gibt es nicht, der Zustand der absoluten Leere ist vielmehr eine gedankliche Vorstellung, die aller Erfahrung nach so wenig erreichbar ist, wie etwa der absolute Nullpunkt der thermodynamischen Temperatur T.

In der theoretischen Physik versteht man unter ‚Vakuum‘ einen materie- und energiefreien Raum. Während ein solcher vollständig entleerte Raum nicht herstellbar ist, können technische Vakua in verschiedenen Qualitäten hergestellt werden.

2.2.1 Einheiten

Die Größe eines Vakuums wird über den in dem betreffenden Raumbereich herrschenden Druck angegeben. Die SI-Einheit des Druckes ist 1 Pascal (Einheitszeichen Pa) mit $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2$. Trotz der Einigung auf die verbindliche SI-Einheit Pascal sind diverse andere Bezeichnungen noch sehr verbreitet, insbesondere die Einheiten bar und mbar. Hinsichtlich der Umrechnung zwischen den verschiedenen Einheiten sei auf Abb. 2.23 verwiesen.⁴⁶

Die in der Praxis unterschiedenen Vakuumbereiche finden sich in Abb. 2.24.

2.2.2 Kräfte auf evakuierte Platten

Auf plattenförmigen Elemente mit evakuiertem Kern lastet der Atmosphärendruck (siehe Abb. 2.25 links).

Der von innen herrschende Druck wirkt hierbei dem von außen angreifenden Luftdruck entgegen. Als Resultierende⁴⁷ wirkt der Druckunterschied senkrecht auf die Oberfläche (siehe Abb. 2.25 rechts):

$$P_{\text{RES}} = P_{\text{A}} - P_{\text{I}}$$

Liegt ein Kern mit weicher Hülle vor, muss dieser Druckunterschied vom Kernmaterial ohne nennenswerte Kompression aufgenommen werden können, da mit einem Volu-

	Pa	bar	mbar / hPa	Torr	atm	at
1 Pa	= 1	10^{-5}	10^{-2}	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$
1 bar	= 10^5	1	10^{-3}	750	0,987	1,02
1 mbar = 1 hPa	= 10^2	10^{-3}	1	0,75	$0,987 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$
1 Torr	= 133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1,33	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$
1 atm	= 101320	1,0132	1013,2	760	1	1,033
1 at	= 98100	0,981	981	736	0,968	1

Abb. 2.23 Umrechnungstabelle für Druckeinheiten (Anmerkung: 1 Torr = 1 mm Hg-Säule)

Vakuum-Bereich	Druck		Teilchenzahldichte [cm ⁻³]	mittlere freie Weglänge [cm]
	[Pa]	[mbar]		
Grob-Vakuum	100 - 10^5	1 - 1000	10^{16} - 10^{19}	10^{-7} - 10^{-4}
Fein-Vakuum	0,1 - 100	0,001 - 1	10^{13} - 10^{16}	10^{-4} - 0,1
Hoch-Vakuum	10^{-5} - 0,1	10^{-7} - 10^{-3}	10^9 - 10^{13}	0,1 - 10^3
Ultrahoch-Vakuum	$< 10^{-5}$	$< 10^{-7}$	$< 10^9$	$> 10^3$

Abb. 2.24 Druckbereiche⁴⁸, korrespondierende Teilchenzahldichte und mittlere freie Weglänge am Beispiel von Luft bei 300K

menverlust ein Innendruckanstieg einhergehen würde.

Besteht das Element jedoch aus einer harten Hülle ohne stützenden Kern, so muss der Druckunterschied durch das Hüllmaterial und den Randverbund aufgenommen werden können.

Die sich ergebenden Lastanforderungen auf das Hüllmaterial sind in diesem Falle erheblich (bis zu $10,3 \text{t/m}^2$). Daher sind hier gegebenenfalls zusätzliche ‚Abstandhalter‘ im Kernbereich erforderlich, wie dies beispielsweise von sogenannten ‚Vakuum-Verglasungen‘ (siehe Teil 3 Abschnitt 3) bekannt ist.

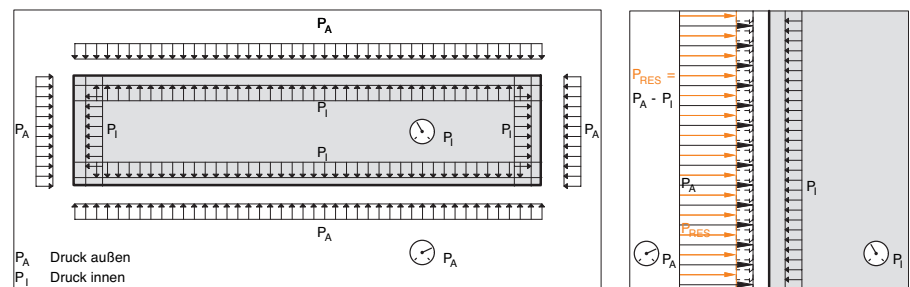


Abb. 2.25 Auf plattenförmige, evakuierte Elemente wirkende Kräfte (links) Druckresultierende (rechts)

2.2.3 Exkurs: Von der Beschäftigung mit dem Vakuum

2.2.3.1 Das Phänomen Vakuum

Die Diskussion um das Wesen des Raumes beschäftigte Philosophen bereits in der Antike: Ist der Raum mit Stoff gefüllt oder ist er leer?

Die Debatte um das ‚Nichts‘ wurde in der griechischen Antike im wesentlichen durch zwei sich widersprechende Theorien bestimmt, die Vorstellungen vom ‚Atom‘ (als nicht mehr weiter zerlegbaren Teilchen) und vom ‚Kontinuum‘ standen sich gegenüber.

Die sogenannte ‚Atomische Schule‘ um die griechischen Philosophen Plato (um 428-347 v. Chr.), Demokrit (460-371 v. Chr.), Leukipp (um 450-370 v. Chr.) und später auch Epikur (341 - 271 v. Chr.) vertrat die These⁴⁹, „alle Körper bestünden aus unzähligen Substanzen, die zwar verschieden groß, aber immer noch so klein seien, dass sie von menschlichen Sinnen nicht erfasst werden könnten, und dass sich diese Substanzen im leeren Raum bewegen, zusammenstoßen, sich gegenseitig berühren und nahe beieinander seien.

Diese Gebilde nannten sie Atome, die ‚Unteilbaren‘. Selbst im Idealfall engster Packung träten zwischen den Atomen Zwischenräume auf.“

Hier gäbe es also das ‚Nichts‘, und die Verfechter dieser These



Abb. 2.26 Evangelista Torricelli⁵⁰

postulierten damit sozusagen das Vakuum als Behälter für Atome im Vorgriff auf die Idee des Newtonschen Raumes.

Eine entgegengesetzte Auffassung vertraten die Anhänger der ‚Kontinuumstheorie‘ um den Philosophen Aristoteles (384-322 v. Chr.), die die Existenz des Leeren grundsätzlich negierten, denn ‚die Natur macht nichts vergeblich‘.⁵¹

Dieser Vorstellung folgend war die Welt als lückenloser und kontinuierlicher Zusammenhang der vier Elemente Erde, Wasser, Feuer und Luft zu verstehen.

Daher lehnte Aristoteles auch den Begriff ‚Raum‘ an sich ab, da eben alles in der Welt mit mindestens einem dieser Elemente gefüllt sei. Aus der Vorstellung, die Nichtexistenz des Raumes bewiesen zu haben, folgte er, dass es auch



Abb. 2.27 Torricelli's Luftdruckversuche⁵²

keinen leeren Raum geben könne.⁵³

Die Vorstellungen des Aristoteles überdauerten fast 2000 Jahre. Auch die Kirche hielt an diesem Paradigma fest: Ein Zweifel am ‚Horror vacui‘ - dem Abscheu der Natur vor der Leere - konnte zur Konfrontation mit der Inquisition führen.

Die Behauptung der Existenz des ‚Nichts‘ widersprach der Allgegenwart Gottes⁵⁴. Dem Menschen dieser Zeit schien die Vorstellung des ‚Nichts‘ in der Schöpfung undenkbar oder zumindest sinnlos und damit auf das Gotteswerk der Schöpfung nicht anwendbar.

Nach den theoretischen Diskussionen über das Vakuum in der Antike gewann das Problem des luftleeren Raumes erst durch Versuche von Evangelista Torricelli (1608-47, Abb. 2.26 und 2.27), Schüler Gali-

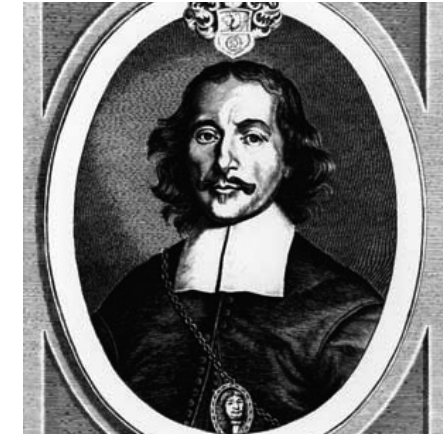


Abb. 2.28 Otto von Guericke⁵⁵

leo Galileis (1564-1642), praktische Bedeutung:

1643 füllte er eine einseitig verschlossene Glasröhre randvoll mit Quecksilber. Als er das Rohr mit dem offenen Ende nach unten in eine ebenfalls mit Quecksilber gefüllte Schale stellte, sackte die Flüssigkeitssäule ein Stück weit ab.

Unabhängig von der Länge des Rohres pendelte sich der Flüssigkeitspegel immer auf der gleichen Höhe ein. Oberhalb des Quecksilberspiegels befand sich nichts als freier Raum, die sogenannte ‚Torricellische Leere‘. Dieser Versuch gilt allgemein als der erste experimentelle Nachweis von Vakuum.

Aufbauend auf den Vorarbeiten Torricellis errechnete der Physiker und Religionsphilosoph Blaise Pascal (1623-1662) im Jahre 1648 zum ersten Mal die Dichte der Luft.



Abb. 2.29 Der Versuch mit den ‚Magdeburger Halbkugeln‘⁵⁶ von 1663

Außerdem entdeckte er im gleichen Jahr den Zusammenhang von Luftdruck und Höhe:

Bei Clermont-Ferrand konnte durch das Torricelli'sche Experiment - einmal auf dem Berg Puy de Dome und einmal im Tal - nachgewiesen werden, dass der Luftdruck mit zunehmender absoluter Höhe abnimmt.

1654, während des Reichstages zu Regensburg, experimentierte Otto von Guericke (vor 1666: Otto Gericke, 1602-1686, Abb. 2.28) erstmals öffentlich mit dem ‚Vakuum‘. Er hatte vorher erste Luftpumpen aus umgebauten und mit Ventilen versehenen Handfeuerspritzen konstruiert.

Seine Forschungen zum ‚leeren Raum‘ wurden jedoch nicht durch das Interesse am Kleinsten, am Atom, sondern durch die Astronomie und die Frage angeregt, ob der

Welt-Raum mit einem Stoff, einem ‚Äther‘ angefüllt war, wie dies Descartes (1596-1650) in seinen ‚Principia philosophiae‘ behauptete: „Was mochte das All wohl sein, umfaßt es doch alles und gewährt ihm die Stätte seines Seins und Bleibens? Ist es irgendein feuriger Himmelsstoff, fest? Oder ist es eine durchsichtige Quintessenz? Oder am Ende der stets geleugnete, jeder Stoffheit bare Raum?“⁵⁷

Von Guericke wollte auf der Erde einen luftleeren Raum schaffen, um damit die Leere des Weltalls zu beweisen.

1663 führte er am Hof des großen Kurfürsten zu Berlin das Experiment der ‚Magdeburger Halbkugeln‘ (erstmalig 1656, Abb. 2.29) vor:

Mithilfe von Luftpumpen evakuierte er den Luftraum zwischen zwei Kupferhalbkugeln weitgehend.

Die beiden Halbkugeln waren mit einem in Öl und Wachs getränkten Lederriemen abgedichtet und hatten einen Durchmesser von ca. 42 cm.

Zwei Pferdegespanne von je acht Pferden vermochten nicht, die Halbkugeln zu trennen, da der auf ihnen lastende äußere Luftdruck zu groß war.⁵⁸

Die Kraft, die auf jede Originalhalbkugel wirkte, betrug dabei ca. 13,85 kN. Das entspricht der Gewichtskraft einer Masse von ca. 1,411 t.⁵⁹

Im Anschluss entwickelte sich die Vorstellung, dass es, unabhängig von jeder Materieform, Raum und Zeit ‚an sich‘ gäbe.

Außer durch Albert A. Michelson (1852-1931) wurde diese Vorstellung des ‚absoluten Raumes an sich‘ als Behältnis für Materie vor allem durch die Relativitätstheorien Albert Einsteins (1879-1955) widerlegt, der in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie postulierte, dass „Raum und Zeit an sich keine physikalischen Begriffe sind“, sondern dass „jegliche Materieform Ursache eines Raum-Zeitfeldes, also des sie umgebenden Raumes und der Zeit ist.“

Ohne Materie gibt es keinen Raum und keine Zeit. Dabei umfaßt der Begriff Materie heute nicht nur Moleküle und Atome, sondern auch sämtliche Energieformen, wie zum Beispiel die der Lichtquanten.“⁶⁰

Ist das Vakuum somit ein Bereich zwischen physikalischen Körpern, in dem sich weder Masse noch Energie befindet?

Gemäß Erkenntnissen der modernen Physik gibt es ein solches Vakuum nicht oder vielleicht besser ‚nie‘, denn selbst in einem theoretischen, leeren (also materielosen) Raum entstehen - stark vereinfacht - ständig Paare verschiedenster Materie- und Antimaterieteilchen. Nach unmessbarer Zeit vernichten sich diese Teilchen wieder.

Allerdings scheinen verschiedene Erhaltungssätze, zum Beispiel der Ladungs- oder der Energieerhaltungssatz mit der dazu gehörenden Unbestimmtheitsrelation auch hier weiter zu gelten, - ebenso wie die Erkenntnis, dass je mehr und je massereichere Teilchen aus dem Nichts entstehen, desto kürzer deren Lebenszeit ist.

Dieses Phänomen wird als ‚Vakuumfluktuation‘ bezeichnet, die entstehenden und verschwindenden Teilchen nennt man ‚virtuelle Teilchen‘. Diese Vorgänge sind nur indirekt messbar, indem man zum Beispiel ein Elektron durch ein Vakuum schickt und dessen Abweichung von der ‚idealen‘ Bahn verfolgt.

Der heutige Kenntnisstand, nachdem es also ein Vakuum in unserer aus Atomen aufgebauten Welt doch nicht gibt, bestätigt somit im übertragenen Sinne beide Theorien der griechischen Antike.

2.2.3.2 Vakuum(luft-)pumpen

Neben den philosophischen und physikalischen Fragen zum Begriff ‚Vakuum‘ beschäftigt die Technologie zur Erzeugung von Unterdruck und Vakuum die Menschen seit langer Zeit. Da für die vorliegende Arbeit die Erzeugung des Vakuums nicht im Vordergrund steht, soll hier nur ein kurzer Überblick über die verschiedenen eingesetzten Prinzipien folgen.⁶¹

Abb. 2.30 stellt gebräuchliche Pumpentypen in einen typologischen Zusammenhang.⁶²

In Abb. 2.31 finden sich die Arbeitsbereiche ausgewählter Pumpentypen. In der Praxis müssen verschiedene Pumpentypen oft kombiniert werden, da einzelne Pumpen das benötigte Anwendungsspektrum nicht abdecken können.⁶³

Wesentliche Auswahlkriterien für einen bestimmten Pumpentyp sind neben dem Arbeitsbereich die Pumpgeschwindigkeit und die Eignung für die zu pumpenden Gasarten.

Für die Herstellung von Vakuum-Dämmsystemen wurden bisher zum Beispiel eine Drehschieberpumpe (Rotary Vane Pump, Kapazität 400 m³/h) in Kombination mit einer Wälzkolbenpumpe (Roots Pump, Kapazität 500m³/h) eingesetzt, mit der ein Druckniveau von ca. 0,1 mbar in ca. 40 Sekunden erreicht werden kann.⁶⁴

2.2.3.3 Vakuum-Messgeräte

Der Begriff des Vakuums umfasst heute einen technisch erzeugbaren Druckbereich, der sich von fast 10⁵ Pa (Atmosphärendruck) bis zu weniger als 10⁻¹² Pa erstreckt.

Ein solcher Umfang von mehr als 17 Zehnerpotenzen lässt sich nicht mit einer Art von Messgerät quantifizieren, - genauso wenig, wie er sich mit einer Art Pumpe erzeugen lässt. Abb. 2.32 gibt einen Überblick über verschiedene Unterdruckmessgeräte, sogenannte Vakuummeter. Abb. 2.33 zeigt die unterschiedlichen Arbeitsbereiche verschiedener Messverfahren.

Alle der aufgeführten Vakuummeter dienen der Totaldruckmessung. Mit Geräten zur Partialdruckmessung können neben der Identifizierung der einzelnen Gasgemischkomponenten und den Partialdrücken eines Gasgemisches auch die Konzentration der einzelnen Komponenten bestimmt werden.⁶⁵

Bezüglich der Zusammenhänge mit dem Thema ‚Funktionsdauer‘ sei auf Teil 3 Abschnitt 2.10 verwiesen. Das va-Q-check®-Verfahren, das auf dem Prinzip eines Wärmeleitungs-Vakuummeters beruht, wird in Teil 3 Abschnitt 2.6.1 beschrieben.

Früher wurde die Messung des Innendrucks schon gefertigter Paneele meist gemessen, indem man diese (erneut) in die Vakuum-

Transport- oder Förderpumpen				Speicherpumpen
Verdränger~	Treibmittel~	Molekular~	Ionen~	Getter
Hubkolben~	Wasserstrahl~	Turbomolekular~		Sorptions~
Drehschieber~	Dampfstrahl~			Getter~
Sperrschieber~	Diffusions~			Ionengetter~
Drehkolben~				Kyro~
Wälzkolben~				Kondensations~
Wasserring~				Kyrosorptions~

Abb. 2.30 Verschiedene Vakuumpumpentypen [~ = Pumpe]⁶⁶

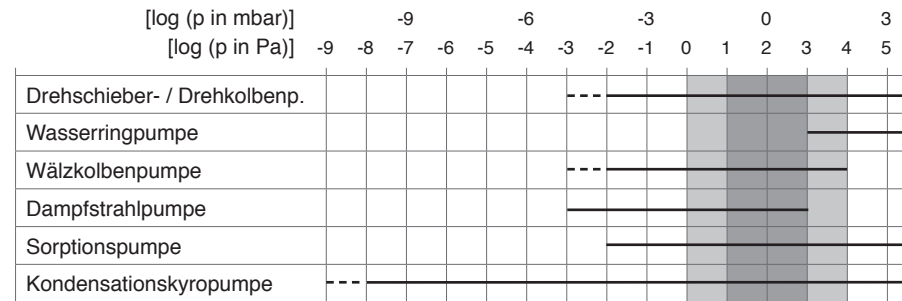


Abb. 2.31 Arbeitsbereiche verschiedener Pumpentypen (Auswahl)⁶⁷ - markiert ist der Arbeitsbereich üblicher Vakuum-Dämmsysteme

kammer legte, mit dem Abpumpen begann und beobachtete, ab wann die Hüllfolie anfang, sich vom Kern abzuheben. Diese Methode ist vor allem zeitlich aufwändig und kaum für eine 100%-ige Qualitätskontrolle umsetzbar. Siehe hierzu ausführlich Abschnitt 2.10.2 in Teil 3.

Auch andere Verfahren wurden erprobt, sind zum Teil auch für Entwicklungsarbeiten interessant, haben sich aber für die

breite Anwendung im Bereich von Vakuum-Dämmsystemen nicht bewähren können. Zu nennen sind hier insbesondere das Kugel-Reibungs-Vakuummeter, z.B. das SpiroTorr®-Instrument⁶⁸, mit dem die druckabhängige Viskosität des Restgases mittels einer rotierenden Kugel gemessen wird, oder auch das Wärmeleitungs-Vakuummeter nach Pirani, mit dem der Energieentzug eines heißen Drahtes durch das Restgas bestimmt wird.

2.2.4 Vakuum - weitere Anwendungen

Vakuumtechnik spielt außer im Bereich von Vakuum-Dämmsystemen in vielen Bereichen des täglichen Lebens eine bedeutende Rolle, zum Beispiel in

- chemischen und physikalischen Untersuchungsverfahren,
- industriellen Herstellungsprozessen.

Ohne diese Technik gäbe es viele Errungenschaften und Annehmlichkeiten nicht: Autofahren, Fernsehen, bestimmte Arzneimittel und Diagnoseverfahren, Computer, Milchpulver, Wandspiegel u.v.m.

Überall dort, wo die freie Bewegung von Elektronenstrahlen erforderlich ist (zum Beispiel in Bildröhren oder Elektronenmikroskopen), ist der Einsatz von Vakuumtechnik unumgänglich.

Das gleiche gilt für wesentliche Vorgänge im Rahmen von (zum Beispiel Metall-) Beschichtungen und der Fertigung von Mikroelektronik, ebenso für Umgebungen, in denen durch das Vorhandensein von Gasen unerwünschte chemische Reaktionen ablaufen würden, wie zum Beispiel innerhalb von Glühbirnen.

In der Grundlagenforschung, zum Beispiel der Elementarteilchen-, astrophysikalischen, biologischen, chemischen oder Material-For-

schung sind Hoch- und Höchstleistungsvakuumpumpen notwendige Hilfsmittel.

Auch beim Gefriertrocknen etwa von Kaffee, Milch, Gemüse oder Blut spielt Vakuumtechnik eine Rolle. Hier nutzt man aus, dass sich der Siedepunkt des Wassers bei niedrigen Drücken nach unten verschiebt.

Technisch beherrscht man heute die Herstellung eines Ultrahochvakuums bis etwa 10^{-14} mbar. Dies entspricht ca. 100 Teilchen pro cm^3 .

Im Vergleich dazu enthält Luft bei Atmosphärendruck etwa 10^{19} Teilchen pro cm^3 , der interstellare Raum unserer Galaxis hingegen nur etwa 20 Teilchen pro cm^3 , der intergalaktische Raum statistisch sogar nur 0,1 Teilchen pro cm^3 .

In Abb. 2.34 sind beispielhaft die Druckgebiete verschiedener Bereiche, Anwendungen, Herstellungsprozesse und Untersuchungsmethoden grafisch dargestellt. Zum Vergleich wurde die Tabelle um den Arbeitsbereich üblicher Vakuum-Dämmsysteme ergänzt.

Mechan. Vakuummeter	Wärmeleitungs-vakuummeter	Ionisations-vakuummeter
Bourdon- oder Röhrenfeder~	· Ausführung nach Pirani	· mit kalter Kathode
Membranvakuummeter	· Thermoelektrische V.	· mit Glühkathode
· mit mechanisch. Sensor		· nach Extraktorprinzip
· mit Widerstands-Sensor		
· mit kapazitivem Aufnehmer		
Reibungsvakuummeter		
Modulationsmanometer		
U-Rohr-Manometer		
Kompressions~ (n. McLeod)		

Abb. 2.32 Verschiedene Vakuummeter (Auswahl)⁶⁹
[~ = Vakuummeter]

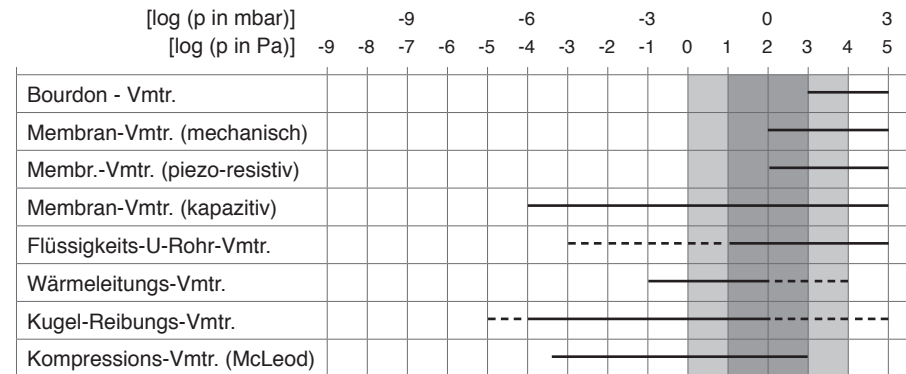


Abb. 2.33 Arbeitsbereiche verschiedener Vakuummeter (Auswahl)⁷⁰ -
markiert ist der Arbeitsbereich üblicher Vakuum-Dämmsysteme

Druckgebiete ($p < 1 \text{ bar}$)

[log (p in Pa)]	...	-17	-16	-15	-14	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
[log (p in mbar)]	...		-18			-15			-12			-9		-6			-3		0					3

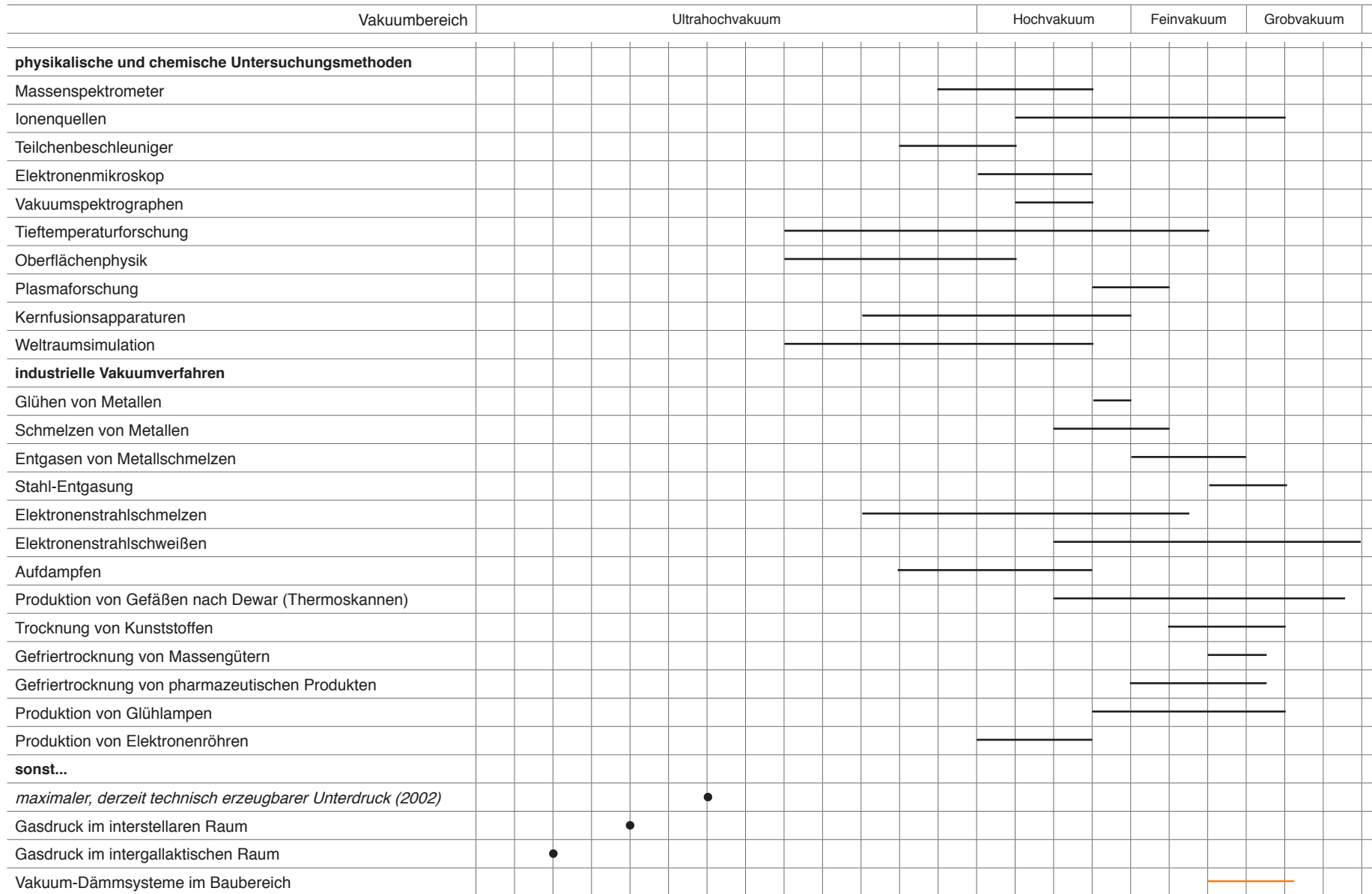


Abb. 2.34 Druckgebiete ($p < 1 \text{ bar}$) verschiedener Bereiche, Untersuchungsmethoden, industrieller Verfahren und Vakuum-Dämmsysteme

Anmerkungen

1. Siehe hierzu ausführliche Darstellung in Zürcher, Ch. u.a.: Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis (1998), S. 21 f.
2. Abb 2.1, 2.2, 2.3 und 2.4 sind entnommen aus Herzog, Krippner, Lang: Fassadenatlas (2004), S. 22. Bearbeitung des Kapitels ‚Außen- und Innenbedingungen‘ durch den Verfasser der vorliegenden Arbeit.
3. Cammerer, Walter: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie (1995), S. 21
4. ebd., S. 20
5. ebd., S. 26
6. ebd., S. 415f und Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 25; Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit λ_{R} im Bauwesen finden sich in DIN 4108 T4.
7. Grafik des Autors, unter Verwendung einer Vorlage aus Zürcher, Ch. u.a.: Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis (1998), S. 21
8. siehe hierzu ausführliche Darstellung, insbesondere zu den physikalischen Zusammenhängen bezüglich der Wärmeübertragung über Strahlung, in Heinemann, U. u.a.: Characterization and Optimization of Filler Materials for Vacuum Insulations, (Mailand, 1998), S. 44f
9. Daten aus Willems, W. u.a.: Vakuum: Hocheffiziente Wärmedämmung der Gebäudehülle (2002), S. 49-50
10. Definition des Begriffes ‚hygroscopisch‘ aus: Duden ‚Die Chemie‘ (1988)
11. Deimling, Axel: Wärmedämmung von Vakuum-Stahlmantel-Fernheizrohren (1983), S. 41
12. vergl. Cammerer, Walter: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie (1995), S. 37-39
13. Die im Folgenden aufgeführten Begriffe beziehen sich (auch in der Nomenklatur) auf DIN 4108-3:2001-07, Anhang A, S. 14-28
14. Tabelle A.2 auf S. 18 im Anhang von DIN 4108-3:2001-07 listet den Wasserdampf-sättigungsdruck zu Temperaturen von -20,9 °C bis 30,9 °C.
15. Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl gibt an, „um welchen Faktor der Wasserdampf-Diffusionswiderstand des betrachteten Materials größer ist, als der einer gleichdicken, ruhenden Luftschicht gleicher Temperatur“. (Aus DIN 4108-3:2001-07, 3.1.2, S. 5)
16. Grafik des Verfassers. Vergleiche hierzu Darstellung mit Messwerten in: Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender (2004), S. 89
17. vergl. Bonk, M.; Anders, F.: Reihe Schadenfreies Bauen, Band 32, Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz (2004) und Mainka, G.-W.; Paschen, Heinrich: Wärmebrückenkatalog (1986)
18. siehe W.M. Willems in: Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender (2004), S. 90
19. ebd., S. 91
20. ebd., S. 91
21. vergl. Sedlbauer, K.; Gabrio, T.; Krus, M.: Schimmelpilze - Gesundheitsgefährdung und Vorhersage (2002), S. 285-295. Kern der vorgestellten Arbeit ist ein Vorhersagemodell für die Schimmelpilzbildung, das auf einem sog. ‚Isoplethenmodell‘ beruht: Mit dessen Hilfe „soll ein Vergleich der hygrothermischen Bedingungen mit den Wachstumsvooraussetzungen für Sporenkeimung und Myzelwachstum ermöglicht werden.“ (Abschnitt 4.2). Weiter heißt es dort: „Mithilfe des neuentwickelten Vorhersagemodells können für reale instationäre Randbedingungen baulich und nutzungsbedingte Wachstumswahrscheinlichkeiten ermittelt werden.“ (Abschn. 5)
22. vergl. Herzog, Thomas: Transluzente Bauteile - Anmerkungen zu ihrer Wirkung (1992)
23. Historisches Quecksilberbarometer aus dem 17. Jh., das im Deutschen Museum in München ausgestellt wird.
24. aus Edelmann, C.: Vakuumtechnik (1985), S. 20
25. zu ‚Luftdruck‘ lt. ‚Meyers Grosses Taschenlexikon in 24 Bänden‘; Bibliografisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich; Ausgabe 1983
26. Im späten 16. und frühen 17. Jh. versuchte man erstmals, die hiermit in direkter Verbindung stehende Frage zu beantworten, warum eine Wassersäule - unabhängig von ihrem Querschnitt - in einer einfachen Saugpumpe nur über eine Höhe von ca. 10 m gehoben werden konnte ohne abzureissen (ein Bergleuten und Brunnenbauern wohlbekanntes Phänomen). Gemäß Brachner [Brachner, A. (2003), S. 7] versuchte insbesondere Galileo Galilei (1564-1642) gegen Ende seines Lebens, hierauf eine Antwort zu finden. Er zog im Rahmen dieser Versuche als einer der ersten ein (wenn auch nur kurz auftretendes) Vakuum in Betracht. Weiteres hierzu in Abschnitt 2.2.3
27. Hier stand der Name des Erfinders des Quecksilberbarometers Pate: Evangelista Torricelli. Siehe Abschnitt 2.2.3.
28. vergl. Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 6
29. Bei Zusammenstößen zwischen Gasmolekülen spielen auch die Geschwindigkeiten der beteiligten Teilchen eine Rolle. Nach der sog. Maxwell-Boltzmann’schen Verteilungskurve lässt sich die wahrscheinlichste Geschwindigkeit (c_w) ermitteln. Zur Vertiefung dieser Thematik siehe Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 19f
30. Diese Formel findet sich neben einer knappen Einführung in die Gasgesetze bei Franke, Hans (2003)
31. vergl. Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 21
32. Die im Abschnitt ‚Wärmeübertragung im Gasraum‘ dargestellten Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge sind im wesentlichen folgenden Grundlagenwerken entnommen: Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991) und Edelmann, C.: Vakuumtechnik (1985)
33. vergl. Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 25
34. Sir James Dewar (1842-1923), ab 1875 Jacksonian Professor in Cam-

bridge (UK), hat 1892/93 im Rahmen seiner kryogenischen Studien die nach im benannten Vakuum-Gefäße erfunden. Ab 1904 wurden solche Gefäße von deutschen Glasbläsern kommerziell gefertigt und vertrieben, die unter dem Namen Thermos GmbH firmierten. Ein gelungener Überblick zur Geschichte der Vakuum-Dämmtechnik findet sich in Fricke, Jochen: From Dewars to VIPs - One Century of Progress in Vacuum Insulation Technology, Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 5-14

35. Bildquelle: <http://www.wessington-cryogenics.co.uk> <12.2003>

36. Bildausschnitt, Bildquelle: JEOL USA, Inc. (<http://www.jeol.com/> <12.2003>) Dort heißt es zu dieser Abbildung:
 ‚The outside shell of the superconducting NMR (Nuclear Magnetic Resonance) magnet is made from stainless steel...about 3 mm thick... The picture shows the outside of the liquid nitrogen vessel with a portion of the outer can and aluminized Mylar super-insulation removed. The Mylar insulation reflects the infra-red heat radiation from the inside of the room temperature surface. There are about 165 layers of the aluminized Mylar insulation. During normal operation of the magnet this ‚space‘ is evacuated under high vacuum. The high vacuum is maintained by the cryopumping action of the 4K liquid helium can.‘

37. Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmedämmung HLWD (2000), S. 9

38. Neben diesen Angaben ist der in diesem Abschnitt beschriebene Zu-

sammenhang ausführlich dargelegt in Fricke, Jochen: Materials Research for the Optimization of Thermal Insulations, High Temp.- High Press. 25 (1993), S. 379-390

39. Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmedämmung HLWD (2000), S. 10

40. nach Maryan von Smoluchowski (1872-1917)

41. siehe Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender (2004), S. 86-88

42. siehe hierzu Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender (2004), S. 88. Hier wird weiter erläutert:
 „Die Extinktion (Auslöschung) oder auch der Extinktionskoeffizient E mit der Einheit 1/m oder 1/cm ist definiert als der Logarithmus des Verhältnisses von eingetretener Strahlungsleistung I_0 zu längs der Schichtdicke d abgeklungener Strahlungsleistung I.“

43. Hieraus ergibt sich auch die Erkenntnis, dass Wärmeübertragung niemals vollständig unterbunden werden kann, denn selbst im Vakuum bilden Minimierungsmaßnahmen der beiden Hauptübertragungsweisen einen unauflösbaren Zielkonflikt:
 Entfernt man die Materie zwischen den Grenzwänden vollständig (auch das Gas), so wird die Übertragung über Strahlung überhaupt nicht eingeschränkt. Diese wiederum kann nur durch Masse reduziert werden, die immer Wärmeenergie über Leitung transportiert.

44. Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmedämmung HLWD (2000), S. 8

45. vergl. Definition in Edelmann, C.: Vakuumtechnik (1985), S. 17

46. Für die vorliegende Arbeit ergibt sich danach insbesondere:
 1 bar = 10 N / cm²
 1 mbar = 1 N / (10 cm)²

47. Auf eine Fläche von 100 cm² bezogen entspricht P_{RES} der Gewichtskraft folgender (gerundeter) Massen bei einem durchschnittlichen Luftdruck von $P_A = 1,0132$ bar und einem erzeugten Innendruck P_I :

P_I [mbar]	[kg]
1013,20	0
1000	1,35
100	93,09
10	102,26
1	103,18
0,1	103,27

48. Angaben aus Josten, Karl (Hrsg.): Wutz Handbuch Vakuumtechnik (2004), S. 749

49. vergl. Brachner, Alto: Geschichte der Vakuumpumpen (2002), S. 4f

50. Bildquelle: <http://www.photolib.noaa.gov/> <10.2003>

51. vergl. Ausführungen von Bilic, Maja unter: <http://www.lexi-tv.de/> <10.2003>, sowie von Böhme, Hartmut: Das Volle und das Leere. Zur Geschichte des Vakuums (2003), S. 42-67

52. Bildquelle: <http://www.phys.uniroma1.it/> <10.2003>

53. vergl. Brachner, Alto: Geschichte der Vakuumpumpen (2002), S. 4

54. siehe <http://www.deutsches-museum-bonn.de/ausstellungen/meisterwerke/halbkugeln/> <10.2003>

55. Bildquelle: <http://www.laurentianum.de/> <10.2003>

56. Bildquelle: ebd.

57. vergl. Maja, Bilic, unter: <http://www.lexi-tv.de/lexikon/> <10.2003>

58. Hierzu schreibt Otto von Guericke in seinen ‚Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio‘ (Drucklegung 1672 in Amsterdam):
 ‚Mit dem Lederring als Zwischenlage wurden nun diese Halbkugeln aufeinandergepasst und dann die Luft (...) rasch ausgepumpt. Da sah ich, mit wieviel Gewalt sich die beiden Schalen gegen den Ring pressten! Und diesergestalt hafteten sie unter der Einwirkung des Luftdrucks so fest aneinander, dass 16 Pferde sie gar nicht oder nur mühsam auseinanderzureißen vermochten. Gelingt aber bei größter Kraftanstrengung die Trennung zuweilen doch noch, so gibt es einen Knall wie von einem Büchsen schuß‘.

Die Originale der berühmten Halbkugeln sind übrigens im Bestand des Deutschen Museums in München.

59. Bildquelle: <http://www.laurentianum.de/physikmuseum/> <10.2003>

60. vergl. Brachner, Alto: Geschichte der Vakuumpumpen (2002), S. 9f

61. Zur Vertiefung dieser Thematik sei hier bezüglich der Historie auf die sehr ausführliche und umfassend bebilderte Publikation ‚Geschichte der Vakuumpumpen‘ des Deutschen Museums München (Hrsg. Brachner, Arno; 2002) verwiesen.

62. siehe hierzu ausführliche Darstellung und Bebilderung in Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991) und Edelmann, C.: Vakuumtechnik (1985)

63. Zu gebräuchlichen Kombinationen verschiedener Vakuumpumpentypen siehe Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 124f

64. siehe Oesterlein, A.: Special Machines for Production of large VIP (1998), S. 71

65. Das Thema ‚Vakuum-Messverfahren‘ soll hier allgemein nicht vertieft werden, weiterführendes findet sich zum Beispiel in Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 30ff

66. nach Edelmann, C.: Vakuumtechnik (1985), S. 86ff. Eine deutlich ausführlichere Typologie findet sich bei Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 516

67. Grafik des Autors unter Verwendung von Daten aus: Edelmann, C.: Vakuumtechnik (1985), S. 125f. Es ist zu beachten, dass die gewählte Darstellung logarithmisch angelegt ist: Jede senkrechte Linie der Figur entspricht einer Zehnerpotenz des Gasdruckes. Dies gilt auch für entsprechende, folgende Darstellungen.

68. Dieses Instrument, das seinen typischen Anwendungsbereich bei Drücken zwischen 10^{-3} bis 1 mbar hat, wurde ab Ende der 80er-Jahre auch bei der Entwicklung von VIPs eingesetzt, eignet sich aber wegen des Druckanwendungsbereiches nur für Schaumstoffkern-Paneele und weniger für Kerne auf Kieselsäurebasis. Außerdem bedingt der Einbau des Stahl- oder Glasröhrchens mit der

Messkugel (\varnothing ca. 8,4 mm, Länge ca. 60 mm), das vom eigentlichen Messgerät aufgenommen werden muss, eine aufwändige Durchdringung des Hüllmaterials.

Informationsquelle hierzu: Paetz, Stephan: Messprinzip des SpiroTorr/SVG1 Gasreibungsvakuometers, Firma SAES Getters Group, Lainate/ Italien (1998)

69. Grafik des Autors basierend auf Angaben aus Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 32ff, und Edelmann, C.: Vakuumtechnik (1985), S. 135ff

70. Grafik des Autors beruhend auf Daten aus Pupp, W.; Hartmann, H.: Vakuumtechnik (1991), S. 32

Inhaltsverzeichnis

Teil 3

Im Baubereich eingesetzte Vakuum-Dämmsysteme

Abschnitt	Seite	Abschnitt	Seite	
1	Typologien der zum Einsatz kommenden Systeme	42		
2	Vacuum-Insulation-Panels (VIP)	45		
2.1	Innendruckbereich	45		
2.2	Kernmaterial	45		
2.2.1	Organische Schäume	45		
2.2.2	Glasfasern	47		
2.2.3	Aerogele	47		
2.2.4	Mikroporöse Kieselsäuren	48		
2.2.4.1	Fällungskieselsäure	49		
2.2.4.2	Nanostrukturierte pyrogene Kieselsäure	49		
2.2.4.3	Anwendungsformen der Kieselsäure	50		
2.2.5	Sonstige Kernmaterialbestandteile	50		
2.2.5.1	Trübungsmittel	50		
2.2.6	Kernmaterialien im Vergleich	50		
2.3	Gasdichtes Hüllmaterial	52		
2.3.1	Glas	52		
2.3.2	Metallblech und -folien	53		
2.3.3	Kunststoff- und Kunststoffverbundfolien	53		
2.3.3.1	Zur Gasdurchlässigkeit von Folien	55		
2.3.3.2	Reine Kunststoff-Folien	55		
2.3.3.3	Kunststoff-Metallfolien-Verbund	56		
2.3.3.4	Metallisierte Kunststoff-Folien	56		
2.3.3.5	Kunststoff mit SiO _x - (oder AlO _x)-Beschichtung	57		
2.3.3.6	Folienprodukte im Vergleich	57		
2.3.4	Der Randverbund	58		
2.3.4.1	Der Randverbund für die Verwendung von Glas	58		
2.3.4.2	Der Randverbund für die Verwendung von Metallblech	58		
2.3.4.3	Der Randverbund für die Verwendung von Folien	59		
2.4	Abstandhalter	60		
2.5	Evakuier-Anschlüsse	60		
2.6	Einbauteile für spätere Messungen des Paneelinnendrucks	60		
2.6.1	Das va-Q-check [®] -Verfahren	61		
2.7	Trocknungsmittel und ‚Getter‘	62		
2.8	VIP: Freiheiten im Zusammenhang mit der Formfindung	63		
2.9	Produkte	63		
		2.9.1	Herstellungsverfahren	63
		2.9.2	Produktübersicht	63
		2.9.3	Wärmeleitgruppen - Klassifizierung	64
		2.9.4	Brandschutz - Klassifizierung	64
		2.9.5	Schallschutz - Klassifizierung	64
		2.10	Funktionsdauer	66
		2.10.1	Begriffsdefinition	66
		2.10.2	Qualitätssicherung	66
		2.10.2.1	Der Gasdruckanstieg in VIP - Ursachen	67
		2.10.2.2	Abhängigkeit vom Gasdruckanstieg	67
		2.10.2.3	Abhängigkeit von der Feuchtigkeitszunahme	67
		2.10.2.4	Abhängigkeit vom Verhältnis Hüllfläche zu Volumen	67
		2.11	Ökologie	68
		2.12	Anwendungen von VIP in baufremden Bereichen	68
		2.13	Patente zu Vakuum-Dämmsystemen	69
		3	‚Vakuum-Verglasung‘	70
		3.1	Begrifflichkeit	70
		3.2	Aufbau	70
		3.3	Innendruckbereich	70
		3.4	Gläser	70
		3.5	Abstandhalter	70
		3.6	Randverbund	71
		3.7	Evakuier-Anschluss	71
		3.8	Funktionsdauer	71
		3.9	Weitere Anwendungen	71
		4	Thermische Messverfahren für Vakuum-Dämmsysteme	72
		4.1	Physikalische Grundlagen	72
		4.2	Szenarien	72
		4.3	Einzelne thermische Messverfahren	72
		4.3.1	Guarded Hot Plate	72
		4.3.2	Guarded-calibrated Hot Box	73
		4.3.3	Heat Flow Meter	73
		4.3.4	Proprietäre und sonstige Verfahren	73
			Anmerkungen	74

Teil 3

Im Baubereich eingesetzte Vakuumdämmsysteme

Vakuumdämmsysteme lassen sich grundsätzlich in zwei verschiedene Gruppen einteilen:

1. evakuierte Einzelelemente (zum Beispiel flache Paneele) und
2. Behälterformen mit evakuierbaren Wandschichten, die einen Hohlraum umgeben, der im wesentlichen durch das Vakuum vom Außenbereich abgetrennt wird. Dies sind vor allem Rundgefäße (wegen der günstigen Form zur Aufnahme des Atmosphärendruckes).

Während in der zweiten Gruppe (z.B. Thermoskannen oder Kryogefäße) λ -Werte zwischen 0,01 und 5 mW/(mK) zu finden sind, bewegen sich diese in der ersten Gruppe in der Regel zwischen 2 und 8 mW/(mK).¹

Da sich die vorliegende Arbeit auf Anwendungen im Bereich der Gebäudehülle konzentriert, beschränken sich die weiteren Darstellungen und Überlegungen auf die erste Gruppe.

1 Typologien der zum Einsatz kommenden Systeme

Abb. 3.1 zeigt verschiedene Materialien und Elemente, die derzeit für Vakuumdämmsysteme Verwen-

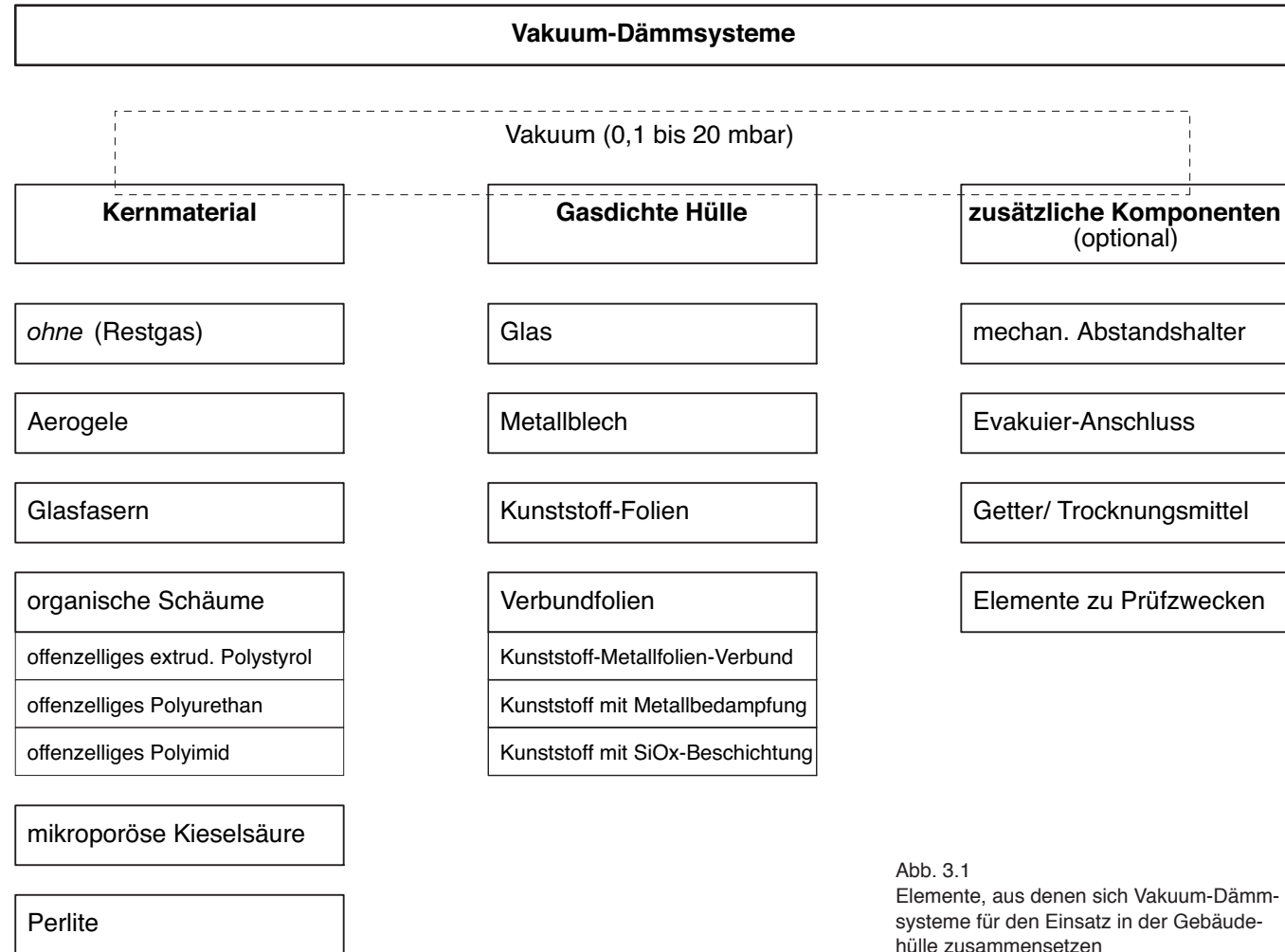


Abb. 3.1
Elemente, aus denen sich Vakuumdämmsysteme für den Einsatz in der Gebäudehülle zusammensetzen

dung finden oder denkbar sind. In Abb. 3.2 sind diese Kombinationen in Bezug gesetzt und hinsichtlich ihrer Durchlässigkeit (transparent, transluzent, opak) für sichtbares Licht als maßgeblicher Teil des einwirkenden Strahlungsspektrums zugeordnet.

In Abb. 3.3 sind die gleichen Ele-

mente in einer Matrix dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass einige Kombinationen entweder aus mechanischen Gründen nicht sinnvoll sind, weil ein nicht druckfestes Kernmaterial in einer ‚weichen‘ Hülle nicht unter Beibehaltung der Form evakuiert werden oder aus wirtschaftlichen Gründen nicht eingesetzt werden kann.

Evakuiert man ein transluzentes oder transparentes Material wie zum Beispiel Aerogele in einer opaken Hülle, wird die teuer bezahlte Eigenschaft der Transluzenz oder gar Transparenz nicht ausgespielt und dem Nachteil der deutlich höheren IR-Strahlungsdurchlässigkeit steht kein Gewinn auf anderem Gebiet gegenüber.

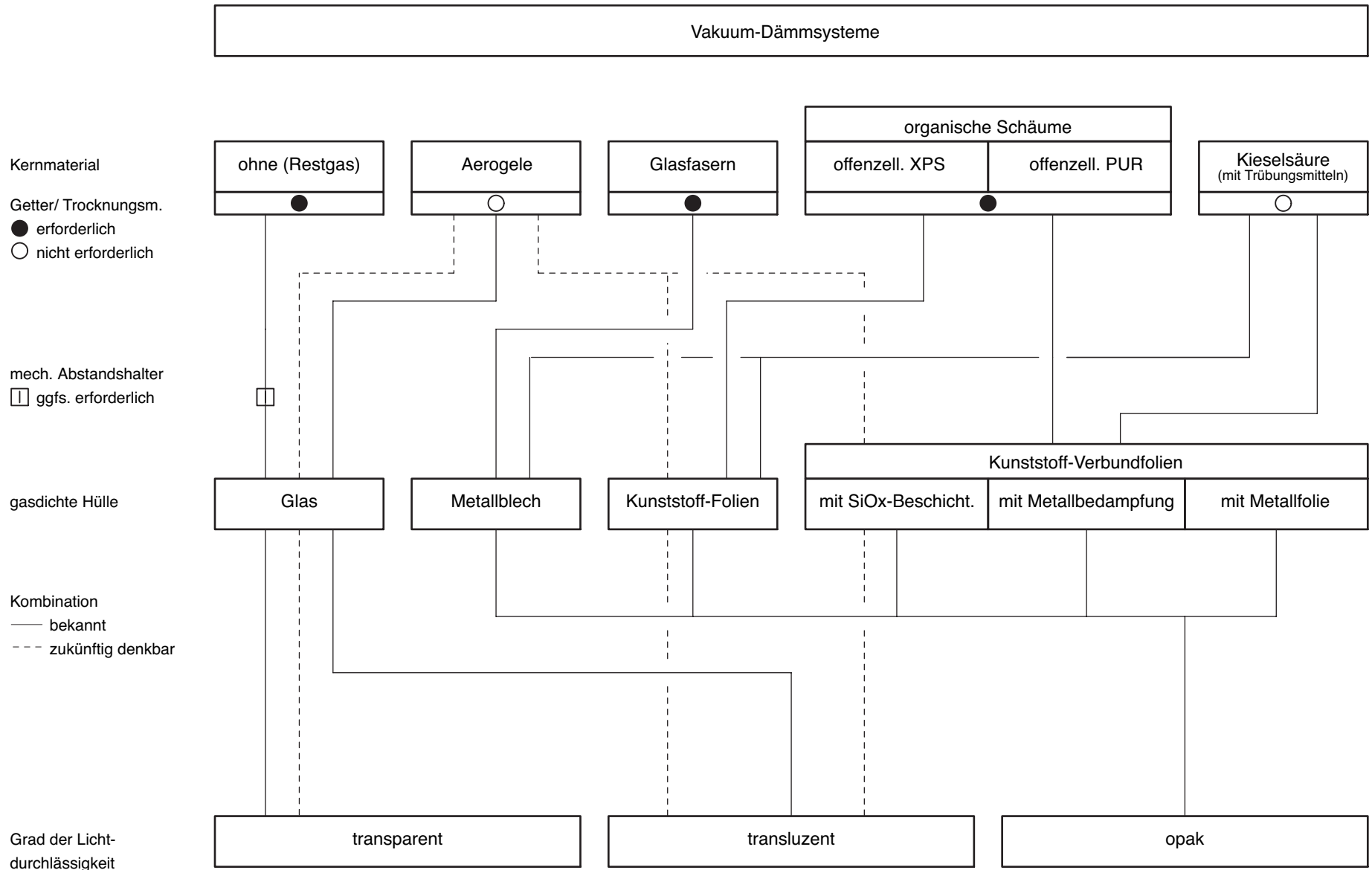
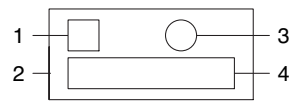


Abb. 3.2
 Vakuüm-Dämmsysteme²,
 Kombinationen und Grad der Lichtdurchlässigkeit
 (Typologie-Vorschlag des Verfassers)

Vakuum-Dämmsysteme, Kombinationen und Eigenschaften

Kernmaterial	ohne (Restgas)	Aerogele / reine Kieselsäure	Glasfasern	organische Schäume		Kieselsäure (mit Trübungsmitteln)
				offenzelliges Polystyrol	offenzelliges Polyurethan	
gasdichte Hülle						
Glas						
Metallblech		aus wirtschaftlichen und funktionalen Gründen nicht sinnvoll				
Kunststoff-Folien	aus mechan. Gründen nicht sinnvoll					
Kunststoff-Verbundfolien ...mit SiOx-Beschicht.	aus mechan. Gründen nicht sinnvoll					
...mit Metallbedampfung	aus mechan. Gründen nicht sinnvoll	aus wirtschaftlichen und funktionalen Gründen nicht sinnvoll				
...mit Metallfolie	aus mechan. Gründen nicht sinnvoll	aus wirtschaftlichen und funktionalen Gründen nicht sinnvoll				

Legende



1. mech. Abstandhalter erforderlich (ja/ nein)
2. verfügbar (ja/ nein)
3. Getter/ Trocknungsm. erforderlich (ja/ nein)
4. Grad der Lichtdurchlässigkeit
(transparent / transluzent / opak)



Abb. 3.3
Vakuum-Dämmsysteme, Kombinationen und Eigenschaften

2 Vacuum-Insulation-Panels (VIP)

Im Rahmen dieser Arbeit werden unter Vacuum-Insulation-Panels (VIP) Dämmsysteme verstanden, die in Aufbau und Elementen dem in Abb. 3.4 dargestellten Prinzip entsprechen.

Alle solche Systeme verfügen über ein von einer gasdichten Hülle umgebenes, evakuiertes Kernmaterial. (Die unter Abschnitt 3 dieses Teils behandelten Systeme haben im Unterschied hierzu *kein* solches Kernmaterial.)

Je nach Kombination und Ausstattung kommen weitere optionale Elemente hinzu:

- mechanische Abstandhalter
- Evakuier-Anschlüsse
- Prüfeinrichtungen
- ‚Getter‘ (Trocknungsmittel)

In diesem Abschnitt werden diese Elemente und die dafür verwendeten Materialien behandelt.

2.1 Innendruckbereich

Je nach Kernmaterial, Hüllmaterial und Herstellung der Hülle bewegt sich das Vakuum in den Paneelen in einem Bereich zwischen 0,1 und 20 mbar.³

Die Herstellung der VIP erfolgt in der Regel in einer Vakuumkammer, deren Größe daher die maximalen Abmessungen bestimmt. Hier kann unterschieden werden zwischen handbeschickten Vakuumverpackungsmaschinen und automatisierten VIP-Produktionsanlagen.

Alternativ kann bei bestimmten VIP das Vakuum auch über lokale Evakuieranschlüsse erzeugt werden, was zu deutlich größeren möglichen Abmessungen führt.

2.2 Kernmaterial

Hauptanforderungen an das Kernmaterial sind

- eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit unter möglichst ‚geringem‘ Vakuum

bei gleichzeitig

- ausreichender Druckstabilität gegenüber dem Atmosphärendruck,
- vollständiger Offenzelligkeit.

Die Anforderung der Druckstabilität leitet sich nicht nur aus der Notwendigkeit mechanischer Stabilität des

Systems ab, sondern hängt auch direkt mit der Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials zusammen, die mit zunehmender Dichte ebenfalls (in der Regel näherungsweise linear) ansteigt.

Viele Kernmaterialien müssen vor der Herstellung eines Paneels zur Minimierung von Restgas und Restwassergehalt im Material vorbehandelt werden. Meist geschieht dieses sogenannte ‚Vortrocknen‘ (engl. ‚Tempern‘) durch Erhitzen in einem Ofen möglichst unmittelbar (max. ca. 15 Minuten) vor der Weiterverarbeitung.

Je nach Kernmaterial dauert dieser Vorgang 15-60 Minuten und findet bei Temperaturen zwischen 70 und 200 °C statt.⁴

Bisher wurden vor allem folgende Kernmaterialien eingesetzt:⁵

- organische Schäume,
- Glasfasern,
- Aerogele,
- mikroporöse Kieselsäuren.

Neben den genannten Materialien und Materialgruppen wurden diverse Alternativen in Betracht gezogen und untersucht, konnten sich aber aus verschiedenen Gründen nicht durchsetzen. Sie spielen in der aktuellen Diskussion keine hinreichend bedeutende Rolle mehr und sollen daher nicht vertieft betrachtet werden. Hierzu gehören unter anderem Perlite und offenzelliger Polyimid-Schaum.

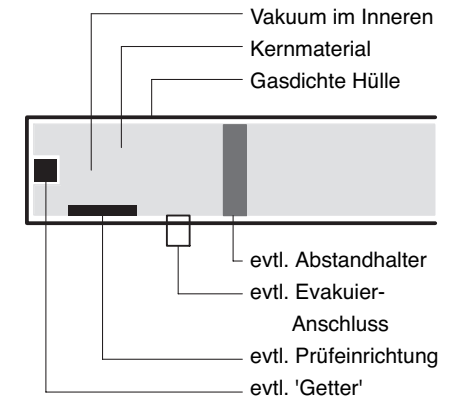


Abb. 3.4
Prinzipieller Aufbau und Elemente eines Vacuum-Insulation-Panels (VIP)

2.2.1 Organische Schäume

Als Basismaterialien wurden bisher extrudiertes Polystyrol (Rohdichten zwischen ca. 80 und 150 kg/m³) und Polyurethan (Rohdichten zwischen ca. 50 und 80 kg/m³) eingesetzt. Aus Abb. 2.22 ergibt sich, dass die Wahl von Kunststoffschäumen als Kernmaterial einen höheren Anspruch an das Vakuum bedingt als zum Beispiel mikroporöse Kieselsäure. Das gilt insbesondere für Polyurethane.

Aus den in Teil 2 Abschnitt 2.1.8.3 ausgeführten Gründen können für die Anwendung in evakuierter Umgebung nur vollständig offenporige Kunststoffschäume zum Einsatz kommen.

Diese Voraussetzung impliziert für geschäumte Kunststoffe sehr hohe Anforderungen an die Fertigungstechnik und Qualitätskontrolle, die

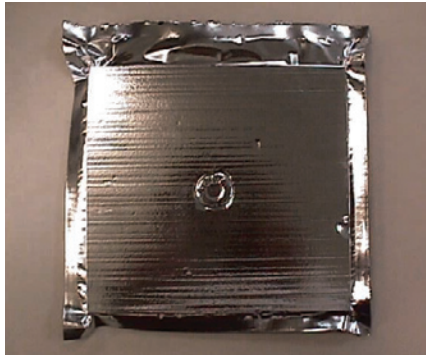


Abb. 3.5
Frühes VIP mit Polyurethanhartschaum-Kern⁶

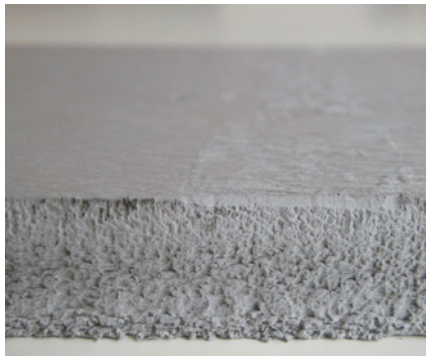


Abb. 3.6
Offenzelliger Polystyrolschaum (Produkt INSTILL[®], Dow Corning Chemical Co.)



Abb. 3.7
Offenzelliger Polyurethanschaum
(Produkt der Firma Elastogran GmbH)

bis heute insbesondere bei Polyurethanen nur schwer zu erfüllen sind.

Weitere gewichtige Nachteile sind bisher vor allem das Alterungsverhalten und der Umstand, dass bei Schäumen nach dem Einbau noch über lange Zeit die Gefahr des ‚Ausgasens‘ besteht, wenn sie nicht ausreichend lange gelagert und vorgetrocknet wurden. Dies wird noch verstärkt durch einen immer mehr oder weniger fehlerhaften Herstellungsprozess, der das Entstehen einzelner, geschlossener Poren nicht vollständig verhindern kann.

Dies führt durch einen zeitlich verzögerten Druckausgleich über die Kammerwände zu einer nachträglichen Verringerung des Vakuums im Paneel und damit zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit.

Zur Herstellung organischer Schäume kommen diverse Treibmittel („blowing agents“) zum Einsatz, die aus ökologischer Sicht teilweise nicht unkritisch sind und die Ökobilanz von VIP mit dieser Materialgruppe deutlich verschlechtern. Versuche, offenzellige Polystyrolschaumplatten für die Anwendung in VIP mit den Treibmitteln CO₂ und N₂ herzustellen, gingen für CO₂ negativ aus. Der Einsatz von N₂ könnte danach aber Erfolgsaussichten haben.⁷

Aus den oben genannten Gründen müssen in Paneele mit Kernmaterialien aus Kunststoffschäumen

sogenannte Getter (siehe Abschnitt 2.7) eingebaut werden, um den Paneelen zu einer angemessenen Funktionsdauer zu verhelfen. Ein solcher Getter ist in Abb. 3.5 deutlich in der Mitte zu erkennen. Diese ‚Störungen‘ im Paneelaufbau schwächen lokal den wirksamen Querschnitt des dämmenden Kernes und stellen somit eine Wärmebrücke dar.

Zu einem weiteren Problem kann es kommen, wenn mit einem solchen Kernmaterial ausgestattete Paneele während des Einbaus Einschäumvorgängen ausgesetzt werden, wie dies zum Beispiel im Bereich der Kühlgeräteherstellung üblich ist, da hierbei durch die sehr hohen auftretenden Temperaturen durch exotherme Reaktionen verstärkt Gase aus dem Füllmaterial freigesetzt werden können (mit den genannten Folgen).

Ein Aspekt auf einer anderen Betrachtungsebene steht im Zusammenhang mit der Produktionsweise organischer Schäume. Da es sich nicht um ein Nebenprodukt eines anderen Prozesses (wie bei Kieselsäure), oder um ein Grundprodukt für andere Anwendungen (wie bei Glasfasern) handelt, die Herstellung aber nur industriell und damit in sehr großen Mengen wirtschaftlich und produktionstechnisch sinnvoll ist, setzt die Entwicklung von VIP auf Basis dieser Kernmaterialien voraus, dass (zukünftig) erhebliche Mengen umgesetzt werden (können):

Das Polystyrolschaum-Produkt INSTILL[®] der Firma Dow Corning (Abb. 3.6) beispielsweise wurde nur einmal in einer sehr großen Menge hergestellt und dann vom Lager verkauft, bis im März 2003 die Entscheidung fiel, das Produkt bis auf weiteres nicht weiter zu vertreiben. Die bis dahin abgesetzten Mengen und die Entwicklungsperspektiven waren nicht ausreichend, um einen erneuten Herstellungszyklus zu initiieren.⁸

Nach Kenntnis des Verfassers gibt es derzeit weltweit keinen Hersteller für offenzelliges Polystyrol.

Für offenzelligen Polyurethanhartschaum stellt sich die Situation etwas anders dar:

Neben dem japanischen Hersteller Kurabo wird offenzelliges Polyurethan derzeit von der Firma Elastogran (BASF Group) in Zusammenarbeit mit Partnern hergestellt⁹:

Auf einer Doppelbandanlage werden in einem Endlosprozess 500 mm breite und 110 mm hohe Platten erzeugt, die anschließend beschnitten werden müssen, da der Rand immer geschlossenzellig ist.

Der wasserbasierende Schäumungsprozess mit dem Triebmittel CO₂ ist im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren (wie zum Beispiel von Huntsman / ICI eingesetzt) zwar ökologisch günstiger, führt aber zu geringfügig erhöhter Wärmeleitung.

Derart gefertigte Schäume (siehe Abb. 3.7) liegen bei 0,1 mbar bei ca. 8 mW/(mK) im Vergleich zu 6-7 mW/(mK) für mit ungünstigen Treibmitteln hergestellten PU-Schäumen.

Bevor diese Schäume evakuiert und umhüllt werden können, müssen sie ca. eine halbe Stunde bei 130-150 °C vorgetrocknet werden.

Vorteil der PU-Schäume als Kernmaterial für VIP sind das sehr geringe Gewicht (ca. ein Drittel von Kieselsäure-Pulver) bei hoher Druckfestigkeit.

Die Frage, ob man nicht direkt eine fertige Hülle ausschäumen kann und diese dann evakuieren, lässt sich nur abschlägig beantworten, da dann aufgrund des Verbundes Schaum-Hülle mit einem geschlossenzelligen Bereich am Rande nicht mehr flächig evakuiert werden könnte. Und eine lokale Evakuierung zum Beispiel über einen Stutzen von der Paneelmitte aus, ist in der Praxis nicht durchführbar.

Eine definierte kontrollierbare Strömung könnte sich nicht einstellen, der Evakuierprozess würde viel zu lange dauern.

Die Evakuierung gestaltet sich für Schaumstoffkerne grundsätzlich schwieriger als für pulverförmige Materialien. Vor allem in den Anfangszeiten versuchte man daher die Evakuierungszeiten zu verkürzen, indem man die Kernplatten-

oberfläche durch karo- oder rau-tenförmige Kanäle so modifizierte, dass der Unterdruck gleichmäßiger angreifen konnte (gut zu sehen an dem Paneel in Abb. 3.31).

Für den Baubereich kommt diese Kernmaterial-Gruppe aber (mittelfristig) nicht in Betracht, da der erforderliche Paneel-Innendruck von 0,1 mbar zu für diesen Bereich deutlich zu kurzen garantierbaren Funktionszeiten von ca. 10 Jahren führt.

2.2.2 Glasfasern

Als Kernmaterial finden auch temperaturbehandelte und gepresste, ausgerichtete Glasfasern (Abb. 3.8) mit einer Rohdichten zwischen 100 und 400 kg/m³ Verwendung, zum Beispiel in Form von Vliesen als Rollenware.

Wie aus Abb. 2.22 hervorgeht, liegt für dieses verhältnismäßig teure Kernmaterial die Anforderung an das Vakuum und damit an die gasdichte Hülle deutlich über der von Kieselsäure.

Außerdem erfordern mechanisch wenig stabile Glasfasern für die meisten Anwendungen eine druckfeste Hülle, so dass dieses Material bisher in der Regel für die Hüllmaterialien Glas und Metallblech eingesetzt wurde.

Die mit evakuierten Glasfasern erreichbare Wärmeleitfähigkeit liegt gleichwohl bei extrem geringen

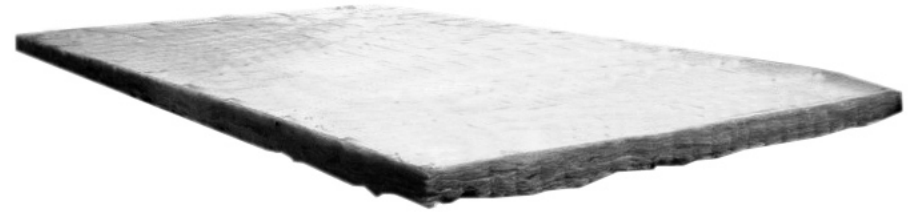


Abb. 3.8
Glasfasern (Rollenware) als Kernmaterial.
Der Zuschnitt erfolgt beispielsweise über Wasserstrahlschneiden.

1,5 - 3 mW/(mK), was einer Verringerung um den Faktor 15 - 20 gegenüber dem Atmosphärendruck [ca. 35 - 40 mW/(mK)] entspricht.

Damit stellen Vakuum-Dämmsysteme mit dieser Kernmaterialgruppe das derzeit erreichbare Minimum dar.

2.2.3 Aerogele

Silica-Aerogele sind organische Siliziumverbindungen mit Porengrößen 10 - 100 nm und einem Porenvolumenanteil von mehr als 80%. Die Rohdichte liegt im allgemeinen deutlich unter 300 kg/m³.

Der ursprüngliche Herstellungsprozess war sehr aufwändig, gefährlich und teuer, da die sog. 'überkritische Trocknung' einen wichtigen Fertigungsschritt darstellte.

Erst im letzten Jahrzehnt konnte das Verfahren so stark vereinfacht werden¹⁰, dass einer weiteren Verbreitung dieser Materialgruppe fortan weniger im Wege zu stehen scheint.

Aerogele sind nun in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess (siehe hierzu Abb. 3.11) herstellbar, und - im Gegensatz zu den Varianten der ersten Generation - hydrophob¹¹ und deutlich preisgünstiger.

Aktuelle Aerogel-Materialien sind

- opak bis transluzent,
- unbrennbar,
- umweltfreundlich im Recycling (direkt wiederverwendbar),
- temperaturbeständig bis 800 °C,
- UV-beständig,
- hydrophob und
- langzeitstabil.

Abb. 3.9 vermittelt ein Erscheinungsbild von transluzentem Aerogel-Granulat in verschiedenen Maßstäben, die optischen und wärmetechnischen Eigenschaften finden sich in Abb. 3.12. In Bezug auf die Körnung ist das Material in zwei verschiedenen Graden verfügbar, um auf verschiedene Anforderungen insbesondere durch den Befüllvorgang¹² reagieren zu können. Aerogelen können zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaft

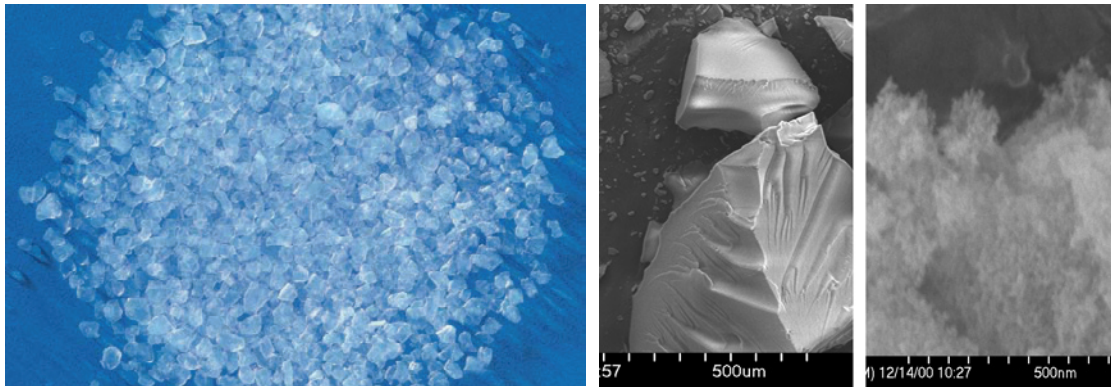


Abb. 3.9
 Transluzentes Aerogel-Granulat (hier das Produkt nanogel® der Firma Cabot Corp.), ca. in Originalgröße (links), in ca. 100-facher Vergrößerung (mitte) und ca. 100.000-facher Vergrößerung (rechts).¹³

(Reduktion des IR-Strahlungsdurchganges) Trübungsmittel, zum Beispiel Ruß, beigesezt werden (siehe Abschnitt 2.2.5.1). Solcherart modifizierte Aerogele sind allerdings nicht mehr lichtdurchlässig.

Aerogele sind als Pulver, Granulat und als monolithische Blöcke verfügbar, wobei Pulver nur für opake, Granulat auch für transluzente Anwendungen eingesetzt werden kann. Mit dem derzeit und in absehbarer Zukunft noch sehr schwer verfügbaren, sehr aufwendig herzustellenden und daher sehr teuren monolithischen Aerogel können

	Druck [mbar]		
	< 0,01	10	1000
Granulat	3-4		18-25
Monolith		8	15-18
Monolith mit Trübungsmittel		4	11-14

Abb. 3.10 Wärmeleitfähigkeit von Aerogelvarianten [mW/(mK)]

nahezu vollständig transparente Anwendungen realisiert werden.¹⁴

Die optischen Eigenschaften von monolithischem Aerogel sind allerdings derzeit noch nicht annähernd perfekt wie die von Glas. Zum Beispiel weist das Material einen wahrnehmbaren Gelbstich auf und unter direktem Sonnenlicht wird die Durchsicht durch unterschiedliche Brechungen stark behindert.

Das relativ gut verfügbare und für transluzente Anwendungen interessante Granulat hat den Nachteil, dass es große Anforderungen an das Vakuum und damit an das Hüllmaterial stellt, wenn die Wärmeleitfähigkeit deutlich verbessert werden soll, da sich die verbleibenden Bereiche zwischen den Granulen negativ bemerkbar machen.

Das heißt, für die Entwicklung von hochdämmenden transluzenten Vakuum-Dämmsystemen mit diesem Kernmaterial sind zum

Einsatz von Glas extrem gasdichte Randverbundlösungen oder, für die Verwendung von Folien, äußerst leistungsfähige, transluzente Hochbarrierefolien erforderlich, siehe Abb. 3.10. Beides ist bisher nicht verfügbar, aber Gegenstand laufender Forschungsvorhaben.¹⁵

Wenn die Wärmeleitfähigkeit unter Atmosphärendruck allerdings für eine spezielle Anwendung ausreicht, so müssen mit Aerogel-Granulat gefüllte Systeme nicht unbedingt evakuiert werden, da dies aufgrund der nun vorhandenen Hydrophobilität nicht mehr zwingend erforderlich ist.¹⁶

Inwieweit allerdings ein durch zyklische Gasexpansion und -kontraktion (versursacht durch Temperaturschwankungen) bedingtes ‚Pumpen‘ der Systembegrenzungen (zum Beispiel Glasscheiben) zu einer schleichenden, mechanisch bedingten Zerstörung und in Folge dessen zu einem sichtbaren ‚Ab-

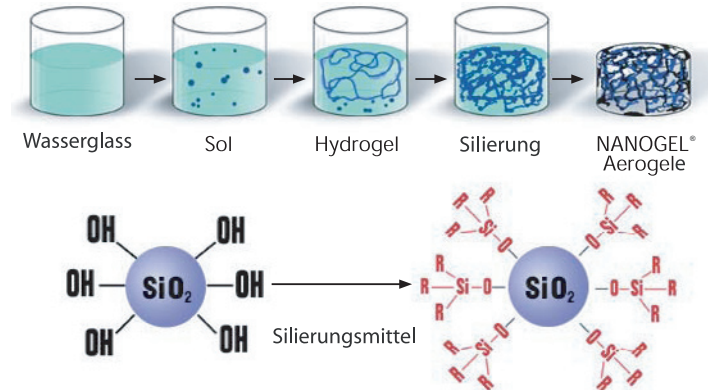


Abb. 3.11
 Aktueller Herstellungsprozess von transluzentem Aerogel-Granulat der Firma Cabot Corp. (Herstellereangaben)

sacken‘ des Materials führt, wurde bisher noch nicht eingehend untersucht, konnte allerdings bei der auf S. 92f beschriebenen Erstanwendung (Thomas Herzog / Fraunhofer ISE, Freiburg) festgestellt werden. Für diesen Effekt ist auch die Partikelform von Bedeutung: Sind diese rund, annähernd gleich groß und damit gleich schwer, so sind die für eine langfristige Zerstörung und damit für das Absacken maßgeblichen Kräfte wesentlich gleichmäßiger verteilt. Bruchgranulat mit in der Größe stark variierenden Partikelgrößen ist in dieser Hinsicht wesentlich ungünstiger.

2.2.4 Mikroporöse Kieselensäuren

Als Kieselensäuren werden die Sauerstoffsäuren des Siliciums bezeichnet. Sie kommen in der Natur vor allem in Form ihrer Salze, der sog. Silikate vor. Diese sind zusammen mit den Oxiden die wichtigsten gesteinsbildenden Minerale, sie

Materialstärke Aerogelgranulat [cm / Inches]	Eigenschaften		
	Lichttransmission	g-Wert	U-Wert [W/(m ² K)] bei 1bar
1,3 cm / 0,5"	73%	0,73	1,4
2,5 cm / 1"	53%	0,52	0,7
3,1 cm / 1,25"	45%	0,43	0,57
3,8 cm / 1,5"	39%	0,39	0,47
5 cm / 2"	28%	0,26	0,35
6,4 cm / 2,5"	21%	0,21	0,28

Abb. 3.12
Eigenschaften von transluzentem Aerogelgranulat (Produkt nanogel[®]/ Firma Cabot), gemäß Firmenangaben (Stand August 2004).

sind an der Zusammensetzung der Erdkruste (bis in 16 km Tiefe) mengenmäßig weitaus am stärksten beteiligt. Siliciumdioxid (SiO₂) ist ein in der Natur verbreiteter, sehr harter, kristalliner oder amorpher Feststoff. Jedes Siliciumatom wird hierbei tetraedrisch von vier Sauerstoffatomen umgeben, wobei wiederum jedes Sauerstoffatom mit zwei Siliciumatomen verbunden ist, so dass ein dreidimensionales Molekülgitter entsteht. Die beständigste Modifikation des SiO₂ ist der Quarz. Alle auftretenden Erscheinungsformen des Siliciumdioxids sind reaktionsträge, sie werden nur durch Fluorwasserstoff angegriffen und aufgelöst, gegenüber allen anderen Säuren sind sie resistent. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit kann zwischen zwei Arten der Kieselsäure unterschieden werden:

- Fällungskieselsäure und
- pyrogene Kieselsäure.

Kieselsäure hat ein vernachlässigbares Schwindverhalten. Ähnlich wie Aerogele sind auch Kieselsäuren

- toxikologisch unbedenklich,
- emissionsfrei,
- gut rezyklierbar,
- nicht brennbar und
- transluzent bis weißlich.

Die ascheartige, opake Konsistenz (Abb. 3.13) resultiert aus der Beimischung von Glasfasern und insbesondere Trübungsmitteln.

2.2.4.1 Fällungskieselsäure

Fällungskieselsäure ist mit weniger Aufwand herstellbar als pyrogene Kieselsäure, allerdings derzeit etwa um den Faktor 3 gröber strukturiert als diese. Hieraus ergeben sich höhere Ansprüche an das Vakuum (siehe hierzu Teil 2, Abschnitte 2.1.7 und 2.1.8). Weitere Entwicklungen könnten diese Gruppe jedoch zukünftig als preisgünstigere

Alternative für den Einsatz in Vakuum-Dämmsystemen erschließen.

2.2.4.2 Nanostrukturierte pyrogene Kieselsäure

Abb. 3.14 zeigt schematisch den Herstellungsprozess pyrogener Kieselsäure, wobei Silane verbrannt werden. Dieser Kieselsäuretyp (engl. Fumed Silica) wurde 1942 durch Harry Klöpfer von der Firma Degussa erfunden, die das Material unter dem Markennamen Aerosil[®] herstellte und vertrieb.¹⁷

Durch den minimalen Abstand der Porenwände in der Struktur pyrogener Kieselsäure wird die freie Weglänge der Luftmoleküle schon unter Atmosphärendruck so weit begrenzt, dass die Wärmeleitfähigkeit mit ca. 18-20 mW/(mK) unter der von ruhender Luft mit ca. 24 mW/(mK) liegt. Andere Moleküle, wie zum Beispiel Wasser, können an der Oberfläche der Primärpartikel, die eine



Abb. 3.13
Glasfaserverstärkte, gepresste pyrogene Kieselsäure (Produkt Wacker Chemie)

Länge von ca. 250 nm haben, an sogenannte reaktive isolierte Silanolgruppen gebunden werden.¹⁸ Diese ‚Gettereigenschaft‘ ist für die Anwendung in VIP von großem Vorteil.

Unterscheidungsmerkmal und wesentliches Qualitätskriterium der Varianten der pyrogenen Kieselsäuren ist ihre spezifische Oberfläche, die in Quadratmetern pro Gramm angegeben wird. Sie liegt in der Regel zwischen 200 und 800 m²/g und gibt einen Hinweis auf die Fähigkeit des Materials, Wasserdampfmoleküle ‚anzulagern‘.¹⁹

Gemäß Angaben der Firma Porextherm liegt das Adsorptionsvolumen im Bereich von 50 g pro kg Material bei 75% rel. Luftfeuchtigkeit.²⁰ Untersuchungen am ZAE-Bayern konnten zeigen, dass dieser potenzielle Anstieg der Materialfeuchte, bedingt z.B. durch Belüftung eines Panels, zu einem maximalen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit um 3 mW/(mK) führt.²¹

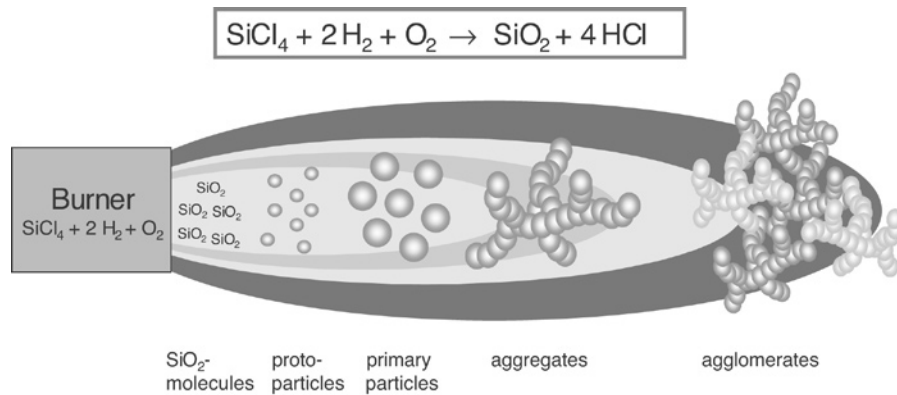


Abb. 3.14 Herstellungsprozess pygener Kieselsäure in der Flamme²²

2.2.4.3 Anwendungsformen der Kieselsäure

Je nach Pressdruck lässt sich die Rohdichte des aschenartigen Pulvermaterials zwischen ca. 100 und 400 kg/m³ einstellen.

Hierbei gilt es, zwei konträre Anforderungen zu erfüllen:

Einmal eine möglichst geringe Dichte für minimale Wärmeleitfähigkeit (Festkörperleitung), andererseits ausreichende mechanische Stabilität und Dichte, um das evakuierte System gegen den Atmosphärendruck zu schützen und die Strahlungsdurchlässigkeit gering zu halten.

Um ein Optimum dieser gegenläufigen Ziele zu erreichen, wird das hochporöse und hydrophile Material derzeit in der Regel mit einem Trübungsmittel (siehe Abschnitt 2.2.5.1) vermischt und teilweise mit Glasfasern verstärkt zu Platten

verpresst (siehe Abb. 3.13), die eine Rohdichte zwischen ca. 160 und 200 kg/m³ aufweisen.

Aus der Abb. 2.22 in Teil 2 wird die besondere Eignung dieses Kernmaterials für Vakuum-Dämmsysteme ersichtlich, da es auch bei relativ hohen Restgasdrücken noch eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist (siehe auch Abb. 3.16).

Die maximale Druckbelastbarkeit solcher evakuierten Kieselsäuren liegt bei ca. 200 kPa (= 200 kN/m²).²³

Die chemische Zusammensetzung des von der Firma Wacker an die Firma va-Q-tec gelieferten Kernmaterials stellt sich nach Firmenangaben (Stand 10/2002) wie folgt dar:

Siliziumdioxid (SiO ₂)	ca. 80%
Siliziumcarbid (SiC)	ca. 15%
andere	ca. 5%

2.2.5 Sonstige Kernmaterialbestandteile

2.2.5.1 Trübungsmittel

Einigen der beschriebenen Kernmaterialien (insbesondere Aerogelen und Kieselsäuren) wird in der Regel ein sogenanntes Trübungsmittel (auch „Infrarotblocker“) beigelegt.

Hierbei handelt es sich um strahlungsabsorbierende Zusätze, durch die der Strahlungswärmeverlust reduziert werden soll. Es kommen unter anderem Ruß, Eisenoxid, Titanoxid und Siliziumcarbid zum Einsatz, wobei die Anteile am Füllmaterial zwischen ca. 15% und 30% schwanken.

Die meisten dieser Trübungsmittel verfügen nicht über eine dem Kernmaterial entsprechend günstige Struktur und erhöhen somit die Wärmeleitfähigkeit. Diese liegt beispielsweise für das Material Siliziumcarbid (SiC) bei etwa 45 W/(mK).

Ein zu hoher Anteil steht also im Widerspruch zum Ziel der Wärmeleitfähigkeit-Reduktion. Vor allem muss eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Trübungsmittels erreicht werden. Hierbei lässt sich über Versuche ein optimales Mischungsverhältnis ermitteln, wie dies in Abb. 3.15 zu erkennen ist.

Bei den für die Herstellung von VIP üblichen eingesetzten pyrogenen

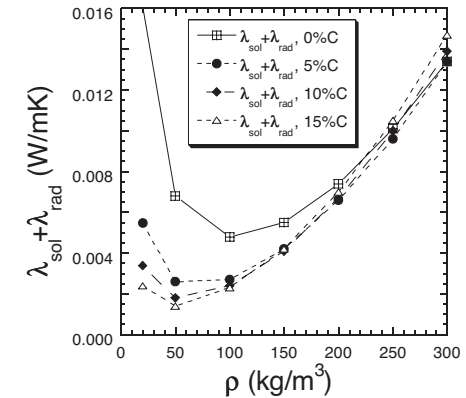


Abb. 3.15 Wärmeleitfähigkeit eines Kernmaterials mit verschiedenen Rohdichten (hier: Aerogel) mit unterschiedlichen Anteilen eines Trübungsmittels.²⁴

Dichte [kg/m ³]	Druck [mbar]			
	0,1	40	100	1000
160	~0,004	0,005	0,008	0,018

Abb. 3.16 Wärmeleitfähigkeit pygener Kieselsäure bei unterschiedlichem Füllgasdruck [W/(mK)]

Kieselsäuren führen die zugemischten Trübungsmittel dazu, dass der Anteil der Wärmeübertragung über Strahlung für die evakuierten Paneele bei Raumtemperatur deutlich unter 1 mW/(mK) liegen bei einer Gesamtwärmeleitung von ca. 4-5 mW/(mK).²⁵

2.2.6 Kernmaterialien im Vergleich

In Abb. 3.17 finden sich Werte diverser Eigenschaften und Hersteller verschiedener Kernmaterialien im Vergleich.

Kernmaterialien		organische Schäume		Glasfasern	Aerogele		mikroporöse Kieselensäuren
		Polystyrol (XPS)	Polyurethan (PUR)	gezogene und gerichtete Fasern	transluzentes Granulat	opakes Granulat	
Bezugsprodukt / Hersteller		Instil® / Dow Chemical	Elastocool® / Elastogran	(Informationen über Porextherm GmbH)	nanogel® / Cabot Corp.	nanogel® / Cabot Corp.	
Dichte	[kg/m³]	80-150	62	100-400	90-100	90-100	160-200
Partikelgröße	[mm]			Faser-Ø 10 µm	0,5 - 4,0	0,5 - 4,0	0,007 - 0,04
Porengröße	[µm]	20-100	(200-300) vacpac	-	0,02	0,02	0,02
Spezifische Oberfläche	[m²/g]				600 - 800	600 - 800	300
Lichtdurchlässigkeit	pro cm Material	-	-	-	80 %	- (Trübungsmittel)	50 - 70 %
Porosität				-	> 90 %	> 90 %	99 %
Wärmeleitfähigkeit	[mW/(mK)] bei ca. 1 bar / 25°C		34	30	18	18	20
Wärmeleitfähigkeit	[mW/(mK)] bei ca. 0,1 mbar	4,8-5,6	8	1,5 - 3	3,4 - 3,6	3,4 - 3,6	4,2
optimaler Druckbereich (für VIP-Anwendungen)	[mbar]	≤ 1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 30	≤ 30	≤ 30
Art der erforderlichen Vorbehandlung		Lagerung (Ausgasen), Zuschnitt	Lagerung (Ausgasen), Zuschnitt, Ausheizen	Ausheizen	Ausheizen	Ausheizen	Ausheizen, In-Form-Pressen
Temperatur-Einsatzbereich	[°C]		< 150		-270 bis > 150	-270 bis > 150	-200 bis > 1000
Getterung erforderlich	[+ : ja / o : nein]	ja	ja (mind. Trockner)	ja (v.a. H ₂ O)	nein	nein	nein
Brandschutzklassifizierung	n. DIN 4102-6	B3	B3	A1	A1	A1	A1
rezyklierbar		möglich	schwierig	möglich	möglich	möglich	möglich
max. verfügbare Größen (Stand 2004)	[l x b x h, cm]	(nicht mehr verfügbar)	135 x 480 x 60	- (Fasern, abh. von Rollenbreite)	- (Granulat)	- (Granulat)	- (Pulver)
Preisniveau [ca. / Stand '04]	[€ / m³]	250 - 500		2000 - 3000	2500	1800	500 - 1000
Produktbezeichnungen / Hersteller / verfügbar Stand 2004		Instil® / Dow Chem. : nicht mehr verfügbar	vacpac® / Huntsman (ehem. ICI): nicht mehr verfügbar Elastocool® / Elastogran (BASF): verfügbar	- / Schuller GmbH (jetzt Johns Manville) / unbekannt (Info Stand 1999)	nanogel® / Cabot Corp.: verfügbar	nanogel® / Cabot Corp.: verfügbar	HDK T30 / Wacker Ceramics: verfügbar

Abb. 3.17 Eigenschaften verschiedener Kernmaterialien im Vergleich (Stand März 2005)²⁶

2.3 Gasdichtes Hüllmaterial

Hauptanforderungen an das Hüllmaterial eines Vakuum-Dämmsystems sind

- möglichst hohe Gasdichtigkeit, je nach angestrebtem Vakuum und Einsatzzeitraum,
- Verfügbarkeit eines geeigneten Randverbundes (zum Beispiel durch Kleben, Vulkanisieren oder Schweißen),
- möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit wegen der Verluste über den Randverbund,
- Verarbeitbarkeit,
- Langzeitstabilität,
- Lieferqualität (keine Fehlstellen, und damit Undichtigkeiten),
- Flexibilität (Dehnbarkeit),
- Formstabilität,
- Keine (Mikro-) Risse durch Dauerbelastung,
- gute Umformbarkeit (möglichst enge Biegradien ohne Rissbildung, ggf. sogar Tiefziehbarkeit),
- Dauerhaftigkeit über einen möglichst großen Temperaturbereich,

zudem je nach Einbausituation / Anwendung

- UV-Beständigkeit,
- mechanische Beanspruchbarkeit,
- Schwerentflammbarkeit / Nichtbrennbarkeit (Brandschutz),
- Verträglichkeit mit anderen, angrenzenden bauüblichen Materialien (z.B. Klebern, Putzen o.ä.).

Darüber hinaus kann ein Kriterium darstellen, ob das Hüllmaterial

zum Beispiel nach einem Schaden reparierbar ist.

In direktem Zusammenhang mit dem Hüllmaterial steht die Frage des Randverbundes, an den als Teil der Hülle des Vakuum-Dämmsystems analoge Anforderungen zu stellen sind. Dennoch kann der Randverbund als herstellungsbedingte Schnittstelle im allgemeinen insbesondere die Gasdichtkeitsanforderungen nicht in gleichem Maße wie das in der Fläche eingesetzte Hüllmaterial erfüllen.

Grundsätzlich stellt der Randverbund in der wärmetechnischen Betrachtung eines Vakuum-Dämmsystems eine Schwachstelle dar, da die Wärmeleitung jedes bisher bekannten Hüllmaterials mehr oder weniger deutlich über der des eingeschlossenen Kerns liegt. Dies hat aus geometrischen Gründen grundsätzlich zur Folge, dass dieser ‚negative‘ Randeffect um so deutlicher ausfällt, je dicker die Hüllschicht und je kleiner die Systemmaße sind, da so der Anteil des Randverbundes am Gesamtsystem zunimmt.

Der relevante Wert hierfür ist die Wärmelängsleitung in einem Hüllmaterial. Insbesondere für Folien liegen hierzu bislang kaum gesicherte Werte vor.

Die Anforderungen an die gasdichte Hülle werden nicht nur ‚von außen‘ gestellt, sondern ergeben sich auch aus dem jeweiligen Kernmaterial.

Eine genaue Abstimmung ist im Sinne einer Optimierung des Gesamtsystems zwingend erforderlich.

Bisher wurden folgende Hüllmaterialien untersucht und eingesetzt:

- Glas,
- Metallblech und -folien,
- reine Kunststoff-Folien,
- Verbundfolien:
 - Kunststoff / Metallfolie,
 - metallisierter Kunststoff,
 - Kunststoff mit SiO_x-Beschichtung.

Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

2.3.1 Glas

Glas als Material kann als ‚gasdicht‘ bezeichnet werden. Durch die üblichen Herstellungsprozesse und Materialstärken wird zudem eine Qualität sichergestellt, die lokale Undichtigkeiten / Fehlstellen (mikroskopisch kleine ‚Löcher‘) ausschließt.

Aufgrund der herstellungsbedingten Beschränkung (Floatverfahren) auf plattenförmige Formate (Scheiben) besteht die besondere Schwierigkeit in der Ausbildung eines gasdichten Randverbundes. Glasscheiben können am Rand nicht einfach umgefaltet und versiegelt werden.

Andere Formen erfordern entweder abweichende Herstellungsverfahren (zum Beispiel Guss) oder aufwändige nachträgliche Umform-

Vorgänge (zum Beispiel Biegen), die nur sehr beschränkt möglich sind.

Die Anforderungen eines gasdichten Randverbundes gelten nicht nur für Anwendungen im Rahmen von Vakuum-Dämmsystemen, sondern spielen auch für normale Randverbundlösungen wärmedämmender Mehrscheibenverglasungen eine wichtige Rolle. Hierbei übertreffen die Anforderungen im Falle der Anwendung von höherwertigen Füllungen mit Edelgasen (Argon, Krypton) die noch verhältnismäßig moderaten mit normaler, getrockneter Luft gefüllter Mehrfachverglasungen deutlich.

Glas ist außerdem nur in geringem Maße auf Biegung beanspruchbar und hat kein ‚gutmütiges‘ Bruchverhalten (wie z.B. Blech), da Spannungsspitzen nicht durch plastische Verformung abgebaut werden können.

Als Hüllmaterial für VIP entsprechend Abb. 3.4 gibt es bislang keine verfügbaren Anwendungen.

Offensichtlich ist der entscheidende Vorteil von Glas die Transparenz bei gleichzeitiger Gasdichtigkeit.

Daher gibt es vor allem Versuche, dieses Hüllmaterial im Zusammenhang eines Vakuum-Dämmsystems *ohne* Kernmaterial zu verwenden, um die Transparenz nicht einzuschränken. Diese Systeme finden sich in Abschnitt 3 (‚Vakuum-Verglasungen‘) dieses Teils.

Außerdem gibt es Versuche und experimentelle Anwendungen in Kombination mit Aerogelen (Granulat und monolithisch) und reinen Kieselsäuren. Solche Systeme sind aber derzeit noch nicht auf dem Markt verfügbar.

2.3.2 Metallblech und -folien

Entsprechend dem Material Glas sind auch Metalle ab einer gewissen Mindestmaterialstärke grundsätzlich gasdicht. Ebenso wie Glas ist daher Metall im gesamten Spektrum der Vakuumtechnik anzutreffen.

Für beide Materialien bestehen umfangreiche Erfahrungen aus der Anwendung von druckbeständigen Anwendungen.

Allerdings besteht bei Metallen die Gefahr, dass es während der Herstellung von Blechen oder insbesondere dünnen Folien zu Fehlstellen kommt, das heißt mikroskopisch kleinen Löchern in der Metallstruktur, durch die Gas entweichen kann. Dies gilt auch für alle weiteren Umformvorgänge.

Gleichzeitig eröffnen eben diese Umformungsmöglichkeiten und die zur Verfügung stehenden Verfahren zur dauerhaften Fügung durchgehend metallische Randverbundlösungen, wodurch die Eigenschaft der Gasdichtigkeit optimal genutzt werden kann.

Solche Randverbundlösungen werden allerdings in thermischer

Hinsicht durch die besonders gute Wärmeleitfähigkeit von Metallen und die grundsätzlich bestehende Korrosionsgefahr beeinträchtigt.

Ein solcher in wärmedämmtechnischer Hinsicht schlechterer Randverbund kann aber je nach Anwendung dadurch kompensiert werden, dass bei der Verwendung von Blechen als Hüllmaterial derzeit deutlich größere Formate herstellbar sind (bis zu 3 x 8 Metern).

Aufgrund der geringen Sprödigkeit besteht für die Anwendung von Metallen als gasdichte Hülle von Vakuum-Dämmsystemen keine Bruchgefahr. Verformungen in gewissen Grenzen führen auch nicht zu einem Verlust der Gasdichtigkeit.

In der Regel werden Paneele mit Metallblechhüllen (vor allem im Falle von großen und sehr großen Formaten) über punktuell angebrachte Ventile evakuiert. Werden diese Evakuierflansche auch in eingebautem Zustand zugänglich gehalten, ist es möglich, die Paneele vor Ort bei Bedarf auf den Ursprungsdruck zurück zu führen. Sollte ein Paneel mechanisch beschädigt werden, kann es, soweit die schadhafte Stelle zugänglich ist, vor Ort zum Beispiel durch Schweißen repariert werden und dann - ebenso vor Ort - durch Evakuierung in seiner Funktionalität wieder voll hergestellt werden.

Biegesteife Paneele mit dem Hüllmaterial Edelstahl (meist Werkstoff

1.4301) werden in der Literatur oft auch als VIS (Vacuum Insulating Sandwiches) bezeichnet.²⁷ Da dieser Begriff in der Ordnung der vorliegenden Arbeit nicht eindeutig ist, wird hier darauf verzichtet.

Das Material Edelstahl ist nach DIN 4102-1 in die Baustoffklasse A1 eingestuft. Dies ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu anderen Hüllmaterialien und ermöglicht vor allem im Zusammenhang mit entsprechenden Kernmaterialien (zum Beispiel pyrogener Kieselsäure) grundsätzlich ein größeres Anwendungsspektrum im Baubereich.

Die Verwendung von Kohlenstoffstahl ist aus folgenden Gründen als sehr ungünstig einzustufen:

- Vorher aufgebrachte Korrosionsschutzschichten gefährden durch mögliche Ausgasungsvorgänge das Vakuum.
- Auf jeden Fall erforderliche Korrosionsschutzmaßnahmen stellen einen erheblichen, den Materialkostenvorteil bei weitem kompensierenden Faktor dar.

2.3.3 Kunststoff- und Kunststoffverbundfolien

Obwohl kein bislang bekannter Kunststoff als ‚gasdicht‘ entsprechend Glas oder Metallen bezeichnet werden kann, können doch durch Kombinationen und Modifikationen geeignete sogenannte ‚Hochbarrierefolien‘ hergestellt werden.

Insbesondere durch die im Vergleich zu Metallen, aber besonders zu Glas, erheblich leichter auszubildenden Schweißnähte für den Randverbund werden Kunststoff- oder Kunststoffverbundfolien häufig eingesetzt. Sie sind im allgemeinen in großen Breiten und nahezu beliebiger Länge (von der Rolle) lieferbar, wesentlich leichter zu konfektionieren und zu verarbeiten.

Um die verschiedenen Anforderungen optimal zu erfüllen, werden meist Mehrschichtsysteme eingesetzt, wobei normalerweise jeder Lage eine spezielle Funktion zugeordnet ist, zum Beispiel Träger- oder Schutzfunktionen (PA, PET), Barrierelage oder Schweißschichtbildung (PE, PP).

Im Wesentlichen finden folgende thermoplastischen Kunststoffe Anwendung:

- PVDC (Saran®)
- PE (Polyester)
- HDPE/LDPE (Polyethylen)
- PA (Nylon®)
- PET (Polyester)

Dazu kommen im Falle von Verbundfolien Klebstoffe und unter Umständen Metalle (vor allem Aluminium).

Eine Zusammenstellung verschiedener Folienmaterialien und deren Eigenschaften findet sich in Abb. 3.18.

Im Gegensatz zu reinen Metallfolien besteht ein wesentlicher Un-

Folien-Basismaterialien (z.T. ausgewählte Produktnamen)		Dichte	Wärmeleitfähigkeit	lin. Wärmeausdehnungskoeff.	Gasdurchlässigkeit für...					Gasdichtigkeit	UV-Beständigkeit	Transparenzgrad	Hitzeversiegelungstemperatur	min./max. Dauertemperatur	E-Modul im Zugversuch	Zugfestigkeit (max.)	Bruch-/Reissdehnung
					O ₂	N ₂	CO ₂	H ₂ O	H								
		[g/cm ³]	[W/(mK)] bei 23°C	[10 ⁻⁶ /K]	[10 ⁻¹³ cm ³ cm cm ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹ bei 25°C]					+ (hoch) o (mittel) - (niedrig)		[°C]	[°C]	[GPa]	[MPa]	[%]	
Polyethylen - hohe Dichte	HDPE	0,95	0,45-0,5	100-200	0,3	0,1	0,3	9	2	-	-	o		- / 120	0,5-1,2	40	
Polyethylen - niedrige Dichte	LDPE	0,92	0,33	100-200	2,2	0,73	9,5	68	7,4	--	--	o	120-204	-60 / 90	0,1-0,3	25	400
Polypropylen	PP	0,9	0,1-0,22	100-180	1,7	0,4	6	16	31	--	--	o	140-205	-50 / 100	2,2-4,2	300	50
Polyvinylchlorid	PVC	1,4	0,12-0,25	75-100	0,034	0,009	0,12	206	1,3	o	+	++		-30 / 50	2,5-4,0	70	60
Polyvinylchlorid (Saran®)	PVDC	1,63	0,13	190	0,004	0,0007	0,02	7		++	-	++	120-150	- / 100	0,3-0,5	110	30-80
Polytetrafluorethylen (Teflon®)	PTFE	2,2	0,25	100-160	3,2	1,0	7,5		7,4	--	++	--		-260 / 250	0,3-0,8	40	400
Ethylen-Tetra-FE (Tefzel®)	ETFE	1,7	0,24	90-170										-100 / 150	0,8	48	300
Ethylen-Chlortri-FE (Halar®)	E-CTFE	1,68	0,16	80	0,11	0,046	0,46	2,8		+	+	-	246-260	-75 / 150	1,4-1,6	48	200
Polyamid (Nylon 6,6®)	PA 6,6	1,14	0,25	90			0,05			+	-	-	245	-30 / 150	3,3	82	200
Polycarbonat (Makrolon®)	PC	1,2	0,19-0,22	66-70	1,05	0,23	4,8	1050	9,0	--	-	++	204-221	-135 / 130	2,3-2,4	75	150
lineare Polyester (Mylar®)	PET	1,3	0,13-0,15	20-80	0,015	0,003	0,07	100	0,45	+	+	++		-40 / 115	2-4	250	110
Polystyrol	PS	1,05	0,1-0,13	30-210	2	0,6		900	17	--	-	+		- / 90	2,3-4,1	100	1,6
Fluoriertes Ethylen-Propylen	FEP	2,15	0,19-0,24	83-104	3	1	8	13	10	--	++			-250 / 180	0,5-0,6	30	220
Polyetheretherketon	PEEK	1,26	0,25	47-108	0,06			160			-	o		- / 250	3,7-4,0	100	240
Polyvinylfluorid (Tedlar®)	PVF	1,38		50-97	0,01	0,001	0,05	10	0,35	+	++	++		-70 / 150	2,1-2,6	110	160
Polyvinylidenfluorid (Kynar®)	PVDF	1,76	0,1-0,25	80-140	0,035	0,03	0,2	340	0,25	o	+	--		-40 / 150	1,0-3,0	60	50
Polyaramid (Kevlar®) - Fasern		1,44	0,04	-2							-	--		-200 / 240	59-124	2760	
Polyimid (Kapton®)	PI	1,42	0,16	20	0,11		0,2	430		o	+	+		-270 / 250	2,0-3,0	150	70
Polymethylmethacrylat (Plexiglas®)	PMMA	1,19	0,17-0,19	70	0,12			480		o	+	+++		-40 / 80	2,4-3,3	80	4
Silikon-Elatomer (Silastic®)		1,5					2400			---				-50 / 200		6,5	

Abb. 3.18 Eigenschaften verschiedener, ausgewählter Folien-Basismaterialien im Vergleich²⁸

terschied in den Auswirkungen für eine Brandschutzklassen-Einstufung der VIP. Bisher liegen solche nicht vor, aber die angegebenen Dauertemperaturbelastungen in den Datenblättern (zwischen +50 bis +90 °C) geeigneter Folientypen lassen eine Baustoffklasse besser als B2 nach DIN 3102-1 kaum erwarten.

2.3.3.1 Zur Gasdurchlässigkeit von Folien

Die Gasdurchlässigkeit der Hülle ist im allgemeinen das entscheidende Kriterium für Funktionsdauer-Abschätzungen eines Vakuum-Dämmsystems.

Gase penetrieren zum einen über die Folie selbst durch sogenannte Pinholes²⁹ (mikroskopische Fehlstellen im Folienmaterial), zum anderen über Fügstellen im Randbereich, wobei der Verlust über den Randverbund den über die Fläche in der Regel bei weitem übersteigt.

An dieser Stelle soll auf die materialspezifischen Kriterien und Abhängigkeiten eingegangen werden. Gesamtsystemabhängige Aspekte und grundsätzliche Fragestellungen hinsichtlich der Funktionsdauer von im Baubereich einzusetzenden Vakuum-Dämmsystemen finden sich unter Abschnitt 2.10.

Prinzipiell kann das Permeationsvermögen P durch eine Schicht beschrieben werden als das Produkt aus Diffusivität D und Löslichkeit S:

$$P = S \cdot D$$

Dabei hängt dies für einzelne Gase ab von

- Temperatur,
- Schichtdicke,
- Partialdruck-Gradient und der
- relativen Feuchte.

Das Gasdiffusionsverhalten von einzelnen Folien wird im Wesentlichen bestimmt durch

- Material bzw. Materialkombinationen,
- Materialdicke,
- Temperatur,
- relativer Feuchte,
- UV-Stahlung,
- Luftdruck,
- Zeit und
- Belastungen durch die Art der Verarbeitung (Faltungen etc.).

Die Permeation durch die Folie ist im Prinzip proportional zur Größe der Oberfläche. Insbesondere die durch die Verarbeitung (Falze, Faltungen, Ausbeulungen) auftretenden Spannung und Belastungen können allerdings zu deutlich reduzierten Dichtigkeitswerten im Vergleich zu unbelasteten, flachen Folien führen, auf die sich die Angaben der Hersteller beziehen.³⁰

Untersuchungen eines amerikanischen Folienherstellers haben gezeigt, dass ein Anstieg der Temperatur und/ oder der relativen Luftfeuchtigkeit einen negativen Einfluss auf die Dichtigkeit der Fo-

lien haben. Zum Beispiel nimmt die Gas-Permeationsrate typischerweise mit dem Anstieg der Temperatur pro Kelvin um ca. 5% bis 7% zu.³¹

Hierbei ist Folgendes anzumerken: Von wesentlicher Bedeutung für die Tauglichkeit von Hochbarriere-Folien für den Einsatz in VIP ist die Gasdurchlässigkeit, die traditionell differenziert wird in Sauerstoff-(OTR, gemessen in cm^3) und Wasserdampfdurchlässigkeit³² (MVTR, auch WTR, gemessen in Gramm). Das ist insofern irreführend, als ein Gramm Wasserdampf ein Normalvolumen von 1240 cm^3 hat.

Für eine typische Hochbarriere-Folie liegt der Wasserdampfmoleküldurchgang um den Faktor 1000-100.000 über dem von Sauerstoff.

Daher ist für die Anwendung in Vakuum-Dämmsystemen in der Regel der Wasserdampf-Durchgang von ausschlaggebender Bedeutung, der allerdings sehr stark in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (Wasserdampf-Partialdruck) schwankt.³³

Für den Einsatz in VIP lassen sich bezüglich der Gasdurchlässigkeit Anforderungen wie folgt stellen³⁴:

- Sauerstoffdurchlässigkeit (OTR) $\leq 0,01 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ bei 23 °C
- Wasserdampfdurchlässigkeit $\leq 0,01\text{-}0,05 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ bei 38 °C und ca. 90 % rel. Luftfeuchtigkeit

2.3.3.2 Reine Kunststoff-Folien

Unter diese Gruppe mit polymerer Barrierschicht fallen im Wesentlichen aus mit PVDC, EVOH oder PVOH beschichtete oder coextrudierte Polymer-Verbundfolien mit einer PE-Siegelnaht.

Ihre Barriereigenschaften sind mittelmäßig, sie verfügen über eine Sauerstoffdurchlässigkeit (OTR) von ca. $0,01 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d bar})$ bei 23 °C und eine Wasserdampfdurchlässigkeit von weniger als

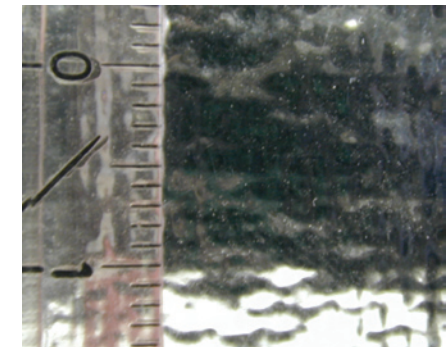


Abb. 3.19 Folie vor dem Evakuierungsvorgang

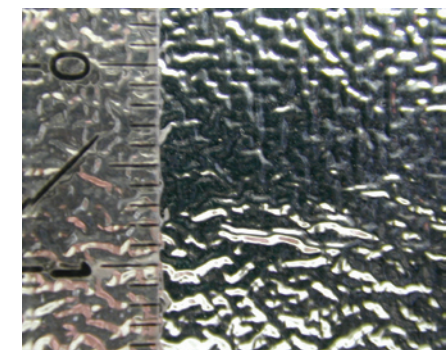


Abb. 3.20 Folie nach dem Evakuierungsvorgang

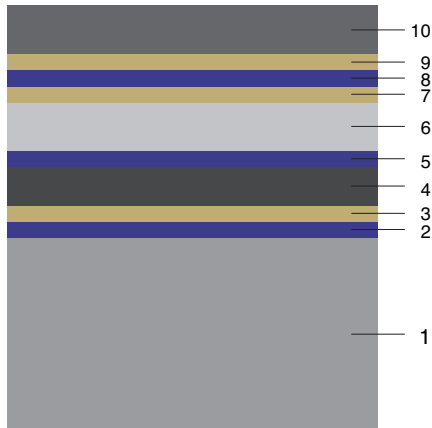


Abb. 3.21 Typischer Aufbau einer metallisierten Hochbarrierefolie³⁵

Legende

10 PA- oder PET-Schicht	15 μm
9 Metallisierung	30 nm
8 Klebstoffschicht	2 μm
7 Metallisierung	30 nm
6 PP-Zwischenschicht	15 μm
5 Klebstoffschicht	2 μm
4 PET-Zwischenschicht	12 μm
3 Metallisierung	30 nm
2 Klebstoffschicht	2 μm
1 PE-LD-Siegelschicht	60 μm

0,1 g/(m² d bar) bei 38 °C und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit³⁶. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit kommt es allerdings kaum zu Wärmebrückeneffekten.

Die Folien sind relativ dick, auch in transparenter Ausführung verfügbar und unter Umständen thermisch umformbar (zum Beispiel durch Tiefziehen).

Allerdings haben klimatische Bedingungen einen relativ großen Einfluss auf die Barriereigenschaften.

Für diesen Folientyp besteht jedoch noch deutliches Entwicklungspotenzial, da grundsätzlich aus sehr verschiedenen Basismaterialien gewählt werden kann und nahezu beliebige Kombinationen umsetzbar sind, bei denen die jeweiligen charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Folienlagen synergistisch zu Laminaten zusammengeführt werden können.

Die Herstellung erfolgt entweder durch Coextrusion (also in einem simultanen Herstellungsprozess) oder durch Kaschieren (meist mit PU-Klebern als Zwischenschicht).

In jüngster Zeit erhält die Entwicklung dieser Foliengruppe einen starken Schub durch eine andere Anwendung, in der ähnlich anspruchsvolle Eigenschaften benötigt werden, nämlich als Basis für filmartige OLEDs (Organic-Light-Emitting-Diodes).³⁷

2.3.3.3 Kunststoff-Metallfolien-Verbund

Für den Einsatz in Vakuum-Paneelen wurden spezielle Aluminium-Verbundfolien (auch sogenannte ‚Aluminiumkaschierte Folien‘) entwickelt.

Diese haben eine durchschnittliche Aluminiumschichtdicke von 5 bis 12 μm bei gleichzeitig sehr hoher Gasdichtigkeit unter der Nachweisgrenze mit einer typischen Sauerstoffdurchlässigkeit von weniger als 0,005 cm³/(m² d bar) bei 23 °C.³⁸

Aluminium verfügt jedoch über eine hohe Wärmeleitfähigkeit von ca. 273 W/(mK). Somit kommen die Wärmetransporteffekte über den Randverbund mit dieser Materialgruppe sehr deutlich zum Tragen.

Typischerweise verfügt dieser Folientyp über eine PE-Siegelschicht und eine PET-, PE-, PP- oder PA-Außenschicht. Als Nachteil dieser Gruppe ist zu nennen, dass die Anfälligkeit für Pinholes (vor allem bei Al-Schichtdicken unter 6 μm) und Siegelnahttrisse relativ hoch ist.

Außerdem kann es zu Korrosionserscheinungen der Aluminiumschicht kommen.

Dieser Folientyp ist im Bereich der Kaffee- oder Chemikalienverpackungen ein weitverbreiteter Standard.

2.3.3.4 Metallisierte Kunststoff-Folien

In dieser Gruppe wird das Aluminium nicht als eigene Folienlage in den Verbund eingebracht, sondern auf eine Trägerfolie aufgedampft, oft mehr als einlagig mit polymeren Zwischenlagen. Man spricht dann von ‚metallisierten‘ Folien. Ein typischer Aufbau dieses Folientyps findet sich in Abb. 3.21.

Die Metallschichtstärke beträgt nur ca. 40-200 nm oder weniger und ist damit mind. 30-40 mal dünner³⁹ als bei den Folien aus Abschnitt 2.3.3.3.

Metallisierte Folien sind allerdings geringfügig weniger gasdicht.

Durch den erheblich geringeren metallischen Querschnitt ist die relevante Wärmeleitung für diesen Hüllmaterialtyp wesentlich geringer als für die Kunststoff-Metallfolien-Verbundprodukte.

Ihre Barriereigenschaften sind relativ gut, vor allem durch die aufgrund der Mehrlagigkeit (räumlich getrennte Barrierefunktionsschichten) bedingte statistisch geringere Ausfallquote.

Die typische Sauerstoffdurchlässigkeit (OTR) liegt unter 0,01 cm³/(m² d bar) bei 23 °C und die Wasserdampfdurchlässigkeit bei weniger als 0,1 g/(m² d bar) bei 38 °C und 90 % rel. Luftfeuchtigkeit.⁴⁰

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit kommt es kaum zu Wärmebrückeneffekten. Auch für diese Foliengruppe wird in der Regel PE als Siegelschicht (in einer typischen Schichtdicke von ca. 40-60 μm) eingesetzt.

Als robuste Außenschicht kommt zum Beispiel PET (übliche Schichtdicke: ca. 60 μm), PE, PA oder PP zum Einsatz.

Als Nachteile gelten allerdings die geringe Bruchfestigkeit und Verformbarkeit sowie Haftungsprobleme der aufgedampften Schichten auf der Substratfolie. Außerdem kann es auch hier zu Korrosionserscheinungen der Aluminiumschicht kommen.

		Kunststoff-Folien (Polymere, ohne Metall, oder Oxidanteile)	Kunststoff-Metallfolien-Verbund	Metallisierte Kunststoff-Folien	Kunststoff-Folien mit AlOx- oder SiOx-Beschichtung
Wärmeleitfähigkeit (Bew.)		++	- -	+	++
Sauerstoffsperrefunktion		o	++	+	+
Wasserdampfsperrefunkt.		o	++	+	+
Festigkeit		++	+	+	+
mechanische Belastbarkeit		++	o	+	+
Langzeitstabilität		+	++	++	++
Kompatibilität		o	o	o	o
Korrosion		+	o	o	o
Baustoffklassifizierung	n. DIN 4102-1	nicht vorhanden (Erwartung: bestenfalls B2)			
Preisniveau		hoch	gering	mittel	mittel

Abb. 3.22 Eigenschaften verschiedener Folienprodukte im Vergleich

Die gestalterischen Eigenschaften entsprechen denen der oben beschriebenen Kunststoff-Metallfolien-Verbundmaterialien. Optisch werden beide Folientypen durch die Metallschicht geprägt.

Die zusätzlichen Schichten führen dazu, dass sich das Aluminium chemisch nicht weiter verändert und somit hochglänzend bleibt.

Allerdings wird die Folie und damit auch die Metallschicht durch den Evakuierungsprozess auf den Kern gepresst und zeichnet dessen Oberfläche genau nach.

Hierdurch und durch die Kontraktion durch die Volumenverringernungen entstehen unzählige kleine Falten und Dellen. Dieser Effekt ist auf den Abb. 3.19 und 3.20 deutlich zu sehen.

2.3.3.5 Kunststoff mit SiOx-(oder AlOx)-Beschichtung

Diese Folienmaterialgruppe ist die jüngste Entwicklung der beschriebenen Typen. Nach heutigem Stand der Technik ist sie ähnlich gasdicht wie metallbedampfte Folien, allerdings deutlich günstiger herzustellen.

Die Wärmeleitfähigkeit von SiOx entspricht der von Glas und liegt somit bei ca. 0,8 W/(mK). Dies ist ca. 280 mal weniger als der entsprechende Wert für Aluminium.

Die Schichtdicken betragen vergleichbar den metallisierten Folien nur einige 10 nm. Der Beschichtungsvorgang findet ebenso im Hochvakuum statt.

Für diesen Folientyp ergeben sich nur äußerst geringe Wärmetransporteffekte über den Randverbund.

Sie sind in dieser Hinsicht nochmals deutlich besser als die Gruppe der metallisierten Folien.

Allerdings verfügen sie über analoge Nachteile wie geringe Bruchfestigkeit und Verformbarkeit sowie Haftungsprobleme der aufgedampften Schichten auf der Substratfolie.

Aus architektonischer Sicht von besonderer Bedeutung ist, dass diese Folien in ihren Permeationseigenschaften besser als die reinen Polymerfolien sind, aber ebenso wie diese transluzent oder sogar transparent herstellbar sind.

Somit bieten sich vor allem in Kombination mit transluzenten oder transparenten Kernmaterialien (wie zum Beispiel Aerogelen oder reinen Kieselsäuren) weitere Einsatzmöglichkeiten, wenn die laufenden Entwicklungen zu den erhofften Verbesserungen führen.

2.3.3.6 Folienprodukte im Vergleich

Abb 3.22 zeigt die maßgeblichen Folienvarianten und deren Eigenschaften im qualitativen Überblick.⁴¹

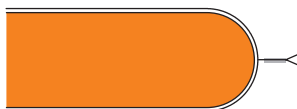
Die für die Verwendung für VIP wesentliche Eigenschaft der Wärmeleitfähigkeit der Folienmaterialien selbst (maßgeblich für den Randverbund) unterscheidet sich zwischen Kunststoff-Metallfolien-Verbundwerkstoffen (Absatz 2.3.3.3) und metallisierten Folien (Absatz 2.3.3.4) zugunsten letzterer ca. um den Faktor sieben.⁴²



1 Randverbund bei Hüllmaterial Glas (abstrahiert)



2 Randverbund bei Hüllmaterial Metallblech



a



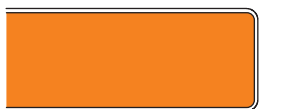
b



c



d



e

3 Randverbund bei Hüllmaterial Folie

Abb. 3.23 VIP-Randverbund (schematisch)

2.3.4 Der Randverbund

Für die Funktion von Vakuum-Dämmsystemen ist die Qualität des Randverbundes von ausschlaggebender Bedeutung, da er in der Regel lokal mit der Hauptschwachstelle für die Wärmeleitung, der Stoßfuge zwischen zwei Elementen, zusammenfällt.

An dieser Stelle soll nur der Randverbund der eigentlichen Vakuum-Dämmsysteme thematisiert werden, nicht allgemein das Problem der Stoßfuge zum Beispiel zweier Elemente eines Außenwandsystems. Dieses Thema, das sich unter anderem bei Paneelen aus in PU-Schaum eingebetteten VIP ergibt, impliziert weitere Anforderungen und Probleme (zum Beispiel bei der Montage), siehe hierzu Teil 4 Abschnitt 1.5.

Eine systematische Untersuchung zu linearen Wärmebrücken bei Vakuum-Dämmsystemen findet sich im Anhang 1.

Folgende Anforderungen müssen durch den Randverbund erfüllt werden:

- langanhaltende Dichtigkeit
- Ermöglichung minimaler Stoßabstände einzelner Paneele (zur Minimierung von Wärmebrücken)
- wirtschaftliche Herstellung

Die Herstellbarkeit des Randverbundes steht im engen Zusammenhang mit dem Evakuiervorgang, da er diesen abschließt. Im

allgemeinen wird die Hülle vorher mindestens dreiseitig geschlossen, die letzte Seite muss daher in der Vakuumkammer versiegelbar sein.

Aus hauptsächlich zwei Gründen sind - rein geometrisch bedingt - quadratische Formate günstiger als solche mit ungleich langen Kanten, nämlich wegen

- des günstigeren Verhältnisses Kante zu Fläche und
- des beidseitig maximalen Kantenabstandes und des damit verbundenen geringeren Übertragungseffektes von Kante zu paralleler, gegenüberliegender Kante.

Die Permeation durch die Siegelnaht ist im Prinzip proportional⁴³

- zur Länge der Siegelnaht,
- zur Dicke der Siegelschicht und
- zum Permeationsvermögen des Siegelmaterials.

In der Praxis führen insbesondere folgende Aspekte zu einer weiteren Erhöhung der Permeation über die Siegelnaht:



Abb. 3.24 Randverbund in Blech, Bsp. VIS-Element (lambdasave GmbH)

- Verletzung im Aufbau der Folien (mechanische Belastungen),
- ungenaue Siegelung,
- Falten und
- Verunreinigungen (Siegelnaht).

2.3.4.1 Der Randverbund für die Verwendung von Glas

Wie in Abschnitt 2.3.1 ausgeführt, ist der gasdichte Randverbund bei Glas ein spezielles, komplexes Thema, für das es im Zusammenhang mit Vakuum-Dämmsystemen derzeit keine ausgereiften Lösungen gibt, die die erforderliche, lange Funktionsdauer sicherstellen, siehe Fall 1 in Abb. 3.23

An dieser Stelle sei zudem auf Abschnitt 3 in diesem Teil und Abschnitt 1.6 in Teil 4 verwiesen.

2.3.4.2 Der Randverbund für die Verwendung von Metallblech

Fall 2 in Abb. 3.23 und Abb. 3.24 zeigen den durchgängig verschweißten Randverbund eines Edelstahl-Paneels der Firma lambdasave GmbH unter Verwendung einer sehr dünnen Edelstahlfolie (0,20-0,27 mm, Werkstoff 1.4301) als Membranprofil. Dieser Paneeltyp wird in der Literatur in der Regel als Vacuum-Insulating-Sandwich (VIS) bezeichnet.⁴⁴

Der Randverbund ist aus verarbeitungstechnischen Gründen insgesamt um ca. 14 mm nach innen versetzt.

2.3.4.3 Der Randverbund für die Verwendung von Folien

Aufgrund des resultierenden Außendrucks ist bei der Verwendung von Folien als Hüllmaterial eigentlich die ‚runde‘ Ecke die ideale Form.

Die gebräuchlichen Folien werden in der Regel heißversiegelt (verschweißt). Dies ist immer dann möglich, wenn Folienverbundmaterialien mit außenliegender thermoplastischer Schicht zum Einsatz kommen. Durch Aufschmelzen und anschließendes mechanisches Fügen der thermoplastischen Schicht wird der Verschluss erreicht.

Verfahren hierzu sind⁴⁵:

- Infrarotschweißen,
 - Laserschweißen,
 - Ultraschallschweißen,
 - kapazitives Hochfrequenzschw.,
 - Induktionsschweißen,
- und (am gebräuchlichsten) das
- Wärmekontaktschweißen.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass mindestens die letzte Siegelnaht im Vakuum zum Beispiel mittels eines einfachen Schweißbalkens durchgeführt werden muss.

Die einfachste Ausführung besteht darin, zwei Folien entlang des Paneelrandes umlaufend zu versiegeln (siehe Fall 3a in Abb. 3.23). An Paneelen der ersten Generation ist dies gut zu beobachten (Abb. 3.25).

Da diese Ausführung im Hinblick

auf die Vermeidung von Wärmebrücken und auf gute Verlegbarkeit nicht das Optimum darstellt, wird im allgemeinen ein möglichst rechtwinkliger Randverbund durch geeignete Faltungstechnik angestrebt.⁴⁶

Gleichzeitig führt jede ‚harte‘ Faltung unter den herrschenden Druckbedingungen zu starker Belastung der Folien.

Diese beschriebenen Anforderungen führen in der Praxis meist zu einer geringfügigen Abrundung an den Kanten der Paneelkerne.

Außerdem ist die umlaufende, abstehende Lasche für viele Weiterverarbeitungsschritte problematisch, was in einem ersten Optimierungsschritt dazu führte, dass diese um die Kante herumgefaltet und durch eine Klebung fixiert wurde, siehe Fall 3b+c in Abb. 3.23 und Abb. 3.26).

Die Entwicklung einer geeigneten Faltungstechnik bedeutet vor allem die Lösung des Problems der Eckausbildung.

Da die Qualität der Siegelnaht im Hinblick auf langfristige Gasdichtigkeit das wesentliche Kriterium darstellt, ist es von großer Bedeutung, dass diese nicht durch die Art der Faltung beeinträchtigt wird. Insbesondere sollte die Siegelnaht nicht gefaltet werden oder gar die Faltung parallel in der Siegelnaht liegen.

Liegt die Siegelnaht im Bereich der Stoßfuge zwischen zwei Paneelen,

erhöht sie erstens den Abstand zwischen den Paneelen und bildet zweitens selber eine Wärmebrücke durch ‚zusätzliches‘ Material parallel zum Wärmefluss. Eine Strategie zur Reduzierung dieses Effekts besteht darin, die Siegelnaht zweier Längsnähte einseitig in die Fläche des Paneels zu verlegen, siehe Fall 3e in Abb. 3.23 und Abb. 3.27. Hier stellt dann jedoch die resultierende T-Stelle der Siegelnähte eine prinzipbedingte Schwachstelle dar.

Die Firma va-Q-tec AG ließ sich im Jahre 2002 ihr ‚va-Q-seam‘-Verfahren patentieren⁴⁷, das die geschilderten Probleme bereits ziemlich überzeugend löst, allerdings derzeit noch einen relativ hohen manuellen Aufwand bedingt:

- rechteckige Plattenkanten
 - saubere Ecken
 - Siegelnaht in der Fläche
 - minimale Laschenlänge
 - Paneele allseitig mit minimalem Abstand stoßbar
- (Siehe hierzu Fall 3d+e in Abb. 3.23 und Abb. 3.28).

Folgende weitere Maßnahmen mit dem Ziel, die Schwachstelle ‚Randverbund‘ weiter zu minimieren, können genannt werden:

- Umkleben der Siegelränder
- zusätzlicher mechanischer Schutz der Kanten und Ecken (durch Klebebänder oder Beschichtung mit spez. Lacken)
- Reduzierung des manuellen Aufwands

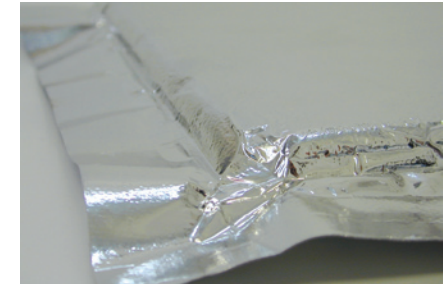


Abb. 3.25 Randverbund Folie, frühes Paneel (Firma Microtherm)

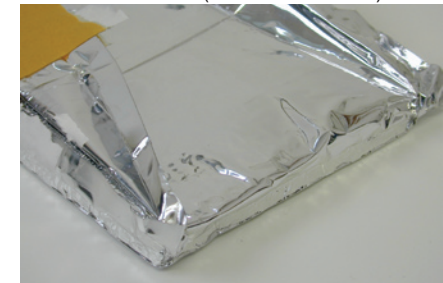


Abb. 3.26 Frühes Paneel (Firma ZZWancor/ Porextherm)

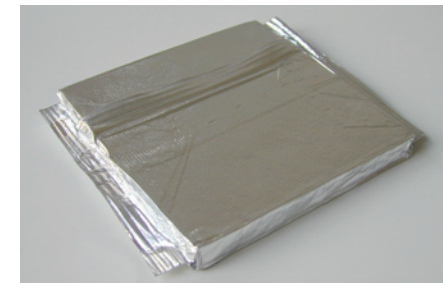


Abb. 3.27 Paneel des ZAE-Bayern (ca. 1998)



Abb. 3.28 Paneel der Firma va-Q-tec AG (2003)

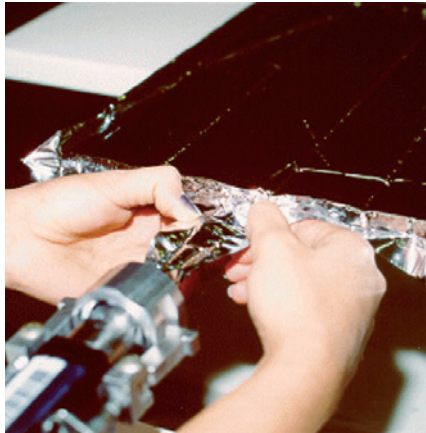


Abb. 3.29
Evakuieranschluss für ein PU-VIP einer früheren Generation.⁴⁸

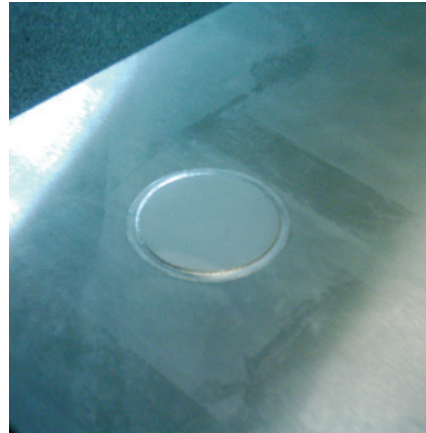


Abb. 3.30
Evakuieranschluss eines Edelstahlpaneels der Firma lambdasave GmbH.⁵⁰

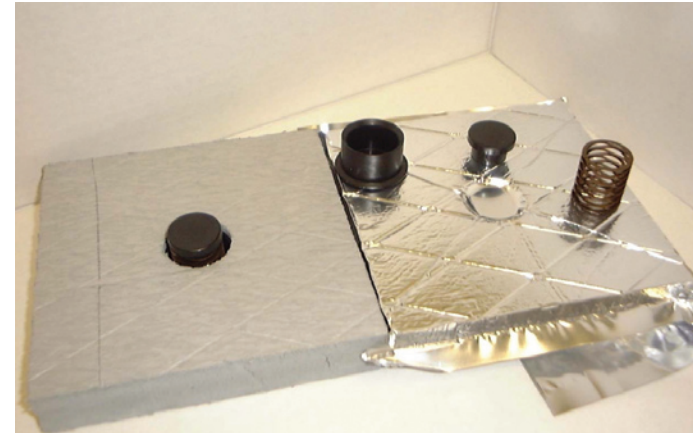


Abb. 3.31
VIP-Kontroll-Einbauteil (Verfahren Vac-Intact®) der Firma Tuscarora / ISC⁵¹

2.4 Abstandhalter

Vakuum-Dämmsysteme mit weichem Kernmaterial und weicher Hülle bedingen ein weiteres Systemelement, das die beiden Hüllschichten von einander separiert und den evakuierten Zwischenraum aufrecht erhält.

Dies führt in der Regel dazu, dass die günstigen Wärmedämmeigenschaften zu einem großen Teil verloren gehen. Daher haben sich solche Systeme bis heute nicht durchgesetzt.⁴⁹

„Vakuum-Verglasung“ gehört nach der Systematik dieser Arbeit nicht in diese Fallgruppe, sie wird in Abschnitt 3 dieses Teils behandelt.

2.5 Evakuier-Anschlüsse

Insbesondere im Zusammenhang mit dem Hüllmaterial Edelstahl werden in der Regel Evakuierflansche

eingesetzt, das heißt das Paneel wird nicht - wie sonst heutzutage üblich - in einer Vakuumkammer evakuiert, sondern der Randverbund wird unter normaler Atmosphäre hergestellt und das Paneel im Anschluss (eventuell sogar erst nach dem Einbau vor Ort) über einen separaten Anschluss, den Evakuierflansch, luftleer gepumpt. Ein Beispiel für ein Paneel einer früheren Generation gibt Abb. 3.29.

Bei größeren Formaten können zur Reduzierung der Evakuierzeit mehrere Anschlussflansche eingesetzt werden.

Die Dichtheit im Bereich des Anschlusses wird durch einen Viton-Dichtring gewährleistet. Dieser ist am fertigen VIP in der Regel jedoch nicht mehr sichtbar, da er meist durch ein darüber liegendes Aufschweißplättchen abgedeckt wird, siehe Abb. 3.30.

2.6 Einbauteile für spätere Messungen des Paneelinnendrucks

Für die Qualitätskontrolle von VIP ist von entscheidender Bedeutung, mit welchem Aufwand zu welchem Zeitpunkt geprüft werden kann, ob und wie gut sie noch funktionieren. Diese Frage steht in direktem Zusammenhang mit dem Innendruckniveau der Paneele.

Die grundsätzlichen Möglichkeiten, wie die Wärmeleitfähigkeit bei Vakuum-Dämmsystemen direkt und indirekt gemessen werden kann, sind in Abschnitt 4 dieses Teiles abgehandelt, da sie sich nicht auf die Anwendung in VIP beschränken.

Eine Methode, den Paneelinnendruck zu prüfen, besteht darin, die Hülle über einen Aufsatz anzusaugen und dabei zum Beispiel mit einem Laser zu messen, wie

weit sich die Hülle bei welchem anliegenden äußeren Unterdruck vom Kernmaterial abhebt. Dieses Verfahren ist allerdings in der Praxis schwierig und sehr aufwändig. Zudem besteht die Gefahr, dass das Paneel dabei beschädigt wird. Um die spätere Messung des Paneelinnendrucks an fertigen und wohlmöglich bereits eingebauten VIP zu erleichtern, gibt es daher verschiedene Verfahren, die meist darauf basieren, ein spezielles Element in das Paneel einzubauen, mit dessen Hilfe die Innenseite des Paneels später messtechnisch ‚erreicht‘ werden kann.

Dabei darf das Paneel bei der Kontrollmessung nicht beschädigt werden. Außerdem sollte das Einbauteil selbst möglichst keine Wärmebrücke darstellen. Ein Beispiel für ein rein mechanisches Verfahren wird in Abb. 3.31 gegeben:



Abb. 3.32 Messgerät zum Verfahren va-Q-check® / Fa. va-Q-tec ⁵²

In einer runden Aussparung im Paneelkern befindet sich ein mechanisches Einsatzteil aus zwei ineinandergesteckten Hülsen, die durch eine Feder auf Abstand gehalten werden.

Der Unterdruck im Paneel zieht das Hüllmaterial beidseitig in die Aussparung und drückt die Feder zusammen. Das ist bei einem funktionierenden Paneel deutlich zu erkennen, wie auf der Abbildung zu sehen ist. Lässt das Vakuum im Paneel nach, drückt die Feder das Hüllmaterial nach außen und das Paneel ist deutlich und schnell von außen als defekt identifizierbar.

Allerdings bildet dieses Einbauteil selbst eine bedeutende Wärmebrücke und führt zu einer örtlichen, punktförmigen mechanischen Belastung des Hüllmaterials. Quantitative Aussagen zum Paneelinnen- und -druck sind nicht möglich.

2.6.1 Das va-Q-check®-Verfahren

Gegenüber den oben beschriebenen Methoden stellt das von der va-Q-tec AG (Würzburg) 2003 patentierte⁵³, thermische ‚va-Q-check‘-Verfahren eine wesentliche Verbesserung dar. Es ist für alle VIP mit Kunststoff- oder Kunststoffverbundfolien einsetzbar, aber zum Beispiel nicht für Systeme mit Edelstahlhülle. Auf den kaschiereten Dämmstoffkern wird ein Metallplättchen als Wärmereservoir, der sogenannte ‚Mess-Chip‘ (Abb. 3.34), aufgelegt und mit einer offroporigen Vlieslage abgedeckt (mit größeren Poren als das Kernmaterial, zum Beispiel ein Glasfaservlies mit 50 g/m², Abb. 3.35). Nach der Evakuierung im Hüllmaterial zeichnet sich der ‚Mess-Chip‘ deutlich ab und ist leicht zu finden (Abb. 3.36).

Abb. 3.33 zeigt die zugrundeliegende Idee entsprechend der Patentschrift. Der Mess-Chip (3) wird zwischen Kern (1) und Hülle (2) eingelegt, von letzterer getrennt durch die grobporöse Zwischenschicht (4), die einen Wärmewiderstand bietet, der direkt von der Höhe des im Inneren befindlichen Vakuums abhängig ist. Der Wärmewiderstand der Zwischenschicht wird gemessen, indem für ca. 5 bis 30 s von außen eine deutlich erhöhte Temperatur auf den Mess-Chip aufgebracht wird und der Wärmestrom ermittelt wird. „Der Wärmewiderstand der Zwischenschicht ist dann proportional zum

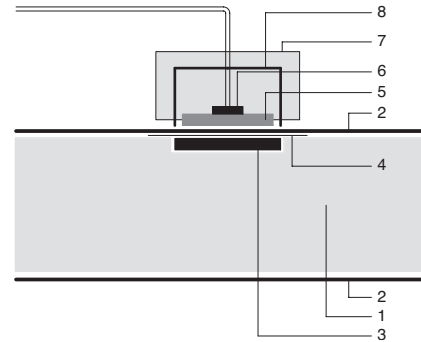


Abb. 3.33 Prinzip⁵⁴ Messverfahren va-Q-check®

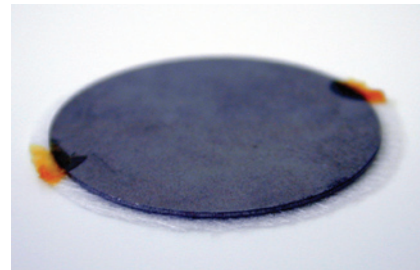


Abb. 3.34 ‚Mess-Chip‘ fixiert auf Vlieszuschnitt...

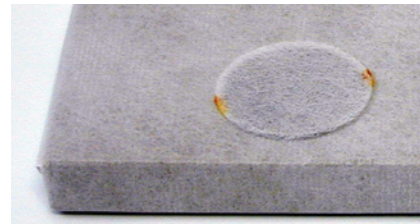


Abb. 3.35 ...appliziert auf kaschiertem VIP-Kern

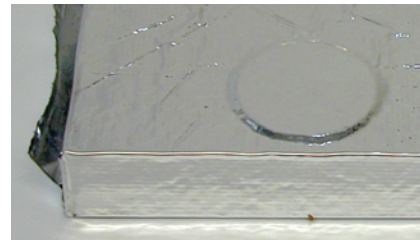


Abb. 3.36 ... sich deutlich abzeichnend im fertigen Paneel

- 1 Kernmaterial des VIP
- 2 gasdichte Hülle des VIP
- 3 Metall- oder Keramikplatte
- 4 grobporöse Zwischenschicht
- 5 Sensorplatte
- 6 Temperatursensor
- 7 Wärmedämmstoff um Sensor
- 8 metallische Sensorhülle

Verhältnis aus Temperaturdifferenz zwischen innerer Platte (3) und Sensorplatte (5) und dem gemessenen Wärmestrom.“ ⁵⁵

Es gilt allerdings zu beachten, dass für die Messung die Temperaturen der Umgebung und der VIP-Materialien berücksichtigt werden müssen, was in der Praxis einen gewissen Unsicherheitsfaktor darstellt. Der geringe Aufwand (an Material, Zeit und damit an Kosten) macht es möglich, dass grundsätzlich alle Paneele der va-Q-tec AG mit den notwendigen Vorhaltungen für dieses Verfahren ausgerüstet werden.

Der Messkopf mit dem Temperatursensor und das notwendige Handgerät (Abb. 3.32) sind verhältnismäßig klein und handlich. Dies ist für den Einsatz in der Qualitätssicherung von großer Bedeutung, siehe hierzu Abschnitt 2.10 dieses Teils. Statt des Handmessgerätes kann der Sensor auch (zum Beispiel an ausgewählten Paneelen) fest eingebaut werden und die anfallenden Daten durch eine Festverkabelung vor Ort erfasst und regelmäßig (zum Beispiel zu Forschungszwecken) ausgewertet werden.⁵⁶ Das Verfahren suggeriert zwar sichtbar Sicherheit, kann die Qualität der Paneele selbst aber natürlich nicht heben.

2.7 Trocknungsmittel und ‚Getter‘

Sogenannte Trocknungsmittel (engl. ‚getter materials‘) verzögern durch Bindung von verschiedenen Gasen (auch Wasserdampf) bis zum Sättigungspunkt des Materials den Druckanstieg in evakuierten Bereichen. Restgase können sich aus folgenden Gründen im Paneelinneren befinden:

- Restgas nach Evakuierung
- ausgasendes Kernmaterial
- undichte Barrierschicht
- undichter Randverbund
- freiwerdende Gase durch Hitze- einwirkung zum Beispiel durch den Einschäumungsvorgang

Oft sind Gettermaterialien in kleinen tablettförmigen Containern untergebracht (Abb. 3.38), die in bestimmte Vakuum-Dämmsysteme eingebaut werden und dort - zumindest für eine bestimmte Zeit - wie eine eingebaute Vakuumpumpe wirken. Dies ist nicht notwendig, wenn das Kernmaterial selbst schon Getter-Eigenschaften aufweist, wie dies zum Beispiel für mikroporöse Kieselsäure gilt (vergleiche v.a. Absatz 2.2.4.2).

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen physikalischer und chemischer Wirkungsweise von Gettermaterialien (Abb. 3.37).

Je nach Art und Menge der zu absorbierenden Gase werden Gettermaterialien ausgewählt, zum

Wirkungsweise	chemisch	physikalisch
Material	Legierungen mit Elementen wie Barium, Titan, Zirkonium, Vanadium	Zeolite, Kieselsäuren, Aktivkohlen
Sorption	irreversibel	reversibel
Sorptionsmechanismus	Oberflächenadsorption mit molekularer Veränderung oder atomare Diffusion mit stabiler Bindung	Oberflächenadsorption
‚getterbare‘ Gase (bei 23 °C)	O ₂ , N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O, H ₂ , C _x H _x	H ₂ O, bestimmte organische Verbindungen
Vorbehandlung	erforderlich	erforderlich

Abb. 3.37 Überblick über chemische und physikalische Gettermaterialien.⁵⁷

Beispiel Barium und Lithium für Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid, Kalzium-, Kobalt-, oder Bariumoxide für Wasserdampf. Edelgase können durch Gettermaterialien weder physikalisch noch chemisch gebunden werden. Im Hinblick auf die Anwendung im Bereich von Vakuum-Dämmsystemen sind Menge und Art des Gettermaterials abhängig von

- Kernmaterial,
- Folien- / Hüllentyp,
- Paneeldimensionen und
- der geforderten Lebensdauer.

Durch den Einsatz von Trocknungsmitteln und Gettern können folgende Effekte erzielt werden:

- Verlängerung der Lebensdauer
- Qualitäts-Verbesserung und Beschleunigung des Herstellungsprozesses

Für die speziellen Anforderungen von VIP wurde Ende der 1990er Jahre von der Firma SAES ein spezieller, optimierter Getter entwickelt,

der Combogetter® (Abb. 3.38). Er enthält neben dem Hauptbestandteil Calciumoxid unter anderem eine Barium-Lithium-Legierung (BaLi₄) und Kobaltoxid. Sorptionskapazitätswerte hierzu finden sich in Abb. 3.39. In der Regel werden Getter allerdings nur in VIP eingesetzt, deren Kernmaterial nicht auf Kieselsäure basiert.

Zur optimierten Getterung von Wasserstoff wurden spezielle Polymer-basierte Getter entwickelt.⁵⁸

Trocknungsmittel kommen auch in vielen anderen Bereichen zum Einsatz, zum Beispiel bei elektronischen Röhren, Bildschirmröhren, Plasmaschirmen, Thermoskannen u.v.m., aber auch in konventionellen Abstandshaltern bei Mehrfachverglasungen. Sie können u.a. in folgenden Verarbeitungsvarianten ein- bzw. aufgebracht werden:

- Pulvern
- Pellets und Tabletten
- Aufsprühen von Material
- Selbstklebene Folien

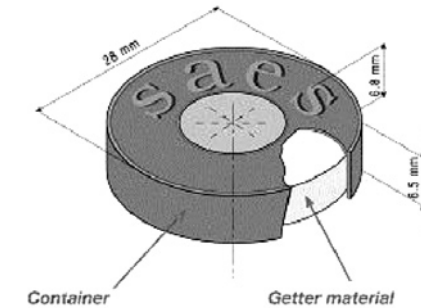


Abb. 3.38 Containerförmiger Getter zur Absorption von Restgasen. Über die Öffnung im Containerdeckel oder die Unterseite findet der Gasdurchgang statt.⁵⁹

Gas	Sorptionskapazität
	[mbar l]
H ₂ O	> 800
H ₂	> 90
CO/ CO ₂	> 8
N ₂ / O ₂	> 5,5
C _x H _x	> 1

Abb. 3.39 Sorptionskapazitäten für bestimmte Gase des Combogetters® (Model 5M1040) der Firma SAES Getters (Herstellerangaben, 2004).

2.8 VIP: Freiheiten im Zusammenhang mit der Formfindung

Naheliegenderweise sind rechteckige Platten mit möglichst präzisen rechtwinkligen bzw. parallelen Kanten das zu bevorzugende Format.

Dennoch sind auch diverse andere Formen möglich, wenngleich in der Regel mit größerem Aufwand in der Herstellung verbunden.

Möglich sind unter anderem

- Ausnehmungen im Randbereich,
 - freigeformte Ränder,
 - Ausnehmungen in der Paneelfläche („Löcher“) oder
 - gebogene Paneele,
- sowie Kombinationen hieraus.

Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass mit jeder ‚Sonderstelle‘ in der Versiegelung potenzielle Schwachstellen entstehen.

Sonderformen erfordern in der Regel sehr komplizierte, mehrfache Faltungen der Folien, die an den betroffenen Stellen zu deutlicher Mehrbelastung der Siegelnähte führen als der konventionelle Randverbund. Oft kann zudem die für den Standard-Randverbund entwickelte und optimierte Faltungs- und Verarbeitungstechnik an Sonderstellen nicht eingesetzt werden.

Grundsätzlich führt die Verlängerung der Gesamtsiegelnahtlänge bereits rein statistisch zu einer Verringerung der Funktionsdauer des Paneels.

Ausnehmungen oder Abrundungen/ Abschrägungen an den Ecken sind allerdings unter Umständen ein Mittel, um Durchführungen zu Befestigungszwecken zu ermöglichen. In solchen Fällen kann ein Abwägen sinnvoll sein, ob der erhöhte Aufwand für die Herstellung durch die möglicherweise verbesserten konstruktiven Einsatzmöglichkeiten gerechtfertigt ist.

Einen Sonderfall stellen Paneele mit Edelstahlblech als Hüllmaterial dar, da diese aufgrund der Randverbundausführung relativ biegesteifen Systeme zusätzlich die Möglichkeit bieten, Befestigungselemente wie zum Beispiel Gewindebolzen am Hüllmaterial anzuschweißen.

2.9 Produkte

2.9.1 Herstellungsverfahren

Außer den von außen sichtbaren Unterschieden zwischen den einzelnen Systemen (Hüllmaterial, Randverbundausbildung usw.) gibt es teilweise erhebliche Unterschiede in der Fertigungstechnik, die Einfluss auf Qualität und Preis der angebotenen Systeme haben. Diese können im Rahmen der vorliegenden Arbeit keinesfalls vollständig dargestellt werden, da sie größtenteils geschützt und nicht offen zugänglich sind. Außerdem unterliegen sie gerade in der noch frühen Entwicklungsphase der hier thematisierten Systeme ständigem Wandel, der nicht nur Innovationen

entspringt, sondern oft auch aus einer Skalierung der betreffenden Prozesse resultiert.

Da es für die Herstellung von Paneelen mit Edelhüllmaterial derzeit nur einen Hersteller gibt, finden sich die meisten Unterschiede bei den Systemen mit Folien als Hüllmaterial.

Das Kernmaterial kommt in der Regel von einem großen Hersteller, seien es organische Schäume, Glasfasern oder Kieselsäure-Pulver. Letztere werden dann in der Regel bereits von einem weiteren Anbieter zu den eigentlichen Kernplatten, den sogenannten ‚Grundplatten‘, durch Mischung mit Glasfasern und Trübungsmitteln und anschließende Verpressung aufbereitet. Hieraus ergibt sich ein kostenrelevanter Zusammenhang durch die Wahl des Standard-Grundplattenformats. Bei der Firma Porextherm GmbH liegt dieses Maß beispielsweise derzeit (2005) bei 1200 mm x 1050 mm.

Wirtschaftliche Standardformate für fertige Paneele ergeben sich daher dann, wenn diese Grundplatten mit möglichst wenig Verschnitt eingesetzt werden können. Die anfallenden Reste können durch Aufmahlen nur zu einem Anteil von maximal 10% mit dem Grundmaterial für neue Platten verwendet werden, da sonst die angestrebte Dichte nicht einzuhalten ist.

Da die Handhabung der Grundplatten aufgrund der mechanischen La-

bilität schwierig ist und die ascheartige Konsistenz den Versiegelungsvorgang durch Verunreinigung gefährden kann, werden sie meist in einem Zwischenschritt kaschiert. Hierzu kommen zum Beispiel Glasfaservliese (Abb. 3.35 zeigt dies anhand eines Produkts der va-Qtec AG) oder perforierte PE-Folien zum Einsatz.

Letztere haben den Vorteil, dass sie durch einen folgenden, vollautomatisierten Hitze-Einschrumpfungsvorgang zu einer deutlichen Erhöhung der Eigenstabilität der Platten und damit einer Verbesserung der weiteren Handhabung der Zwischenprodukte beitragen können.⁶⁰

2.9.2 Produktübersicht

Abb 3.41 zeigt verschiedene auf dem Markt verfügbare VIP-Produkte und deren Eigenschaften im Überblick.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass es zu keinem dieser Produkte bislang (09.2005) eine Bauaufsichtliche Zulassung gibt. Es handelt sich vielmehr bei allen behandelten Varianten um Produkte, deren Herstellung und Verwendung bisher nicht durch Vorschriften oder Normen geregelt sind. Solange beim Deutschen Institut für Bautechnik keine sog. ‚Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung‘ erwirkt ist, ist für jede Anwendung bei der jeweils zuständigen obersten Baubehörde eine sogenannte ‚Zustimmung im Einzelfall‘ zu beantragen.

Außerdem wurden in dieser Zusammenstellung nur Systeme berücksichtigt, die als Produkt bereits verfügbar sind und zu denen daher entsprechende Angaben vorliegen.

Dabei wurde versucht, derzeit führende oder wenigstens in technischer Hinsicht den aktuellen Stand widerspiegelnde Produkte in Vergleich zu bringen. Somit bilden die Ergebnisse auch einen Vergleich der zugrundeliegenden, verschiedenen Systemvarianten.

Nicht zu allen Aspekten liegen bereits konkrete Angaben vor. Hier ist beispielsweise das in letzter Zeit an Bedeutung gewinnende Thema der elektromagnetischen Dämpfungseigenschaften in Bezug auf die Funkstrahlungsbelastung zu nennen.

Dabei ist zu erwarten, dass sich Vakuum-Dämmsysteme im Vergleich zu anderen Dämmstoffen (zum Beispiel PS-Schäumen) als günstig erweisen, vor allem aufgrund des Metallanteils im Hüllmaterial.

2.9.3 Wärmeleitgruppen-Klassifizierung

Bislang existieren keine für den Baubereich zugelassenen VIP-Produkte (s.o.) und damit keine offiziellen Rechenwerte. Da die Wärmeleitfähigkeit eines Vakuum-Dämmsystems in hohem Maße von Randbedingungen abhängen, werden durch die Hersteller im allgemeinen nur Wärmeleitwerte angegeben, die für die ungestörte

Paneelfläche (also die Paneelmitte) gelten, die in der Praxis in keiner Einbausituation erreicht werden können.

„Mittlere“ Wärmeleitzahlen (und damit erzielbare U-Werte) werden vor allem durch Geometrie, Materialwahl und die Art der Randausbildung und -anschlüsse bestimmt. Dies zeigt Abb. 3.40 für ausgewählte Beispiele.

Vermutlich wird dies schlussendlich dazu führen, dass man sich im Rahmen einer Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung auf einen relativ hoch angesetzten Rechenwert für die Wärmeleitfähigkeit festzulegen hat, wie dies in der Schweiz bereits erfolgt ist.

Dort haben intensive Langzeittests, die an der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (EMPA) unternommen wurden, zum Vorschlag folgender Rechenwerte für die Wärmeleitfähigkeit geführt: ⁶¹

6 mW/(mK)
für VIP mit Kunststoff-Metallfolienverbund (Abschnitt 2.3.3.3)

8 mW/(mK)
für VIP mit metallisierten Kunststoffverbundfolien (Abschnitt 2.3.3.4)

Diese Werte beinhalten Alterungseffekte bis 25 Jahre und gelten für VIP mit einer Mindestseitenlänge von 25 cm und einer Mindeststärke von 2 cm.

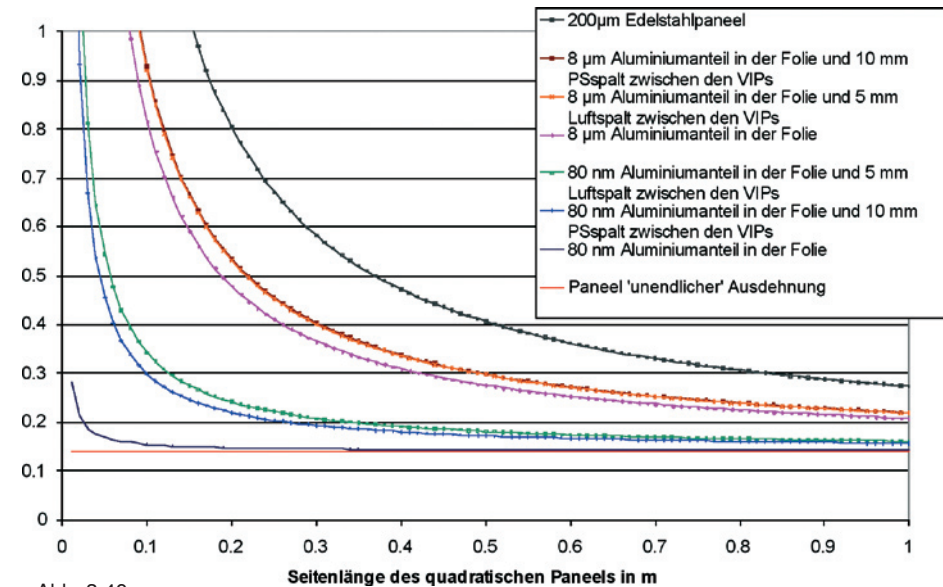


Abb. 3.40 Effektive U-Werte $[W/(m^2K)]$ für einen speziellen Wandaufbau (17,5 cm Kalksandstein, 3 cm VIP, 3 cm Polystyrol) in Abhängigkeit von der Seitenlänge eines quadratischen Paneels für verschiedene Folien (und Edelstahlblech zum Vergleich) und Stoßvarianten. ⁶²

2.9.4 Brandschutz-Klassifizierung

In Abb. 3.17 findet sich die brandschutztechnische Klassifizierung verschiedener Kernmaterialien.

Für die Zulassung eines Produktes für den Baubereich ist jedoch 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. ⁶³

Für die meisten der untersuchten Systeme liegen allerdings bis zum

jetzigen Zeitpunkt keine Prüfzeugnisse mit entsprechender brandschutztechnischer Klassifizierung vor. Hinsichtlich der Einstufung von VIP mit Kunststoff- oder Kunststoffverbundfolien (auch metallisierte Varianten) sind allerdings kaum Ergebnisse zu erwarten, die über die Baustoffklasse B2 nach DIN 4102-1 hinausgehen (siehe auch Abschnitte 2.3.2 und 2.3.3).

2.9.5 Schallschutz-Klassifizierung

Hinsichtlich des schallschutztechnischen Verhaltens von Vakuum-Dämmsystemen sind nach Expertenmeinung ⁶⁴ pauschale Aussagen nicht möglich, da die entsprechend erreichbaren Werte des (bewer-

Typ		VIP	VIP	VIS
Kernmaterial		pyrogene Kieselsäure (160-180 kg/m ³)	offenzelliger Polyurethanhartschaum	pyrogene Kieselsäure (160-180 kg/m ³)
Hüllmaterial		metallisierte Hochbarrierefolie (Al)	metallisierte Hochbarrierefolie (Al)	Edelstahl (0,6 - 4 mm), Randverbund Edelstahlfolie (0,20 - 0,27 mm)
Wärmebrückenwirkung des Randverbunds		sehr gering	sehr gering	hoch
sonst. ‚Bausteine‘		(ggf. ‚Mess-Chip‘ für va-Q-check-Verfahren)	Getter	Evakuierflansch
Dicke(n)	[mm]	10 - 50 (typisch 20)	15, 20, 25, 30, 40, 50, 60	10 - 50
Wärmeleitfähigkeit	[mW/(mK)]	4,2 (bei 10 °C)	8 - 9 (bei 23 °C)	5,3
...bei Innendruck von	[mbar]	< 5	< 0,1	1
Wärmeleitfähigkeit (in belüftetem Zustand)	[mW/(mK)]	20	34	20
spez. Wärmespeicherkap.	[kJ/(kgK)]	0,8 (Kernplatte)	k.A.	0,8 (Kernplatte)
Gewicht	[kg/m ³]	160-180	62	160-180 (+ Hüllmaterial: 30-50 kg kg/m ²)
Temperatur-Dauer- einsatzbereich	[°C]	-30 bis 60	-50 bis +50 (max. +80)	-200 bis > 1000
Luftfeuchtigkeit- Dauereinsatzbereich	[%-rel. Luftf.]	0 bis 60 (80)	k.A.	je nach Legierung des Hüllmaterials
verträgliche Spitztemperatur (kurzzeitig, < 15 min)	[°C]	80 - 100	80	> 1000
Eigenstabilität		nicht vorhanden	nicht vorhanden	biegesteif
Druckbelastbarkeit		160 kPa (bei 10% Stauchung)	450 kPa	> 7,5 t / m ²
reparabel	[ja / nein]	nein	nein	ja
angegebene Funktionsdauer	[Jahre]	keine Angaben	5 - 15	> 100, wenn vor Ort evakuierbar
Brandschutz-Klassifizierung	nach DIN 4102-6	(max. B2 möglich)	nicht vorhanden	A1
max. Abmessungen, l x b	[mm]	2200 x 1000 (min. 150 x 150), Standardformat: 1000 x 500 oder 1000 x 600	1350 x 600, kein Standardformat	8000 x 3000 (min.: 500 x 500), kein Standardformat
Fertigungstol., l bzw b / s	[mm]	-5 bis +2 / ± 1	k.A.	k.A.
sonstiges		mit 2-Komponenten-PU-Kleber oder Hotmelt-Butyl verklebbar, mit PU oder PS einschäumbar.		
Bewertung der Eignung für den Baubereich		mit Einschränkungen geeignet	nicht geeignet, Funktionsdauer zu gering	mit Einschränkungen geeignet
Preisniveau pro m ²	[€]	80 - 100 (bez. auf Standardformate)		
Hersteller (Auswahl)		va-Q-tec AG, Porextherm GmbH, SAES Getters S.p.A, Microtherm International Ltd.	va-Q-tec AG	lambdasave GmbH

Abb. 3.41 Eigenschaften ausgewählter aktueller VIP-Produkte im Vergleich (gemäß Angaben der jeweiligen Hersteller, Stand März 2005)

teten) Luftschalldämm-Maßes R'_{w} - ebenso ggf. des (bewerteten) Normtrittschallpegels $L'_{n,w}$ - von der jeweils gewählten Einbausituation abhängig sind. Diese müssen jeweils messtechnisch ermittelt werden.

Bewertete Luftschalldämm-Maße R_w für biegesteife Vakuum-Dämmsysteme (zum Beispiel mit Edelstahl als Hüllmaterial) wurden bislang nicht veröffentlicht.

Es gibt allerdings Firmenangaben zu bewerteten Luftschalldämm-Maßen R_w in Bezug auf zwischen Glas (als Brüstungselemente für Pfostenriegelfassaden) eingebaute VIP, siehe hierzu Teil 4 Abschnitt 1.6.

2.10 Funktionsdauer

Im Gegensatz zu Anwendungen aus anderen Bereichen (zum Beispiel Kühlgerätebau) werden für den Einsatz im Baubereich deutlich höhere Anforderungen an die Funktionsdauer der eingesetzten Produkte und Systeme gestellt.

Ein üblicher Zeithorizont liegt hier bei 50 Jahren und mehr. Doch was genau ist unter Funktionsdauer zu verstehen?

2.10.1 Begriffsdefinition

Unter Funktionsdauer wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Zeitspanne verstanden, in der das Produkt bzw. System seine vorgesehene Funktion voll erfüllen wird.⁶⁵ Dies bedeutet in erster Linie, dass

die Wärmeleitfähigkeit nicht über einen bestimmten, je nach Anwendung im einzelnen festzulegenden Grenzwert λ_{grenz} steigt bzw. die Wahrscheinlichkeit dafür ausreichend gering ist. Diese Dauer wird als t_{grenz} bezeichnet. Zu einem Anfangsdruck p_0 in einem VIP lässt sich daraus ein maximal zulässiger Druckanstieg Δp berechnen (siehe hierzu Teil 2 Abb 2.21).

Die maßgebliche Größe für den Druckanstieg ist die Leckrate pV/t der Hülle, die in der Regel in $[\text{mbar} \cdot \text{dm}^3 / \text{s}]$ angegeben wird. Hier zeigt sich ein Grundkonflikt, denn Aussagen können nur aufgrund statistisch ermittelter Daten getroffen werden, die immer mit einer gewissen Unsicherheit für den Einzelfall behaftet sind.

Grundlage einer solchen Abschätzung bilden folgende Faktoren und Bedingungen:

- Definition der zugrundegelegten Randbedingungen (zum Beispiel Temperatur und Feuchteschwankungen und -schwankungshäufigkeiten)
- Definition der maximal zulässigen Wärmeleitfähigkeit (Grenzwert)
- ggf. Festlegung weiterer funktionaler oder anderer Kriterien, zum Beispiel optischer Art

2.10.2 Qualitätssicherung

Die Wärmeleitfähigkeit in Vakuum-Dämmsystemen gemäß Abb. 3.4 hängt in erster Linie vom inneren

Gasdruck und Feuchtegehalt des Kernmaterials ab. Daher können prinzipiell neben der Wärmeleitfähigkeit selbst diese beiden physikalischen Größen zur Qualitätskontrolle herangezogen werden.

Dazu ist es erforderlich, möglichst genau zu wissen, wie sich diese beiden Werte mit der Zeit im System entwickeln werden. Wenn man innere Effekte (wie zum Beispiel Ausgasen) vernachlässigt, hängt die Entwicklung in erster Linie von der Qualität der Umhüllungsmaterialien und des Randverbundes ab.

Weiterhin ist die Kenntnis des ‚Startzustandes‘ des Gasdruckes und des Feuchtegehaltes unabdingbar. Da man undichte Vakuum-Dämmsystem mit rein optischen Mitteln kaum erkennen kann, insbesondere dann, wenn sie schon eingebaut und verdeckt sind, bilden Innendruck-Messverfahren die einzige Möglichkeit der Qualitätskontrolle (siehe Abschnitt 2.6).

Die damit zusammenhängende besondere Schwierigkeit bei Vakuum-Dämmsystemen besteht darin, dass - auch aus Gründen der konkreten Gewährleistung - die Kontrollen die ganze Produktionskette von der Herstellung über Transport / Lagerung und Einbau lückenlos erfassen müssen, da auch ein einmal geprüft und für gut befundenes Element im Verlauf der weiteren Schritte Schaden nehmen kann, ohne dass dies ohne Hilfsmittel erkennbar ist. Aufgrund dieser

Notwendigkeit zu mehrfachen Kontrollen an verschiedenen Orten sind insbesondere Verfahren erforderlich, die schnell Ergebnisse liefern und unkompliziert anzuwenden und auszuwerten sind.

Zu bevorzugen sind daher Methoden, bei denen die Hülle nicht durchdrungen wird und es ausreicht, wenn das Dämmsystem punktuell zugänglich ist.

Unter Umständen kann es auch interessant sein, einzelne oder alle Dämmsysteme einer Baumaßnahme mit Sensoren zu bestücken, über die zentral über längere Zeit Daten erfasst werden können und so die Datenbasis für Aussagen zu langfristigen Entwicklungen geschaffen wird.

Das unter Abschnitt 2.6.1 beschriebene va-Q-check-Verfahren ist für VIP mit dem Hüllmaterial Kunststoff- oder Kunststoffverbundfolie nach den vorliegenden Informationen ein geeignetes Verfahren, eine solche Qualitätssicherung durchzuführen. Es ist ausreichend genau, um durch mehrfache Messungen und die ermittelten Differenzen aufgrund der verfügbaren Datengrundlage Aussagen über die weitere Entwicklung einzelner Paneele abzuleiten.⁶⁶

Für Systeme mit Edelstahlblechhülle und Evakuierflansch kann das va-Q-check-Verfahren nicht angewendet werden. Für diese VIP-Gruppe kann die Dichtheit mittels einer Heliumdichtigkeits-

prüfung nach dem ‚Integralen Vakuumverfahren‘ (gem. DIN EN 1779) ermittelt werden. Davon ausgehend, dass Edelstahl selbst in der verwendeten Stärke gasdicht ist, und in Kenntnis, dass der Evakuierflansch versuchstechnisch nicht erfassbar ist, lässt sich die gemessene Leckrate ausschließlich auf die Schweißverbindungen beziehen.⁶⁷ Die Dichtheit des Evakuierflansches muss separat ermittelt werden.

Das Verfahren ist nach Angaben des Herstellers Thyssen-Krupp TempSAFE (jetzt lambdasave GmbH) ausreichend schnell, um eine 100%-ige Kontrolle aller die Firma verlassenden Elemente zu gewährleisten, wodurch jeweils die individuelle Funktionsdauer angegeben werden kann (ohne Berücksichtigung einer außerdem möglichen Nachevakuierung).

2.10.2.1 Der Gasdruckanstieg in VIP - Ursachen

Folgende Bedingungen haben Einfluss auf den Gasdruckanstieg in einem VIP:

- Hüllmaterial
- Randverbundausführung und -breite
- Evakuierflansch (falls vorhanden)
- Getteigenschaften der Innenmaterialien (Kern und ggf. Getter)
- Temperatur und Feuchte auf der Paneelaußenseite
- Paneelvolumen
- Verhältnis Hüllfläche zu Volumen

2.10.2.2 Abhängigkeit vom Gasdruckanstieg

Die von va-Q-tec produzierten VIP haben einen typischen Anfangsdruck zwischen 1 und 2 mbar und eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 4 mW/(mK). Die Firma gibt an, dass eine Zunahme des Gasdruckes um 1 mbar pro Jahr zu einer Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,04 mW/(mK) führt, was etwa 1% entspricht.

Eine solche geringe Zunahme lässt sich mit üblichen Verfahren zur Messung der Wärmeleitfähigkeit kaum nachweisen, so dass der Nachweis über die Änderung des Gasdruckes viel geeigneter erscheint. „Die Wiederholgenauigkeit des va-Q-check-Verfahrens kann bei einem Gasdruck von 1 mbar im Bereich von 0,1 mbar liegen.“⁶⁸

In der Praxis sollten durch in relativ kurzer Zeit (am besten wenige Tage, zum Beispiel im Verlauf von Wareneingangskontrollen) aufeinander folgende Messungen ausreichend genaue Aussagen zur langfristigen Entwicklung der Paneele getroffen werden können. Dazu müssen die Messergebnisse hinlänglich genau sein. Unter der Annahme, dass sich die Gasdiffusionsrate der Umhüllungsmaterialien im Laufe der Zeit nicht ändert, erfolgt der Gasdruckanstieg im wesentlichen linear und es lassen sich aus solchen Messungen Rückschlüsse auf die Lebenserwartung ziehen.

Setzt man den von va-Q-tec angegebenen typischen Gasdruckanstieg von etwa 1 mbar pro Jahr an, so ergibt sich danach nach 50 Jahren eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von $50 \times 0,04 \text{ mW}/(\text{mK}) = 2 \text{ mW}/(\text{mK})$, also immer noch eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von ca. 6 mW/(mK).

Dies deckt sich mit Ergebnissen von Untersuchungen am ZAE Bayern⁶⁹:

Funktionsdauer [t _{Grenz} / a]	Zulässiger jährlicher Druckanstieg [mbar/a] bei einer maximal tolerierten Wärmeleitfähigkeit des VIP von	
	6 mW/(mK)	8 mW/(mK)
10	6,0	13,0
25	2,4	5,2
50	1,2	2,6
100	0,6	1,3

Das ZAE leitet daraus im Umkehrschluss ab, dass der Druckanstieg von VIP mit pyrogener Kieselsäure pro Jahr 1 bis 2 mbar nicht überschreiten darf.

2.10.2.3 Abhängigkeit von der Feuchtigkeitszunahme

Untersuchungen am ZAE-Bayern haben ergeben, dass die Wärmeleitfähigkeit mikroporöser Kieselsäuren bei einem Anstieg der Feuchtigkeit um 1% um ca. 0,5 mW/(mK) zunimmt.⁷⁰ Untersuchungen bei va-Q-tec

lassen vermuten, dass die dort verwendeten Folien eine jährliche Feuchtigkeitszunahme von ca. 0,1 Gewichtsprozent des Kernmaterials verursachen. Unter Berücksichtigung diverser Nebeneffekte leitet man dort eine Feuchtigkeitszunahme nach 50 Jahren von deutlich unter 5 Gew.-% ab, die einer zusätzlichen Wärmeleitfähigkeit von ca. 2,5 mW/(mK) entspräche.

Für ihr Produkt leitet die Firma daraus eine prognostizierte Wärmeleitfähigkeit nach 50 Jahren von ca. 8 mW/(mK) für „normale Umgebungsbedingungen“ ab.⁷¹

Allerdings gehen alle vorliegenden Untersuchungen von (im wesentlichen) gleich bleibenden Folieneigenschaften aus.

Dies kann aus Sicht des Verfassers kaum als gesicherte Voraussetzung angenommen werden, da das Alterungsverhalten der relativ jungen Materialien unter den am Bau herrschenden Randbedingungen kaum abschätzbar ist, auch wenn erste Ergebnisse von Versuchen unter realen Bedingungen (über bisher ca. 1 Jahr) optimistisch stimmen.⁷²

2.10.2.4 Abhängigkeit vom Verhältnis Hüllfläche zu Volumen

Die Anforderungen für die Aufrechterhaltung des Vakuums an das Hüllmaterial hängen direkt mit dem Verhältnis Hüllfläche zu eingeschlossenem Volumen zusammen.

Auf plattenförmige Elemente bezogen lässt sich daraus schließen, dass die Funktionsdauer direkt mit der Größe und insbesondere mit der Dicke der Paneele zusammenhängt.

Die Firma va-Q-tec empfiehlt daher, für den Baubereich möglichst großformatige Platten in der Nähe des Maximalmaßes (1000 x 650 mm) mit einer Dicke von mind. 15 mm (besser 20 mm) einzusetzen.

Der Zusammenhang zwischen der Funktionsdauer und dem Verhältnis Hüllfläche zu eingeschlossenem Volumen ist näherungsweise linear.⁷³

2.11 Ökologie

Bislang wurde zu diesem Thema eine Studie vorgelegt, die im Auftrag des schweizer Bundesamtes für Energie entstand und auf einer Diplomarbeit aufbaut, die am Institut für Energie der Fachhochschule beider Basel (FHBB) in Muttenz/CH entstand.⁷⁴

Die Studie stützt sich auf drei bekannte Methoden⁷⁵ und kommt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Methoden liefern sehr unterschiedliche Ergebnisse und die Position von VIP zu den Vergleichsprodukten Glaswolle und Polystyrol EPS ist uneinheitlich.
- Die Kernfrage ist die Bewertung des Energieaufwands für die

Herstellung des Kernmaterials Kieselsäure.

Im Hinblick auf den Vorserien-Status von VIP wird das weitere Optimierungspotenzial hoch eingeschätzt. Der Hauptgrund dafür sei darin zu sehen, dass wesentliche Vorprodukte der pyrogenen Kieselsäure verfahrenstechnisch nicht für den Einsatzzweck in VIP optimiert seien.⁷⁶

Folgendes lässt sich derzeit weiterhin konstatieren:

- Der Materialaufwand insgesamt ist aufgrund der hohen Effizienz relativ gering.
- Bei den bislang im Baubereich eingesetzten Systemen bildet Kieselsäure den gewichtsmäßig maßgeblichen Anteil. Dieses Material fällt in den bisher benötigten Mengen als ein Nebenprodukt in der Silikat-Chemie an.
- Nach gezielter Belüftung der Systeme lassen sich diese ohne nennenswerten Aufwand in ihre Bestandteile zerlegen (sie sind dann verbundfrei) und ggf. rezyklieren.
- Kieselsäuren sind uneingeschränkt wiederverwertbar, ebenso das Hüllmaterial Edelstahl.
- Die bisher verwendeten Verbundfolien sind nicht direkt wiederverwertbar, können aber teilweise rezykliert werden.

2.12 Anwendungen von VIP in baufremden Bereichen

Neben Anwendungen von VIP im Bereich der Gebäudehülle, die in dieser Arbeit vertieft untersucht werden, finden sich wesentliche andere Einsatzgebiete.

Neben der möglichen Anwendung in anderen Hüllkonstruktionen, wie zum Beispiel von Fahrzeugen oder Zügen⁷⁷, ist hier an erster Stelle der Bereich der Kühlgeräte- und Transportboxenherstellung zu nennen. Die Beschäftigung mit diesem Thema kann zweifelsfrei als die über lange Zeit anhaltende Hauptmotivation für die Entwicklung diverser Arten von Vakuum-Dämmsystemen angesehen werden. Die VIA (Vacuum Insulation Association, USA) hatte für die Zeit ihres Bestehens auf diesem Gebiet ihren Betätigungsschwerpunkt.

Als Beispiele für frühe Entwicklungen für diese Anwendung sei auf die beiden frühen Vakuum-Paneele der Firmen Degussa und Owens Corning aus den 1990-er Jahren, die in den Abbildungen 3.42 und 3.43 dargestellt sind, verwiesen.

Bis heute von großer Bedeutung sind Anwendungen für Lagerbehälter in allen Größen bis zum Lastwagen- und Schiffscontainer, vor allem für solche mit angeschlossenen Kühlaggregaten. Hier führt der Platzgewinn im Vergleich zu konventionellen Technologien zu



Abb. 3.42
Frühes VIP der Firma Degussa (Hanau) aus den 1990er Jahren für den Kühlschrankbau.⁷⁸

Aufbau: Kieselsäure-Kern (ca. 200 kg/m³), Tiefgezogene Kunststoff-Hochbarrierefolie auf der Unterseite, Aluminium-Folie auf der Oberseite (ca. 12 µm Stärke), Wärmeleitfähigkeit in Paneelmitte ca. 6-7 mW/(mK)



Abb. 3.43
Frühes VIP der Firma Owens Corning (Produkt Aura®) für den Kühlschrankbau.⁷⁹

Aufbau: Glasfaser-Kern (ca. 240 kg/m³), Elektronenstrahl-geschweißte Stahlfolienhülle mit 75 µm Stärke, Wärmeleitfähigkeit in Paneelmitte ca. 2 mW/(mK)

mehr Raum für das Transport- oder Lagergut.

Daneben sind Boxen für den Transport von eiligen Medikamenten oder Blutkonserven ein Einsatzgebiet, auch im militärischen Bereich.

Zum Beispiel können mit vaku-umgedämmten Boxen mit einer Dämmstärke von ca. 50 mm (20 mm VIP + 30 mm Dämmschaum-Schutzschicht) und geeigneten Kühlakkus hochempfindliche Produkte ohne externe Kühlung vier Tage lang bei -18 °C gelagert und transportiert werden.⁸⁰

Auch im Ultratieftemperaturbereich finden VIP in kryogenischen Behältern Anwendung.

Aufgrund des sehr geringen Gewichts und der geringen Abmessungen sind VIP zudem für den Einsatz in Luftfracht-Behältern prädestiniert.

Außer diesen Anwendungen gibt es solche, die die dämmende Wirkung zur langanhaltenden Bevorratung von Wärme nutzen (wie dies in der Regel auch für Thermoskannen gilt):

Hier sind vor allem Heizkessel zu nennen, wie sie auch im Baubereich zum Einsatz kommen, oder Latentwärmespeicher und elektrische Hochtemperaturbatterien für Autos.

Auch Anwendungen im Bereich von Brennstoffzellen sind derzeit im Gespräch.

2.13 Patente zu Vakuum-Dämmsystemen

VIP wurden anfänglich für die Kühlschrankproduktion entwickelt, da sich der ergebende Platzgewinn hier als deutlicher Marktvorteil darstellt. Die Forschung und Entwicklung hierzu begann Mitte der 70er Jahre. Die ersten Patente wurden 1979 und 1983 erteilt.⁸¹

Das Thema ‚Vakuum-Dämmsysteme‘ beschäftigt nach wie vor Forscher in vielen Ländern der Erde.

Einen Anhaltspunkt liefert hierfür auch die Anzahl von Patentanmeldungen, die in den Abb. 3.44, 3.45, 3.46 und 3.47 nach verschiedenen Aspekten (Länder und Forschungsgebiete) für die letzten Jahrzehnte dargestellt ist.

Daraus ist unter anderem ersichtlich, dass es inzwischen eine deutliche Verschiebung von Systementwicklungen zu den Themenkomplexen Qualitätskontrolle und Gehäusegestaltung gibt.

Das Forschungsgebiet ‚Bauwesen‘ nimmt insgesamt (aber vor allem in Deutschland) signifikant zu.

Abb. 3.44 Weltweite Verteilung der Patente: Anzahl der Patente zu Vakuum-Dämmsystemen.⁸²

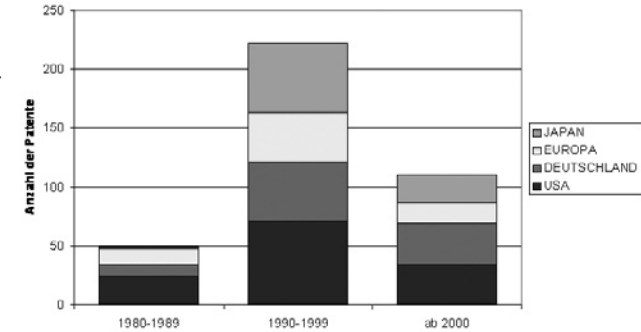


Abb. 3.45 Forschungsgebiete in Deutschland (zu Vakuum-Dämmsystemen): Veränderung der Forschungsschwerpunkte in den vergangenen Jahrzehnten anhand der Anzahl der Patente.

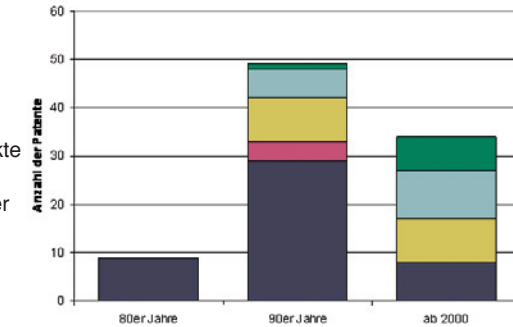


Abb. 3.46 Forschungsgebiete weltweit (zu Vakuum-Dämmsystemen): Veränderung der Forschungsschwerpunkte in den vergangenen Jahrzehnten anhand der Anzahl der Patente.

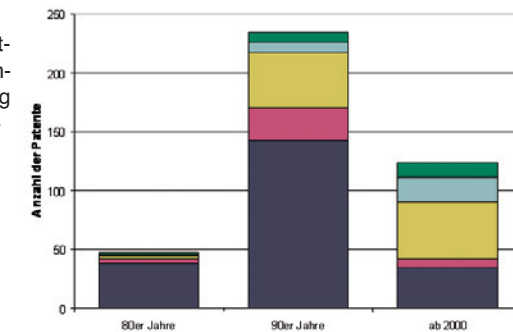
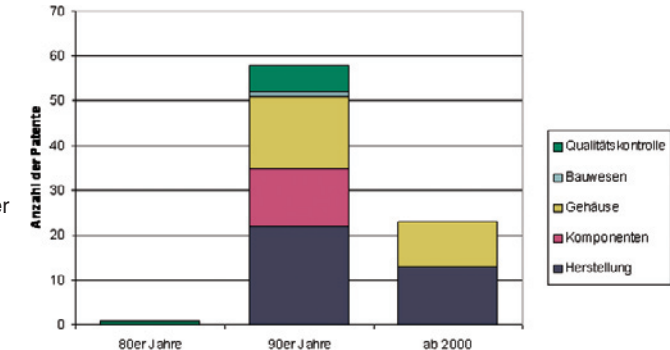


Abb. 3.47 Forschungsgebiete in Japan (zu Vakuum-Dämmsystemen): Veränderung der Forschungsschwerpunkte in den vergangenen Jahrzehnten anhand der Anzahl der Patente.



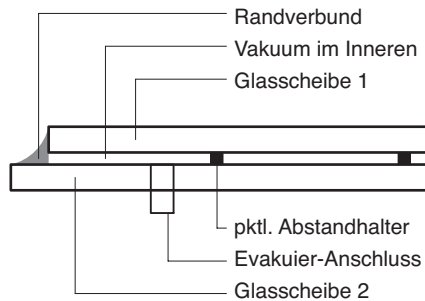


Abb. 3.48
Vakuum-Verglasung: Prinzipieller Aufbau

3 ,Vakuum-Verglasung‘

3.1 Begrifflichkeit

Unter dem wissenschaftlich nicht korrekten Begriff ‚Vakuum-Verglasung‘ (engl. ‚vacuum-glazing‘) wird in der Literatur eine dämmende Doppelverglasung verstanden, deren Scheibenzwischenraum nicht wie üblich mit Luft oder speziellen (Edel-)Gasen gefüllt ist, sondern der weitgehend evakuiert wurde.

(Korrekt wäre der etwas sperrigere Begriff ‚Vakuum-Dämm-Verglasung‘.)

Obwohl diese speziellen Verglasungen zweifellos zu den vakuumdämmenden Systemen zu zählen sind, verfügen sie doch über eine Reihe von Eigenarten und einen daraus resultierenden Komplexitätsgrad, dem die vorliegende Arbeit aufgrund ihrer notwendigen Schwerpunktbildung nicht gerecht werden kann.

Dennoch soll im Sinne der Vollständigkeit und der Vergleichsmöglichkeit ein kurzer Überblick über die wirksamen Prinzipien und den Stand der Technik gegeben werden.⁸³

3.2 Aufbau

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter Vakuum-Verglasung ein Dämmsystem verstanden, das im Aufbau dem in Abb. 3.48 dargestellten Prinzip entspricht.

Solche Systeme setzen sich aus folgenden Elementen zusammen:

- Glasscheiben
- evakuierter Glaszwischenraum
- minimierter Abstandhalter (punktförmig)
- gasdichter Randverbund
- Evakuieranschluss

Dieser Abschnitt beschreibt diese Elemente und die dafür verwendeten Materialien anhand des derzeit einzigen kommerziell verfügbaren Produkts (‚Spacia‘ von Nippon Sheet Glass Co. Ltd.⁸⁴, siehe Abb. 3.49). Das System wurde entwickelt, um die in Japan übliche Einfachverglasung ohne Rahmenaustausch ersetzen zu können. Dies ist für das Verständnis und zur Einschätzung der damit erzielbaren U-Wert-Verbesserung von Bedeutung.

Das Produkt hat folgenden Aufbau: 3mm Glas, 0,2 mm Abstand, 3mm Glas (gesamt 6,2 mm). Dadurch lässt sich für das oben genannte Szenario der U_g -Wert (Verglasungsmitte) von ca. 5,8 auf ca. 1,5 W/(m²K) reduzieren.

3.3 Innendruckbereich

Das zur Herstellung dieser Verglasung normalerweise eingesetzte Vakuum ist extrem hoch und bewegt sich in einem Bereich um 0,001 mbar (zum Vergleich: normale VIP liegen hier bei ca. 0,1-20 mbar). Hierbei ergeben sich erhebliche, deutlich über das

übliche Maß hinausgehende Gasdichtigkeits-Anforderungen an den Scheibenrandverbund.

Außerdem muss durch geeignete Maßnahmen verhindert werden, dass sich die beiden Scheiben der wärmedämmenden Mehrfachverglasung durch das Vakuum verformen und sich wohlmöglich sogar berühren.

3.4 Gläser

Als Standard wird aus Kostengründen normales Floatglas verwendet. Durch die Verwendung von ESG lassen sich die Abstandhalterabstände deutlich vergrößern, allerdings hat der Einsatz von gehärtetem Glas Konsequenzen für die Ausbildung des Randverbundes.

Außerdem kann die Leistung des Gesamtsystems durch aufgebraute Low-E-Beschichtungen gesteigert werden, wobei bis vor einiger Zeit wegen der sehr hohen Temperaturen während der Herstellung des Randverbundes nur pyrolytische Varianten (‚hard coating‘) eingesetzt werden konnten. Hiermit konnte der U_g -Wert des oben beschriebenen Produktes von 1,5 auf 0,8 bis 1,1 W/(m²K) verbessert werden.

3.5 Abstandhalter

Der zwischen den Glasscheiben befindliche Abstand, der typischerweise zwischen 0,15 - 0,25 mm beträgt, kann durch die Scheiben allein in Anbetracht des außen an-

liegenden Atmosphärendrucks nicht aufrecht erhalten werden. Daher werden kleinste Metallkugeln, sogenannte ‚Pillars‘, als Abstandshalter in einem Quadratraster (20 bis 40 mm) eingebaut.

3.6 Randverbund

Der Randverbund ist neben den erforderlichen Abstandshaltern das eigentliche Kernproblem der Vakuum-Verglasungen, da er langfristig die Gasdichtigkeit des Systems gewährleisten muss. Gleichzeitig kommt es aufgrund der guten Dämmeigenschaft des evakuierten Scheibenzwischenraumes zu erheblichen Temperaturschwankungen und -unterschieden zwischen äußerer und innerer Scheibe und damit verbundenen Längenänderungen, die im Bereich des Randverbundes aufgenommen werden müssen.

In der Regel werden die Scheiben daher bislang verlötet, wobei während dieses Prozesses Temperaturen bis 500 °C auftreten. Ein solcher Randverbund stellt zudem eine erhebliche Wärmebrücke dar.

Die bisher verfügbaren Produkte werden nach Kenntnis des Verfassers ohne Trockenmittel eingesetzt. Mit einer verträglichen Integration könnte die Funktionsdauer eventuell verlängert werden.

3.7 Evakuier-Anschluss

Da die Herstellung des Randverbundes bisher nicht in einer Vaku-

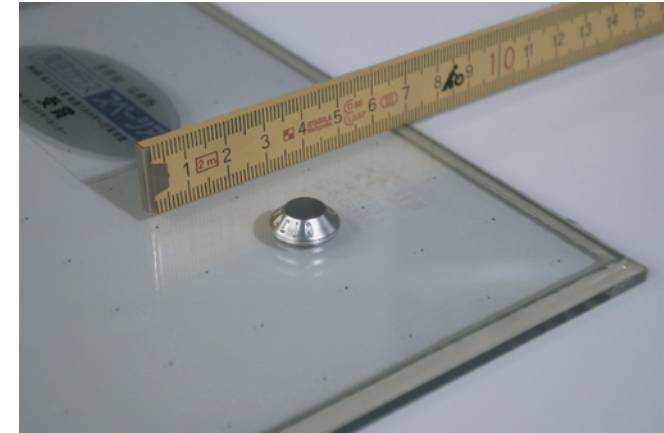


Abb. 3.49
Vakuum-Verglasung: Muster des Produktes ‚Spacia‘ der Fa. Nippon Sheet Glass, Japan (rechts: Detail mit Evakuieranschluss)
Die notwendigen Abstandhalter sind als Muster regelmäßiger schwarzer Punkte im rechten Bild zu sehen.

um-Kammer ausgeführt werden kann, sind separate Evakuieranschlüsse erforderlich, die die Bohrung einer Scheibe notwendig machen, siehe Abb. 3.49 rechts.

In der Theorie bietet dies analog zu den Edelstahlpaneelen aus Abschnitt 2.3.4.2 dieses Teils die Möglichkeit der Nachevakuierung vor Ort.

In der Praxis wäre allerdings ein dafür notwendiger, mehrmals verwendbarer Anschlussflansch sehr aufwändig. Dieser Gedanke findet daher bislang keine Anwendung.

3.8 Funktionsdauer

Aufgrund der sichergestellten Gasdichtigkeit in der Fläche konzentrieren sich die potenziellen Undichtigkeiten als Hauptfaktor bezüglich der zu erwartenden Funktionsdauer auf den Randverbund und den Evakuieranschluss.

Da diese beiden konstruktiven Punkte in ihren Anforderungen als hochkomplex einzustufen sind und die Thematik insgesamt noch relativ neu ist, liegen bisher noch keine Daten vor, die zu einer verlässlichen Abschätzung herangezogen werden könnten.

Kommt es zu Undichtigkeiten, ist damit zu rechnen, dass die Abstandshalter, die dann nicht mehr durch den Scheibendruck gehalten werden, ‚herunterfallen‘ und sich die beiden Scheiben (mindestens) teilweise berühren, was neben der Eintrübung der Scheibe durch Kondensat eine drastische Verschlechterung der Dämmeigenschaften zur Folge hätte.

3.9 Weitere Anwendungen

Neben dem oben beschriebenen Produkt ‚Spacia‘ bietet die gleiche Firma unter dem Namen ‚Spacia21‘ eine Kombination von ‚Spacia‘

mit einer Einzelscheibe zu einer Isolierglas-Einheit an. Damit wird dann ein U_g -Wert von $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht.

Beide bisher kommerziell verfügbaren Produktvarianten können aufgrund des außergewöhnlich hohen Produktionsaufwandes und der bisher vorhandenen Unsicherheit bezüglich der erreichbaren Funktionsdauer sicher nicht als Alternative zu konventionellen wärmedämmenden Verglasungen gelten, es sei denn es liegen zwingende Gründe für eine minimale konstruktive Verglasungsdicke oder eine entsprechende Gewichtsbeschränkung vor.

Für die Zukunft wird jedoch allgemein weiteres Entwicklungspotenzial gesehen. Beispielsweise wurde im Jahre 2004 ein größeres Verbundprojekt initiiert, - mit dem Entwicklungsziel eines U_g -Wertes von $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.⁸⁵

4 Thermische Messverfahren für Vakuum-Dämmsysteme

Da die thermische Performance (Wärmedämmvermögen) die Schlüsselfunktion der Vakuum-Dämmsysteme darstellt, besteht die Notwendigkeit, diese Kenngröße in den diversen Phasen zwischen Entwicklung und Anwendung durch geeignete Messverfahren und -instrumente möglichst konsistent, schnell und präzise erfassen zu können.

Die verschiedenen Verfahren bewegen sich grundsätzlich zwischen den zwei Hauptanforderungen nach hoher Testgeschwindigkeit und hoher Messgenauigkeit, die sich nicht gleichzeitig erfüllen lassen.

Die Schwerpunkte werden von den Beteiligten (Materialentwicklern, Ingenieuren, Wissenschaftlern, Produktionsüberwachern, Qualitätsverantwortlichen) unterschiedlich gesetzt. Im Zusammenhang mit Anwendungen im Baubereich ist außerdem von großer Bedeutung, ob ein Verfahren auch in situ verwendet und damit zu Kontrollen vor, während und nach dem Einbau herangezogen werden kann.

4.1 Physikalische Grundlagen

Die Fourier'sche Gleichung stellt die wesentliche Grundlage für thermische Messverfahren dar:

	Szenario A	Szenario B	Szenario C	Szenario D
Ziel-Anwendungsfall	Entwicklungen, wissenschaftliche Untersuchungen, neue Verfahren usw.	Qualitätsprogramme	Produktionsüberwachung beim Hersteller	Vor-Ort-Kontrollen, anwendungsbegleitende Untersuchungen
Testdauer	< 1 h	< 20 min	< 3 min	< 3 min
Anforderung an Messgenauigkeit	maximal	relativ genau	mind. ‚go‘ - ‚no go‘	mind. ‚go‘ - ‚no go‘, besser: relative quantitative Aussagen
sonstige Anforderungen	Lieferung vergleichbarer, absoluter quantitativer Aussagen, Wiederholbarkeit (statistische Messreihen)	mind. Lieferung vergleichbarer, relativer quantitativer Aussagen		geringer Messaufwand, Einrichtung gut transportabel, bei verschiedenen Außenbedingungen anwendbar, geringe Anforderungen an die Zugänglichkeit der VIP
geeignete Verfahren	Guarded Hot Plate, Guarded-calibrated Hot Box, Heat Flow Meter	Heat Flow Meter	Heat Flow Meter, va-Q-check®	Heat Flow Meter, va-Q-check®

Abb. 3.50 Thermische Messverfahren von Vakuum-Dämmsystemen, Szenarien (Vorschlag des Verf.)

$$\frac{Q}{A} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

mit

Q/A	Wärmefluss durch die Probe [W/m ²]
λ	probenspezifische Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
ΔT	Temperaturdifferenz innerhalb der Probe [K]
Δx	effektive Probenstärke [m]

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach ISO 8301 erfordert die Messung des Wärmeflusses unter gleichmäßigen festen Randbedingungen.

Aus der Gleichung ergibt sich, dass insbesondere zwei Bedingungen

für einen schnellen und genauen Test erfüllt sein müssen:

1. Schnelles Erreichen von Stabilität der anliegenden Temperaturen.
2. Möglichst schnelle Erfassung oder Abschätzung des letztlich stabilisierten Wärmeflusses.

4.2 Szenarien

Aus den verschiedenen, teils schwer vereinbaren Anforderungen lassen sich mindestens vier unterschiedliche Szenarien ableiten, die sich in Abb. 3.50 finden und im weiteren Anwendung finden sollen.

4.3 Einzelne thermische Messverfahren

Im Folgenden sollen gängige Messverfahren kurz beschrieben und verglichen werden. Eine Zusammenstellung findet sich in Abb. 3.51.

Verfahren, die in-situ-Messungen erlauben, sind in Abschnitt 2.6 beschrieben, da sie (bisher alle) Einbauteile in die Vakuum-Dämmsysteme benötigen.

4.3.1 Guarded Hot Plate

Es handelt sich um ein ‚absolutes‘ Messverfahren für die Wärmeleitfähigkeit von Materialproben, welches kein Kalibrieren mit Referenzmus-

tern erfordert. Das Verfahren ist in DIN 52612 geregelt und erlaubt die getrennte Erfassung der einzelnen Wärmetransportmechanismen.

Abb. 3.52 zeigt eine modifizierte Apparatur dieser Kategorie des ZAE-Bayern, die evakuierbar und daher für die Messung von Kernmaterialien, die für den Einsatz in Vakuum-Dämmsystemen vorgesehen sind, besonders geeignet ist.

4.3.2 Guarded-calibrated Hot Box

Es handelt sich ebenfalls um ein ‚absolutes‘ Messverfahren, hier nach EN ISO 8990. Die Probe, beispielsweise ein Fassadenelement, befindet sich zwischen zwei Kammern mit konstanten, unterschiedlichen Temperaturen. Gemessen wird der sich einstellende Wärmestrom.

Im Zusammenhang mit der Messung von Vakuum-Dämmsystemen ist zum Hot-Box-Verfahren anzumerken, dass es äußerst schwierig ist, absolute Messergebnisse zu erzielen, da in der Regel kaum Kontraste vorhanden sind und dadurch die Randeffekte im Bereich des Übergangs Probe-Messeinrichtung sehr stark ins Gewicht fallen.

Meist werden solche Messungen daher durch Simulationen begleitet und führen in der Folge zu einer sog. korrigierten Messung.

	Guarded Hot Plate	Guarded-calibrated Hot Box	Heat Flow Meter (dual heat flux transducers)			va-Q-check®
Messgröße	Wärmefluss	Wärmefluss	Wärmefluss			Wärmefluss in Abhängigkeit vom Innendruck
thermische Messung	direkt	direkt	direkt			indirekt
Messergebnisse	absolut	absolut	Referenzmessungen erforderlich			Referenzmessungen erforderlich
Testdauer	var.	var.	60 min	15 min	3 min	< 3 min
Messgenauigkeit	sehr hoch	sehr hoch	maximal	5-10 % Fehler	‚Go - No go‘	mind. ‚go‘ - ‚no go‘, besser: relative quantitative Aussagen
geeignet für Szenario	A	A	A	B	C	C,D
Vorhaltung im Paneel erforderlich	nein	nein	nein			ja (spez. ‚Mess-Chip‘)
Anwendbarkeit systemspezifisch	nein	nein	nein			ja (nur VIP mit Folienhülle)
geschütztes Verfahren	nein	nein	nein			ja (Firma va-Q-tec AG)
Investitionsaufwand	hoch	hoch	mittel			gering

Abb. 3.51 Einzelne thermische Messverfahren im Vergleich⁸⁶

4.3.3 Heat Flow Meter

Es handelt sich um ein relatives Messverfahren (Standard ASTM C518), welches vorausgehende Referenzmessungen mit gleichen Mustern bedingt. Untersuchungen mit einem Holometrix Lambda 2300 haben gezeigt, dass dieses Verfahren zu befriedigenden Ergebnissen mindestens für die Szenarien A,B und C führt.⁸⁷

Dabei ist der Investitionsaufwand deutlich geringer als für vergleichbar präzise Verfahren.

Gleichzeitig sind Messergebnisse ca. 5-10 mal schneller verfügbar als zum Beispiel mittels der Guarded-Hot-Plate-Methode.

4.3.4 Proprietäre und sonstige Verfahren

Neben den genannten Verfahren und Methoden gibt es spezielle Lösungen insbesondere für Situationen gemäß Szenario D (Abb. 3.50), die für einzelne Vakuum-Dämmsysteme optimiert wurden.

Hier ist insbesondere auf das va-Q-check-Verfahren hinzuweisen, das in Abb. 3.51 aufgenommen und - da es spezielle Einbauteile im Paneel erfordert - in Abschnitt 2.6.1 dieses Teiles näher beschrieben wurde.⁸⁸

Der Vollständigkeit halber sei auf Verfahren hingewiesen, die den bisher behandelten Kategorien nicht zuzurechnen sind. Hierzu

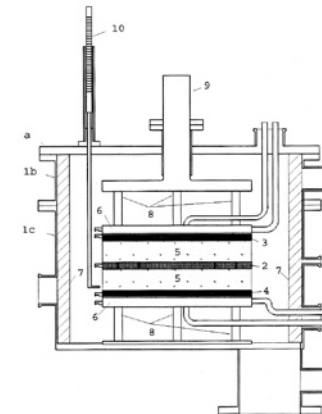


Abb. 3.52 Schematische Darstellung der Zwei-Platten-Apparatur LOLA 4 des ZAE-Bayern.⁸⁹

Legende

1 Vakuum-Kammer, 2 Hotplate mit zwei Guard-Rings, 3 und 4 Cold Plates, 5 Messprobe, 6 Heat Sinks, 7 Dämmung, 8 Unterstützung, 9 Vakuumdichter Stempel, 10 Messeinrichtung zur Materialstärke

zählt auch eine von der amerikanischen Firma NanoPore beschriebene Methode, die auf wiederholtem Auswiegen evakuierter Paneele basiert.⁹⁰

Der gemessene Unterschied lässt auf die eingedrungene Gasmenge schließen.

Eine Messgenauigkeit von 0,1 mg ermöglicht rechnerisch eine Aussage-Genauigkeit von ca. 10-15 mbar Druckzunahme pro Jahr bei einem Messabstand von einem Tag (nur für ‚schwere‘ VIP mit Kiesel-säurekern, nicht aber für solche mit Schaumstoff-Dämmkernen).

Es ist offensichtlich, dass das Verfahren in der Praxis kaum zu verwenden sein wird, da die erforderlichen Randbedingungen, nämlich vor allem keine anderweitig verursachten Gewichtsveränderungen, kaum zu erfüllen sind und die erreichbare Messgenauigkeit üblichen Ansprüchen nicht genügen kann.

Anmerkungen

1. siehe Heinemann, U. u.a.: Characterization and Optimization of Filler Materials for Vacuum Insulations (1998), S. 43

2. Darstellung unter anderem veröffentlicht in Cremers, Jan: Vakuum-Dämmsysteme - Einsatzmöglichkeiten und planerische Hinweise (2005), S. 522- 525, sowie englisch u.a. in Cremers, Jan: Building in a Vacuum / Vacuum packed: insulation systems assessed (2005), S. 38-41

3. Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmedämmung HLWD, Schlussbericht Dezember 2000, S. 7

4. Keur, Arij: The Intelligent Machinery Choice (2000), Folie 6

5. In der Vergangenheit wurden diverse andere Kernmaterialien untersucht, vor allem auch für baufremde Anwendungen wie z.B. die Kühlschrank-Industrie, die sich aber allesamt nicht durchsetzen konnten und nach aktuellem Kenntnisstand des Verfassers auch kein Entwicklungspotenzial bieten. Dabei handelt es sich u.a. um diverse Recycling-Produkte (z.B. wiederverwertetes PUR) oder auch Perlite.

6. Bild aus Akita, J. u.a.: Optimization of vacuum sealing process for VIP (1998), S. 63

7. vergleiche hierzu: Wong, Chang-Ming; Liaug, Wen-Chung; Hung, Ming-Lang; Chang, Chih-Chen: Porous Polystyrene Foam Produced by Carbon Dioxide and Nitrogen (2002), S. 21

8. Diese Angaben stammen von einem Mitarbeiter der Firma Dow Deutschland GmbH, Herrn Wolfgang Hunger (März 2004).

9. Die Firma Huntsman Polyurethans/ICI, die bei der technologischen Entwicklung von VIP eine wichtige Rolle spielte, hat die Herstellung inzwischen komplett eingestellt (Stand 2005).

10. Diese besondere Gruppe poröser Feststoffe aus SiO₂-Granulat wurde erstmals 1931 von Prof. Steven Kistler von der Stanford-University beschrieben, der sie ‚Aerogele‘ nannte. Da sich im Verlauf der Trocknung der Ausgangsgele an der Luft an den Kapillaren starke kontraktive Oberflächenkräfte bilden, konnten Aerogele vorher nur im Autoklaven bei hohem Druck und hohen Temperaturen (durch überkritische Trocknung) hergestellt werden. Ein kurzer geschichtlicher Abriss zu dieser Gruppe der fügen nanoporösen Materialien findet sich neben einer Beschreibung der maßgeblichen thermodynamischen Grundlagen in Fricke, Jochen: From Dewars to VIPs - One Century of Progress in Vacuum Insulation Technology, Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 5-14. 1992 entwickelte Douglas M. Smith von der Universität New Mexico einen neuen Herstellungsprozess, bei dem durch chemische Modifizierung auf den Autoklaven verzichtet werden kann, was eine großindustrielle und kostengünstige Produktion möglich macht. Vergleiche hierzu Schmidt, Mark: Aerogel - Renaissance einer alten Erfindung, Veröffentlichung der Höchst AG, Frankfurt a.M., 2004
Dieser Herstellungsprozess hat großindustriellen Charakter: Die Anlage der Firma Cabot hat nach eigenen Anga-

ben <08.2004> Abmessungen von ca. 30x50x20 m (b x l x h).

11. Laut Angaben von Jens Fründt (Firma Cabot) vom 18.08.2004 lagert Aerogel-Granulat pro m³ (ca. 90 kg) nur maximal 2 Gew.-% Wasser (also ca. 1,8 kg) gleichmäßig an der Oberfläche (ca. 63.000.000 m²) an. Daher führt dies zu keinerlei Kondensationserscheinungen.

12. Neben der Korngröße spielt für einen reibungslosen Befüllvorgang die Neigung der Schüttfläche, eine De-ionisierereinrichtung und eine wirkungsvolle Verdichtungsanlage (z.B. durch Rütteln) eine Rolle.

13. Bildquelle Abb. 3.9 und 3.11: Firma Cabot Corp. / Rheinfelden

14. Dieser Ansatz war Forschungsgegenstand des ersten HILIT-Projektes (1998-2001, Contract JOR3-CT97-0187), vergl. hierzu Jensen, K.I.; Schultz, J.M. (2001) und Jensen, K.I.; Schultz, J.M.; Kristiansen, F.H. (2004), S. 351-357.

Hersteller des dort eingesetzten monolithischen Aerogels ist die schwedische Firma Airglass, siehe <http://www.airglass.se> <01.2005>

15. Hier ist beispielsweise das bis September 2005 laufende EU-Forschungsvorhaben HILIT+ (Contract ENK6-CT-2002-00648) zu nennen.

16. Für nicht evakuierte Anwendungen von Aerogelen (der Firma Cabot) gibt es bereits eine Reihe von Beispielen: Gefüllte Polycarbonat-Stegplatten (Fa. GE Advanced Materials, Bergen NL), gefüllte GFK-(Polyester-)Sandwichprofile (Firma Scobalit AG, Wintertur CH), gefüllte Isolierglasscheiben mit

minimalem Unterdruck (Firma Okalux, Marktheidenfeld D).

17. vergl. Fricke, Jochen: From Dewars to VIPs - One Century of Progress in Vacuum Insulation Technology (2005), S. 6

18. siehe Randel, Peter: Nanoporöse Dämmstoffe auf Basis Fumed Silica (2003), S. C3

19. Der Kern für ein VIP-Paneel von 1 m² und 20 mm Dicke hat demnach eine enorme innere Oberfläche von 720.000 - 2.900.000 m², also ca. 1 bis 3 km², vergleiche auch [11]

20. Auskunft der Firma Porextherm, Kempten vom März 2005. Vergl. dazu auch Angaben in: Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-Components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), Abschlussberichte IEA-Verbundprojekt: HIPTI - High Performance Thermal Insulation, IEA/ECBCS Annex 39 (2005), S. I

21. vergl. Schwab, H. u.a.: Dependence of Thermal Conductivity on Water Content in Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernels (2005), S. 319

22. aus Zimmermann, Mark; Bertschinger, Hans (Ed.): High Performance Thermal Insulation - Vacuum Insulated Products (2001), S. 29

23. Küçükpınar, E. u.a.: Characterization of Open Cell Filler Materials for Vacuum Insulation (1998), S. 33

24. vergl. Smith, Douglas: Vacuum Panels Based on NanoPorous Fillers (1999), Folie 5

25. siehe hierzu Untersuchungen des ZAE Bayern: Caps, R.; Heinemann, U.; Ehrmantraut M.; Fricke J.: Evacuated Insulation Panels Filled with Pyrogenic Silica Powders: Properties and Applications (2001), S. 151-156

26. Die meisten Daten und Angaben in dieser Tabelle beruhen auf Herstellerangaben, v.a. der Firma Porextherm GmbH / Kempten <2005>. Daten für das Produkt Nanogel® HP aus Smith, Douglas: Vacuum Panels Based on NanoPorous Fillers (1999), Folie 18
Sonstige Quelle: Heinemann, U. u.a.: Characterization and Optimization of Filler Materials for Vacuum Insulations (1998), S. 45

Außerdem ist hier der Hinweis geboten, dass sich die für das Druckniveau von 1 bar angegebene Wärmeleitfähigkeit auf trockenes Material bezieht. In der Praxis nehmen defekte Vakuumpaneele aber in relativ kurzer Zeit über die Undichtigkeiten in der Hülle Feuchtigkeit bis zum jeweiligen Sättigungspunkt auf, was die Wärmeleitfähigkeit erhöht.

27. vergl. Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender (2004), S. 91

28. Quellen:
- Lamb, W.; Zeiler, R.: Designing Non-Foil Containing Skins for Vacuum Insulated Panels (VIP) Applications (1998), S. 55-58
- Angaben von Goodfellow (Bad Nauheim), www.goodfellow.com <02.2004>

29. Vergleiche hierzu ausführliche Untersuchungen von extrem dünnen Al-Folien (ca. 7 µm) in Tada, H.: Gas permeation through the pinholes of plastic film laminated with aluminium foil (1998), S. 51-54

30. Dies ist die Kernaussage des ausführlichen Beitrages von Nelson, Bryan; Olson, Eric: Permeation Issues in Vacuum Panel Manufacturing and Design (2000), Folien 23-43.
Hier finden sich auch interessante Mikroskop-Aufnahmen von feinen Rissen und Fehlstellen, wie sie bei der Verarbeitung von Hochbarrierefolien aufgetreten sind.

31. siehe Nelson, Bryan; Olson, Eric: Permeation Issues in Vacuum Panel Manufacturing and Design (2000), Folie 12

32. Messverfahren für die Sauerstoffdurchlässigkeit sind in Normen geregelt:
Volumetrische Verfahren nach DIN 53380-1 oder ASTM D 1434, manometrische Verfahren nach ASTM D 1434 bei einer derzeitigen Messgrenze von ca. 0,01 cm³/(m² d bar). Die Wasserdampfdurchlässigkeit ist für gravimetrische und Elektrolyse-Verfahren in DIN 53122-2 geregelt. Die Messgrenze liegt hier derzeit bei ca. 0,005 g/(m² d bar).

33. vergleiche hierzu: Carmi, Yoash: Ultra High Barrier Films for Long Term VIP Applications: The Next Generation, (2002), Folien 4 und 5

34. Diese Angaben entstammen einem Gespräch zwischen dem Verfasser und Roland Caps, Firma va-Q-tec AG während der Veranstaltung ‚VIP-Bau‘ (Rostock-Warnemünde), Juli 2003. Sie decken sich mit Angaben aus Jacobsen, Sven: Hochbarrierefolien für Vakuum-Isolationspaneele - eine Übersicht (2003), S. D2

35. Folienaufbau nach Angaben der Firma Porextherm GmbH / Kempten (Stand Januar 2005).

36. vergl. Reisacher, Hannes: VIP - Stand der Technik (2003), S. B3

37. Vergl. Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-Components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), Abschlussberichte IEA-Verbundprojekt: HiPTI - High Performance Thermal Insulation, IEA/ECBCS Annex 39 (2005), S. 137

38. vergl. Reisacher, Hannes: VIP - Stand der Technik (2003), S. B3

39. Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmedämmung HLWD, Schlussbericht Dezember 2000, S. 11

40. vergl. Reisacher, Hannes: VIP - Stand der Technik (2003), S. B3

41. eine Übersicht über gebräuchliche Folientypen und deren Vor- und Nachteilen findet sich u.a. in Jacobsen, Sven: Hochbarrierefolien für Vakuum-Isolationspaneele - eine Übersicht (2003), S. D1-D7

42. In Ghazi Wakili, K.; Bundi, R.: Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels (VIP) used in building constructions (2004), S. 293-299 werden folgende ‚sichere‘ Ψ_k -Werte (vergl. Teil 2 Abs. 1.3.3.1) für VIP-Dicken ab 2 cm genannt:
0,07 W/(mK) für Metallverbundfolien
0,01 W/(mK) für metallisierte Folien

43. siehe Heinemann, Ulrich: Evakuierete Isolationen im Überblick (2003), Anhang Folien 15 und 18

44. vergl. Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender (2004), S. 83-124

45. vergl. Reisacher, Hannes: VIP - Stand der Technik (2003), S. B5

46. Es sei hier darauf hingewiesen, dass die ‚optische Qualität‘ der Faltungstechnik, also eine möglichst präzise rechteckige Form an sich i.d.R. kein maßgebliches Kriterium darstellt, da es von der geplanten Anwendung abhängt, ob daraus ein Vorteil zu ziehen ist. VIP sind zumeist in eingebautem Zustand nicht mehr sichtbar. Soll das VIP beispielsweise eingeschäumt werden, ist eine (i.d.R. mit erhöhtem Kostenaufwand verbundene) rechteckige Faltungstechnik nicht zwingend von Vorteil.

47. vergl. Patentschrift DE10058566C2

48. Bild entnommen aus Wynne, Nick: Vacuum Panel Quality Control Measures for Manufacturing - Practical Quality Assurance for Vacuum Insulation (1999), S. 8

49. Es gibt diverse Ansätze, die Wärmeübertragung über die Abstandhalter durch eine Verlängerung der Wärmeübertragungswege zu minimieren. In der Patentschrift DE 198 34 379 C2 (Patenterteilung 2001) findet sich beispielsweise eine im Systemschnitt meanderförmige Ausführung der Abstandhalter. Ebenso ist dort eine Variante beschrieben, bei der V-förmige Abstandhalter mit verschiedenen Schenkelwinkeln derart ineinandergreifen, dass auch hier der Wärmeübertragungsweg maximiert ist.

50. Das Bild wurde freundlicherweise von der Firma lambdasave GmbH (Emden) zur Verfügung gestellt.

51. Bild aus Pringle, Tom; Grogan, Kevin: The Commercialization of VIP

Based Shipping Containers (2002), Folie 17. - vergleiche auch Pringle, T.: Development of a Reusable VIP Shipping Container with Built-In Vacuum Indicator Device (2001), Folie 4, 16f

52. Bild der Firma va-Q-tec AG, Würzburg <03.2004>

53. Patentschrift DE10215213C1 (Veröffentlichungstag der Patenterteilung 11.09.2003)

54. Zeichnung des Autors nach Angaben und Skizzen in der dem va-Q-check-Verfahren zugrundeliegenden Patentschrift der va-Q-tec AG, Würzburg, mit der Nummer DE10215213C1 (Veröffentlichungstag der Patenterteilung 11.09.2003)

55. aus Patentschrift der va-Q-tec AG, Würzburg, mit der Nummer DE10215213C1 (Veröffentlichungstag der Patenterteilung 11.09.2003), S. 2, Spalte 2

56. Einen solchen festeingebauten Messkopf (Abb. 3.53) präsentierte die Firma va-Q-tec AG 2005 in der Schweiz, siehe Caps, R.: Monitoring Gas Pressure in Vacuum Insulation Panels (2005), S. 63. Zukünftig wird es zudem vermutlich möglich sein, die gemessenen Informationen auch kabellos über sog. RFID-Tags (Transponder-Module) zu übertragen.

57. Angaben aus Manini, P.: Vacuum Issues in Vacuum Insulated Panel Technology and the role of the Getter (1998), S. 40-41

58. siehe Phillip, Brad L.; Shepodd, Timothy J.: Versatile New Polymer Based Getters (2000), Folien 1-17

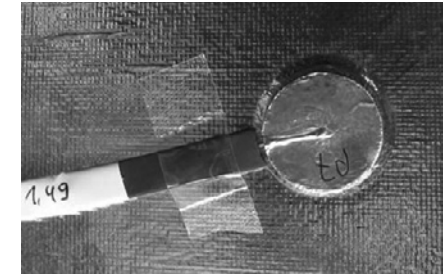


Abb. 3.53
Fest an einem Vakuum-Panel montierter Messkopf für das va-Q-check-Verfahren der va-Q-tec AG. Bildquelle: va-Q-tec AG, 2005

59. Bildquelle: Firma SAES Getters Group, Lainate/ Italien

60. Patentiertes Verfahren der Firma Porextherm GmbH, Kempten.

61. vergl. Simmler, H.; Brunner, S.: Kann die Lebensdauer von Vakuumisolationssystemen vorausgesagt werden? Status-Seminar der EMPA 2004, Dübendorf: Eidgenössische Materialprüfungsanstalt EMPA, 2004, S. 7-8

62. Diagramm vom ZAE-Bayern. Die Daten wurden mit der thermischen Simulationssoftware HEAT3 erzeugt. Quelle: www.vip-bau.de <07.2004>

63. gem. Prüfbericht 23002307 (12-2001) Materialprüfungsamt NRW, vergl. auch Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender (2004), S. 92/122

64. vergl. Sedlbauer, K. u.a.: Vakuumsolationspaneele aus hygrothermischer und akustischer Sicht (2005), S. E1-E13

65. vergleiche hierzu: Schwab, Hubert: VIP unter baupraktischen Bedingungen. Erfahrungen aus dem Projekt: Vaku-

umdämmungen für Gebäude (2003), Anhang Folie 25

66. siehe hierzu: Caps, Roland: Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Vakuumdämmplatten (2003), S. R1-R11

67. Das Verfahren ist ausführlich beschrieben in Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender (2004), S. 98.

68. Angaben und Zitat entnommen aus: Caps, Roland: Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Vakuumdämmplatten, Firma va-Q-tec AG, Würzburg; Rostock (VIP-Bau), 2003, Vers.2, S. 2

69. aus Schwab, Hubert: VIP unter baupraktischen Bedingungen, Erfahrungen aus dem Projekt: Vakuumdämmungen für Gebäude (2003), Anhang Folie 26

70. siehe Caps, Roland: Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Vakuumdämmplatten, Firma va-Q-tec AG, Würzburg; Rostock (VIP-Bau), 2003, Vers. 2, S. 6

71. Angaben aus Caps, Roland: Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Vakuumdämmplatten (2003), S. R8

72. Versuche durchgeführt am ZAE-Bayern. Dort wurde auch ein Modell zur Vorhersage der Funktionsdauer unter baupraktischen Bedingungen erstellt, das allerdings noch nicht ausreichend validiert zu sein scheint, siehe hierzu Schwab, Hubert: VIP unter baupraktischen Bedingungen, Erfahrungen aus dem Projekt: Vakuumdämmungen für Gebäude (2003), Anhang Folie 25-44, insbesondere Folie 31ff. Auch in jüngeren Veröffentlichungen bleibt das ZAE-Bayern skeptisch und bezeichnet das Thema der Langzeitstabilität der Fo-

lien unter baupraktischen Bedingungen weiter als „offene Frage“. Siehe hierzu: Schwab, H. u.a.: Prediction of Service Life for Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernel and Foil Cover (2005), S. 357

73. lt. Aussage von Roland Caps (va-Q-tec AG) anlässlich eines Besuchs des Autors in Würzburg vom 07.07.2004.

74. Schonhardt, U.; Binz, A, u.a.: Ökobilanz (2003)

75. Dies sind: ‚Kumulierter Energieaufwand‘ (KEA), ‚Methode der ökologischen Knappheit‘ (UBP 97) und ‚Eco-Indicator 99‘

76. Schonhardt, U.; Binz, A, u.a.: Ökobilanz (2003), S. 50-51

77. Dieses Anwendungsgebiet wird mit Sicherheit mit zunehmend effektiveren Antriebssystemen an Bedeutung gewinnen.

78. Abbildung des ZAE-Bayern, entnommen aus Fricke, Jochen: From Dewars to VIPs - One Century of Progress in Vacuum Insulation Technology (2005), Präsentation, Folie 23

79. ebd., Folie 24

80. siehe hierzu Caps, R.; Ehrmanntraut, M.: Vakuumisolationspaneelle - Anwendungen für Kälte- und Wärmespeicher, Vortrag AA.II.1.7, Ulm: Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2001, S. 3

81. siehe Stovall, Therese K.: An Introduction to VIP Technology (1999), S. 4

82. Die Abbildungen 3.44 bis 3.47 wurden freundlicherweise vom ZAE-Bayern zur Verfügung gestellt.

Quelle: www.vip-bau.de <07.2004>

83. vergl. Asano, Osamu: Vacuum Glazing for Transparent Thermal Insulating Material (2003) und Ng, Nelson: Single-Step Manufacture of Vacuum Glazing (2003)

84. NSG Co., Ltd., Osaka, Japan; <http://www.nsg.co.jp/en> <10.2004>

85. Hier wird auf das im August 2004 gestartete Verbundprojekt ‚VIG- Vacuum Insulation Glass‘ verwiesen (Informationen unter <http://www.vig-info.de/> <10.2005>). Partner sind Firmen aus dem Bereich der Glasveredler, aus dem Maschinen- und Anlagenbau, sowie Forschungseinrichtungen (Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISC, Fraunhofer IWM, ZAE-Bayern). Ein Zwischenstand wurde durch das ZAE-Bayern bereits vorgestellt in Weinläder, H.; Ebert, H. u.a.: VIG - Vacuum Insulation Glass (2005), S. 197-204

86. Die Daten für diese Tabelle stammen aus folgenden Quellen: Für das Heat Flow Meter - Verfahren aus Smith, S.E.; Urso, C.: Analytical and Modeling Techniques for Rapid Determination of VIP Thermal Resistance (1998), S. 64-70; Für das va-Q-check-Verfahren: Angaben aus Firmenunterlagen der Firma va-Q-tec AG <03.2004>

87. siehe hierzu Smith, S.E.; Urso, C.: Analytical and Modeling Techniques for Rapid Determination of VIP Thermal Resistance (1998), S. 64-70

88. Eine weniger spezifische Form eines vom Ansatz vergleichbaren, auch nicht zerstörenden Messverfahrens über das Einleiten von Wärme ist beschrieben in Mathis, Nancy: Imple-

mentation of Rapide Nondestructive Thermal QC Test for Vacuum Insulation Panels for Appliance Manufacturing (2001), Folie 16ff. Das Verfahren lässt aber wohl nur Aussagen über ‚gute‘ und ‚schlechte‘ Paneele zu.

89. Die Abbildung ist entnommen aus: Heinemann, Ulrich: Influence of Water on the Total Heat Transfer in ‚Evacuated‘ Insulations (2005), S. 29.

Hier werden folgende Spezifikationen dieser Messeinrichtung am ZAE-Bayern genannt:

- Temperaturbereich: -200 °C bis 400 °C
- Interner Gasdruck: 10⁻⁵ mbar bis 1 bar
- Von außen aufgebracht Druck: 0 bis 1,5 bar
- Emissivität der Oberflächen: 0,8 bis 0,04
- Zwei identische Messkörper mit einer Dicke von 1 bis 28 mm und einem Durchmesser von 280 mm

90. siehe Smith, Douglas; Roderick, Kevin; Braun, Robert; Glover, Brian: Novel Physical Forms and Applications of Vacuum Insulation (2003), Folie 6-7

Inhaltsverzeichnis

Teil 4

Anwendungen im Bereich der Gebäudehülle

Abschnitt	Seite	Abschnitt	Seite		
1	Wo können Vakuum-Dämmsysteme eingesetzt werden?	80	2	Betrachtete Beispielanwendungen - Übersicht	95
1.1	Typologie zur Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen	80	3	Zur Anwendung lichtundurchlässiger Systeme	98
1.1.1	Betrachtungsebene 1: Anwendungsbereiche	80	3.1	Anwendungsbereich Fassade	98
1.1.2	Betrachtungsebene 2: Ausschnitt	80	3.1.1	Gebäudehüllenausschnitt ohne Öffnung	98
1.1.3	Betrachtungsebene 3: Einbausituation	80	3.1.1.1	Einbausituation: nicht bewegbar	98
1.1.4	Betrachtungsebene 4: Verhältnis zur primären thermischen Trennebene	81	3.1.1.2	Einbausituation: bewegbar	101
1.1.5	Betrachtungsebene 5: Lagebeziehung zur primären thermischen Trennebene	81	3.1.2	Gebäudehüllenausschnitt mit Öffnung	102
1.1.6	Prinzipdarstellung und Fallnummer	81	3.1.2.1	Einbausituation: bewegbar	102
1.1.7	Sonstige Anmerkungen zur Typologie	81	3.2	Anwendungsbereich Dach	104
1.2	Weitere Merkmale zur Klassifizierung der Anwendungsmöglichkeiten	81	3.2.1	Gebäudehüllenausschnitt ohne Öffnung	105
1.2.1	Eigenstabilität der Vakuum-Dämmsysteme	81	3.2.1.1	Einbausituation: nicht bewegbar	105
1.2.2	Integration in ein biegesteifes Sandwich-oder Bauteilsystem	81	3.2.2	Gebäudehüllenausschnitt mit Öffnung	106
1.2.3	Weitere Aspekte	84	3.2.2.1	Einbausituation: bewegbar	106
1.3	Beispielhafte Wandaufbauten	85	4	Zur Anwendung lichtdurchlässiger Systeme	106
1.4	Eingeschäumte Paneele	85	5	Zusammenfassung der gegebenen Planungshinweise	107
1.5	Sandwichartige Konstruktionen	86	5.1	Anlass für den Einsatz	107
1.6	Paneel-Anwendungen für linien- und punktgehaltene Systeme	88	5.2	Empfindlichkeit	107
1.6.1	Aufbau	90	5.3	Wärmebrücken	107
1.6.2	Beispiele lichtundurchlässiger Anwendungen	91	5.4	Formate	107
1.6.2.1	...mit einer Hüllschicht	91	5.5	Austauschbarkeit / Zugänglichkeit	108
1.6.2.2	...mit zwei Hüllschichten	91	5.6	Wirtschaftlichkeit	108
1.6.3	Beispiele lichtdurchlässiger Anwendungen	92	6	Ausblick	108
1.6.3.1	...mit einer Hüllschicht	92	Anmerkungen	109	
1.6.3.2	...mit zwei Hüllschichten	93			
1.7	Anmerkungen zu Auswirkungen auf die Wandstärke	94			
1.7.1	Wirtschaftlichkeit	94			
1.7.2	Wahrnehmung	94			
1.7.3	Sichtbeziehungen Innen - Außen	94			
1.7.4	Belichtung und Strahlungseintrag	94			
1.7.5	Einfluss der Leibungsbildung	95			
1.7.6	Konstruktiver Aufwand	95			

Teil 4

Vakuum-Dämmsysteme, Anwendungen im Bereich der Gebäudehülle

1 Wo können Vakuum-Dämmsysteme eingesetzt werden?

Bevor darauf eingegangen wird, wie Vakuum-Dämmsysteme im Bereich der Gebäudehülle eingesetzt werden können, stellt sich die Frage, wo und mit welcher Zielsetzung dies sinnvoll geschehen könnte.

Erst die Beantwortung dieser Fragen legt die wesentlichen Grundlagen für spätere Untersuchung konstruktiver Zusammenhänge.

1.1 Typologie zur Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen

Abb. 4.1 zeigt zwei analog aufgebaute Typologien zu Anwendungen von lichtundurchlässigen und lichtdurchlässigen Vakuum-Dämmsystemen in der Gebäudehülle.¹

Aus dem elektromagnetischen Strahlungsspektrum spielen für die Gebäudehülle neben dem Ausschnitt des sichtbaren Lichts insbesondere die angrenzenden Bereiche größerer und kleinerer Wellenlänge, der Infrarot- und Ultraviolettstrahlung, eine Rolle.

Im Sinne der vorliegenden Arbeit ist dieser gesamte Bereich gemeint,

wenn von ‚Strahlungsdurchlässigkeit‘ die Rede ist.²

Unter einem ‚lichtdurchlässigen‘ Bauteil soll hingegen ein transluzentes oder transparentes im Gegensatz zu einem opaken verstanden werden.

Alle Systeme, die in diesem Sinne ‚lichtdurchlässig‘ sind, lassen nicht nur Strahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums passieren, sondern immer auch Anteile darüber hinaus, insbesondere kurzwellige, energiereiche Strahlung.³

Allerdings sind - wenn auch in deutlich geringerem Umfang - auch opake, also ‚lichtundurchlässige‘ Systeme nicht ganz undurchdringbar für Strahlung.

Hierbei sind zwei verschiedene Effekte zu unterscheiden:

Einmal können Baustoffe und -teile Strahlungsanteile direkt passieren lassen.

Zum anderen geben alle, auch vermeintlich strahlungsundurchlässige Materialien indirekt Strahlungsenergie weiter, indem sie diese absorbieren und über Wärmeleitung transportieren, sich dabei selbst erwärmen und dann wieder über Strahlung abgeben. Dieser Effekt, durch den es unter anderem zu Frequenzverschiebungen kommt, ist abhängig von der Materialtemperatur und käme theoretisch erst am absoluten Temperatur-Nullpunkt zum Erliegen.

Der zweitgenannte Effekt wird allgemein als ‚Sekundärstrahlung‘ bezeichnet und spielt insbesondere im Zusammenhang Sonnenschutzmaßnahmen eine oft unterschätzte Rolle.

Im Sinne der Zielsetzung der in diesem Teil angestrebten Systematisierung geht es aber um den Zweck der untersuchten Anwendung, und hier ist die Eigenschaft der Lichtdurchlässigkeit (also Transluzenz oder Transparenz) vorrangig, bei der - wie ausgeführt - immer ein gewisser zusätzlicher Permeationsanteil weiterer Strahlungsbereiche zu berücksichtigen sein wird.

1.1.1 Betrachtungsebene 1: Anwendungsbereiche

Gebäudehülle im Sinne dieser Arbeit meint die vollständige ein Gebäude begrenzende Fläche gegenüber der Außenluft, also das, was man - vereinfacht - als Dach und Fassade bezeichnen kann.

Der erdberührende Bereich der Gebäudehülle wird in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt, da für die hier erfolgte Untersuchung die Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen aus den folgenden Gründen nicht von vorrangigem Interesse ist:

- Erdberührende Bereiche sind nicht oder nur unter erheblichem Aufwand zu Wartungs- oder Kontrollzwecken zugänglich.
- Die Anforderungen an Druckfestigkeit sind meist sehr hoch.

· Im erdberührenden Bereich eingesetzte Materialien müssen den äußeren Einflüssen standhalten, das heißt sie dürfen nicht verrotten, müssen absolut wasserbeständig und resistent gegen Wurzelwerk sein. Diese Anforderungen müssten durch ergänzende Maßnahmen erfüllt werden.

· Unter der Erde herrscht in der Regel kein Platzmangel, der den Hauptvorteil von Vakuum-Dämmsystemen zum Tragen brächte.

· Die mit der Tiefe zunehmend konstant werdenden⁴ Temperaturen stellen verhältnismäßig geringe Anforderungen an das Wärmedämmvermögen.

In den oben genannten Typologien werden daher nur die Bereiche Fassade und Dach untersucht und unterschieden.⁵

1.1.2 Betrachtungsebene 2: Ausschnitt

Im weiteren wird differenziert in Gebäudehüllenausschnitte mit und ohne ‚Öffnungen‘, wobei darunter permeable, das heißt strahlungs- und / oder luftdurchlässige Bereiche verstanden werden.⁶

1.1.3 Betrachtungsebene 3: Einbausituation

Die nächste Betrachtungsebene bezieht sich auf die Einbausituation: Ist das Dämmsystem in seiner Lage unveränderlich eingebaut

oder in ein bewegbares Bauteil wie zum Beispiel einen Fensterflügel oder einen Klappladen integriert. Ist letzteres der Fall, handelt es sich bei den beschriebenen bewegbaren Elementen um sogenannte ‚Manipulatoren‘.⁷

1.1.4 Betrachtungsebene 4: Verhältnis zur primären thermischen Trennebene

Im folgenden Schritt wird die Beziehung zur primären thermischen Trennebene des betrachteten Gebäudehüllenausschnittes herangezogen, um folgendermaßen zu differenzieren:

Fällt das betrachtete Dämmsystem mit der primären thermischen Trennebene zusammen, wie dies zum Beispiel für einen gedämmten Lüftungflügel gilt, so wird das Verhältnis zu dieser als ‚identisch‘ bezeichnet.

Dies ist von der Situation zu unterscheiden, in der das Dämmsystem ‚additiv‘ zu einer bestehenden (und daher ‚primären‘) thermischen Trennebene, wie sie zum Beispiel von einem Fenster gebildet wird, eingesetzt wird. Es ist an dieser Stelle unerheblich, von welcher Qualität die bestehende thermische Trennung ist.

Offensichtlich kann der Fall ‚additiv‘ für statische Einbausituationen nicht vorkommen, sondern nur für ‚bewegbare‘ Anwendungen. Die beiden letztgenannten Ebenen

ergänzen die bisherigen Betrachtungen für den Fall ‚bewegbar-additiv‘ um den Aspekt des temporären Wärmeschutzes, wobei hierunter sowohl Tag / Nacht-Zyklus-bezogene (wie zum Beispiel Klappläden) als auch saisonale Maßnahmen (zum Beispiel Vorfenster⁸) zu rechnen sind.

1.1.5 Betrachtungsebene 5: Lagebeziehung zur primären thermischen Trennebene

Das Dämmsystem kann, wenn es im oben genannten Sinne ‚additiv‘ ist, auf die primäre thermische Trennebene bezogen entweder innen- oder außenseitig eingesetzt werden. Bildet es selbst die primäre thermische Trennebene (Fall ‚identisch‘), so wird die Lagebeziehung folglich als ‚ebenengleich‘ bezeichnet.

Eine Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen (Einbausituation: nicht bewegbar) als transluzente Wärmedämmung (TWD) fällt im Sinne dieser Typologie unter den Fall LD.F.oÖ.1.

1.1.6 Prinzipdarstellung und Fallnummer

Alle dargestellten Betrachtungsebenen werden in einer zugeordneten piktogrammartigen Prinzipdarstellung zusammengefasst und es wird eine die Betrachtungsebenen widerspiegelnde Fallnummer zugeordnet, die für die weitere Arbeit als Referenz dient.

1.1.7 Sonstige Anmerkungen zur Typologie

Prinzipiell sind die bisher erfolgten Darstellungen für alle Arten lichtdurchlässiger und lichtundurchlässiger Dämmsysteme gültig. Der potenziell deutlich geringere Dämmstärkebedarf im Vergleich zu konventioneller Dämmung lässt allerdings Anwendungen mit dem Ziel des temporären Wärmeschutzes interessant erscheinen.

Es sind nicht alle theoretisch vorstellbaren, sondern nur die dem Verfasser sinnvoll erscheinenden Möglichkeiten erfasst. Beispielsweise fehlt der Fall ‚Lichtundurchlässig/ Dach / mit Öffnung / bewegbar / additiv / außenseitig‘ (der die Nummer LU.D.mÖ.3 hätte), da der konstruktive Aufwand für eine solche Anwendung (zum Beispiel wegen Schnee, Regen usw.) unverhältnismäßig erscheint.

Dennoch könnten auch solche Fälle anhand der vorliegenden Typologie begrifflich und logisch eindeutig bezeichnet und beschrieben werden.

1.2 Weitere Merkmale zur Klassifizierung der Anwendungsmöglichkeiten

Abb. 4.2 zeigt weitere Merkmale zur Klassifizierung der Anwendungsmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen, die sowohl für lichtdurchlässige als auch für lichtundurchlässige Varianten Gültigkeit

haben. Hierbei werden Aspekte in die Betrachtung einbezogen, die für die weiteren Klassifizierungsschritte Bedeutung haben.

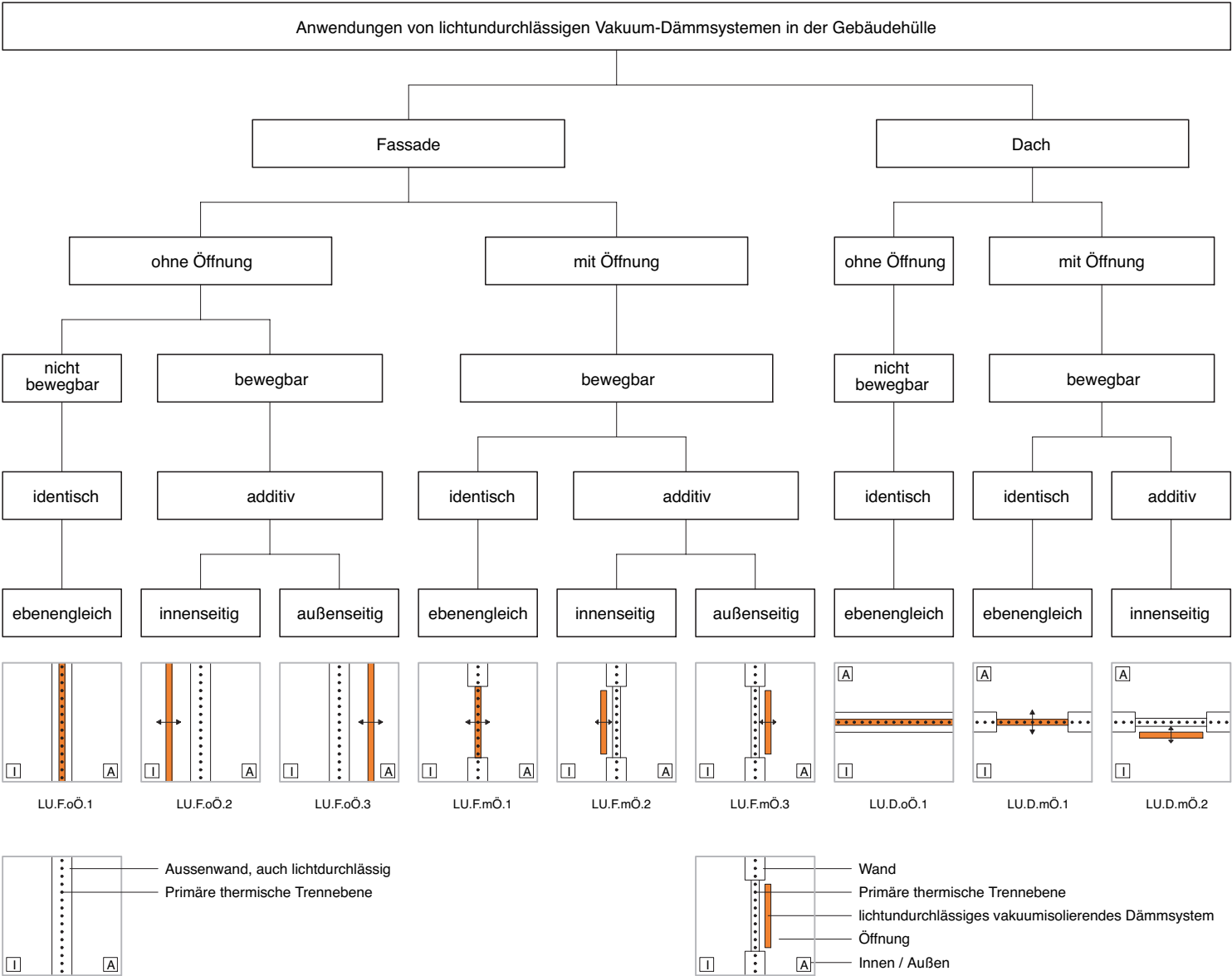
1.2.1 Eigenstabilität der Vakuum-Dämmsysteme

Ob das betrachtete Dämmsystem in seiner statischen Wirkung als biegesteif oder weich einzustufen ist, spielt für die weiteren Anwendungsmöglichkeiten eine gewisse Rolle. Die meisten bisher verfügbaren Vakuum-Dämmsysteme sind in diesem Sinne als ‚weich‘ zu klassifizieren, da sie keine nennenswerten Biegemomente aufnehmen können. Das gilt zum Beispiel für alle VIP mit Folienhüllmaterialien.

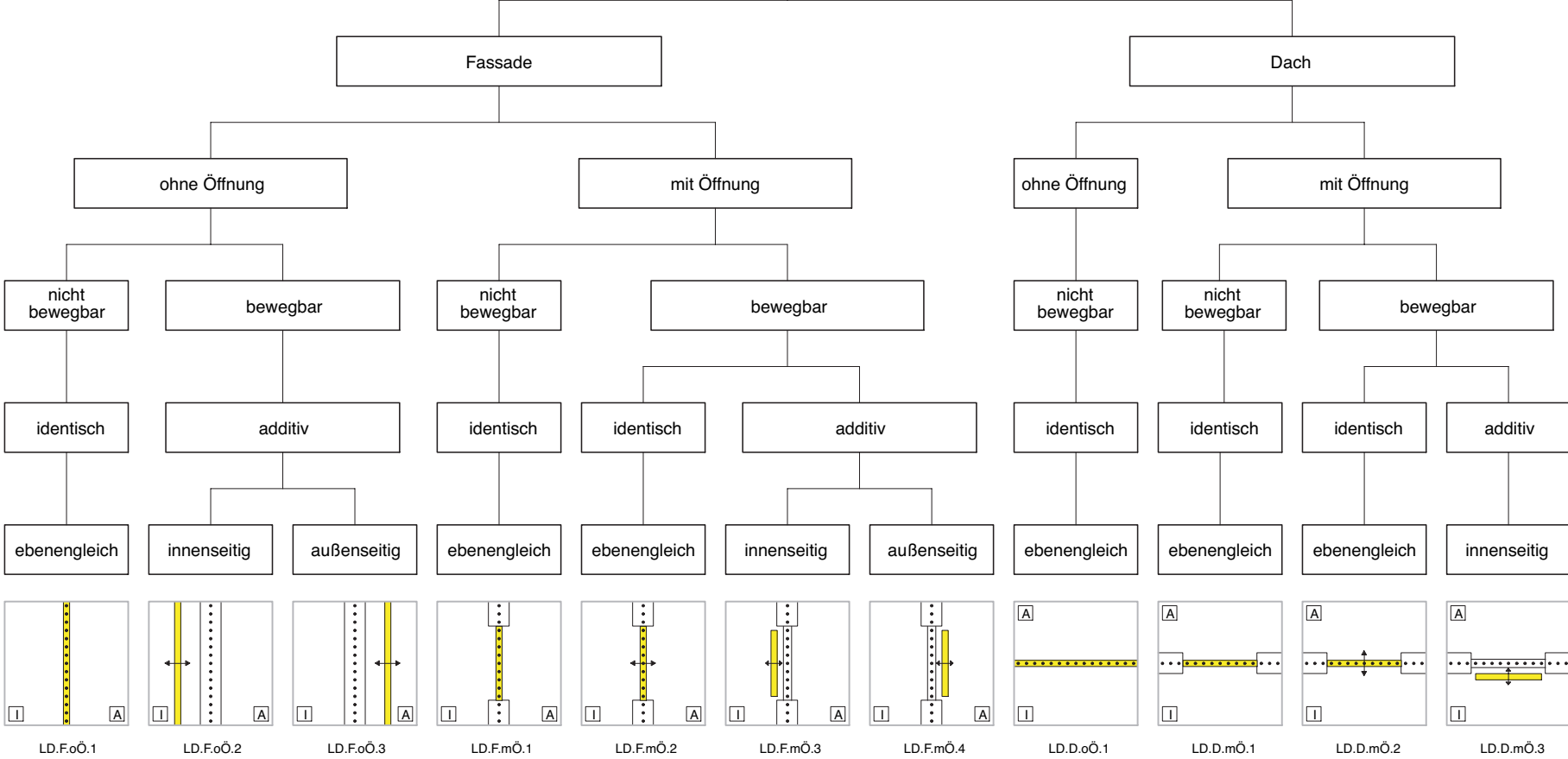
VIP mit Metallblech als Hüllmaterial dagegen verfügen nicht zuletzt durch das Vakuum zwischen den Paneelschalen über eine beträchtliche Biegesteifigkeit (siehe Abb. 3.24), die andere Anwendungen und vor allem konstruktive Möglichkeiten erschließt.

1.2.2 Integration in ein biegesteifes Sandwich- oder Bauteilsystem

Ist die Gesamtsystemeigenschaft der Biegesteifigkeit erforderlich, kann dies für weiche Vakuum-Dämmsysteme dadurch erreicht werden, dass diese in ein übergeordnetes biegesteifes System integriert werden, wie zum Beispiel in ein Sandwichelement, wobei das Vakuum-Dämmsystem dann ein



Anwendungen von lichtdurchlässigen Vakuum-Dämmsystemen in der Gebäudehülle



Zusammensetzung der Fallnummern

LU / LD lichtundurchlässige / lichtdurchlässige Vakuum-Dämmsysteme
 F / D Fassade / Dach
 oÖ / mÖ ohne Öffnung / mit Öffnung

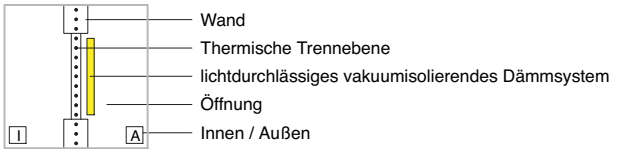


Abb. 4.1
 Anwendungen von lichtdurchlässigen und lichtundurchlässigen
 Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle
 (ohne Dämmung gegen Erdreich), Typologie des Verfassers

Vakuumisolierendes
Dämmsystem:
weich oder biegesteif

Integration in ein
biegesteifes
Sandwich- oder
Bauteilsystem

einlagige oder mehrlagige
Anwendung

Befestigung:
flächig / linear / punktuell

H: horizontal
V: vertikal

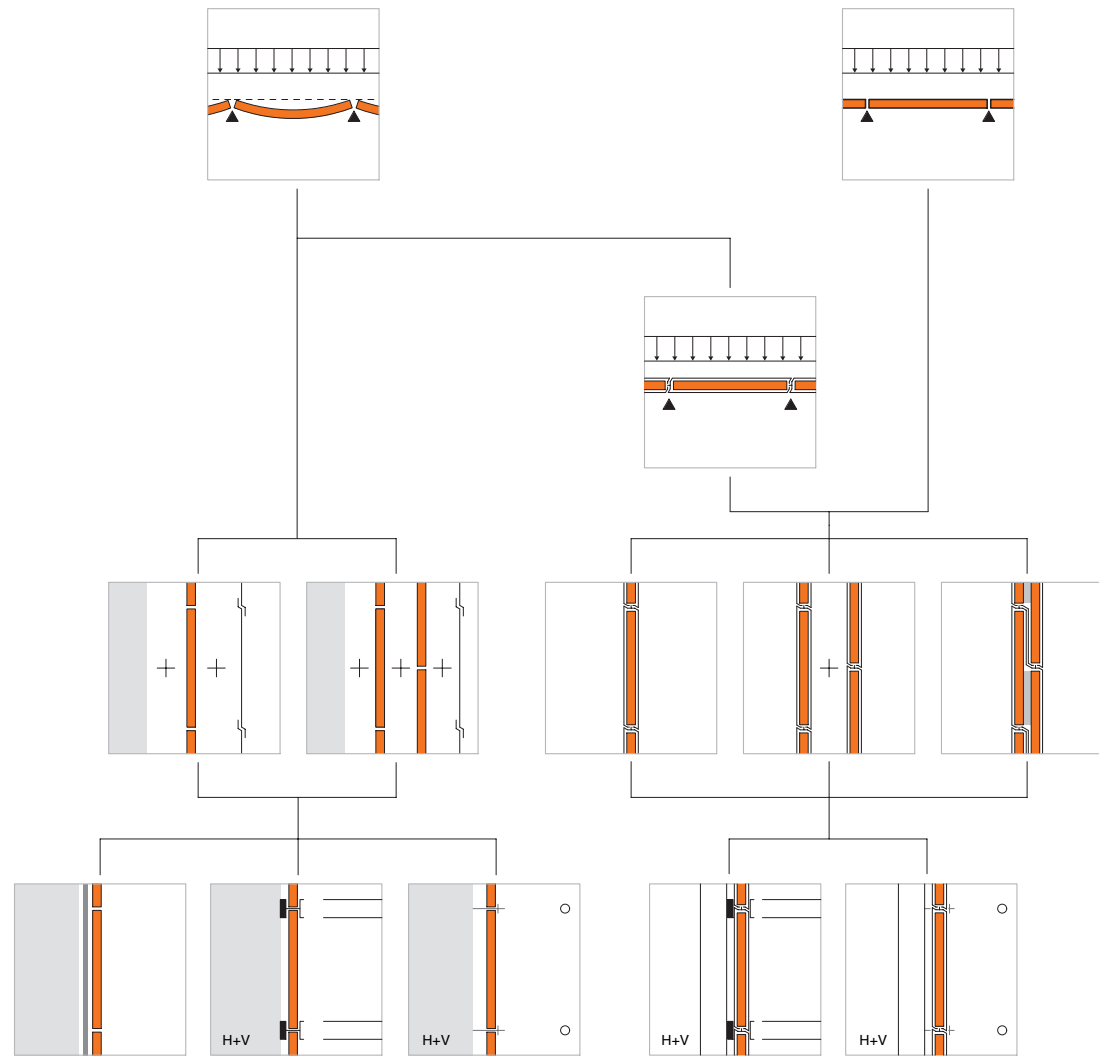


Abb. 4.2
Zusammenhang zwischen Biegesteifigkeit, ein- oder mehrlagiger Anwendung und Art der Befestigung (vereinfacht), Darstellung des Verfassers⁹

Subsystem bildet. Dies bedingt eine entsprechende Randausbildung, siehe Abschnitt 1.5.

Das übergeordnete System selbst kann unter Umständen auch evakuiert sein, wie dies beispielsweise bei in Pfosten-Riegel-Paneelen eingebauten VIP der Fall ist (siehe hierzu Abschnitte 1.5 und 1.6 in diesem Teil).

1.2.3 Weitere Aspekte

Werden weiche Dämmsysteme nicht im Rahmen von Vorfertigung in ein anderes System integriert, müssen sie einzeln vor Ort eingebaut werden. Dies hat sich aufgrund der Empfindlichkeit der eingesetzten Hüllmaterialien als sehr problematisch erwiesen.

Grundsätzlich können die betrachteten Dämmsysteme ein- oder mehrlagig eingesetzt werden. Letzteres kann sinnvoll sein, um durch Versatz der Stöße im Randbereich in der zweiten Lage die Wärmebrücken deutlich zu entschärfen (siehe hierzu auch Teile 2, 5, 6 und Anhang 1).

Im Falle der Integration in ein übergeordnetes System kann solch eine versetzte Anordnung auch in den einzelnen Elementen erfolgen. Dabei ist dann ein entsprechender, gestufter Elementstoß auszubilden.

Das Maß des Versatzes zwischen den Lagen ist je nach Anwendungsfall zu wählen. Dargestellt ist hier und in den folgenden Fällen ein

maximaler Versatz von 50%, da so das Prinzip der Maximierung der Weglänge des Wärmedurchgangs am deutlichsten wird.

Aus praktischen Gründen (vor allem im Hinblick auf Zwänge aus dem Maßsystem und der Befestigung) wird man dieses Verhältnis in konkreten Anwendungen kaum vorfinden.

Im Zusammenhang mit der Montage stellt sich außerdem die Frage nach Austausch- und Demontagemöglichkeiten, die eng in Zusammenhang mit der Art der Befestigung und der Randausbildung stehen.¹⁰

Obwohl der mehrlagige Einsatz prinzipielle Vorteile im Hinblick auf die Reduzierung von Wärmebrücken bietet, muss darauf hingewiesen werden, dass damit in der Regel ein erheblicher Mehraufwand (komplexere Unterkonstruktion, erhöhter Material- und Montageaufwand) verbunden ist, der zu entsprechend höheren Kosten führt.

1.2.4 Befestigung

Grundsätzlich können folgende Befestigungsvarianten von flächigen Elementen unterschieden werden:

- flächig,
- linear,
- punktuell,

sowie alle hieraus denkbaren Kombinationen.

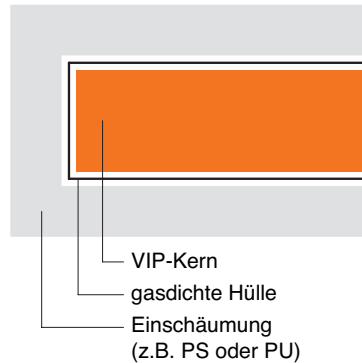


Abb. 4.3
Prinzipielle Darstellung eines eingeschäumten VIP

Weiche Vakuum-Dämmsysteme können nur sehr eingeschränkt Biege-, Zug- oder Scherbeanspruchungen ausgesetzt werden. Prinzipiell sollten diese daher so weit wie möglich reduziert werden.

Einer von der flächigen Befestigung abweichenden Art der Fixierung ist immer der Vorzug zu geben, da diese in der Praxis nur durch Klebung herzustellen ist und damit prinzipiell nicht zerstörungsfrei lösbar ist, oft einen hohen Aufwand bedeutet und die Paneele in ungeeigneter Weise belastet (siehe Abschnitt 1.5 Sandwichartige Konstruktionen).

Obwohl theoretisch auch denkbar, ist eine flächige Befestigung von biegesteifen Systemen nicht dargestellt, da für eine derartige Befestigung normalerweise keine Notwendigkeit besteht.

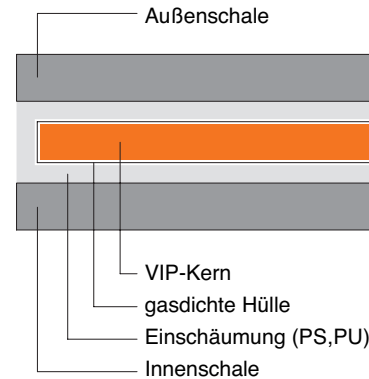


Abb. 4.4
Sandwichartiger Aufbau unter Verwendung eines eingeschäumten VIP, über das allerdings keine Zug- und Scherkräfte übertragen werden können.

1.3 Beispielhafte Wandaufbauten

Abb. 4.7 zeigt eine Auswahl an vorstellbaren Wandaufbauten für die Anwendung von lichtdurchlässigen und lichtundurchlässigen Vakuum-Dämmsystemen für statische Einbausituationen in Wandbereichen ohne Öffnungen (gemäß Abb. 4.1; die letzte Spalte verweist auf neuartige, in dieser Arbeit vorgeschlagene Systeme, die in Teil 5 beschrieben und untersucht werden).

Der Fall LU.1L.2 bezieht sich auf einen Vorschlag der Firma Rimmel/ Ehingen und des ZAE-Bayern für den Einsatz von VIP zwischen einzelnen Mauerwerksteinen, die mittels üblicher Verpackungsbänder zu einer Art hochgedämmtem Mauerwerk-Systemblock verbunden werden.¹¹

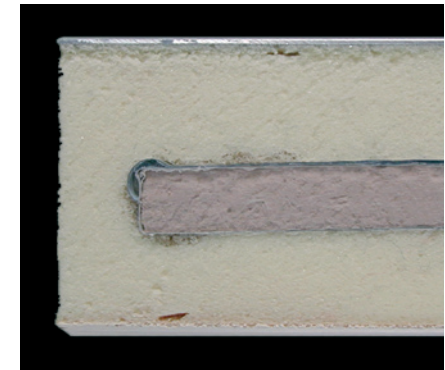


Abb. 4.5
Schnitt durch ein Metallsandwichelement der Firma VarioTec im Randbereich. (Die umgelegte Randlasche des VIP-Randverbundes ist deutlich zu sehen.)

1.4 Eingeschäumte Paneele

Für bestimmte Anwendungsfälle kann es sinnvoll sein, VIP vor einer weiteren Verarbeitung allseitig einzuschäumen (in der Regel mit Polyurethan- oder Polystyrolschaum), siehe Abb. 4.3.

Dadurch wird folgendes erreicht:

- erhöhter mechanischer Schutz während Transport, Lagerung, Montage usw.
- höhere Maßhaltigkeit am Rand (Ausgleich von Herstellungstoleranzen der VIP)
- Nachbearbeitung des Randes in geringem Umfang möglich
- bessere Rechtwinkligkeit am Rand (in Schnitt und Fläche) für Anschlüsse mit geringeren Fugenmaßen
- ggf. leichtere Weiterverarbeitung
- erhöhter Schutz der empfindlichen VIP-Hülle vor Umweltein-



Abb. 4.6 Diverse Sandwichkonstruktionen mit verschiedenen Schalen- und Verschleißschichtmaterialien in Schnitt- und Ansichtsmustern der Firma VarioTec, wie sie für den Baubereich und diverse andere Anwendungsgebiete (z.B. die Transportbranche) gedacht sind.¹²

flüssen (Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen), dadurch unter Umständen längere Funktionsdauer

Es sind aber auch Nachteile dieser Behandlung zu nennen:

- Erhöhter Kostenaufwand
- Gefahr durch zu hohe Temperaturen für die Hüllfolie durch exotherme chemische Reaktion während des Aufschäumungsvorganges
- thermische Schwachstelle im

- Bereich der Fuge (wegen höherer Wärmeleitfähigkeit des Schaummaterials gegenüber VIP)
- höhere Bauteilstärke
 - Unzugänglichkeit des VIP und damit keine Prüf- und Austauschbarkeit
 - keine wirkliche Sandwichwirkung möglich (siehe unten)

Im Baubereich stellt die Einschäumung insbesondere für die Herstellung von sandwichartigen Konstruktionen mit VIP einen üblichen Zwischenschritt dar.

1.5 Sandwichartige Konstruktionen

Es gibt zahlreiche Versuche, VIP als Dämmsystem in sandwichartigen Konstruktionen einzusetzen.

In der Regel werden VIP dabei in eine den schubfesten Verbund herstellende Zwischenschicht aus geschäumtem Dämmstoff (PS oder PU) integriert, siehe Abb. 4.4 und als Anwendungsbeispiel Abb. 4.5.

Als Deckschicht werden vor allem Holzwerkstoffe, aber auch andere Materialien, wie zum Beispiel Metall oder sogar Beton eingesetzt.

Eine große Bandbreite an Beispielen zeigt Abb. 4.6.

Solche Anwendungen sind allerdings problematisch, da über VIP mit Folienhüllmaterialien keine Zug- und Schubspannungen übertragen werden dürfen.

Insofern muss die eigentliche Sandwichwirkung über den verbleibenden (Schaumstoff-) Rand erzielt werden, bzw. es muss durch die Deckschalenausbildung und die Einbausituation sichergestellt werden, dass keine solchen schädlichen Spannungen auf das VIP einwirken können.

Daher werden diese Konstruktionen hier auch als ‚sandwichartig‘ bezeichnet.

Dies hat eine wesentliche Konsequenz für die Ausbildung der seitlichen Befestigung, die normalerweise alle Schichten eines solchen Paneels erfassen oder ausreichend breit (mit einer entsprechenden Wärmebrücke in der Folge) sein muss, um hinreichende Stabilität zu gewährleisten.

Im Baubereich sind daher bisher vor allem Anwendungen als Paneele in Pfosten-Riegel-Fassaden oder zum Beispiel als Türblätter (mit lastabtragenden Seitenrahmen, siehe Abb. 4.6 unten rechts) zu finden.

Der Hauptvorteil solcher Ansätze liegt in der auf die Gesamtläche bezogenen signifikanten Verbesserung des U-Wertes im Vergleich zu reiner PU- oder PS-Schaumkerndämmung und in den Vorfertigungsmöglichkeiten unter kontrollierbaren Bedingungen in der Werkstatt sowie der weitgehenden Vermeidung späterer mechanischer Beschädigungsmöglichkeiten des hochempfindlichen VIP durch Transport und Montage vor Ort.

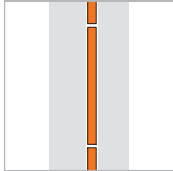
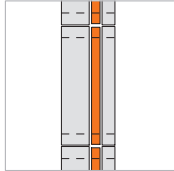
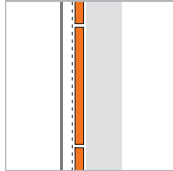
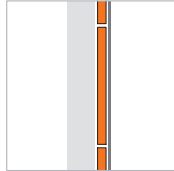
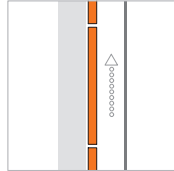
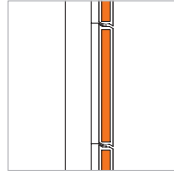
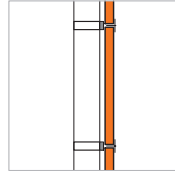
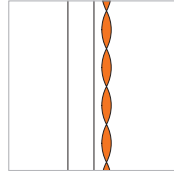
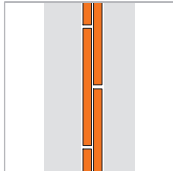
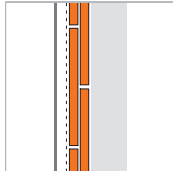
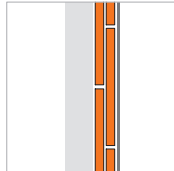
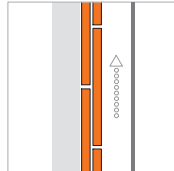
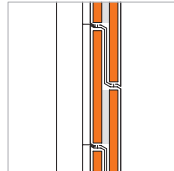
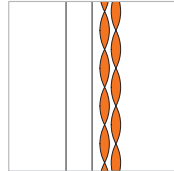
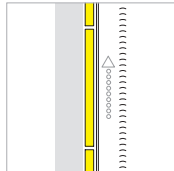
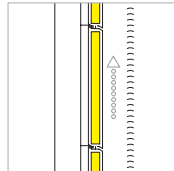
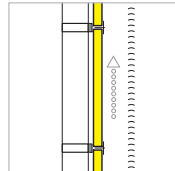
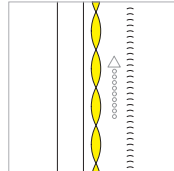
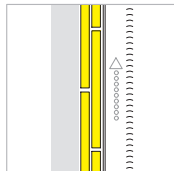
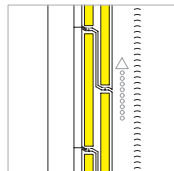
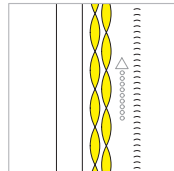





Typ	Kerndämmung	Kerndämmung	Innendämmung	WDV-System	Hinterlüftete Fassade	Sandwich-Paneel	PR-Paneel	Dämm.-mattensyst.
Lastabtragung	tragend oder nicht tr.	tragend oder nicht tr.	tragend oder nicht tr.	tragend oder nicht tr.	tragend oder nicht tr.	tragend oder nicht tr.	nicht tragend	nicht tragend
Schichtigkeit	mehrschichtig	mehrschichtig	mehrschichtig	mehrschichtig	mehrschichtig	mehrschichtig	mehrschichtig	mehrschichtig
Schaligkeit	einschalig	einschalig	einschalig	einschalig	mehrschalig	einschalig	einschalig	einschalig
Hinterlüftung	nicht hinterlüftet	nicht hinterlüftet	nicht hinterlüftet	nicht hinterlüftet	hinterlüftet	nicht hinterlüftet	nicht hinterlüftet	nicht hinterlüftet
Elementierung	Schale nicht element.	Schale elementiert				elementiert	elementiert	nicht elementiert
einlagige Anwendung eines lichtundurchlässigen Vakuum-Dämmsystemes	 LU.1L.1	 LU.1L.2	 LU.1L.3	 LU.1L.4	 LU.1L.5	 LU.1L.6	 LU.1L.7	 LU.1L.8
	 LU.ML.1		 LU.ML.3	 LU.ML.4	 LU.ML.5	 LU.ML.6		 LU.ML.8
einlagige Anwendung eines lichtdurchlässigen Vakuum-Dämmsystemes				 LD.1L.4		 LD.1L.6	 LD.1L.7	 LD.1L.8
				 LD.ML.4		 LD.ML.6		 LD.ML.8
mehrlagige Anwendung eines lichtdurchlässigen Vakuum-Dämmsystemes								
Legende	 Vakuum-Dämmsystem, lichtdurchlässig	 Vakuum-Dämmsystem, lichtundurchlässig	 Opakes Material	außen - oder innenliegende Schutzschicht	Dampfbremse/ Dampfsperre	 Hinterlüftung	Lichtlenk- oder Verschattungssystem	 LU.1L.1 Fallnummer: 1-8 Beispielnummer 1L/ML Lagigkeit Dämmsystem LU/LD Lichtdurchlässigkeit Dämmsystem

Abb. 4.7 Ausgewählte Wandaufbauten für die Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen (Piktogramme: links Innen / rechts Außen), Vorschlag des Verfassers zur Klassifizierung¹³

1.6 Paneel-Anwendungen für linien- und punktgehaltene Systeme

Abb. 4.10 beschäftigt sich im Detail mit den Fällen LU.1L.7 und LD.1L.7 aus Abb. 4.7 und untergliedert diese weiter. Dabei handelt es sich um Anwendungen für linien- und/ oder punktgehaltene Systeme, vor allem sogenannte Pfosten-Riegel-Konstruktionen. Als lichtundurchlässiges Paneelaußenmaterial ist Blech aufgeführt, wobei hier auch andere Materialien, beispielsweise Keramik denkbar wären.

Die von der Firma lambdasave aus Emden hergestellten tempsafe®-Elemente, die ausführlich in Teil 3 Absatz 2.3.4.2 vorgestellt wurden, gehören auch in diese Gruppe (hier Fall LU.1H.BB gem. Abb. 4.10).¹⁴

Als lichtdurchlässiges Außenmaterial wurde für solche Systeme bisher nur Glas eingesetzt.¹⁵

Diese Art der Anwendung bildet schon seit langer Zeit einen allgemeinen Interessensschwerpunkt für den Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle, da hier wichtige Einzelaspekte günstig zusammenfallen¹⁶:

Die Systeme können mit verhältnismäßig geringem Aufwand in verfügbare Standardsysteme eingebaut und zerstörungsfrei wieder ausgebaut bzw. getauscht werden, da die resultierende Systemstärke (Einspanndicke) derjenigen üblicher wärmedämmender Mehr-

scheibenverglasungen weitgehend entspricht.

Aus architektonischer Sicht von besonderer Bedeutung ist hierbei, dass mit diesen Systemen - im Gegensatz zu herkömmlichen Dämmpaneelen mit deutlich größerer Stärke - eine flächenbündige Fortsetzung der Verglasung in der Fassade auch von innen möglich ist, wodurch sich für den gestalterischen und konstruktiven Umgang vor allem mit den senkrechten Pfosten neue Möglichkeiten bieten. Einen Hinweis geben hier die Abb. 4.13 und insbesondere 4.12.

Es stehen für diesen Anwendungsfall inzwischen in technischer Hinsicht weitgehend optimierte Varianten zur Verfügung¹⁷. Mit Systemstärken von ca. 32 mm lassen sich U-Werte von ca. 0,16 W/m²K in Paneelmitte erreichen, siehe Abb. 4.8. Im Vergleich mit der derzeit besten wärmedämmenden Mehrscheibenverglasung (U_g-Wert ca. 0,65 W/m²K) bedeutet dies eine mögliche Reduktion um ca. 75%.

Für den Randverbund sind eine Reihe von Lösungen verfügbar, die mit verhältnismäßig geringen Modifikationen adaptierbar sind, vor allem sog. ‚Warm-Edge-Systeme‘.¹⁸

Die vom ZAE-Bayern für ein Krankenhaus in Erlenbach entwickelten Paneele stellen ein Beispiel für solch eine Variante dar, siehe Abb. 4.14. Hier besteht der Abstandhalter aus Polyurethan-Hartschaum (Purenit) und die Versiegelung (der

Fall	Paneelaufbau		Schalldämm-Maß R _w		U-Wert in Paneelmitte
	[mm Material]	[mm ges.]	in 50er PR-Fas.	Paneel	[W/(m ² K)]
LU.2H.BB	2 LM-Blech 16 VDS 2 LM-Blech	20			0,29
LU.2H.BB	3 LM-Blech 20 VDS 3 LM-Blech	26	38 dB	40 dB	0,23
LU.2H.BB	2 LM-Blech 24 VDS 2 LM-Blech	28			0,18
LU.2H.BB	2 LM-Blech 28 VDS 2 LM-Blech	32			0,16
LU.2H.BB	3 Stahl-Blech 24 VDS 3 LM-Blech	30	42 dB	43 dB	0,34
LU.2H.BG	2 Stahl-Blech 18 VDS 6 ESG-Glas	26	37 dB	39 dB	0,25
LU.2H.BG	3 Stahl-Blech 20 VDS 8 ESG-Glas	31	37 dB	39 dB	0,225

Abb. 4.8 Ermittelte Werte zu einzelnen Paneelaufbauten (Firma Boetker Metallbau GmbH)¹⁹.

Fall	Paneelaufbau		Schalldämm-Maß R _w		U-Wert in Paneelmitte
	[mm Material]	[mm ges.]	in 50er PR-Fas.	Paneel	[W/(m ² K)]
LU.2H.BB	3 Stahl-Blech 20 VDS 3 LM-Blech	26	38 dB	40 dB	0,23
LU.2H.BB	3 Stahl-Blech 24 VDS 3 LM-Blech	30	42 dB	43 dB	0,34
LU.2H.BG	2 LM-Blech 18 VDS 6 ESG-Glas	26	37 dB	39 dB	0,26
LU.2H.BG	3 Stahl-Blech 20 VDS 8 ESG-Glas	31	37 dB	39 dB	0,23

Abb. 4.9 Ermittelte Werte zu einzelnen Paneelaufbauten (lt. Angaben Firma Schüco)
Das bewertete Schalldämm-Maß kann sich je nach Profilsystem verändern und bezieht sich auf das theoretische Maß im nicht eingebauten Zustand.
(VDS = Vakuum-Dämmsystem; 50er PR-Fas. = Pfostenriegel-Fassade mit 50 mm Breite)

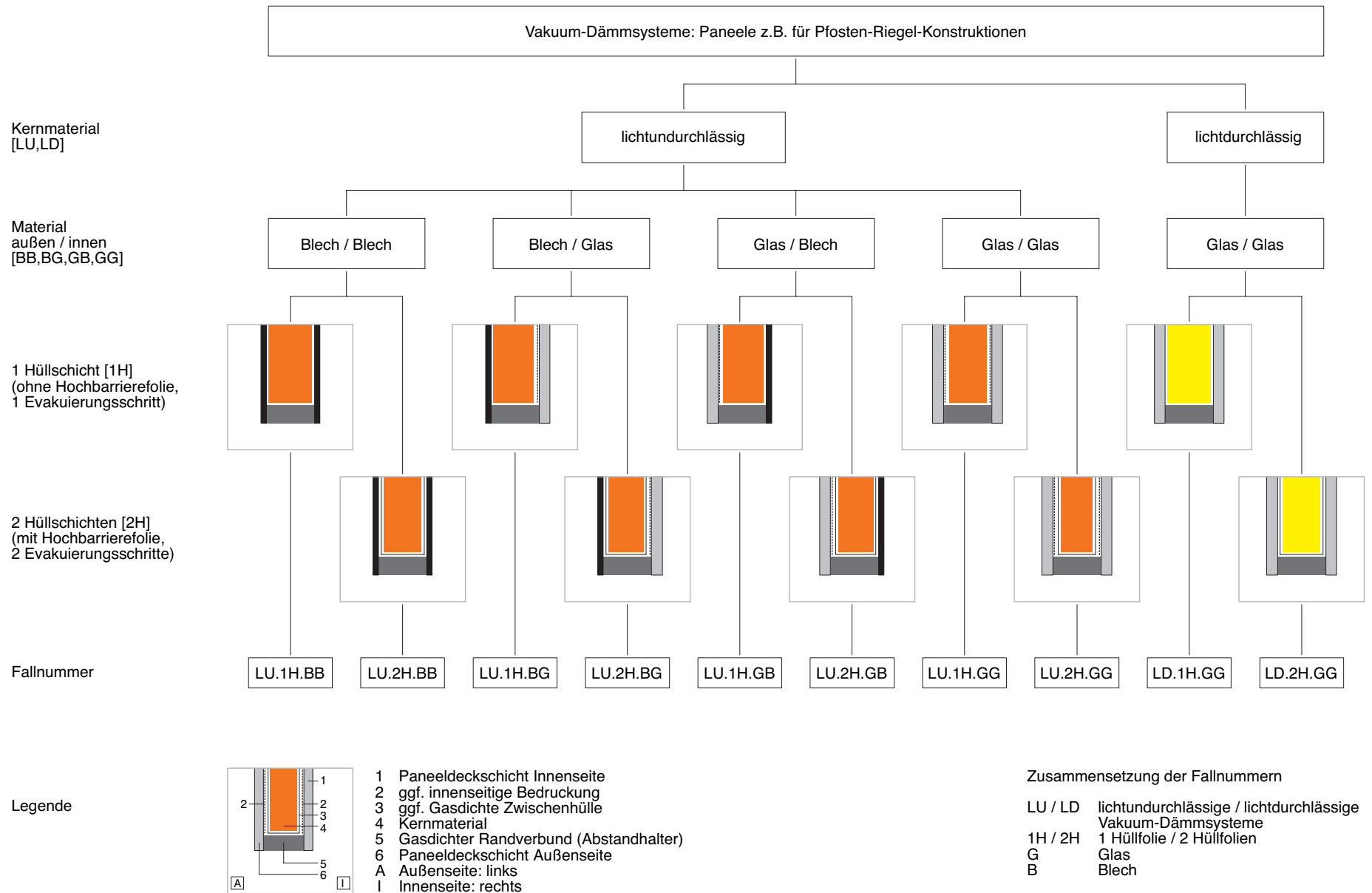


Abb. 4.10 Vakuüm-Dämmsysteme: Paneele ohne spezielle Fügeanschlüsse, z.B. für Pfosten-Riegel-Konstruktionen (Vorschlag des Verfassers zur Klassifizierung)

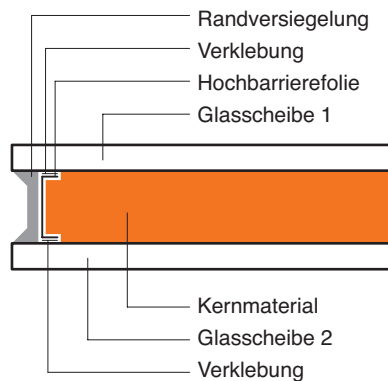


Abb. 4.11
Prinzipieller Aufbau des Glas-Vakuum-
Paneels des ZAE Bayern

zweiten Hüllschicht) wird mit einer dünnen Edelstahlfolie gewährleistet. Normale (konventionelle) Abstandhaltersysteme sollten aufgrund der deutlich höheren Wärmeleitung nicht verwendet werden. Bei dieser Anwendungsform ist der U-Wert der Gesamtfassade stark von der Paneelgröße und damit vom anteiligen Verhältnis der Ränder (Randverbund Paneel und Pfosten-/ Riegelkonstruktion) zu den Flächen abhängig.

Es wird ein weitgehender mechanischer Schutz der Vakuum-Dämmsysteme erreicht, der die Handhabung während der vollständigen Verarbeitungskette bis zum Einbau deutlich vereinfacht, da die Paneele im Werk gefertigt werden können und ab diesem Moment geschützt sind.

Durch die in hohem Maße auszuschließende Beschädigung (Belüftung) der VIP während des Trans-

portes und der Montage kann ein wesentlicher prinzipieller Nachteil kompensiert werden. Allerdings können die VIP mit den bisherigen Prüfmethode nach dem Einbau zwischen den Schutzschichten nicht mehr (schnell) geprüft werden. Nach aktuellem Stand ist nur eine Wärmebilderfassung in eingebautem Zustand möglich. Hier wären weitere Qualitäts-Kontrollverfahren wünschenswert.

Ein weiterer Vorteil liegt in der Gewichts- und Platzreduzierung dieser Paneele gegenüber konventionellen Dämmpaneelen. Das gilt nicht nur für den eingebauten Zustand und den damit verbundenen Grundflächengewinn, sondern in geringerem Maß auch für Transport und Montage.

Durch die Verwendung von Standardformaten und Oberflächen (Glas oder Blech) wird die Akzeptanz in der Branche gegenüber Neuentwicklungen deutlich höher einzuschätzen sein. ‚Von außen‘ unterscheiden sich die Paneele mit Vakuum-Dämmsystemen nicht von opaken, transluzenten oder transparenten Paneelen, wie sie schon seit langem Einsatz finden und für deren Verarbeitung weithin Erfahrungen bestehen.

Oft müssen im Paneelzwischenraum aufgrund von Formatbeschränkungen mehrere VIP nebeneinander (stumpf gestoßen) eingebaut werden. Als eine wesentliche Erfahrung aus der Praxis hat sich dabei allerdings gezeigt, dass sich die so entstehenden Wär-

mebrücken zwischen den VIP auf der Oberfläche auch bei opaken Paneelen deutlich abzeichnen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich hier immer etwas mehr Feuchtigkeit absetzt, was - mittel- und langfristig - zu deutlich sichtbaren linienförmigen Verschmutzungen führt.

1.6.1 Aufbau

Die grundsätzlich möglichen Varianten sind in Abb. 4.10 aufgezeigt. Den Kern solcher Paneele bildet entweder nur ein geeignetes, dämmendes Kernmaterial oder ein eigenes Vakuum-Dämmsystem aus evakuiertem Dämmstoff und gasdichter Hülle.²⁰

Das übergeordnete Paneel kann evakuiert werden um sicherzustellen, dass sich keine nennenswerte Menge an Gasen, insbesondere Wasserdampf, im Paneel befindet. Dabei sind die Anforderungen an den Randverbund des Paneels denen von Isolierglaseinheiten vergleichbar.

Für Systeme ohne zweite Hüllenebene hätte im Paneel befindliches bzw. verbleibendes Gas unerwünschte Folgen:

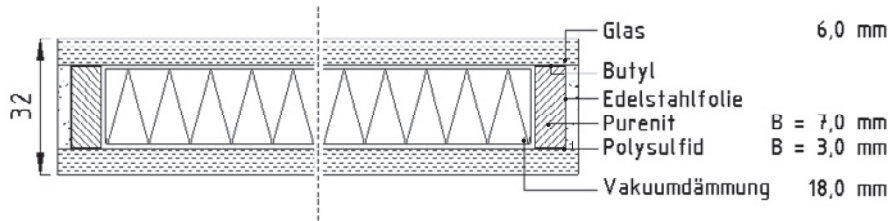
Durch Druckverhältnisänderungen und Temperaturschwankungen kommt es zu einem ‚Pumpeffekt‘, der zu einer mechanischen Belastung des Kernmaterials durch immer wiederkehrende Kontraktionsvorgänge führt. Das Ergebnis können Setzungen (dann verbunden mit lokalen Wärmebrücken und

einer entsprechenden Beeinträchtigung der optischen Erscheinung) bzw. sogar eine schleichende Zerstörung des Kernmaterials (wie z.B. bei transluzenten Aerogelfüllungen²¹, Abb. 4.16 - 4.21) sein. Diese Gefahr besteht insbesondere auf Südseiten, wo die Bauteile von Fassaden hohen Temperaturdifferenzen ausgesetzt sind.

In der Folge kann es zu einer Reduzierung des Wärmedämmvermögens, aber auch zu optischer Beeinträchtigung aufgrund Kondensatbildung durch eingedringenen Wasserdampf kommen und damit zu einer Eintrübung des Systems im Falle von transparenten Varianten.



Abb. 4.12 Innenansicht VIP-Fassade eines
Krankenhauses in Erlenbach (ZAE).²²



1.6.2 Beispiele lichtundurchlässiger Anwendungen

1.6.2.1 ...mit einer Hüllschicht

Vor dem Jahre 2000 wurden am ZAE-Bayern Versuche zum Fall LU.1H.GG durchgeführt.²³ Dabei wurde eine opake pulverförmige Füllung zwischen zwei Glasplatten mit etwas Abstand zum Rand eingebracht. Der gasdichte



Abb. 4.13 Außenansicht VIP-Fassade eines Krankenhauses in Erlenbach (ZAE).

Abschluss wurde durch eine U-förmig den Pulverkern umfassende Hochbarrierefolie ausgebildet, die mit beiden Scheiben durch Klebung verbunden wurde.

Zusätzlich wurde der außenseitig zwischen Folie und Scheiben verbleibende Raum durch eine Versiegelung geschlossen, siehe Abb. 4.11.

Die Herstellung und die dauerhafte Gasdichtigkeit eines derart ausgeführten Randverbundes ist kritisch zu sehen und konnte im genannten Projekt nicht erfolgreich abgeschlossen werden.²⁴

Aus gestalterischer Sicht wäre es zudem erforderlich, eine innenseitige Beschichtung (Bedruckung oder Emaillierung) der Scheiben vorzusehen.

1.6.2.2 ...mit zwei Hüllschichten

Für den Fall LU.2H.BB und LU.2H.BG haben unter anderem die Firmen Boetker Metallbau und Schüco diverse Paneelaufbauten untersucht, die alle vom Brandverhalten der Baustoffklasse A1 zuzuordnen sind.

Abb. 4.14 Aufbau des Glas-Vakuumpaneels des ZAE Bayern für ein Krankenhaus in Erlenbach.

Die ermittelten Werte sind annähernd deckungsgleich und finden sich in Abb. 4.8 und Abb. 4.9.

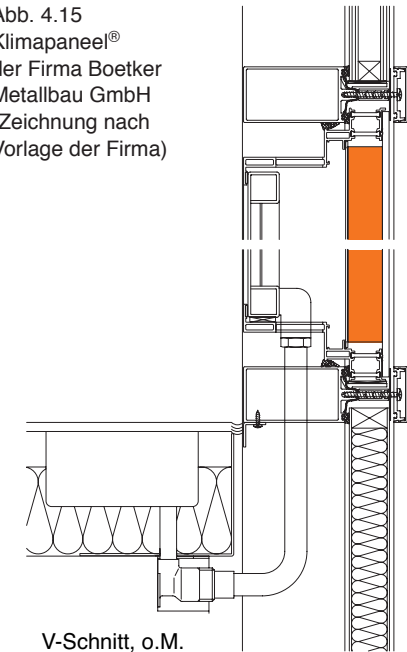
Die Firma Boetker nutzt für ihr Klimapaneel® den im Vergleich zu einem herkömmlichen Paneel gewonnenen Platz zur pfostenbündigen Integration eines Heiz- und Kühlsystems²⁵, siehe Abb. 4.15.

Das in Abb. 4.14 gezeigte Beispiel des ZAE weist einen U-Wert von $0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im Bereich der Paneelmitte auf.

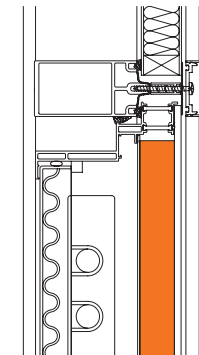
In Abhängigkeit von der Paneelgröße ergeben sich für die verwendete Fassadenkonstruktion der Firma Reynolds und den ausgeführten Paneelrandverbund folgende, deutlich ungünstigere Gesamt-U-Werte, die allerdings für eine Pfosten-/Riegelkonstruktion immer noch beachtlich sind²⁶:

Größe des Brüstungselements [m^2]	U-Wert [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]
0,1	1,4
0,25	0,95
0,65	0,7
1,0 (entspricht hier dem mittleren Wert für das Bauvorhaben)	0,6

Abb. 4.15 Klimapaneel® der Firma Boetker Metallbau GmbH (Zeichnung nach Vorlage der Firma)



V-Schnitt, o.M.



H-Schnitt, o.M.

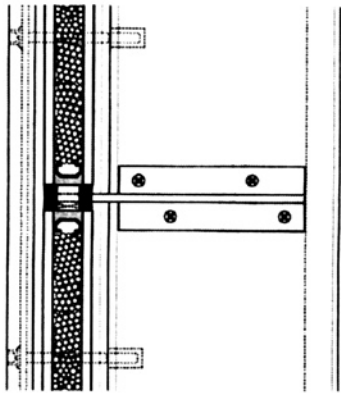


Abb. 4.16
Thomas Herzog: Atelierhaus in Bayern²⁷,
1994, Vertikalschnitt der Fassade, o.M.

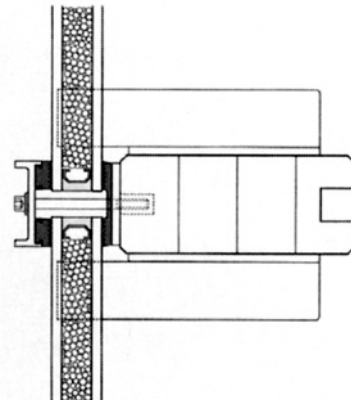


Abb. 4.17
Horizontalschnitt der Fassade, o.M.

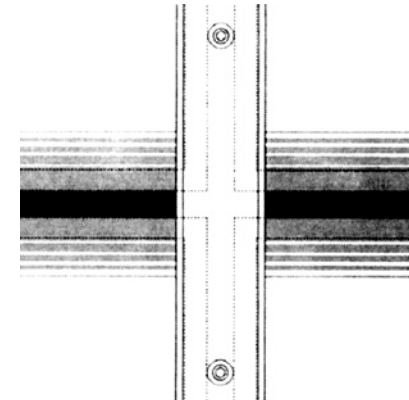


Abb. 4.18
Ansicht Eckausbildung der Fassade, o.M.
Darstellung der verlaufenden, silberfarbigen
Randbedruckung (Siebdruck)

1.6.3 Beispiele lichtdurchlässiger Anwendungen

1.6.3.1 ...mit einer Hüllschicht

1.6.3.1.1 Transluzente Anwendungen

Transluzente Vakuum-Dämmsysteme im Sinne der Fälle LD.1H.GG und LD.2H.GG gemäß Abb. 4.10 sind eine Variante aus der Gruppe der sogenannten Transluzenten Wärmedämmung (TWD).

Für den Fall LD.1H.GG wurde durch Thomas Herzog bereits 1994 eine wesentliche Erstanwendung realisiert:

Für den Einsatz in der Fassade wurden für ein Atelierhaus in Bayern Glaspaneele mit Aerogel-Granulat-Füllung in Zusammenarbeit mit dem Institut für Solare Energiesysteme (ISE) entwickelt und

eingebaut, siehe Abb. 4.19, 4.20 und 4.21. Hierzu schrieb Thomas Herzog²⁸:

„Unter Verwendung derartiger Komponenten lässt sich Tageslicht weitgehend blendungsfrei in größere Raumtiefen einbringen und gleichmäßig verteilen. Helligkeitsdifferenzen und Leuchtdichtekontraste werden stark reduziert, was als Chance für interessante und energetisch oft sehr günstige Raumkonzepte erkannt wird.(...) Die gegenüber normalem Isolierglas stark verminderte Kälteabstrahlung an der Innenseite führt im Winter zu erhöhter Behaglichkeit in den Räumen. Ohne Komfortverlust kann außerdem die Raumlufttemperatur abgesenkt werden.“

Wichtige Merkmale der Aerogelfassade sind die guten Werte im Bereich der Lichttransmission und die hohe Wärmedämmung. Positiv

wirkt sich auch die Lichtbrechung aus. Die maximale Transmission ist nur wenig vom Einstrahlwinkel abhängig, dadurch verteilt sich das Licht tagsüber homogen im Innenraum.“

Der mit Aerogel-Granulat gefüllte und evakuierte Scheibenzwischenraum beträgt 16 mm, womit ein Lichttransmissionsgrad von 45% erreicht wird.

Die horizontalen Fugen sind als ‚fliegender Stoß‘ mit dauerelastischer Dichtung ausgeführt (siehe Abb. 4.16), die vertikalen Fugen wurden mit einer Alu-Pressleiste abgedeckt (siehe Abb. 4.17). Die Paneelränder sind mit einer verlaufenden, silberfarbigen Randbedruckung versehen, um den Paneelrandverbund zu kaschieren (siehe Abb. 4.18).

Mit der Fassade wurde ein U-Wert von 1,0 W/(m²K) erreicht.





Abb. 4.19 (links)
Ansicht bei Tage

Abb. 4.20 (rechts)
Ansicht am Abend



Abb. 4.21
Innenansicht

Heute wird das von der amerikanischen Firma Cabot hergestellte Aerogelgranulat nanogel® (vergl. Teil 3 Abschnitt 2.2.3) als transluzenter Dämmstoff in diversen Produkten eingesetzt, so zum Beispiel in Polycarbonat-Stegdoppelplatten²⁹ oder in PET-Hohlkammerplatten³⁰.

Die Firma Okalux bietet eine Variante, bei der das Granulat ähnlich der hier vorgestellten Anwendung von Thomas Herzog in den Scheibenzwischenraum einer Isolierverglasung eingefüllt ist, siehe Abb. 4.68.

Der Hersteller beschränkt den Einsatz seines Produktes³¹ Okagel® derzeit allerdings auf die Anwendung in Dachschrägen von maximal 45°, da offensichtlich Bedenken bezüglich möglicher Setzungserscheinungen noch nicht abschließend ausgeräumt werden konnten. Alle zuletzt beschriebenen aktuellen Varianten beschränken sich auf den Einsatz von Aerogelen unter

Atmosphärendruck (strenggenommen gehören sie also nicht in die vorliegende Arbeit).

Während ein Evakuieren der Varianten mit Kunststoffhüllen aufgrund zu hoher Permeationsraten von Polycarbonat bzw. Polyester sicher ohne weitere Maßnahmen keine langanhaltende Wirkung hätte, wäre dies für das Okalux-Produkt durchaus denkbar. Hierdurch ließe sich - wenn die komplexen Fragen geklärt sind, die mit der Herstellung verbunden sind - dessen U-Wert nochmals deutlich senken.

Desweiteren beschäftigt sich derzeit das EU-Forschungsvorhaben HILIT mit einer Wärmeschutzverglasung mit einem Kern aus transparentem, monolithischem,

evakuierten Aerogel. Der Prototyp (Abb. 4.22) verfügt bei einem 15 mm Kern über einen U_g -Wert von 0,66 W/(m²K) und einen herausragenden g-Wert von etwas mehr als 73%.³²

1.6.3.2 ...mit zwei Hüllschichten

Solche Anwendungen sind bisher nicht bekannt.

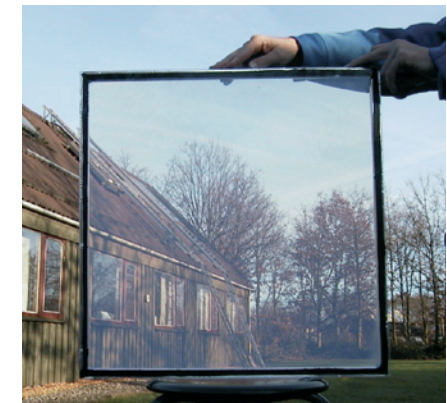


Abb. 4.22 HILIT-Prototyp (Bild: BYG.DTU - Department of Civil Engineering)

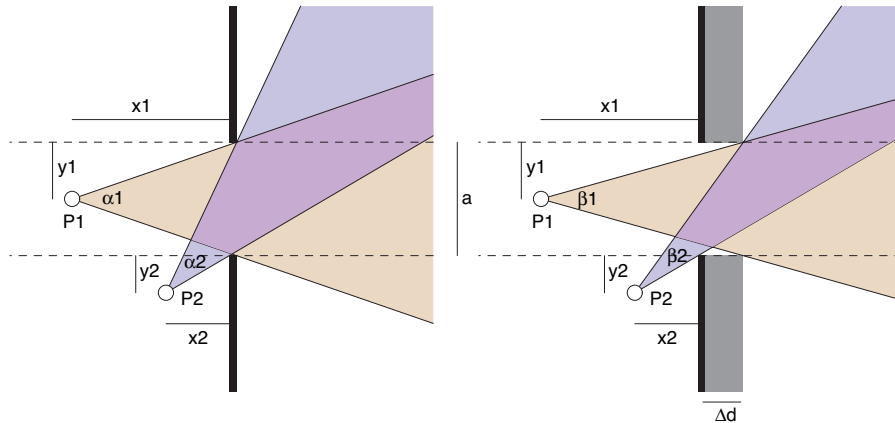


Abb. 4.23
Einfluss der Wandstärke auf den Sichtwinkel

1.7 Anmerkungen zu Auswirkungen auf die Wandstärke

Im Baubereich gilt die potenziell deutliche Reduzierung der notwendigen Wandstärken als Hauptmotiv für eine Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen.

Welche Aspekte werden hiervon berührt?

1.7.1 Wirtschaftlichkeit

Offensichtlich bedingen hohe Außenwandstärken einen Verlust von nutzbarer Grundfläche, wenn man von maximal zulässigen Gebäudeaußenmaßen ausgeht, was insbesondere in teuren Lagen die Regel ist.

Der Effekt nimmt mit der Anzahl der betroffenen Geschosse und proportional zum Verhältnis Außenfläche/Grundfläche zu.

1.7.2 Wahrnehmung

Nichttragende Außenwände könnten durch den Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen (wieder) so ausgebildet werden, dass sie auch als solche ‚gelesen‘ werden können und nicht aufgrund immens hoher Dämmstoffstärken den Eindruck hohen Tragvermögens vermitteln.

Die Stärke eines opaken Außenwandaufbaus lässt sich in der Regel nur an Öffnungen ablesen, wo die Wandstärke über die Leibung in Erscheinung tritt. Hier hat die Lage des Fensters Einfluss auf die Wahrnehmung, vor allem, wenn es außermittig in der Leibung platziert ist.

Unabhängig davon ergeben sich jedoch Konsequenzen für die möglichen Sichtbeziehungen zwischen innen und außen sowie insbesondere für den Strahlungseintrag und damit für die Belichtung.

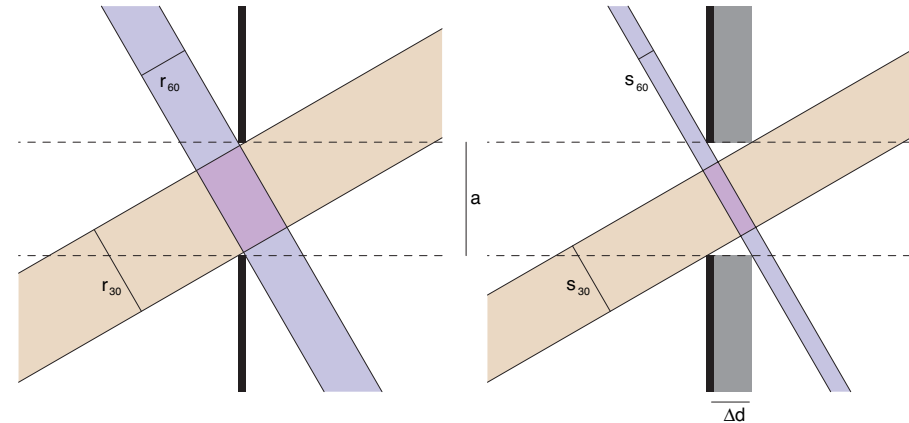


Abb. 4.24
Einfluss der Wandstärke auf den solaren Strahlungseintrag

1.7.3 Sichtbeziehungen Innen-Außen

Abb. 4.23 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Standpunkt und Wandstärke im Hinblick auf einen maximalen Sichtwinkel, den eine Öffnung zulässt. Dieser Effekt ist gleichermaßen von außen nach innen wie umgekehrt wirksam.

Allgemein lässt sich festhalten, dass die Auswirkungen mit zunehmendem y_2 gemäß Abb. 4.23 und geringerem Abstand zur Wand (x_2 entsprechend Abb. 4.23) zunehmen.

Für Positionen gemäß P1 als einem auf die Öffnung bezogenen frontalen Standpunkt verliert die Wandstärke für die räumliche Wahrnehmung mit zunehmendem x_1 an Bedeutung.

1.7.4 Belichtung und Strahlungseintrag

Auch der Umfang des Parallelstrahlungsdurchgangs durch eine Öffnung im Fall von Direktstrahlung ist abhängig von der Wandstärke, wenn die Strahlung nicht senkrecht auf die Öffnung trifft, wie Abb. 4.24 für zwei beispielhafte Winkel (30° und 60°) zeigt.

Dies hat insbesondere Auswirkungen auf den zeitlichen Verlauf, die Dauer und damit auf die Menge des solaren Strahlungseintrags durch eine Öffnung und also in der Konsequenz für die Belichtungssituation des betroffenen Raums.

Abb. 4.25 erläutert den trigonometrischen Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Maximalwinkel für den Strahlungsdurchlass und der Wandstärke für rechtwinklige Leibungen.

Der beschriebene Verschattungseffekt kann allerdings von Vorteil

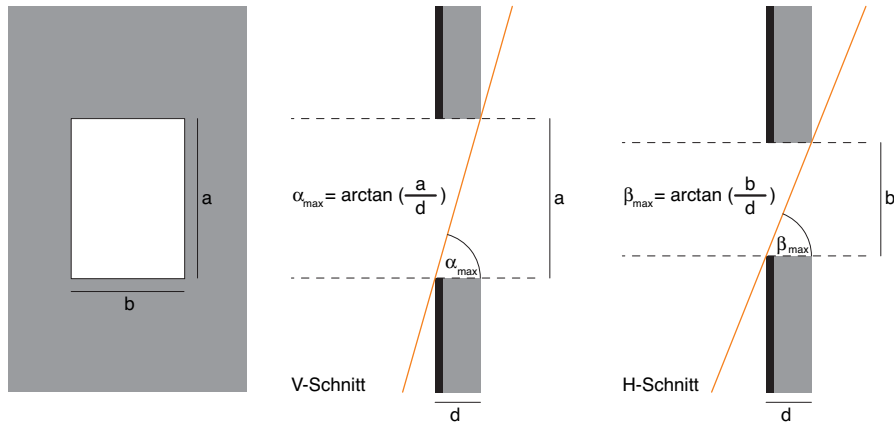


Abb. 4.25 Horizontaler und vertikaler Maximalwinkel für Strahlungsdurchlass in Abhängigkeit von a,b und d

sein, zum Beispiel für die Ausblendung der hochstehenden Sommer- sonne auf der Südseite.

1.7.5 Einfluss der Leibungsbildung

Die beschriebenen Effekte können durch eine angepasste Leibungsbildung teilweise kompensiert bzw. relativiert werden, solche Beispiele zeigt Abb. 4.26.

Insbesondere haben die Leibungsoberflächen (Reflexionsvermögen, Farbe) Einfluss auf die Lichtqualität.

Die Abbildungen 4.23, 4.24 und Abb. 4.26 haben jeweils in der Interpretation als Grundriss- und Schnittdarstellung Gültigkeit.

1.7.6 Konstruktiver Aufwand

Der unter Umständen große konstruktive Aufwand, der sich aus einer Erhöhung der Wandstärke

ergeben kann, lässt sich nicht auf einfache Weise systematisch erfassen. Zum Beispiel können sich Momente aus der Befestigung einer Außenschale ergeben, die aufgenommen werden müssen.

Ebenso kann eine konsequente Führung der Dämmungsebene insbesondere im Bereich von Eckanschlüssen deutlich komplexer werden.

2 Betrachtete Beispielanwendungen - Übersicht

Abb. 4.27 zeigt der Typologie Abb. 4.1 zugeordnete beispielhafte Anwendungen von lichtundurchlässigen und lichtdurchlässigen Vakuum-Dämmsystemen in der Gebäudehülle in einer Übersicht.

Hierbei handelt es sich um eine - unvollständige - Sammlung von ausgewählten Beispielen, teilweise bereits umgesetzt und untersucht

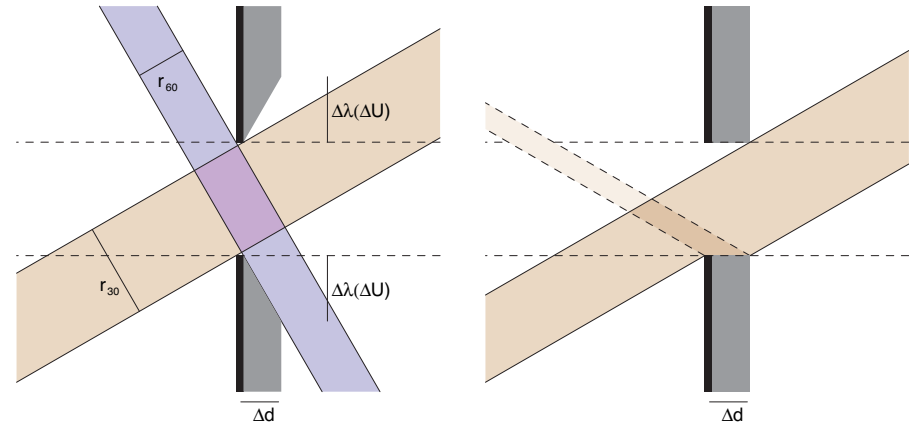


Abb. 4.26 Möglicher Einfluss der Art der Leibungsbildung (Beispiele)

(Piktogramme mit dickerem Rahmen), teilweise in der vorliegenden Arbeit genauer besprochen.

Durch diese Zusammenstellung wird deutlich, dass bisher nur ein Teil an möglichen Einsatzgebieten von Vakuum-Dämmsystemen in der Gebäudehülle umgesetzt und untersucht worden ist.

Die Darstellung ist so aufgebaut, dass sich weitere Beispiele einfügen ließen und den diskutierten gegenübergestellt werden könnten.

Auch sind die dargestellten Anwendungsbeispiele in einem Abstraktionsgrad dargestellt, der verschiedene konstruktive Umsetzungen zulässt und daher jeweils eine große Bandbreite an konkreten Anwendungsfällen subsummiert.

Soweit hier Erfahrungen vorliegen bzw. soweit Vorschläge im Rahmen der vorliegenden Arbeit ent-

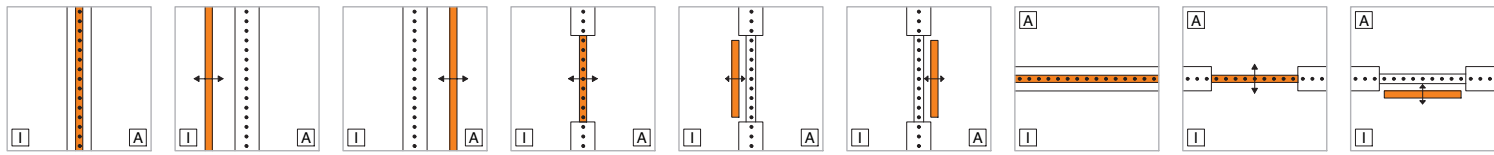
wickelt wurden, finden sich diese für Beispielanwendungen lichtundurchlässiger Systeme unter den entsprechenden Fallnummern, bzw. in einer der Typologie Abb. 4.27 entsprechenden Gliederung im Abschnitt 3 dieses Teiles.

Es wurde nicht grundsätzlich unterschieden, ob Vakuum-Dämmsysteme nur lokal eingesetzt werden, oder vollflächig bzw. ausschließlich. Daher finden sich spezielle Sonderlösungen für bestimmte Anwendungsfälle (zum Beispiel Rollladenkastendämmungen) an dem der Zuordnung gemäß Abb. 4.1 entsprechenden Platz.

Durch die Dokumentation der bereits ausgeführten und untersuchten Beispiele wurde der Versuch unternommen, jeweils die technisch und gestalterisch überzeugendsten Anwendungen anzuführen, soweit überhaupt eine Auswahl möglich war.³³

Lichtundurchlässige Vakuum-Dämmsysteme in der Gebäudehülle

Prinzipdarstellung



Fall-Nummer

	LU.F.oÖ.1	LU.F.oÖ.2	LU.F.oÖ.3	LU.F.mÖ.1	LU.F.mÖ.2	LU.F.mÖ.3	LU.D.oÖ.1	LU.D.mÖ.1	LU.D.mÖ.2
Beispiel 1									
Beispiel 2									
Beispiel 3									
Beispiel 4									
Beispiel 5									
Beispiel 6									
Beispiel 7									
siehe Abschnitt...	3.1.1.1	3.1.1.2	3.1.1.3	3.1.2.1.1	3.1.2.1.2	3.1.2.1.3	3.2.1.1	3.2.2.1.1	3.2.2.1.2

Abb. 4.27 Übersicht beispielhafter Anwendungen mit Abschnittsverweisen (i.d.R. im Vertikalschnitt soweit geeignet, sonst im Horizontalschnitt)

Lichtdurchlässige Vakuum-Dämmsysteme in der Gebäudehülle



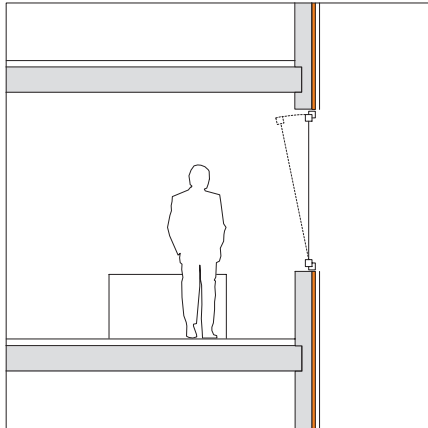


Abb. 4.28
(Fall LU.F.o.Ö.1 gemäß Abb. 4.1)
Außenseitig gedämmte Wand

3 Zur Anwendung lichtundurchlässiger Systeme

3.1 Anwendungsbereich Fassade (LU.F...)

3.1.1 Gebäudehüllenschnitt ohne Öffnung (LU.F.o.Ö...)

3.1.1.1 Einbausituation: nicht bewegbar (Fall LU.F.o.Ö.1)

Abb. 4.28 zeigt den Fall einer aussenseitig gedämmten Wand. Wenn es sich um eine nicht hinterlüftete Ausführung handelt und auf die Dämmung nur noch eine dünne, den Wetterschutz gewährleistende Schicht aufgebracht wird (zum Beispiel ein Außenputz), spricht man von einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS).

Dieser Aufbau stellt in Deutschland den Großteil aller ausgeführten

Außenwände dar. So ist der in den Anfängen der Beschäftigung mit VIP oft unternommene Versuch zu deuten, in dieser Schichtenfolge die sonst übliche Dämmung (meist Polystyrol oder Mineralwolle) durch Vakuum-Dämmsysteme zu ersetzen.

3.1.1.1.1 Beispiel 1: Giebfassadensanierung in Nürnberg (ZAE)

Eine der ersten Versuchsanwendungen hierzu wurde durch das ZAE-Bayern anlässlich der Sanierung einer Giebfassade eines kleinen Hauses in Nürnberg mit sehr geringem Dachüberstand unternommen, siehe Abb. 4.29, 4.30, 4.31 und 4.32. Die Situation entspricht vom Wandaufbau her Fall LU.1L.4 gemäß Abb. 4.7.

Mit einer zusätzlichen Polystyrolschicht geschützte VIP sind mittels eines PVC-Schienen-systems befestigt. Dabei wurde nach Angaben des ZAE der U-Wert der Giebelwand von ca. $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verbessert.³⁴

Um die Wärmebrückenwirkung im Bereich der PVC-Schienen besser beurteilen zu können, wurde durch den Verfasser eine Isothermendarstellung des Wandaufbaus erzeugt³⁵, die den Temperaturverlauf im Bereich der VIP-Stöße (Fugenbreite 2-4 mm) verdeutlicht:

Im Putzbereich über der PVC-Schiene liegt die Oberflächentem-

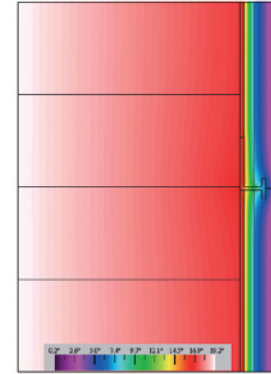
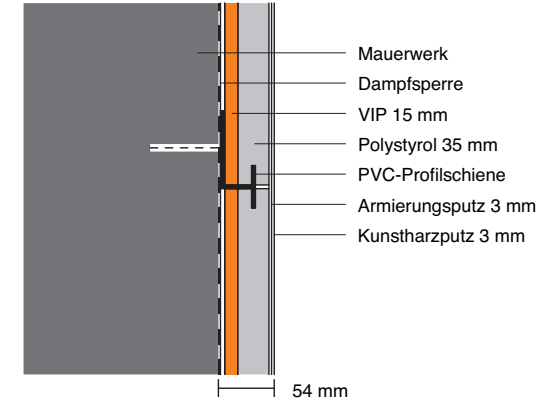


Abb. 4.29 und 4.30

Isothermendarstellung der Wandkonstruktion (Thermische Simulation des Verfassers) und Wandaufbau nach Angaben des ZAE (V-Schnitt, o.M.). Die PVC-Halteschienen stellen vernachlässigbare Wärmebrücken dar.



peratur nur um ca. $0,1 \text{ K}$ über der Regelschnittstelle, die Wärmebrücke kann somit als unkritisch eingestuft werden. Dies gilt auch für den Fall von defekten (also belüfteten) VIP. Dieses Ergebnis deckt sich mit den vom ZAE durchgeführte hygrische Messungen auf der Innenseite. Durch die Simulation konnte außerdem der vom ZAE angegebene U-Wert bestätigt werden,

ebenso wie durch die nach Fertigstellung im Jahresrhythmus erfolgten Thermographiemessungen.

Die wichtigsten Erfahrungen aus diesem Vorhaben sind:

- Die Handhabung ungeschützter VIP auf der Baustelle ist sehr kritisch, auch wegen der nahezu ausgeschlossenen Nachvollzieh-



Abb. 4.31

Thermographie-Aufnahme nach einem Jahr.³⁶ Wärmebrücken sind kaum sichtbar.



Abb. 4.32

...während der Montage: Die VIP werden stumpf (mit minimaler Fuge) gestossen.

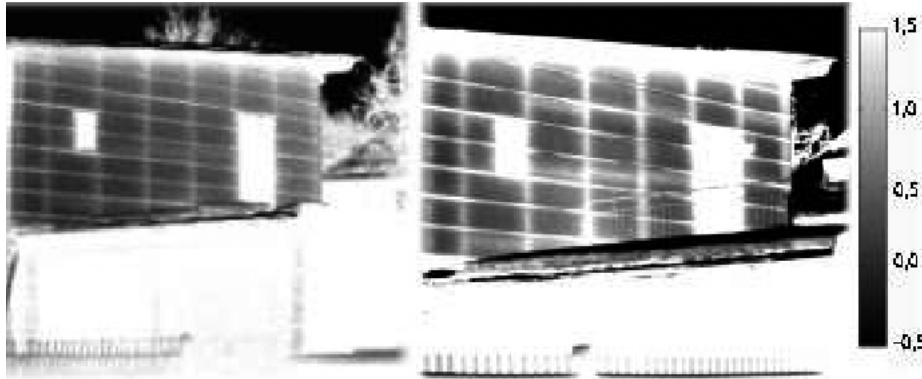


Abb. 4.33
Thermographie-Aufnahmen des Zweifamilienhauses des Architekturbüro Lichtblau/ München aus den Jahren 2002 (links) und 2003. Die Wärmebrücken zeichnen sich deutlich ab.

barkeit der Ursache bei Versagen und der damit verbundenen Gewährleistungsfrage.

- Die VIP sollten im Nachhinein austauschbar sein.
- Unterschiedliche Zuschnitte und Formate der VIP (hier auch



Abb. 4.34
...während der Montage.

Dreiecke) stellen einen sehr hohen Aufwand dar.

3.1.1.1.2 Beispiel 2: Neubau eines vollständig mit VIP gedämmten Wohnhauses

Bei diesem Demonstrationsvorhaben (Abb. 4.33, 4.34, Abb 4.35, 4.36) stand die leichte Zugänglichkeit und Austauschbarkeit der VIP im Vordergrund.³⁷

Auf einer Massivholzkonstruktion, die ebenso dem Fall LU.1L.4 gemäß Abb. 4.7 zuzuordnen ist, werden VIP mit einem Regelformat von 100 cm x 105 cm x 4 cm verlegt, die beidseitig durch Weichfaserplatten geschützt und durch eine relativ breite Holzlattung getrennt werden, über die die Befestigung der außenseitigen Schichten erfolgt.

Die Stöße zwischen den VIP und dieser Lattung werden durch Komprimband weitgehend geschlossen.

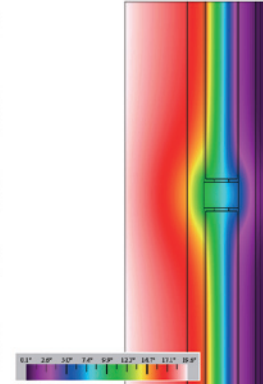
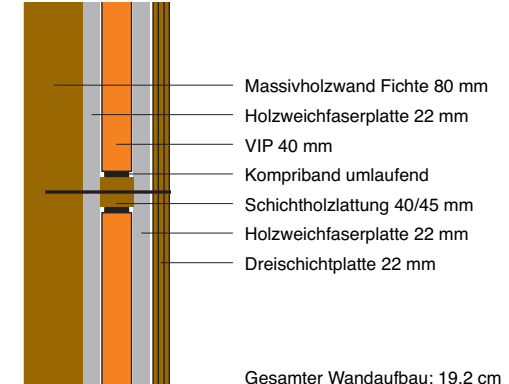


Abb. 4.35 und 4.36
Auch der Isothermenverlauf zeigt die starke Wärmebrücke deutlich (Thermische Simulation des Verfassers). Rechts der Wandaufbau nach Angaben des ZAE-Bayern (H-Schnitt, o.M.).



Die Schichtholzlattung bildet eine relativ starke Wärmebrücke, wodurch der in der Fläche theoretisch erreichbare U-Wert von 0,10 W/(m²K) auf 0,14 W/(m²K) abgewertet wird. Dieser gesamtflächenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ist in Anbetracht einer Wandstärke von 19 cm immer noch als sehr günstig einzuschätzen.

Simulationen und Messungen des ZAE konnten zeigen, dass auch diese Konstruktion bauphysikalisch einwandfrei ist, das heißt, die Wärmebrücken führen nicht zu kritischer Feuchteanreicherung oder gar Tauwasserausfall.

Um die verschiedenen Konstruktionen besser vergleichen zu können, wurde auch für diesen Aufbau durch den Verfasser eine thermische Simulation durchgeführt, die den vom ZAE ermittelten U-Wert bestätigt und den Isothermenverlauf durch den Wandaufbau aufzeigt (Abb 4.35).

Durch die beidseitigen Weichfaserplatten und die guten Dämmeigenschaften der Dickholzwand wird der negative Effekt des großen Abstandes zwischen den VIP abgemindert.

Die wichtigsten Erfahrungen aus diesem Vorhaben sind:

- Das Flächeneinsparpotenzial gegenüber konventioneller Dämmung ist bei durchgängiger Verwendung von VIP groß: Für die Beispielanwendung belaufen sich diese auf 15 m² bezogen auf eine Gesamthauptnutzfläche von 292 m² (ca. 5%).
- Die Maßhaltigkeit der VIP ist aufgrund der hohen Anforderungen bezüglich der Wärmebrückenproblematik kritisch. Nachträgliche Anpassungen sind nicht möglich.
- Brandschutzklassifizierung und Zulassungen liegen bisher nicht vor.

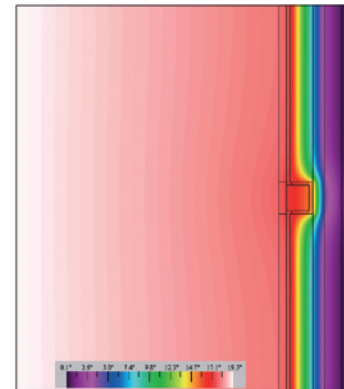
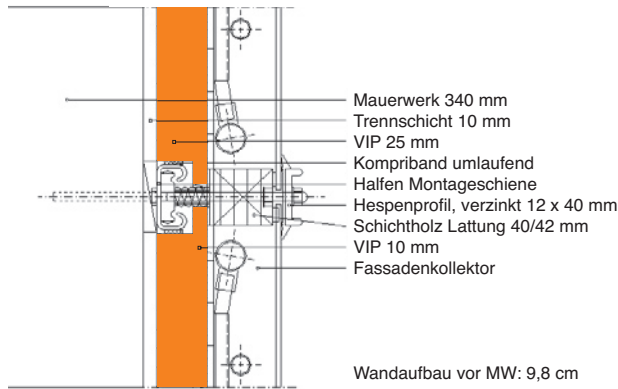
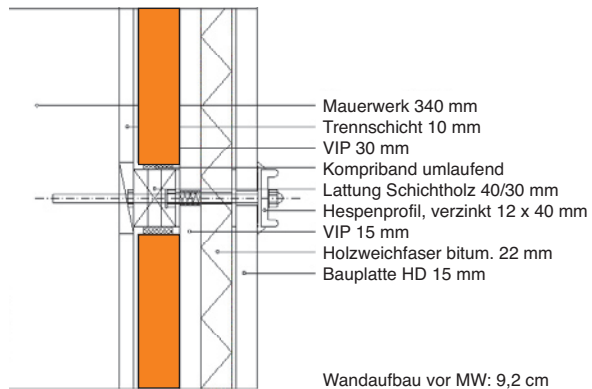


Abb. 4.37 und Abb. 4.38

Links: Wandaufbau Nordfassade mit 2-lagig eingebauten VIP. Rechts: Wandaufbau Südfassade mit integriertem Fassadenkollektor. Beide Vertikalschnitte (o.M.) nach Angaben des ZAE-Bayern. Planung: Architekturbüro Lichtblau.³⁸

Abb. 4.39

Der Isothermenverlauf (Nordfassade) zeigt die Bedeutung der zweiten VIP-Lage.

3.1.1.1.3 Beispiel 3: Sanierung eines Reihenmittelhauses mit austauschbaren VIP

Für diese Anwendung kam ein Wandaufbau zum Einsatz, bei dem VIP zur Reduzierung der Wärmebrückenwirkung im Bereich der Befestigungen zweilagig eingebaut wurden (Abb. 4.37 bis 4.40).

Rekurierend auf Abb 4.7 entspricht diese Anwendung Fall LU.ML.4.

Mit dem Wandaufbau konnte laut ZAE-Bayern ein U-Wert von 0,155 W/(m²K) erreicht werden³⁹, der durch die auch hier durchgeführte thermische Simulation mit akzeptabler Abweichung (hier 0,163 W/(m²K)) bestätigt werden kann.

Abb. 4.39 zeigt deutlich die positiven Auswirkungen der zweiten VIP-Lage, an deren äußerer Seite kaum noch eine Störung im Isothermenverlauf ausgemacht werden kann.

Auf der Südseite dieses Hauses wurde die Dämmkonstruktion der Nordseite durch die Ergänzung eines Absorbers so modifiziert, dass ein Fassadenkollektor entstand. Das ZAE hat für diesen Aufbau (Abb. 4.38) einen U-Wert von 0,19 W/(m²K) ermittelt.⁴⁰

Dieses Vorhaben führte zu folgenden Erfahrungen:

- Der Wandstärkeunterschied zu den unsanierten Nachbarhäusern konnte trotz einer gravierenden Verbesserung des Wärmeschutzes auf ein Minimum reduziert werden.
- Der vorhandene Dachüberstand musste nicht angepasst werden.
- Der Einsatz von VIP im Bereich von Solarkollektoren ist durch die Hitzeentwicklung mit großen Problemen behaftet.
- Durch mehrlagige Verwendung von VIP wird der Kostenaufwand bezogen auf die Dämmstärke deutlich erhöht, neben dem

Materialmehrbedarf durch einen größeren Montageaufwand, obwohl gleichzeitig die Anforderungen an die Passgenauigkeit leicht sinken.

3.1.1.1.4 Weitere Anwendungen und Vorschläge

Abb. 4.41 zeigt die Anwendung von VIP in Pfosten-Riegelfassaden, die als Sonderfall ausführlich in Abschnitt 1.6 dieses Teils beschrieben ist.⁴¹

Für Innendämmungen, die auch dieser Fallnummer zugeordnet werden können, sind zwei Pilotanwendungen in einem Reihenhaus aus den 1930-er Jahren bekannt:⁴²

Neben einem einfachen Aufbau mit innenseitig auf ein 30 cm-Ziegelmauerwerk aufgeklebten und dann verputzten VIP gibt es eine Variante mit einer davor angeordneten freistehenden 4 cm dicken Vormauerung, wodurch die Wand ohne



Abb. 4.40

Während der Montage der Nordfassade.

Einschränkungen zum Beispiel für Befestigungen genutzt werden kann.

Beide Konstruktionen erreichen U-Werte um $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Zum Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen in opaken, sandwichartigen Konstruktionen (Abb. 4.43) siehe Abschnitt 1.5 und Fall LU.1L.6 gemäß Abb. 4.7. Besonders sei hier auf die diese Anwendung prinzipbedingt per se repräsentierenden Edelstahl-Paneele hingewiesen, wie sie in Teil 3, Abschnitt 2.3.4.2 beschrieben sind.

Abb. 4.45 skizziert ein zugstabilisiertes, opakes Wandsystem, das einem Gedanken folgt, dem sich Teil 6 dieser Arbeit widmet.

Die Abb. 4.42 zeigt eine Anwendung opaker, bisher so nicht verfügbarer Vakuumdämmungsmatten, wie sie in Teil 5 beschrieben werden.

Abb. 4.44 steht stellvertretend für lokal begrenzte Anwendungen von Vakuum-Dämmsystemen für Bereiche in der Gebäudehülle mit besonderem Platzmangel, sei es prinzipbedingt wie zum Beispiel bei außenbündig eingebauten Rolladenkästen oder aus anderen Gründen (beispielsweise in speziellen Bestandssituationen).⁴³

Hierzu zählen auch Deckenplatten-dämmungen in der Fassadenebene im Bereich außenliegender Stützen. Diese Stellen wirken prinzipiell und

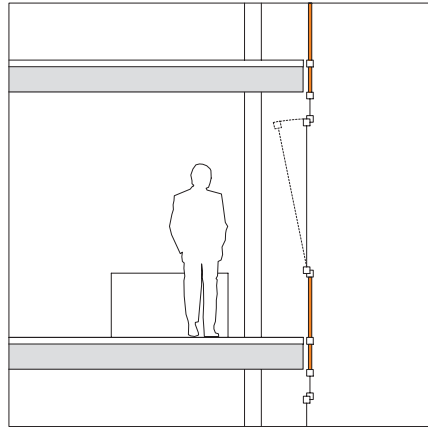


Abb. 4.41
(Fall LU.F.oÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Pfosten-Riegel-Fassaden,
feststehende Elemente

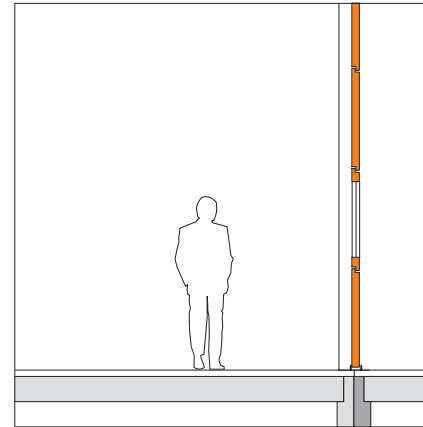


Abb. 4.43
(Fall LU.F.oÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Außenwandsystem in Sandwichbauweise

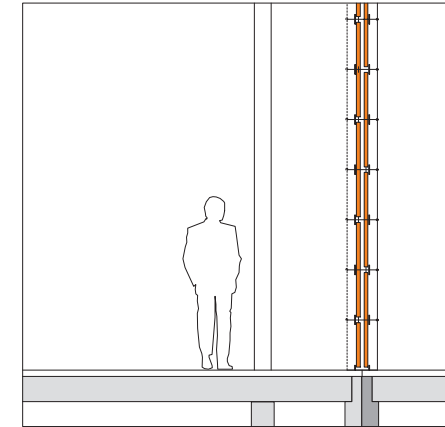


Abb. 4.45
(Fall LU.F.oÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Wandsystem (versetzte Paneele)

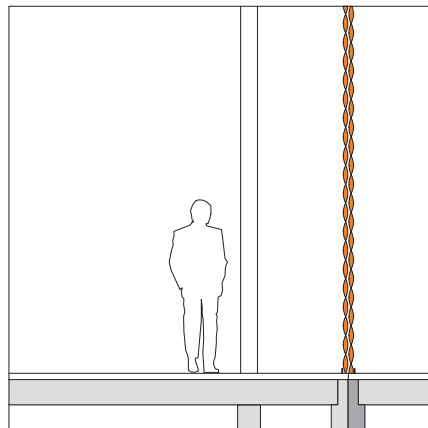


Abb. 4.42
(Fall LU.F.oÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Wandsystem (Dämmungsmatten)

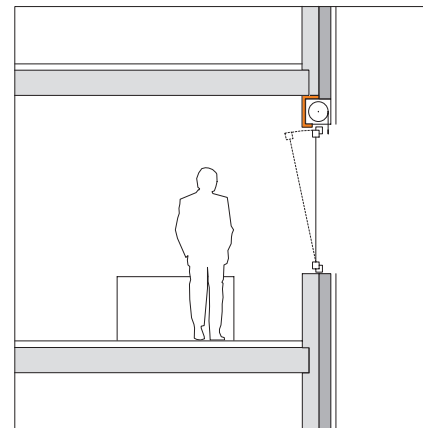


Abb. 4.44
(Fall LU.F.oÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Beispiel für Sonderstelle (Rolladenkasten)

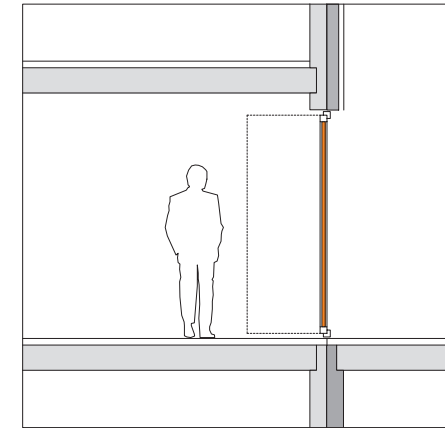


Abb. 4.46
(Fall LU.F.mÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Außentüre

unvermeidbar als Wärmebrücken, wenn man nicht jede Stütze vollständig in die Dämmung einschließen will.

Ein anderes Beispiel ist der Bereich der Fensterleibungen, für den es - wie für die oben genannte Rolla-

denkastensituation - bereits ausgeführte Beispiele gibt.⁴⁴

Weiterhin sind dem Fall LU.F.oÖ.1 derzeit laufende Untersuchungen zum Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen in Betonfertigteilen zuzuordnen.⁴⁵

3.1.1.2 Einbausituation: bewegbar

3.1.1.2.1 ...additiv-innenseitig (Fall LU.F.oÖ.2)

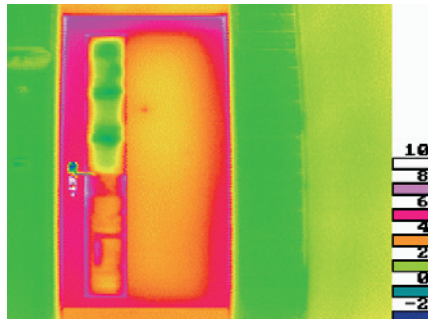
Diese Variante (ohne Abbildung) ist zum Beispiel für saisonalen Wär-

meschutz oder Bauten vorstellbar, die nur temporär genutzt werden sollen, oder auch für den vorübergehenden Gebrauch von Gebäuden, die eigentlich für eine andere Nutzung ausgelegt sind.

3.1.1.2.2 ...additiv-außenseitig (Fall LU.F.oÖ.3)

Neben möglichen Anwendungen für ausschließlich geschlossene Bereiche sind hierzu Varianten zu zählen, bei denen der temporäre Wärmeschutz die gesamte Fasadensfläche umfasst, die dabei ihrerseits partiell Öffnungen aufweisen könnten.

Neben Systemen, die auf den Tag-/ Nachtzyklus ausgelegt sind, kommen für diesen Anwendungsfall je nach lokalen klimatischen Gegebenheiten auch für einen saisonalen Rhythmus entwickelte Systeme in Betracht. Interessant könnte dieser Fall auch als Option für mobile, modular aufgebaute Unterkünfte sein, wie sie beispielsweise in Katastrophenfällen in sehr kalter Umgebung von Nutzen wären (alternativ LU.F.oÖ.2).



3.1.2 Gebäudehüllenauschnitt mit Öffnung (LU.F.mÖ...)

3.1.2.1 Einbausituation: bewegbar

3.1.2.1.1 ...identisch-ebengleich (Fall LU.F.mÖ.1)

Die sicher naheliegendste Anwendung dieser Fallnummer stellt die den Raumabschluss nach außen bildende Haus- oder Wohnungstüre dar (Abb. 4.46 und 4.47), für die bereits eine Reihe von Herstellern Prototypen anbieten (siehe hierzu auch Abb. 4.5 und 4.6).⁴⁶

Zu dieser Fallgruppe sind allerdings auch alle Arten von Lüftungselementen zu zählen, die das ganze Spektrum möglicher Öffnungsvarianten widerspiegeln können. Als Beispiele hierfür mögen die folgenden Abbildungen dienen:

- Abb. 4.50: Drehflügel
- Abb. 4.51: Klappflügel
- Abb. 4.52: Horizontallamellen⁴⁷
- Abb. 4.54: Vertikal-Schiebeelement⁴⁸

Abb. 4.47 Thermographie-Aufnahme⁴⁹ einer Außentüre mit VIP-Dämmung bei ca. 1 °C. Die große VIP-gedämmte Fläche rechts des Fensters erreicht einen U-Wert von ca. 0,3 W/(m²K).

- 1 Aluminiumkanal
- 2 Rahmen 50/15 mm
- 3 Lüftungselement
- 4 Prallplatte ESG
- 5 Lüftungsflügel:
Sperrholz 15 mm
Luftschicht 9 mm
Sperrholz 6 mm
Rahmen 60 mm
PU-Dämmung
Sperrholz 10 mm
- 6 Dreifachverglasung

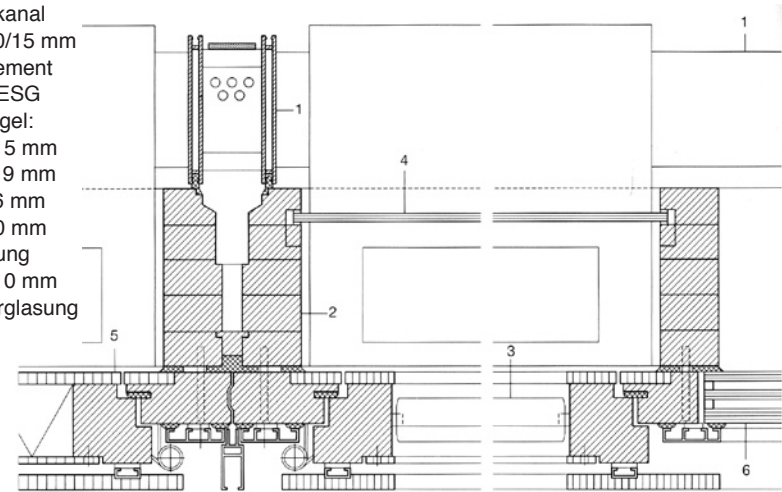


Abb. 4.48 (oben) und Abb. 4.49 Plan (o. M.) und Innenansicht zeigen die in die Fassade integrierten Lüftungsklappen der ZVK Wiesbaden von Herzog+Partner. In der Zeichnung sind dazu zwei Horizontalschnitte dargestellt, einmal durch den ungestörten Regelquerschnitt (links, hier wäre auch der Einsatz von VIP gut vorstellbar), zum anderen durch die zusätzlichen Kunststoff-Lufteinlässe.



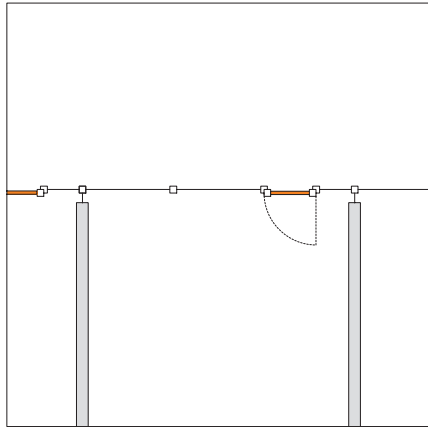


Abb. 4.50
(Fall LU.F.mÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Lüftungselement, drehbar

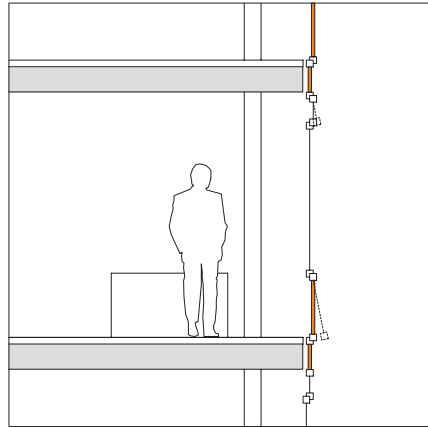


Abb. 4.51
(Fall LU.F.mÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Lüftungselemente, klappbar

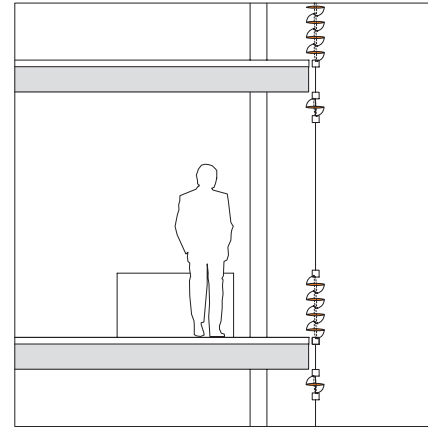


Abb. 4.52
(Fall LU.F.mÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Wärmeschutz-Lamellen als Lüftungselemente

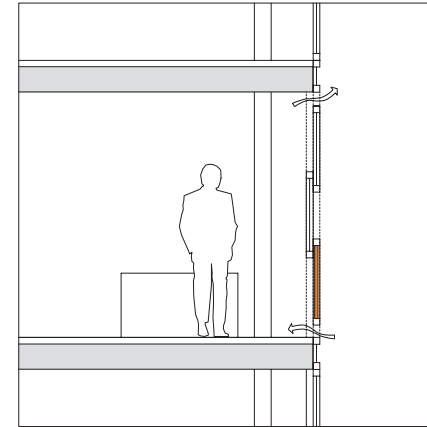


Abb. 4.54
(Fall LU.F.mÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Brüstungselement in Vertikalschiebefenstern

Diese Elemente sind besonders dann sinnvoll, wenn die Funktion der Außenluftversorgung aus bestimmten Gründen von den anderen Funktionen des Fensters getrennt werden soll, zum Beispiel um den Lüftungsquerschnitt und die Anordnung der Öffnung im Hinblick auf Luftströmungen zu optimieren oder um die Rahmensituation von hochwärmedämmenden Mehrscheibenverglasungen mit hohem Gewicht zu entlasten.

Ein wichtiges Beispiel für eine sehr differenzierte Anwendung solcher Elemente stellt der Bau der ZVK Wiesbaden von Herzog+Partner dar, siehe Abb. 4.48 und 4.49.⁵⁰

Das an dieser Stelle mit PU-Hartschaum ausgeführte Projekt hätte aus Sicht des Verfassers alternativ unter Verwendung von Vakuum-Dämmsystemen umgesetzt werden können, wodurch der U-Wert der

Lüftungselemente noch weiter hätte reduziert werden können.

3.1.2.1.2 ...additiv-innenseitig (Fall LU.F.mÖ.2)

Das bewegbare Dämmelement kann auch auf der Innenseite einer Öffnung dem temporären Wärmeschutz dienen, sei es beispielsweise als horizontaler oder vertikaler Schiebeladen vor einer Fensteröffnung oder als innenliegender Drehflügel (Abb. 4.53).

Einer praktischen Umsetzung dieser Vorschläge stehen allerdings erhebliche konstruktive und bauphysikalische Probleme im Wege, zum Beispiel die Befestigung der äußeren Fassadenschale in diesem Bereich oder die Gefahr von Tauwasserausfall zwischen Dämmelement und Außenschichten, da die Vakuum-Dämmelemente zwar per se dampfdicht sind, aber

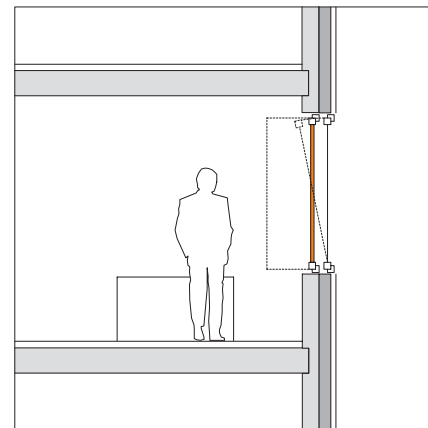


Abb. 4.53
(Fall LU.F.mÖ.2 gemäß Abb. 4.1)
Innenliegender Wärmeschutz-Laden, drehbar

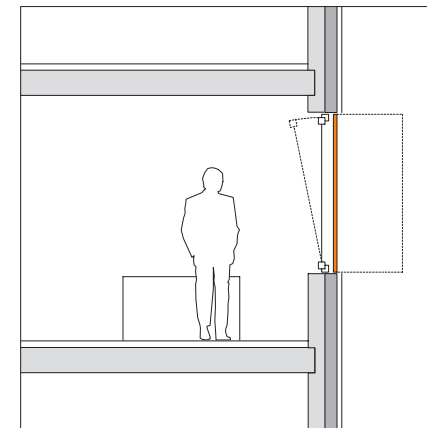


Abb. 4.55
(Fall LU.F.mÖ.3 gemäß Abb. 4.1)
Außenliegender Wärmeschutz-Laden, drehbar

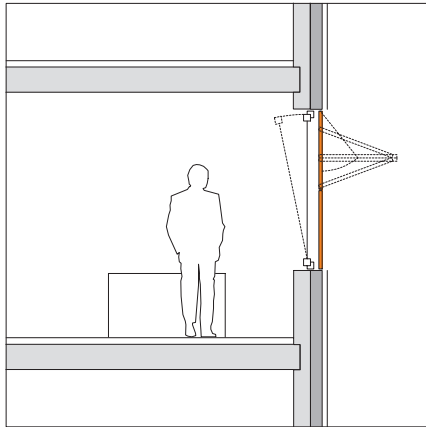


Abb. 4.56
(Fall LU.F.mÖ.3 gemäß Abb. 4.1)
Wärmeschutz-Laden, dreh- und verschieb-
bar

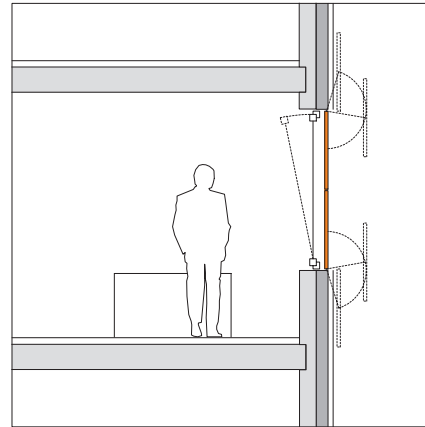


Abb. 4.57
(Fall LU.F.mÖ.3 gemäß Abb. 4.1)
Wärmeschutz-Laden, schwenkbar

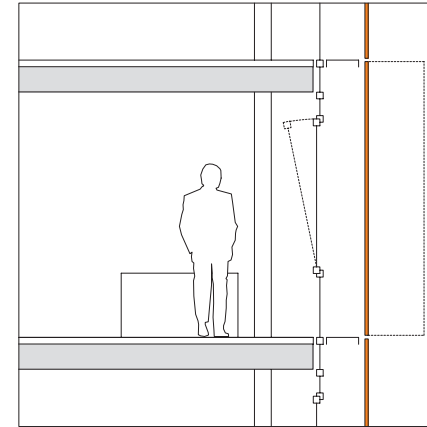


Abb. 4.58
(Fall LU.F.mÖ.3 gemäß Abb. 4.1)
Geschoßhoher Wärmeschutz-Laden,
drehbar

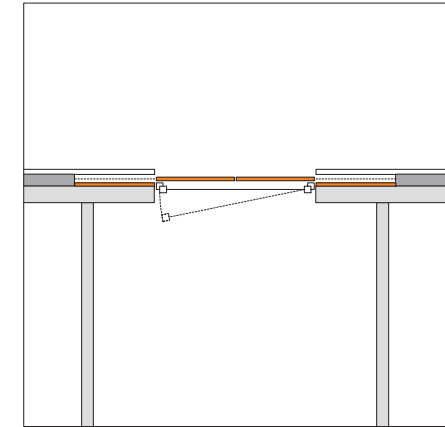


Abb. 4.59
(Fall LU.F.mÖ.3 gemäß Abb. 4.1)
Wärmeschutz-Laden, verschiebbar

der innenliegende Übergang einen grundsätzlichen Schwachpunkt darstellt, auch mit zusätzlicher Außendämmung.

Die Hauptmotivation für den Einsatz solcher Vorschläge dürfte in der Reduzierung der Anforderungen an den eigentlichen Öffnungsverschluss liegen, da es in Phasen erhöhten Wärmeverlustes zeitweise wirkungsvoll geschlossen werden kann. Dies könnte insbesondere im Sanierungsfall von Fassaden interessant sein, deren hauptsächlichster Wert in der Außenansicht zu sehen ist.

3.1.2.1.3 ...additiv-außenseitig (Fall LU.F.mÖ.3)

Als in bauphysikalischer und konstruktiver Hinsicht wesentlich unkritischer ist der Fall bewegbarer,

außenliegender Dämmelemente anzusehen.

Das Prinzip ist in zahlreichen überlieferten Erscheinungsformen bekannt (Drehflügel- und Klapppläden, Rollläden usw.) und wird in einem konkreten Anwendungsbeispiel ausführlich in Teil 7 und hinsichtlich einer Abschätzung des möglichen Wirkungspotenzials im Anhang 2 der vorliegenden Arbeit erörtert.

Temporärer Wärmeschutz kann unter Einsatz diverser Bewegungsarten umgesetzt werden, beispielsweise durch Drehen (Abb. 4.55), durch Drehschieben (Abb. 4.56), durch Schwenken (Abb. 4.57) oder durch Kombinationen hieraus.

Eine weitere beispielhafte Möglichkeit zeigt Abb. 4.58 (geschoßhohe Drehflügelelemente) auf.

Soll das Dämmelement wie im Fall des Schiebeladens (Abb. 4.59) in geöffnetem Zustand vollständig hinter der Fassadenaußenhaut verschwinden, könnte es sich - wie dargestellt - aus Platzgründen anbieten, auch den dann vom Dämmelement abgedeckten Bereich mit Vakuum-Dämmsystemen auszuführen.

3.2 Anwendungsbereich Dach (LU.D...)

Im Bereich von Dächern als Teilen der Gebäudehülle herrscht in aller Regel kein der Situation ‚Fassade‘ entsprechender Platzmangel. Die Aufbauhöhen werden bei Flachdächern nicht zuletzt durch die Funktion der Abdichtung, insbesondere im Randbereich und die statischen Notwendigkeiten geprägt.

Grundsätzlich lassen sich die wesentlichen Arten von Kalt- und Warmdachkonstruktionen auch mit Vakuum-Dämmsystemen ausführen.

Es ist allerdings kaum ein Szenario vorstellbar, das einen solchen Einsatz sinnvoll erscheinen lässt, da die Vorteile von Vakuum-Dämmsystemen in der Regel nicht zum Tragen kommen können, sondern vielmehr die Nachteile überwiegen.

Es gibt jedoch eine Reihe von Sonderfällen, in denen eine Anwendung von hochschlanken Systemen sehr wohl mit hohem Nutzen eingesetzt werden kann, die im Folgenden entsprechend der Systematik gemäß Abb. 4.1 in knapper Form aufgezeigt werden sollen.

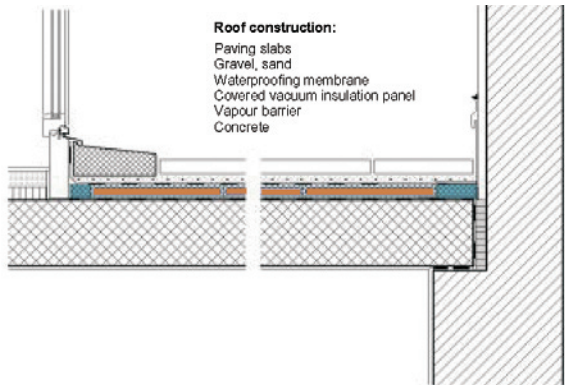


Abb. 4.60, 4.61, 4.62

Beispiel für die Ausführung einer Dachterrassendämmung mit VIP an einem Passivhaus-Projekt in Wolfurt, Voralberg.⁵¹ In der Planzeichnung (o.M.) ist die Lage der VIP unter der Abdichtung zu sehen. Das Foto, das die Verlegearbeiten zeigt, macht deutlich, wie heikel der Umgang mit den VIP auf der Baustelle ist: Ein direktes Betreten soll durch die gelben Matten verhindert werden.

3.2.1 Gebäudehüllenauschnitt ohne Öffnung (LU.D.oÖ...)

3.2.1.1 Einbausituation: nicht bewegbar (Fall LU.D.oÖ.1)

Dachterrassen sind eine besondere Form des Flachdaches, da sie die Verlängerung einer Geschossebene in den Außenbereich bedeuten.

Hier stellt der Übergang aufgrund der Unterschiede in den Aufbauhöhen zwischen Fußboden innen und hochgedämmtem Dachbereich außen ein prinzipielles konstruktives Problem dar, das durch den Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen deutlich entschärft werden kann (siehe Abb. 4.63).

Entsprechendes gilt analog für

nachträgliche Dämmung bzw. Sanierung solcher Dachbereiche.

Für diesen Fall gibt es neben dem in den Abb. 4.60, 4.61 und 4.62 vorgestellten Beispiel auch Erfahrungen mit ausgeführten Anwendungen.⁵²

Die in den meisten dieser Fälle ausgeführte, vollflächige Verklebung ist in der Horizontalen dann deutlich unkritischer zu beurteilen, wenn die über der Vakuum-Dämmung angeordneten Schichten weitgehend schubfest am Rand angeschlossen werden und somit eine Belastung der Paneele im Wesentlichen auf die Aufnahme von Druckkräften beschränkt wird.

Der Nachteil des nur schwer möglichen Austausches defekter Paneele bleibt allerdings bestehen.

Natürlich können auch sandwichartige Elemente (wie in Abb. 4.43) analog im Dach mit Gefälle eingesetzt werden, siehe Abb. 4.64.

Schließen vollverglaste Fassaden an Dächer an, so kann sich ein Zielkonflikt zwischen architektonischen Absichten und baukonstruktiven Notwendigkeiten dadurch ergeben, dass die Verglasung als thermische Trennebene der Fassade im Bereich der Wärmedämmung des Daches angeschlossen werden muss, aber zusätzlich eine Aufkantung wegen der Rückhaltung von Regen und Schnee erforderlich ist.

Dadurch kann der Attikabereich bzw. Dachrand oft nicht so schlank ausgeführt werden, wie dies aus gestalterischen Gründen vielleicht wünschenswert wäre.

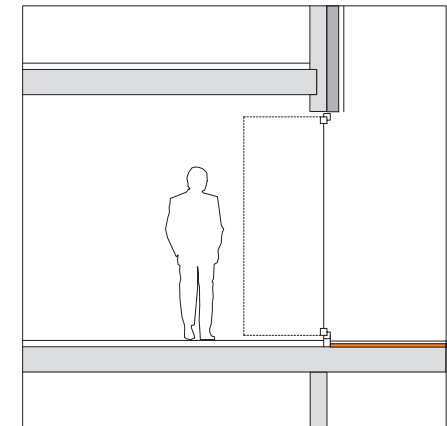


Abb. 4.63
(Fall LU.D.oÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Flachdächer, insbesondere Dachterrassen

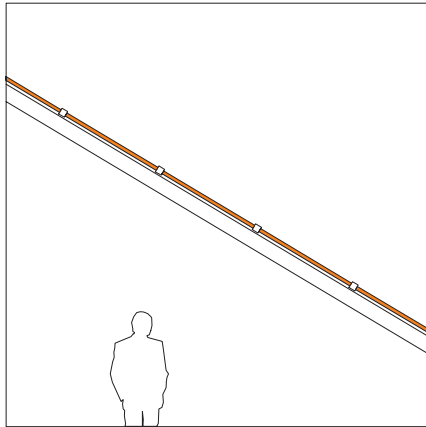


Abb. 4.64
(Fall LU.D.oÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Geneigte Dachfläche

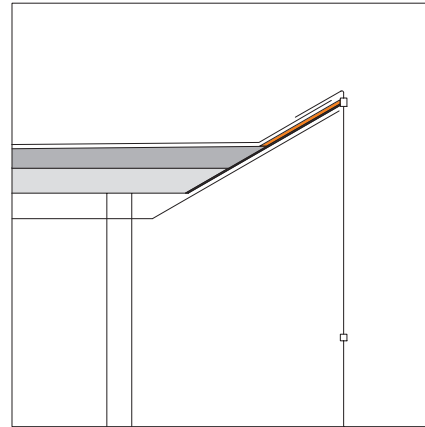


Abb. 4.65
(Fall LU.D.oÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Flachdach-Fassaden-Anschluss

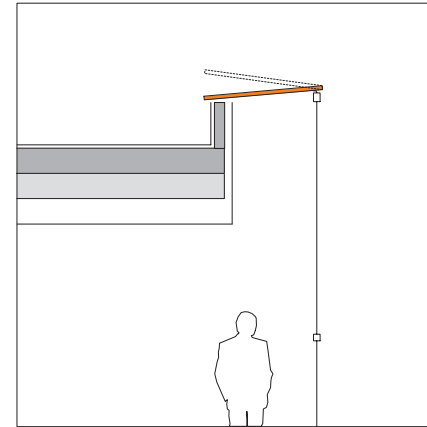


Abb. 4.66
(Fall LU.D.mÖ.1 gemäß Abb. 4.1)
Horizontale Lüftungs-
klappe im Anschlussbe-
reich Fassade - Dach

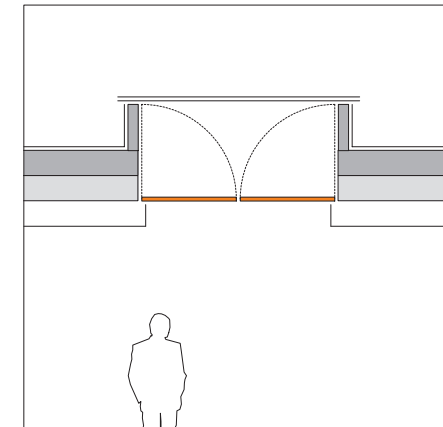


Abb. 4.67
(Fall LU.D.mÖ.2 gemäß Abb. 4.1)
Oberlicht mit innenliegenden Wärmeschutz-
Läden

Durch den Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen erscheint es möglich, die thermische Trennebene des Dachrandes entlang der Aufkantung zu verlängern und so zu einer sehr minimierten Ansichtskante zu gelangen (siehe Abb. 4.65).

3.2.2 Gebäudehüllenauschnitt mit Öffnung (LU.D.mÖ...)

3.2.2.1 Einbausituation: bewegbar

3.2.2.1.1 ...identisch-ebenen-gleich (Fall LU.D.mÖ.1)

Die in Abb. 4.66 dargestellten opaken und gedämmten Öffnungsflügel könnten als Lüftungs-klappen oder/ und als Rauch-Wärme-Abzugsanlagen (RWA) dienen.

Solche Klappen könnten auch im Bereich von Dachflächen vorgesehen werden, allerdings wird man den Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen zumeist auf Situationen beschränken, in denen die besondere Schlankheit einen gestalterischen oder funktionalen Vorteil bedeutet.

3.2.2.1.2 ...additiv-innenseitig (Fall LU.D.mÖ.2)

Analog dem Fall LU.F.mÖ.2 lässt sich diese Situation für die temporäre Innendämmung von Öffnungen - hier jetzt im Dach - nutzen, siehe Abb. 4.67.

Da sich im Dachbereich im Vergleich zur Fassade zusätzliche Anforderungen ergeben, zum Beispiel durch Niederschläge (Regen und Schnee) und daraus resultie-

render Gefahr der Vereisung der Mechanik, aber auch durch erhöhte UV-Strahlungsbelastung, erscheint eine außenseitige Anordnung einer solchen bewegbaren Maßnahme zum temporären Wärmeschutz in aller Regel nicht sinnvoll zu sein, zumal eine innenseitige Anordnung auch für die mechanische Bedienung prinzipielle Vorteile hat, da die thermische Trennebene dazu nicht durchstoßen werden muss.

4 Zur Anwendung lichtdurchlässiger Systeme

Die in Abb. 4.27 beispielhaft aufgeführten Anwendungsmöglichkeiten von lichtdurchlässigen Vakuum-Dämmsystemen sollen hier nicht analog zu Abschnitt 3 besprochen werden, da im Hinblick auf den gewählten Betrachtungsabstand und dem damit einhergehenden

Abstraktionsgrad der erzielbare Informationszugewinn als gering angesehen wird.

Wesentliche diese Möglichkeiten kennzeichnende Aspekte wurden bereits in Abschnitt 1.6 dieses Teils besprochen.

Konkrete Aussagen werden auch durch den Umstand erschwert, dass derzeit mit Ausnahme der in Abschnitt 3 in Teil 3 beschriebenen ‚Vakuum-Verglasung‘ noch keine lichtdurchlässigen Vakuum-Dämmsysteme verfügbar sind.

An dieser Stelle sei auch auf die Ausführungen in Teil 5, 6 und 7 der vorliegenden Arbeit verwiesen, die jeweils verschiedene Aspekte lichtdurchlässiger Systeme thematisieren.

5 Zusammenfassung der gegebenen Planungshinweise

Im Folgenden werden die bisher erfassten wesentlichen Planungshinweise im Sinne einer Erhöhung der Anwendungsnähe der Arbeit zusammengefasst.⁵³

5.1 Anlass für den Einsatz

Folgende Fragen können Anhaltspunkte bieten, ob eine Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen als sinnvoll angesehen werden kann:

- Ist eine sehr gute Wärmedämmung erforderlich und / oder ist dafür nur wenig Platz vorhanden bzw. dieser sehr teuer?
- Entstehen durch den Einsatz von konventioneller Wärmedämmung im vorgesehenen Umfang konstruktive Probleme?
- Gibt es bevorstehende oder aktuelle Vorschriften, die für das geplante Vorhaben eine höhere Wärmedämmung verlangen oder vermutlich in Zukunft verlangen werden (zum Beispiel wegen absehbarer, zukünftiger Nutzungsänderungen)?
- Stellt ein schlanker Wandaufbau ein maßgebliches Planungsziel dar, zum Beispiel aus funktionalen und / oder gestalterischen Gründen?

5.2 Empfindlichkeit

Insbesondere Paneele mit Folienehüllmaterial sind mechanisch extrem empfindlich. Die Handhabung ungeschützter Paneele auf der Baustelle ist daher kritisch.

Ein hoher Vorfertigungsgrad ermöglicht den Einbau unter geschützten und kontrollierbaren Bedingungen und ist daher zu bevorzugen. Von Vorteil ist außerdem, die Paneele durch angrenzende weiche Schichten zu schützen, zum Beispiel durch Weichfaserplatten, dünne Schaumstofflagen o.ä.

Weiterhin gilt es zu bedenken, dass Vakuum-Dämmsysteme keinesfalls penetriert werden können. Dies schränkt zusammen mit der weiteren Anforderung nach einem spannungsfreien Einbau die Möglichkeiten zur Befestigung drastisch ein. Zudem ist eine Aufklärung des Nutzers zwingend erforderlich, dass im betreffenden Bereich auch nach Abschluss der Baumaßnahme nie etwas durch Bohren, Nageln o.ä. befestigt werden kann. Hierzu können auf dem Paneel angebrachte deutliche Warnhinweise sinnvoll sein.

Die Empfindlichkeit beschränkt sich nicht nur auf mechanische Aspekte. Für die gebräuchlichen Vakuum-Dämmsysteme mit weichem Hüllmaterial ist sicherzustellen, dass die Oberflächentemperaturen für die Dauer der Anwendung 60° C nicht überschreiten.

5.3 Wärmebrücken

Jede Wärmerücke bedeutet eine Absenkung des durchschnittlichen Wärmedämm-Niveaus, zusätzlichen Energiebedarf und die Gefahr von Kondensationserscheinungen und in der Folge mögliche Schimmelpilzbildung, Tauwasser, Bauschäden usw.

Vakuum-Dämmsysteme erzeugen aufgrund ihrer Geometrie bereits selbst unvermeidbare Wärmebrücken, da deren Ränder prinzipiell eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als die ungestörten Systemmitten. Die Größe des Effekts an diesen (potenziellen Stoß-) Stellen ist dabei abhängig von der genauen Randausbildung des Systems, der Geometrie und den Abmessungen und der jeweiligen Einbausituation (vergl. Teil 2 und Anhang 1). Der Einsatz von Hochleistungsdämmungen führt zudem aufgrund einer relativen Verschiebung zu einer Verschärfung der Wärmebrückenproblematik:

Die deutlich geringere Dämmstärke bei gleichzeitiger Minimierung der Wärmeleitung in der Fläche hat zur Folge, dass jede Wärmebrücke relativ betrachtet stärker ins Gewicht fällt als bei konventionellen Dämmstoffen.

Auch wenn es innerhalb von Vakuum-Dämmsystemen selbst nicht zu Tauwasserbildung kommen kann, da sie per se absolut dampf-

dicht sind, so bilden die Fügungen systembedingt um so größere Schwachstellen. Hier ist das schadensfreie Diffusionsverhalten im Detail mit der gebotenen Sorgfalt nachzuweisen.

5.4 Formate

Naheliegenderweise ist die Form rechteckiger Platten mit möglichst präziser rechtwinkliger Kantenausbildung die primäre Formatwahl. Dennoch sind auch diverse andere Formen möglich, wenngleich in der Regel mit erheblichem Aufwand in der Herstellung und einer Reduzierung der zu erwartenden Funktionsdauer verbunden.

Grundsätzliches Merkmal aller Vakuum-Dämmsysteme ist die Unveränderlichkeit einmal gefertigter Formate. Nachträgliche Anpassungen sind nicht möglich. Dies ist bei der Planung insbesondere hinsichtlich des Umgangs mit Toleranzen von Bedeutung. Die Anforderungen an die Maßhaltigkeit sind aufgrund der verschärften Wärmebrückenproblematik für die Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen besonders hoch.

Ein weiterer Aspekt ist die wirtschaftlich sinnvolle Beschränkung auf wenige verschiedene Formate. Standardformate bieten zudem den Vorteil, dass sie kurzfristig nachgeliefert werden können, da sie lagernd verfügbar sind und nicht speziell angefertigt werden müssen.

5.5 Austauschbarkeit / Zugänglichkeit

Da Vakuum-Dämmsysteme im Gegensatz zu konventionellen Dämmstoffen versagen können, sollten sie vorzugsweise mit wetretbarem Aufwand austauschbar sein. Dazu ist die Konstruktion so auszubilden, dass entweder das einzelne Paneel oder das es aufnehmende Subsystem zugänglich ist.

5.6 Wirtschaftlichkeit

Für die Wirtschaftlichkeit von Vakuum-Dämmsystemen spielen folgende Faktoren eine Rolle:

1. Herstellung der Elemente:
 - Preis und Verfügbarkeit der Grundmaterialien (Kern, Hülle...)
 - Herstellungsverfahren, vor allem Zeit für Evakuierung, Versiegelung
 - Art der und Zeitaufwand für die Qualitätskontrolle bei der Herstellung, Ausschussquoten
2. Art der baulichen Anwendung:
 - Aufwand für Lagerung, Transport, Montage und Ersatz
 - Systeme / Formate
 - Art und Zeitaufwand für die Qualitätskontrolle vor, während und nach Transport und Montage
3. Einsparpotenziale im Vergleich zu konventionellen Systemen:
 - Höhere Dämmleistung bei gleichzeitig geringerer Dicke, dadurch Flächeneinsparung im Grundriss bzw. geringerer Baulandbedarf^{f54}

4. Thema ‚Funktionsdauer‘:

- Funktionsdauer und -sicherheit, Gewährleistung

Gerade im wirtschaftlichen Vergleich ist aus Sicht des Verfassers der Hinweis geboten, dass auch die Entwicklung konventioneller Dämmstoffe stetig fortschreitet und zu weiterer Optimierung führt. So konnte beispielsweise im Rahmen eines Projekts am ZAE-Bayern die Wärmeleitfähigkeit von EPS durch Zugabe von Aluminium-Partikeln und die damit verbundene Trübung des IR-Durchgangs um ca. 15% gesenkt werden.⁵⁵

Die hohe Empfindlichkeit der Paneele mit weicher Hülle hat auch Einfluss auf die möglichen Vertriebswege: Die Hersteller sind gezwungen, sorgfältig auf die Kompetenz und Qualität der an der ganzen Vertriebskette beteiligten Unternehmen zu achten, da der Erfolg einer Anwendung sonst gefährdet ist.

Anders als die meisten Dämmstoffe werden Vakuum-Dämmsysteme daher in der Regel nicht oder nur sehr ungern an Endverbraucher wie Bauherren von Einfamilienhäusern, die mit hohem Eigenleistungsanteil erstellt werden, verkauft.

Verarbeitende Handwerksbetriebe müssen ihr Personal für die Besonderheiten der empfindlichen Produkte sensibilisieren, was einen gewissen Schulungsaufwand erforderlich macht.

Der Verfasser vertritt daher die Ansicht, dass eine flächendeckende Substitution konventioneller Dämmstoffe durch Vakuum-Dämmsysteme sicher nicht zu erwarten und auch kaum sinnvoll ist.

Gleichwohl werden die neuen Hochleistungssysteme aber ihren Platz in Bereichen finden, in denen aus dem Hauptmerkmal, maximaler Dämmwirkung bei minimaler Dicke, funktional, konstruktiv, wirtschaftlich oder ästhetisch ein Gewinn zu ziehen ist, der den bislang deutlich höheren Investitionsaufwand rechtfertigt.

Dies werden in vielen Fällen besondere einzelne Stellen eines Gebäudes sein und nur in Einzelfällen die gesamte Gebäudehülle, zum Beispiel in Lagen mit extrem teurer Nutzfläche, deren maximale Ausnutzung sich in der Regel an den Gebäudeaußenkanten bemisst.

Neben Neubauten werden Sanierungsmaßnahmen Bedeutung erlangen, da hier oft kein Platz für ausreichende Dämmungsmaßnahmen mit konventionellen Dämmstoffen besteht.

6 Ausblick

Folgende Aspekte sollten nach Auffassung des Verfassers zukünftig unter anderem behandelt werden, um zu einer Verbreiterung der Einsatzmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Baubereich zu führen:

- Weitere Verbesserung der Hüllmaterialien: Reduzierung der Permeationsraten in der Fläche und im Bereich der Siegelnähte.
- Suche nach alternativen Kernmaterialien, die ähnlich positive Eigenschaften aufweisen, aber kostengünstiger sind, um die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems zu erhöhen.
- Entwicklung von transluzenten oder gar transparenten Systemen, um das Einsatzspektrum insgesamt zu erweitern. Als Beispiel hierfür wären Glas-Aerogel-Glas-Systeme zu nennen.
- Erwirkung von Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen für einzelne Systeme, um die Produkte verlässlich einsetzen zu können.⁵⁶
- Entwicklung von geeigneten Standardkonstruktionen mit möglichst hohem Vorfertigungsgrad, um Fehlerquellen durch unerfahrene und inkompetente Anwender auszuschließen und um die hohen Beschädigungsrisiken durch die Handhabung von Vakuum-Dämmsystemen auf der Baustelle zu reduzieren.

Dem Verfasser scheinen die neuen Möglichkeiten zu gestalterisch hochwertigen und schlanken Konstruktionen bei weitem noch nicht ausgereizt zu sein.

Anmerkungen

1. Dieser hier vorgestellte typologische Ansatz des Verfassers wurde erstmals in Cremers, Jan: Systematisierung architektonischer Anwendungsmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle (2005), S. P4 - P5, und englisch in Cremers, Jan: Typology of Applications for Opaque and Translucent VIP in the Building Envelope and their Potential for Temporary Thermal Insulation (2005), S. 191 veröffentlicht (insbes. Abb. 4.1), ist aber maßgeblich durch bestehende Vorarbeiten des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie von Thomas Herzog zu einzelnen Themen aus dem Bereich der Gebäudehülle geprägt. In diesem Falle ist hier vor allem folgender Beitrag zu nennen: Westenberger, Daniel: Untersuchungen zu Vertikalschiebefenstern, Dissertation, München: Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog, TU München, 2005
2. In letzter Zeit gewinnt die Frage der Durchlässigkeit von Bauteilen und -stoffen für elektromagnetische Strahlung im Baubereich deutlich an Bedeutung, vor allem im Zusammenhang mit der Frage nach einer Gefährdung durch hochfrequente, elektromagnetische Funkstrahlung. Darauf wird im Vergleich der einzelnen Vakuum-Dämmsysteme in Teil 3 eingegangen.
3. Die Eingrenzung der Strahlungsdurchlässigkeit auf das Spektrum des sichtbaren Lichts entspricht elektromagnetischer Strahlung mit Wellenlängen zwischen ca. 400 bis 800 nm.
4. In den für den Baubereich relevanten Tiefen nähert sich diese Temperatur in der Regel der lokalen Jahresdurchschnittstemperatur und ist daher immer per se ‚gemäßigt‘.
5. Eine wichtige Ausnahme stellt der Sanierungsbereich dar, wo der Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen aus Platzgründen sehr wohl sinnvoll sein kann. Hier sind vor allem nachträgliche Dämmungen oberhalb der Bodenplatte zu nennen, ein Anwendungsfall, für den es bereits eine Reihe von Ausführungsbeispielen gibt. Durch das ZAE-Bayern wurden hierzu einige Anwendungen betreut, zum Beispiel die Sanierung eines Turnhallenfußbodens in Gemünden (Ing.-Büro Rosel), eines Kellerbodens im eza!-Haus in Kempten (Bayosan Wachter GmbH) und eines weiteren Turnhallenfußbodens in Nürnberg (va-Q-tec AG). Siehe hierzu ausführliche Darstellungen in Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 28-29, 35-40.
6. Zu dem Thema ‚Öffnungen‘ vergleiche insbesondere den Beitrag A2.2 ‚Ränder, Öffnungen‘ in Herzog, Krippner, Lang: Fassadenatlas (2004), S. 38-45.
7. Für die im Bereich der Gebäudehüllen verwendeten beweglichen Elemente findet sich bei Waldemar Jaensch der Begriff ‚Manipulator‘. Die Definition entstand auf Basis seiner von Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog betreuten Dissertation. Siehe: Jaensch, Waldemar: Veränderbare Oberflächen - Verfahren zur Beurteilung kinetischer Manipulatoren im Bereich der Gebäudehülle als Maßnahme zur Regulierung des Gebäudeklimas. Dissertation, Kassel (1981), S. 28
8. Bei einem Vorfenster (auch ‚Winterfenster‘) handelt sich um ein saisonal, nämlich im Winter, nutzbares zusätzliches - aber abnehmbares - Fensterelement, das - im Winter eingesetzt - den Wärmeverlust durch das Fenster (historisch in der Regel jeweils mit Einfachverglasung) reduziert. Vergleiche hierzu Ausführungen und systematische Einordnung in Lang, Werner: Wärme- und Sonnenschutzsysteme aus Holz für Doppelfassaden, Dissertation, München: Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog, TU München, 2000, S. 3-6
9. erstmals veröffentlicht in Cremers, Jan: Systematisierung architektonischer Anwendungsmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle (2005), S. P7
10. Für den Zusammenhang ‚Fügung von Bauteilen, Fugendichtung und Montage/ Demontage‘ wird auf den Beitrag A2.1 ‚Flächen - Strukturelle Prinzipien‘ in Herzog, Krippner, Lang: Fassadenatlas (2004), S. 32-33, verwiesen.
11. vergl. hierzu Schupp, H.B.: VIP im Mauerwerksbau (2003), S. O1 - O8
12. Die Abb. 4.5 und 4.6 sind Fotografien des Verfassers von Schautafeln der Firma VarioTec GmbH, Neumarkt, die anlässlich der Konferenz ‚VIP-Bau‘ im Jahre 2003 in Rostock präsentiert wurden.
13. erstmals veröffentlicht in Cremers, Jan: Systematisierung architektonischer Anwendungsmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle (2005), S. P9
14. Das Hauptanwendungsgebiet dieser Paneeltypen ist der Kühlraumbau. Die Firma benennt bisher als Beispiel für eine Anwendung in der Gebäudehülle einen Bürobau in Bayern aus dem Jahre 2001, in dessen Pfosten-Riegel-Fassade Elemente in einer Stärke von 44 mm (2 x 2 mm Edelstahlblech und 40 mm Dämmkern) in einer Größe von 1250 x 683 mm analog zu Isolierverglasungen eingebaut wurden. Aussagen, wie sich die Paneele bei direkter Besonnung verhalten, und wie sich die resultierenden Längenausdehnungen der Oberflächen bemerkbar machen, liegen bisher nicht vor. Vergleiche hierzu: Nowara, Ekkehard: tempsave® elements – VakuumWärmedämmelemente mit Stahldeckschichten (2005), S. F1-F15
15. In der Praxis findet man nur Systeme mit Einscheibensicherheitsglas (ESG) auf der Außenseite, da der sich durch den Dämmstoff einstellende Wärmestau zu einer erheblichen Temperaturbelastung führt, der einfaches Floatglas nicht gewachsen ist. Weitere Gründe für diese Wahl können sich aus genehmigungsrechtlich oder verfahrenstechnisch (zum Beispiel wegen einer Emaillierung) veranlasst sein.
16. vergl. Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 22-28: Vakuumgedämmte Brüstungselemente für ein Krankenhaus in Erlenbach am Main.
17. zu nennen wäre hier beispielsweise das System RAICOTHERM der Firma Raico GmbH, Pfaffenhausen.
18. Zu den verfügbaren sogenannten ‚Warm-Edge‘-Systemen zählen beispielsweise folgende Produkte: Super-Spacer® (Edgetech Inc. / USA),

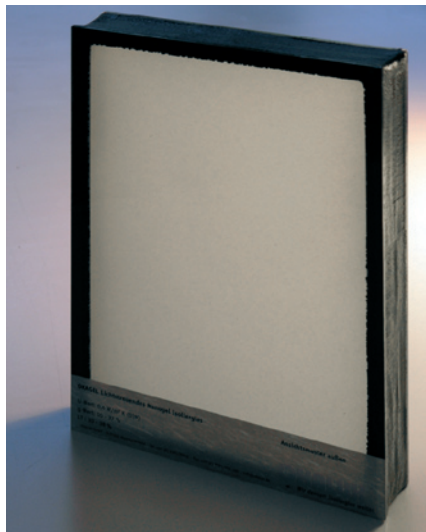


Abb. 4.68
Produkt Okagel® der Firma Okalux



Abb. 4.69
Produkt Lexan Thermoclear®, der Firma GE Advanced Materials / Bergen (NL)

Thermix-Spacer (Thermix GmbH/ Ravensburg), Swiss Spacer (Saint Gobain), TGI Spacer (TGI Glass Insulating Systems GmbH / Fuldabrück), TPS Spacer (verschiedene Hersteller).

Diesem Thema widmet sich u.a. das derzeit laufende EU-Forschungsvorhaben RE-FRAME, an dem der Verfasser als Vertreter des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie Prof. Herzog, TU-München, beteiligt ist.

19. Daten aus Ebert, Andree: VIP in der Anwendung mit beheizten Innenflächen (2003), S. H11

20. Diese ‚Doppeleвакуierung‘ reduziert die Anforderungen an die Gasdichtigkeit für das innere System erheblich, da die Permeationsraten (und damit die Funktionsdauer insgesamt) wesentlich durch die anliegende Druckdifferenz bestimmt wird, die hier durch den Unterdruck des übergeordneten Systems

reduziert wird. Dieser Effekt ist Gegenstand einer Offenlegungsschrift der va-Q-tec AG (DE 101 23 453 A1) vom 21.11.2002.

21. vergl. Projekt ‚Atelierhaus in Bayern‘ von Thomas Herzog (1994), dargestellt und erläutert in Abschnitt 1.6.3.1.1, sowie den Erfahrungsbericht zu der vorgeschlagenen Polycarbonat-Lamelle in Teil 7, Abschnitt 4.2.

22. Bildquellen Abb. 4.12, 4.13 und 4.14: Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 23

23. siehe hierzu Beschreibung und skizzenhafte Darstellung in Caps, R.; Fricke, J.: Thermal Conductivity of Opacified Powder Filler Materials for Vacuum Insulations (2000), S. 445–452

24. Die Suche nach einem geeigneten Randverbund für die hier geschilderten

Anforderungen ist auch ein wesentliche Fragestellung der EU-Forschungsvorhaben HILIT (1998-2001) und HILIT+ (Folgeprojekt bis September 2005), vergl. hierzu Jensen, K.I.; Schultz, J.M.: Highly Insulating and Light Transmitting Aerogel Glazing for Winow (HILIT Aerogel Window) (2001) und Jensen, K.I.; Schultz, J.M.; Kristiansen, F.H.: Development of windows based on highly insulating aerogel glazings (2004), S. 351-357.

Siehe auch Teil 3, Abschnitt 2.2.3.

25. siehe Ebert, Andree: VIP in der Anwendung mit beheizten Innenflächen (2003), S. H1-H11

26. siehe Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 24

27. Die Abb. 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 und 4.21 zum Projekt ‚Atelierhaus in Bayern‘ von Thomas Herzog (1994) entnommen aus Flagge, Ingeborg; Herzog-Loibl, Verena; Meseure, Anna (Hrsg.): Thomas Herzog, Architektur + Technologie (2001), S. 170 und 171, Fotos: Peter Bonfig

28. ebd., S. 170

29. Produkt Lexan Thermoclear® der Firma GE Advanced Materials / Bergen (NL), siehe Abb. 4.69.

30. Produkt scobatherm® der Firma Scobalith / Winterthur (CH)

31. Das Produkt Okagel® (Abb. 4.68) der Firma Okalux/ Marktheidenfeld hat folgende Produkteigenschaften:

- $U_G = 0,6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- g-Wert = 10 - 37 %
- $T_v = 10 - 38 \%$
- Dachschräge max. 45°

- SZR = 32 mm
- kurze Kante max. 100 cm (gem. Herstellerang., Stand 01.2005)

32. Zu den beiden EU-Forschungsvorhabens HILIT und HILIT+ vergl. Jensen, K.I.; Schultz, J.M.: Highly Insulating and Light Transmitting Aerogel Glazing for Winow (HILIT Aerogel Window) (2001) und Jensen, K.I.; Schultz, J.M.; Kristiansen, F.H.: Development of windows based on highly insulating aerogel glazings (2004), S. 351-357

33. Die Anzahl und Bandbreite ausgeführter, untersuchter und veröffentlichter Anwendungen von Vakuum-Dämmsystemen in der Gebäudehülle nimmt nach wie vor kontinuierlich zu und damit auch die Zahl der in die durch den Verfasser vorgeschlagene Typologie einordbaren Fälle. Hierzu gehören v.a. die im Abschlussbericht des IEA-Verbundprojektes ‚HiPTI - High Performance Thermal Insulation, IEA/ECBCS Annex 39‘ veröffentlichten Beispielanwendungen, vergl. Vacuum Insulation in the Building Sector (Sub-task B), www.vip-bau.ch <09.2005>

34. Eine ausführliche Beschreibung dieser sicher bislang mit am häufigsten veröffentlichten Anwendung von VIP im Bauwesen findet sich u.a. in Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 3-5.

35. Die Simulation wurde mit dem Programm THERM 5.2 durchgeführt, näheres zu der verwendeten Software findet sich in Teil 5, Abschnitt 4.1

36. Die Abb. 4.31, 4.32 sowie die Vorlage zu Abb. 4.30 sind entnommen aus: Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 3-5. In der Thermographie-Aufnahme ist gut

zu erkennen, dass mindestens ein Paneel (zwischen den unteren Fenstern befindlich) belüftet ist.

37. Das Projekt wurde vom Architekturbüro Lichtblau Architekten (München) geplant und vom ZAE-Bayern betreut, ausführliche Dokumentation dazu in: Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 7-15. Dieser Veröffentlichung wurden auch die Abb. 4.33, 4.34 und die Vorlage zu Abb. 4.36 entnommen.

38. Bildquelle der Abb. 4.40 sowie der Vorlagen zu Abb. 4.37 und 4.38: Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 16-18

39. vergl. Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 15-19

40. Bei der Verwendung von VIP im Zusammenhang mit Solarkollektoren stellt sich das grundsätzliche Problem, dass die derzeit üblichen Hochbarrierefolien über längere Zeit keinen Temperaturen über 50°C ohne Funktionsverlust ausgesetzt werden können. Insbesondere im Nicht-Betrieb des Kollektors können aber leicht höhere Temperaturen auf der Rückseite der Absorberfläche auftreten (hier zwischen 116 °C und 161 °C). Daher wurden durch das ZAE-Bayern für diese Anwendung mehrere Kollektorvarianten untersucht. Es wurden insbesondere zwei Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Reduzierung des Problems getroffen: Erstens durch Anordnung eines 25 mm dicken Vlieses zwischen VIP und Absorber und zweitens durch eine zweilagige Anwendung der VIP, wodurch im Versagensfall der ersten VIP-Ebene immer noch eine ausreichende Restwärmeeisolation gewährleistet ist.

41. In Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 22-28 findet sich hierzu die ausführliche Darstellung einer Anwendung (Brüstungselemente) für ein Krankenhaus in Erlenbach am Main.

42. siehe ausführlich in Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmeeisolation HLWD, Schlussbericht Dezember 2000, Dr. Eicher + Pauli AG und Institut für Energie Fachhochschule beider Basel, Liestal und Muttenz, Schweiz, S. 30-33

43. In Schwab, Hubert u.a.: Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21 (2003), S. 41-43 findet sich als Beispiel hierfür eine Ortsgangsanierung.

44. vergl. Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmeeisolation HLWD (2000), S. 26-27

45. vergl. Hangleiter, Matthias: Entwicklung von vakuumgedämmten Betonfertigteilen (VIPBON), Folienpräsentation. Ravensburg: Hangleiter GmbH & Co. KG, 2004. Quelle: www.vip-bau.de <01.2005> Bisher sind über das vom BMWA geförderte Vorhaben (FKZ 0327321C) noch keine ausreichend genauen Informationen für eine qualifizierte Auseinandersetzung verfügbar.

46. Hier ist beispielsweise die Firma VarioTec GmbH, Neumarkt, zu nennen. Auch die EMPA hat sich intensiv mit dieser Anwendung beschäftigt, vergl. Bundi, R. u.a.: Meßtechnische und rechnerische Untersuchungen an einer mit Vakuum-Isolations-Paneelen gedämmten Holztür (2005), S. 21 - 27

47. Zur Abb. 4.52 siehe ausführlich Teil 7 und Anhang 2 der vorliegenden Arbeit.

48. Eine ausführliche Untersuchung zu Vertikalschiebefenstern und insbesondere zu deren Potenzial für natürliche Lüftung findet sich in: Westenberger, Daniel: Untersuchungen zu Vertikalschiebefenstern, Dissertation, München: Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog, TU München, 2005

49. Bildquelle: Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmeeisolation HLWD (2000), S. 25

50. ZVK (Zusatzversorgungskasse), Wiesbaden, 2001. Architekten: Herzog + Partner, München. Quelle der Abb. 4.48: Fassadenatlas, S. 282; Abb. 4.49: The Plan, 003/2003, S. 49.

51. Abb. 4.60 , 4.61 und 4.62 entnommen aus Erb, Markus; Eicher, Hanspeter: Hochleistungswärmeeisolation (2001), S. 17-18. Hier findet sich auch weitere Informationen zu dem Projekt des Architekten Gerhard Zweier, Wolfurt

52. Beispielsweise der Boden für einen Tiefkühlraum der Blutspendedienst Bern AG als eine Anwendung mit sehr ähnlichen Anforderungen (siehe Erb, Markus; Eicher, Hans-Peter; Binz, A.: Hochleistungswärmeeisolation HLWD [2000], S. 30) oder die Terrassendämmung eines Einfamilienhauses in Leimbach, siehe gleiche Quelle, S. 27.

53. vergl. Cremers, Jan: Vakuum-Dämmsysteme - Einsatzmöglichkeiten und planerische Hinweise (2005), S. 522-525

54. Da sich die zulässige Geschossfläche als Vorgabegröße der Bauleitplanung von den Außenmaßen eines Gebäudes ausgeht, wirken sich

Einsparungen an der Gebäudehüllendicke i.d.R. direkt auf die verfügbare vermietbare Fläche aus. Insbesondere dieser Zusammenhang kann in Gebieten mit knappen und/oder teurem Grund den wirtschaftlichen Ausschlag für den Einsatz von VIP geben.

55. Projekt am ZAE ,Infrarot-Trübung von Styropor', Information des ZAE-Bayern von 25.08.2004, Kontakt: Dr. J. Manara

56. Diesem Aspekt, der in engem Zusammenhang mit der dazu notwendigen wärmeschutztechnischen Klassifizierung steht und daher bereits in Teil 3 Absatz 2.9.3 erörtert wurde, widmet sich folgender Beitrag: Gellert, Roland: Einflussfaktoren auf die bauphysikalischen Eigenschaften von VIPs: vom Labormesswert zum anwendungsbezogenen Bemessungswert (2005), S. T1-T8

Inhaltsverzeichnis

Teil 5 Mattenartige Vakuum-Dämmsysteme

Abschnitt	Seite	Abschnitt	Seite		
1	Vorüberlegungen	114	5	Zusammenführung der Geometrieuntersuchungen mit den Simulationsergebnissen	129
2	Ein neuer Ansatz: Kontinuierliche Herstellung von VIP	114	5.1	Einordnung der Simulationsgeometrie	129
2.1	Beschreibung	114	5.2	Umrechnung der Simulationsreihen in die untersuchten Mattengeometrien	129
2.2	Potenzialabschätzung	114	5.3	Ergebnisse	131
2.2.1	Herstellung / Formate	114	6	Weiteres Optimierungspotenzial	132
2.2.2	Mehrlagigkeit	115	6.1	Lichtdurchlässige Varianten	132
2.2.3	Fehlertoleranz	115	6.2	Dampfdiffusionsvermögen	133
3	Untersuchungen zur Geometrie	117	6.3	Andere Geometrien	133
3.1	Anforderungen an die Geometrie	117	7	Weitere Aspekte	133
3.2	Vier ausgewählte Fälle	117	7.1	A/V-Verhältnis	133
3.3	Untersuchte Größen und Verhältnisse	117	7.2	Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung	134
3.4	Mehrlagigkeit	117	7.2.1	Herstellung von konventionellen Luftpolsterfolien	134
3.5	Ergebnisse der Geometrieuntersuchungen	119	7.2.2	Verfahrensmodifikation für die Herstellung von Vakuum-Dämmungsmatten	134
3.6	Wertung der Ergebnisse	119	7.2.2.1	Vakuumkammergröße	134
3.7	Weitere Aspekte	120	7.2.2.2	Einbringung des Kernmaterials	135
3.7.1	Mögliche Schnitte	120	7.2.3	Folienmaterialien	135
3.7.2	Transport / Rollbarkeit	120	7.2.4	Kontinuierliche Herstellung: vorläufiges Resumée	136
4	Wärmetechnische Untersuchungen der vorgeschlagenen Vakuumdämmungsmatten	120	7.3	Nicht-kontinuierliche Verfahren zur Herstellung	136
4.1	Simulationstechnik und Hinweise zu den Ergebnissen	120	7.4	Vergleich mit der Entwicklung ‚Chip-Vacua‘ der japanischen Firma Matsushita	137
4.2	Aufbau und Materialien	122	7.4.1	Der japanische Ansatz	137
4.3	Simulationsreihen	122	7.4.2	Offene Fragen	138
4.3.1	Ein- und Mehrlagigkeit	122	7.4.3	Unterschiede zum Ansatz des Verfassers	138
4.3.2	Variierende Zellstärke	122	7.4.4	Einschätzung der Entwicklung ‚Chip-Vacua‘	138
4.3.3	Variierende Zellbreite	124			
4.4	Sonderuntersuchungen	124			
4.4.1	Lage der Siegelnahtverbindung	124			
4.4.2	Defekte (belüftete) Zellen	126			
4.5	Zum Vergleich herangezogene Varianten	128			
				Anmerkungen	139



Abb. 5.1 ‚Eisbeutel­folie‘, hier mit Wasser gefüllt. (Produkt Firma Toppits)

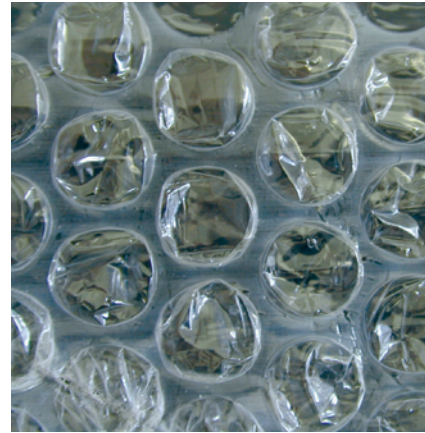


Abb. 5.2 Einfache Standard-Luftpolster-Verpackungsfolie aus LDPE, Kreis-Geometrie, Ø ca. 8 mm



Abb. 5.3 Luftpolsterfolie¹ aus HDPE, Viereck-Geometrie, Stegbreite 2 mm, Zellhöhe 3-4 mm

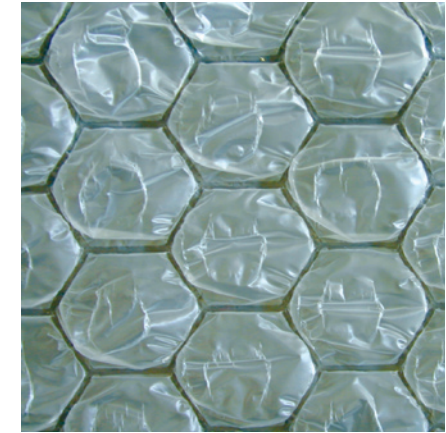


Abb. 5.4 Luftpolsterfolie² aus HDPE, Sechseck-Geometrie, Stegbreite 0,8 mm, Zellhöhe 3 mm

Teil 5

Mattenartige Vakuum-Dämmsysteme - Geometrische Vorüberlegungen

1 Vorüberlegungen

Bisher untersuchte und verfügbare VIP bieten neben dem bisher aufgezeigten Potenzial eine Reihe von grundsätzlichen Nachteilen:

- Die konventionelle Herstellung führt zu einzelnen Elementen, die nachträglich nicht verändert oder angepasst werden können, ihre Maße müssen vielmehr vor der Fertigung festgelegt werden. Die beschriebene Wärmebrückenproblematik bedingt sehr geringe zulässige Toleranzen im Bereich der Fugen.

- Die Abmessungen der einzelnen Elemente sollte so groß wie mög-

lich gewählt werden, um die Zahl der Fugen und damit der wärmetechnischen Schwachstellen, so gering wie möglich zu halten. Dies führt umgekehrt zu einer sehr geringen Fehlertoleranz des Gesamtsystems für den Fall fehlerhafter (also belüfteter) VIP.

- Die Herstellung, Prüfung, Behandlung und Einbringung konventioneller VIP ist aufwändig und teuer, was in der Praxis dazu führt, dass in der Regel eine einlagige Anwendung umgesetzt wird, obwohl eine mehrlagige Anwendung im Hinblick auf die Vermeidung von Wärmebrücken unbestreitbare Vorteile hätte.

Gibt es Lösungsansätze, die einen Teil dieser Nachteile überwinden könnten?

2 Ein neuer Ansatz: Kontinuierliche Herstellung von VIP

2.1 Beschreibung

Die grundlegende Idee, die im Folgenden untersucht werden soll, besteht in dem Gedanken, zusammenhängende, verhältnismäßig kleine VIP in einem kontinuierlichen Prozess herzustellen. Dabei wird der Dämmstoff regelmäßig in kleinen Einheiten zwischen zwei Lagen Hüllmaterial angeordnet.

Daraufhin wird der Zwischenraum evakuiert und die beiden Lagen des Hüllmaterials jeweils entlang der entstehenden Zellen gasdicht verbunden, siehe Abb. 5.7. Die Zellen werden dadurch im Hinblick auf möglichen Gasaustausch getrennt.

So entstehen Matten, die von der optischen Erscheinung an Eisbeu-

tel- oder Luftpolsterfolien (siehe Abb. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 und 5.6) erinnern, hier aber mit vakuumgedämmten Zellen.³

2.2 Potenzialabschätzung

Die beschriebenen Matten haben einen relativ großen Anteil an Siegnähten, die jede für sich eine Wärmebrücke darstellt.

Dieser Nachteil könnte durch eine Reihe von Vorteilen kompensiert werden, die im folgenden kurz beschrieben werden.

2.2.1 Herstellung / Formate

Die vereinheitlichte Herstellung erlaubt Vorfertigung, ohne die konkrete Anwendung zu berücksichtigen.

Es kann also ‚auf Lager‘ produziert werden, Maschinen werden optimal ausgenutzt.

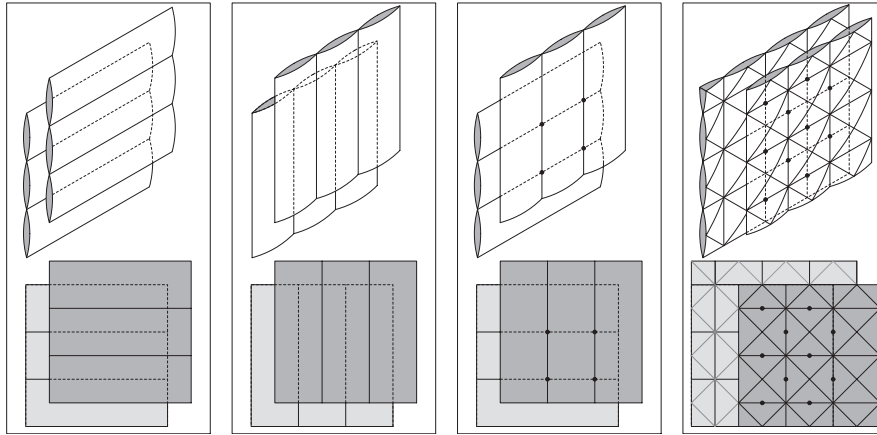


Abb. 5.5 a-d Überlegungen zur mehrlagigen Anwendung und möglichen Punkten für Durchdringungen am Beispiel rechteckiger, kontinuierlicher Geometrien.

Theoretisch ist in mindestens eine Richtung eine kontinuierliche Herstellung vorstellbar, was je nach Geometrie und Material sehr große Mattenformate ermöglicht, die zum Beispiel gerollt werden könnten.

2.2.2 Mehrlagigkeit

Die zu erwartenden deutlich geringeren Produktionskosten im Vergleich zu einzelnen maßgefertigten Paneelen erlauben eine grundsätzlich mehrlagige Anwendung.

Durch eine geeignete Geometrie werden die Matten so überlagert angeordnet, dass möglichst wenig Siegelnähte und damit lineare Wärmebrücken über einander zu liegen kommen, siehe beispielhaft Abb. 5.5 a-d.

Hierdurch kann dieser wesentliche Schwachpunkt teilweise kompensiert werden.

2.2.3 Fehlertoleranz

Die Integrität der einzelnen Zelle verliert an Bedeutung, da ihr Anteil an der Dämmwirkung des mehrlagigen Gesamtsystems verschwindend gering ist. Dies macht das System in einem hohen Maße fehlertolerant:

Das Ziel hinsichtlich der Definition der Faltung und der Verschweißung ist eine Minimierung von s in Abb. 5.7 und eine möglichst große Annäherung an die in der gleichen Abbildung unten gestrichelt gezeichneten Konturen, um die Wärmeverluste über die sich ergebenden Fugen f zu minimieren.

Ein entscheidender Vorteil dieses Prinzips ist, dass im Versagensfall der beschriebenen Verbindung unter der Annahme der Unversehrtheit des Hüllmaterials selbst zwei oder mehr Dämmstoffbereiche verbun-



Abb. 5.6 Luftpolsterfolie⁴ aus LD-PE, Kreis-Geometrie

den werden, was der Funktionalität des Systems nicht schadet, da das Vakuum weiter erhalten bleibt, wenn die defekte Verbindung nicht im Randbereich der Matte liegt.

Im Falle einer lokalen Beschädigung des Hüllmaterials und des Verlustes der Funktion der Gassperre fällt nur der betroffene Dämmstoffbereich aus.

Und wenn die zugrundeliegende Modulgröße a (gemäß Fig. 4-7) ausreichend klein gewählt wurde, ist die Funktionalität der Vakuumdämmstoffmatte als ganze weitgehend gewährleistet.

Unter Umständen kann die Zerstörung einzelner Zellen bewußt in Kauf genommen werden, zum Beispiel zur Anordnung von durchdringenden Befestigungen oder für den nachträglich Zuschnitt vor Ort.

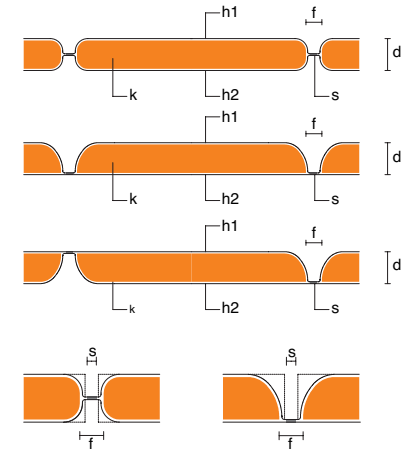


Abb. 5.7 Prinzipschnitte durch die Vakuumdämmungsmatte, Art und Lage der Siegelnähte, o.M.

Legende

- k Kernmaterial: Dämmstoff, evakuiert
- h1/2 Hüllmaterial außen und innen
- f Abstand zwischen den Zellen
- s Siegelnaht
- d Stärke der Dämmstoffzellen

Schnitte von oben nach unten:

- Mittige Lage der Siegelnaht (symmetrische Variante)
- Lage der Siegelnaht am Rand (asymmetrische Variante)
- theoretische weitere Möglichkeit: wechselnde Siegelnaht am Rand (asymmetrische Variante)
- Material- und Herstellungsverfahren-abhängige Ausbildung des Zellenrandes

	Kreis	Dreieck ($\alpha = 60^\circ$)	Viereck ($\alpha = 90^\circ$)	Sechseck ($\alpha = 120^\circ$)
regelmäßige Grundgeometrie (Rapportierungsmuster)				
Basisfigur mit Rapport / Rapport mit Grund- und Fugenmaß				
Rapportfläche A_{ges}	$\frac{\sqrt{3}}{4} a^2 \approx 0,43 a^2$	$\frac{\sqrt{3}}{2} a^2 \approx 0,86 a^2$	a^2	$\frac{\sqrt{3}}{4} a^2 \approx 0,43 a^2$
Fläche im Rapport ohne Dämmstoff (hellblau): A_r	$\frac{2\sqrt{3} \cdot a^2 - \pi (a-f)^2}{8}$	$3 a f - \frac{3\sqrt{3}}{2} f^2 \quad \text{für } f < \frac{a}{\sqrt{3}}$	$2 a f - f^2$	$\frac{\sqrt{3}}{4} (2 a f - f^2)$
Dämmstoffrandlänge im Rapport (rot): U_r	$\frac{\pi}{2} (a-f)$	$6 (a - \sqrt{3} f)$	$4 (a-f)$	$\sqrt{3} (a-f)$
Art der Überlagerung zweier Lagen im Hinblick auf eine Minimierung der Fugenüberlappung / mögliche Durchstoßpunkte (zum Beispiel zur Befestigung)				

Abb. 5.8 Vergleich der grundsätzlich möglichen regelmäßigen Rapportgeometrien: Flächen- und Ränderverhältnisse, optimale Art der Überlagerungen zweier Lagen im Sinne der Aufgabe.

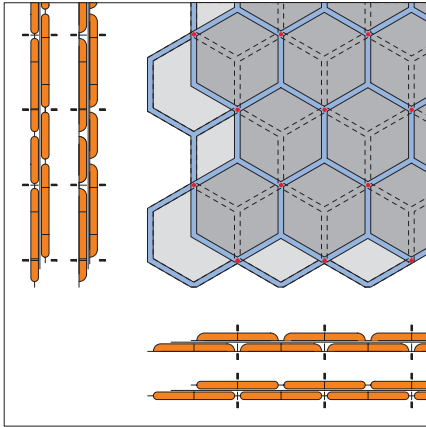


Abb. 5.9 Optimale Art der Überlagerung: vertikale Rapportverschiebung (minimale Fugenüberlappung)

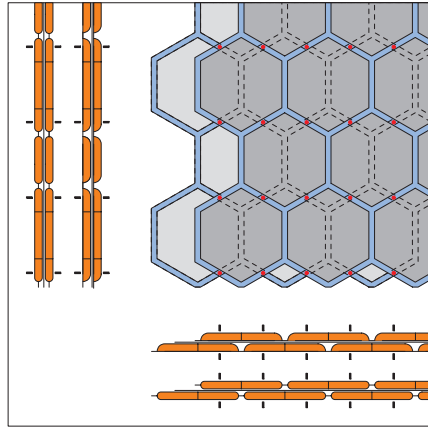


Abb. 5.10 Weitere mögliche Verschiebung im Rapport: horizontal, ein Drittel mehr Fugenüberlappung.

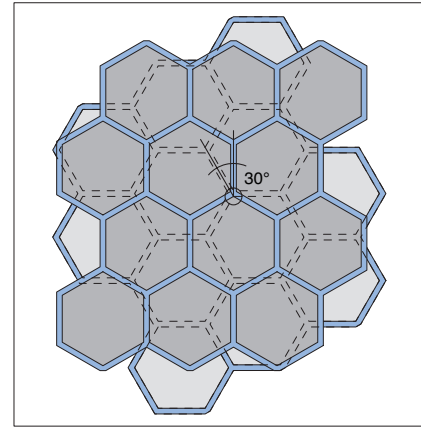


Abb. 5.11 Rapportüberlagerung durch Verdrehen (hier 30°)

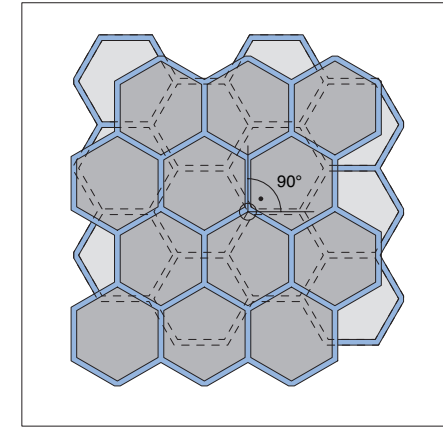


Abb. 5.12 Rapportüberlagerung durch Verdrehen (hier 90°)

3 Untersuchungen zur Geometrie

3.1 Anforderungen an die Geometrie

Der oben beschriebene Ansatz basiert auf einer Geometrie, die folgende Anforderungen erfüllt:

1. Das gewählte Muster muss rapportierbar⁵ sein.
2. Der Anteil der Siegelnahtflächen an der Gesamtfläche sollte wegen der damit verbundenen Wärmeverluste möglichst gering sein.
3. Die entstehenden Zellrandwinkel sollten möglichst stumpf sein, um das Hüllmaterial in möglichst geringem Umfang zu belasten.
4. Die Geometrie sollte eine möglichst vorteilhafte Art der Überlagerung zulassen, so dass eine minimale Anzahl der Siegelnähte über einander zu liegen kommen.

3.2 Vier ausgewählte Fälle

Um die Möglichkeiten des oben beschriebenen Ansatzes systematisch zu untersuchen, sollen im folgenden vier Fälle betrachtet werden, die auf den geometrischen Grundfiguren Kreis, Dreieck, Viereck in der speziellen Ausformung ‚Quadrat‘ und Hexagon beruhen, siehe hierzu Abb. 5.8.

Dreieck, Quadrat und Hexagon sind prinzipiell die einzigen regelmäßigen gleichseitigen Polygone, die als geometrische Grundfiguren bei konstanter Siegelnahtbreite rapportierbar sind und deren Rapportflächen sich durch nur eine Variable (a) beschreiben lassen.

3.3 Untersuchte Größen und Verhältnisse

Da der Wärmeenergieverlust über die Siegelnahtflächen A_r und besonders auch die Ränder U_r der mit

Dämmstoff gefüllten Zellen stattfindet, gilt diesen beiden Größen das besondere Augenmerk der vergleichenden Untersuchung.

Für alle Figuren gibt es ein aus dem Rapport abzuleitendes Grundmaß a und ein für die Ausbildung der Siegelnaht notwendiges Fugenmaß f .

Um einen Vergleich anstellen zu können, wird in einem ersten Schritt die Rapportfläche A_{ges} bestimmt und deren Abhängigkeit von a und f .

In einem zweiten Schritt ist die sich zwischen den mit Dämmstoff gefüllten Zellen ergebende Siegelnahtfläche A_r (hier kurz ‚Restfläche‘) zu ermitteln. Auch diese ist abhängig von a und f . Entsprechendes gilt für die im Bereich der Rapportfläche wirksame Summe der Ränder der Zellen U_r . Die entsprechenden Ergebnisse für A_{ges} , A_r und U_r bezogen auf die einzelnen Geometrien, finden sich in Abb. 5.8.

3.4 Mehrlagigkeit

Im Rahmen der in der vorliegenden Arbeit angedachten Anwendung der untersuchten Geometrien spielt die Frage einer in wärmetechnischer Hinsicht möglichst günstigen Überlagerung im Sinne einer maximalen Reduktion des Wärmebrückeneffektes eine wesentliche Rolle.

In der letzten Zeile der Tabelle Abb. 5.8 finden sich die jeweils in diesem Sinne günstigsten Möglichkeiten und die Position der Punkte (in rot dargestellt), an denen die Siegelnähte beider Lagen übereinander zu liegen kommen.

Diese Stellen könnten für eine durchdringende Befestigung herangezogen werden, ohne den Dämmstoff und damit das Vakuum zu verletzen.

Sind a und f ausreichend klein gewählt, kann auch eine Durch-

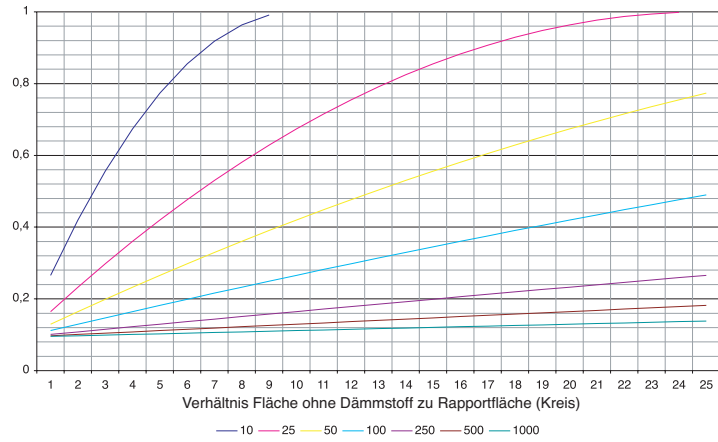


Abb. 5.13

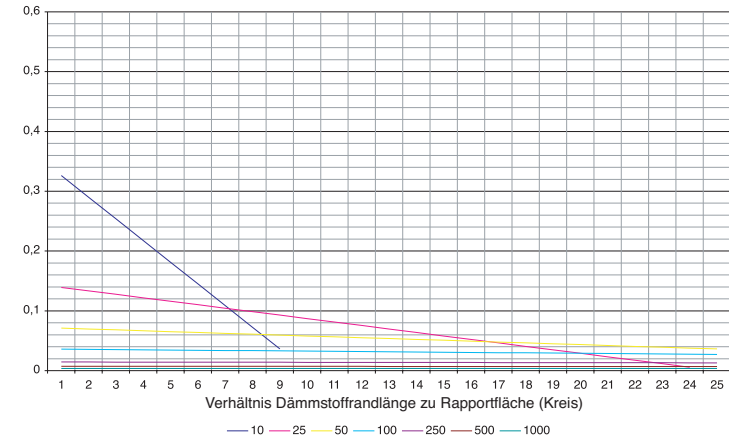


Abb. 5.16

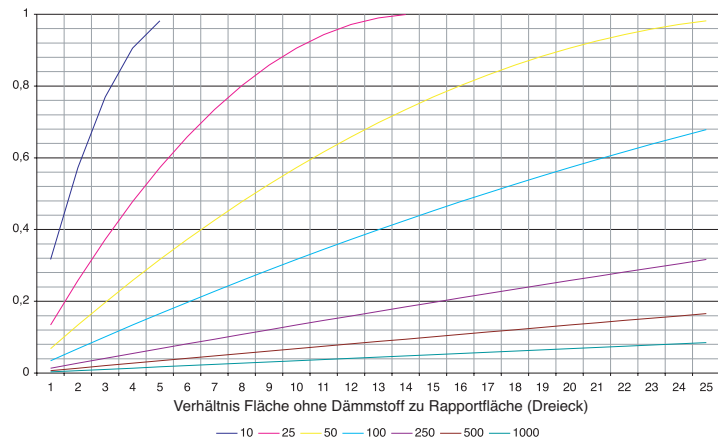


Abb. 5.14

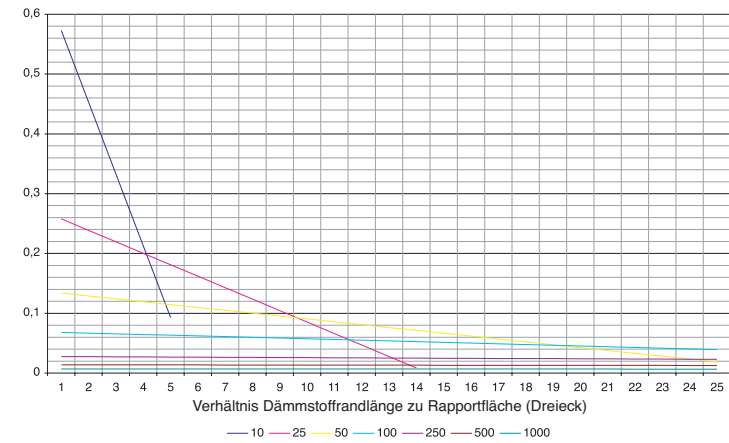


Abb. 5.17

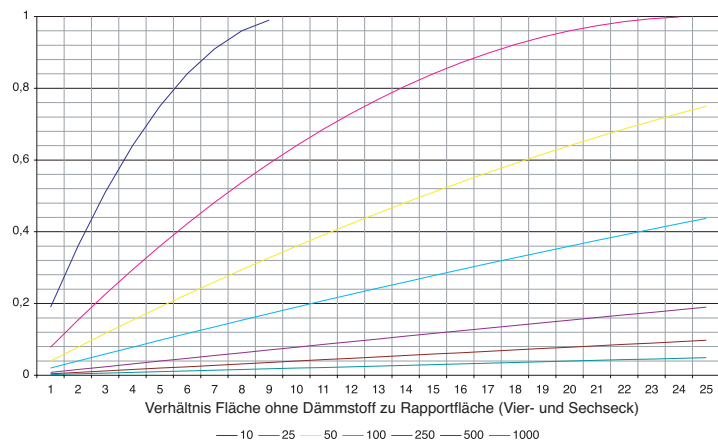


Abb. 5.15

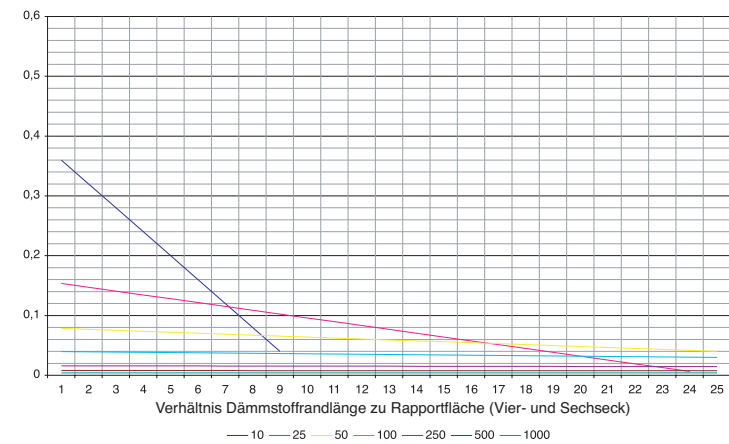


Abb. 5.18

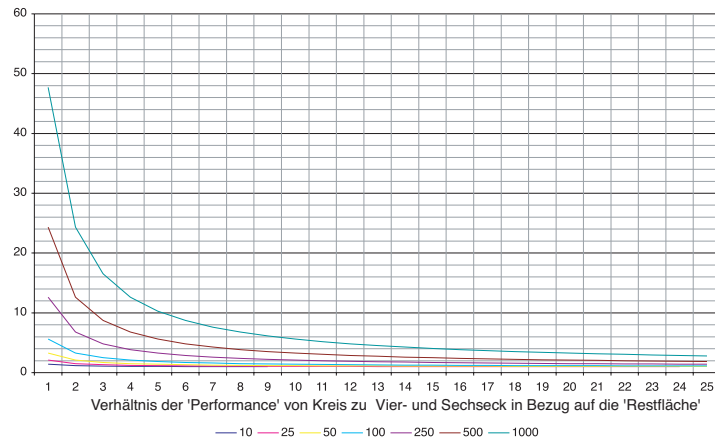


Abb. 5.19

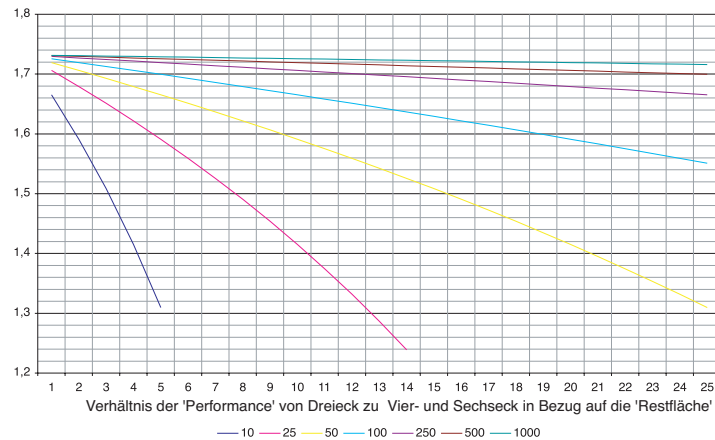


Abb. 5.20

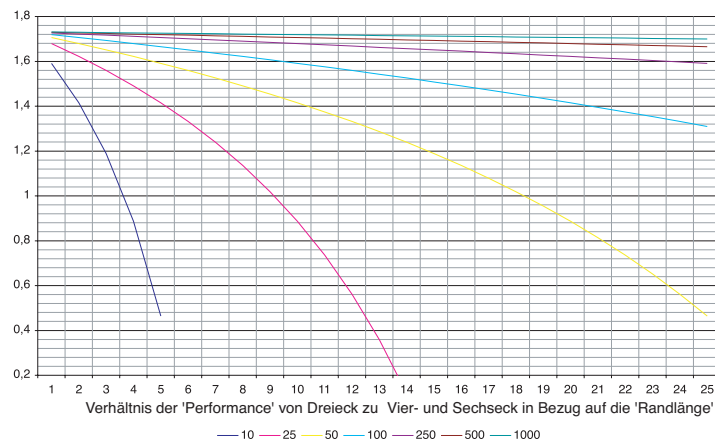


Abb. 5.21

dringung durch die mit Dämmstoff gefüllten Bereiche in Erwägung gezogen werden, da dann eventuell der punktuell erhöhte Wärmedurchgang in Kauf genommen werden kann.

Für den Fall ‚Sechseck‘ finden sich in den Abb 5.9, 5.10, 5.11 und 5.12 genauere Darstellungen zu weiteren Möglichkeiten der Überlagerung, wobei die beiden dargestellten Rapportüberlagerungen durch Verdrehen schon deshalb wenig zielführend sind, weil sie keine rapportbezogenen regelmäßigen Durchdringungspunkte ergeben.

Für die Praxis wird dabei auch von Bedeutung sein, dass die Lagen nicht gedreht werden müssen, sondern dass die Überlagerung vielmehr durch Verschiebung des Rapports erreicht werden kann.

3.5 Ergebnisse der Geometrieuntersuchungen

Um die unterschiedlichen Geometrien vergleichen zu können, müssen die Ergebnisse der beiden relevanten Größen A_r und U_r ins Verhältnis zu den jeweiligen Rapportflächen gesetzt werden:

$$A_r : A_{ges} \text{ und } U_r : A_{ges}$$

Dabei ist ein erstes (und für den Autor durchaus erstaunliches) Ergebnis, dass beide Verhältnisse für die Geometrien ‚Viereck‘ und ‚Sechseck‘ gleich sind.

Um die resultierenden quadrati-

schen (für die Flächen) und linearen (für die Ränder) Gleichungen, die die jeweiligen Verhältnisse beschreiben, besser deuten zu können, sind sie für die Grundmaßschritte (a) 10, 25, 50, 100, 250, 500, 1000 und Fugenmaße (f) zwischen 1 und 25 grafisch wie folgt dargestellt:

$A_r : A_{ges}$ (Kreis) in Abb. 5.13,
 $A_r : A_{ges}$ (Dreieck) in Abb. 5.14,
 $A_r : A_{ges}$ (Vier- und Sechseck) in Abb. 5.15,

$U_r : A_{ges}$ (Kreis) in Abb. 5.16,
 $U_r : A_{ges}$ (Dreieck) in Abb. 5.17,
 $U_r : A_{ges}$ (Vier- und Sechseck) in Abb. 5.18.

3.6 Wertung der Ergebnisse

Als erstes ist auffällig, dass die Verhältnisse bezogen auf Fläche und Rand für die Geometrien ‚Kreis‘ und ‚Vier-‘ bzw. ‚Sechseck‘ sehr nahe beieinander liegen, während der Fall ‚Dreieck‘ deutlich ungünstiger ausfällt.

Um aber genauere Aussagen treffen zu können, müssen die Ergebnisse erneut ins Verhältnis gesetzt werden:

$$(1) \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (Kreis)} : \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (4-/6-Eck)}$$

$$(2) \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (3-Eck)} : \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (4-/6-Eck)}$$

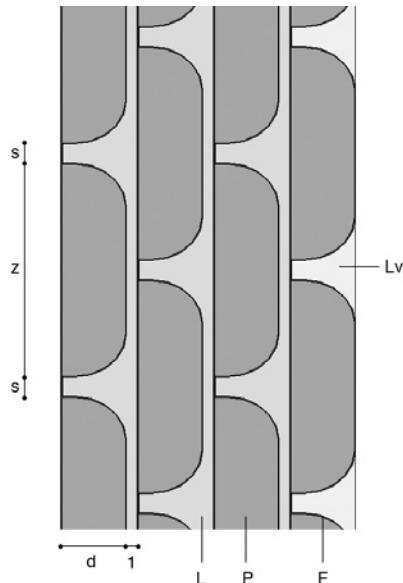


Abb. 5.22 Prinzipschnitt des gewählten Untersuchungsbereichs, o.M.

Legende zu Abb. 5.22

- P Porenfüllmaterial (Dämmstoff, evakuiert)
- F Zellhüllenmaterial
- L Luft zwischen Zellenmatten
- Lv Luft zwischen Zellen auf der Außenseite, geometriebedingt geringere Ventilation
- z Zellbreite
- s Zellabstand
- d Zellstärke

Abstand zwischen den Matten im Mittel:
1 mm

$$(3) \frac{U_r}{A_{ges}} (\text{Kreis}) : \frac{U_r}{A_{ges}} (4\text{-}/6\text{-Eck})$$

$$(4) \frac{U_r}{A_{ges}} (3\text{-Eck}) : \frac{U_r}{A_{ges}} (4\text{-}/6\text{-Eck})$$

Grafische Darstellungen für

- (1) in Abb. 5.19,
- (2) in Abb. 5.20,
- (4) in Abb. 5.21.

(3) Hier ist das Verhältnis konstant:

$$\frac{U_r}{A_{ges}} [(\text{Kreis}) : (4\text{-}/6\text{-Eck})] = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} \approx 0,91$$

(1) bis (4) geben Aufschluss über die im Sinne der Aufgabe maßgebliche ‚Performance‘ der Geometrien.

Folgende Schlüsse können gezogen werden:

Für große Grundmaße und kleine Fugenmaße ist die Geometrie ‚Kreis‘ dem Fall ‚Vier- und Sechseck‘ sehr unterlegen (zum Beispiel um den Faktor 25 bei $a = 1000$ und $f = 2$), während in Bezug auf die ‚Randlänge‘ der Fall ‚Kreis‘ konstant ca. 10% besser ist. Für kleine Grundmaße und relativ große Fugen nähern sich die beiden Varianten im Hinblick auf die ‚Restfläche‘ immer weiter an, so dass der immer noch verbleibende 10%-Vorteil für den Rand stärker ins Gewicht fällt.

Was den Vergleich ‚Dreieck‘ zu ‚Vier- und Sechseck‘ angeht, sind

die Performance-Figuren für die Fragen ‚Restflächen‘ und ‚Randlängen‘ sehr ähnlich.

In Bezug auf beide Größen ist der Fall ‚Dreieck‘ dem ‚Vier- und Sechseck‘ bis maximal zum Faktor von ca. 1,7 unterlegen, außer für kleine Grundmaße mit sehr großen Fugen (was in der Praxis kein bevorzugter Fall sein wird).

Weiterhin offen bleibt bis jetzt allerdings die Frage, welchen Anteil an den Gesamtwärmeenergieverlusten die beiden untersuchten Kenngrößen, also die Übergänge über die Fläche und über die Ränder, haben.

Hierzu werden im Folgenden zweidimensionale Wärmedurchgangssimulationen durchgeführt, wobei auch die Auswirkungen weiterer bestimmender Einflussgrößen abgeschätzt werden sollen.

3.7 Weitere Aspekte

3.7.1 Mögliche Schnitte

Insbesondere die Geometrien ‚Dreieck‘ und ‚Viereck‘ bieten den Vorteil, dass die kontinuierlich produzierten Matten entlang gerader, durch die Geometrie vorgegebenen Kanten durch die Mitte der Verschweißung geschnitten werden können.

Auf diese Weise könnten daraus auch wieder einzelne Elemente, zum Beispiel Platten, hergestellt werden.

3.7.2 Transport / Rollbarkeit

Beide Geometrien bieten zudem den Vorteil, dass solche Matten bei geeigneter Ausbildung der Siegelnaht gerollt und in dieser Form transportiert werden können, da keine Biegung der dämmstoffgefüllten Bereiche erforderlich ist:

Die Wahl der zugrundeliegenden Geometrie der Füllkammern und deren Anordnung, die Länge der zwischen den Kammern befindlichen Stege, das verwendete Hüllmaterial und die gewählte Versiegelungstechnik bestimmen dabei maßgeblich die Steifigkeit der wärmedämmenden Noppenmatte.

Durch geeignete Bestimmung dieser Randbedingungen lässt sich erreichen, dass die Matten in eine Richtung verformbar sind zum Beispiel für die Dämmung zylindrischer Teile.

4 Wärmetechnische Untersuchungen der vorgeschlagenen Vakuumdämmungsmatten

4.1 Simulationstechnik und Hinweise zu den Ergebnissen

Die zweidimensionalen Wärmedurchgangssimulationen wurden mit dem Computerprogramm THERM 5.2 durchgeführt, das am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL, San Francisco, USA) entwickelt wurde.

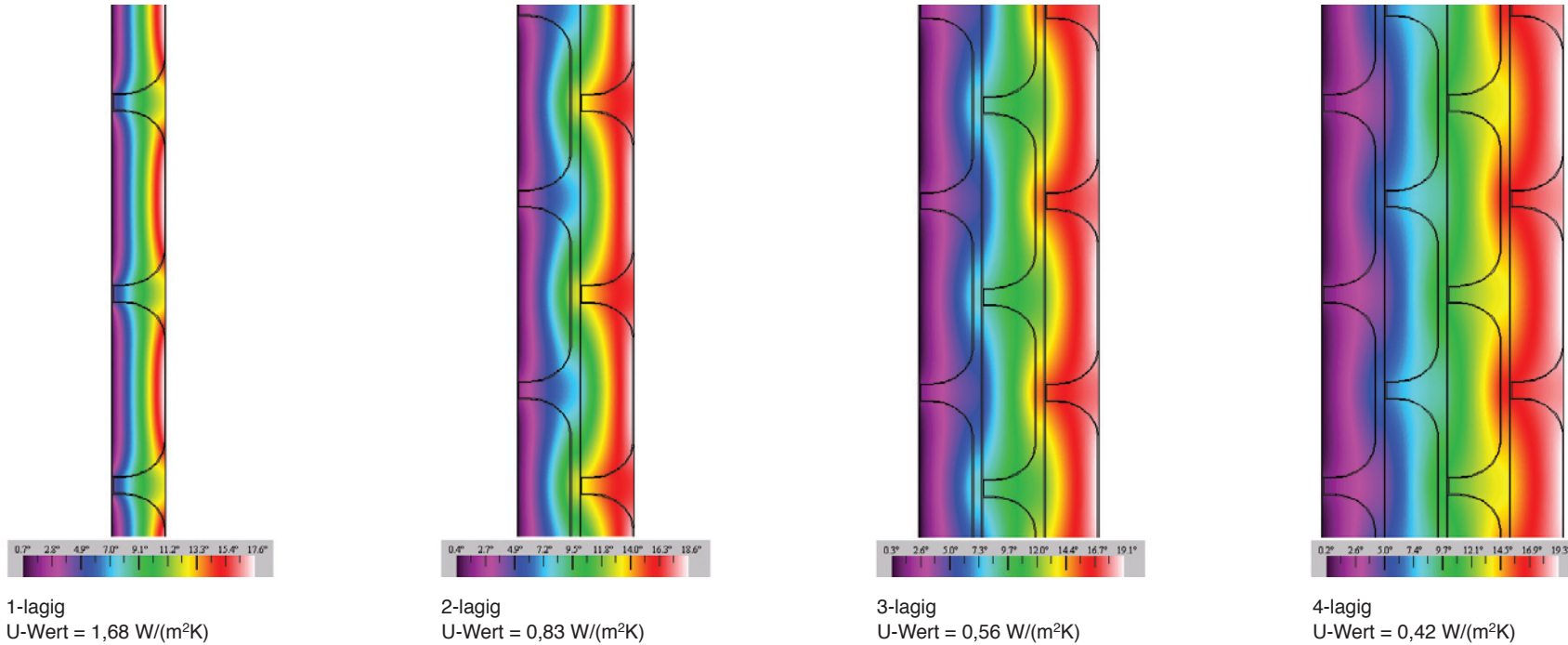


Abb. 5.23 Veränderung des U-Wertes und Einfluss auf den Isothermenverlauf durch ein- bzw. mehrlagige Anwendung (Referenzvariante $d = 5 \text{ mm}$; $s = 2 \text{ mm}$; $z = 20 \text{ mm}$), Abbildungsmaßstab ca. $1,5 : 1$

Es handelt sich um Software für die thermische 2D-Simulationen auf Basis von Finite-Elemente-Modellen, die speziell für die Untersuchung von Bauteilen im Bereich der Gebäudehülle (insbesondere Fensterprofile) optimiert wurde und hier sehr genaue Ergebnisse liefert.

Mit dieser Simulationsmethode können die untersuchten Geometrien aus Abschnitt 3 allerdings nicht vollständig abgebildet werden, da ausschließlich Abschätzungen einer 2D-Vorgabe in einer Schnittebene (mit einer gedachten kontinuier-

lichen Projektion in z-Richtung) angestellt werden können.

Die daher noch erforderliche Zusammenführung und abschließende Betrachtung der Ergebnisse findet im folgenden Abschnitt 5 statt.

Es sei auch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ermittelten Werte ohne empirische Validierung nicht als abgesichert gelten können. Die ermittelten Temperaturverläufe beziehen sich auf folgende,

der Simulation zugrunde gelegten Randtemperaturen:
Außen 0°C und innen 20°C .

Neben dem U-Wert liefert die Simulationssoftware als weiteres Ergebnis den Verlauf der Isothermen und des Wärmeflusses (Heat-Flux) durch den betrachteten Querschnitt.

Für die grafische Darstellung wird das jeweils auftretende Temperaturspektrum zwischen Minimum und Maximum auf den Oberflächen auf die verfügbaren Farben aufgespreizt. Daher ist für die Inter-

pretation die individuell beigefügte Farblegende elementarer Bestandteil.

Die Größenordnung der einzelnen Farben ist somit in jeder Darstellung unterschiedlich.

Die Isothermendarstellung gibt Auskunft über die zu erwartenden Oberflächentemperaturen. Zusammen mit einer entsprechenden Annahme von jeweils anzusetzender Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit ließe dies Aussagen über einen zu erwartenden Tauwasserausfall zu.

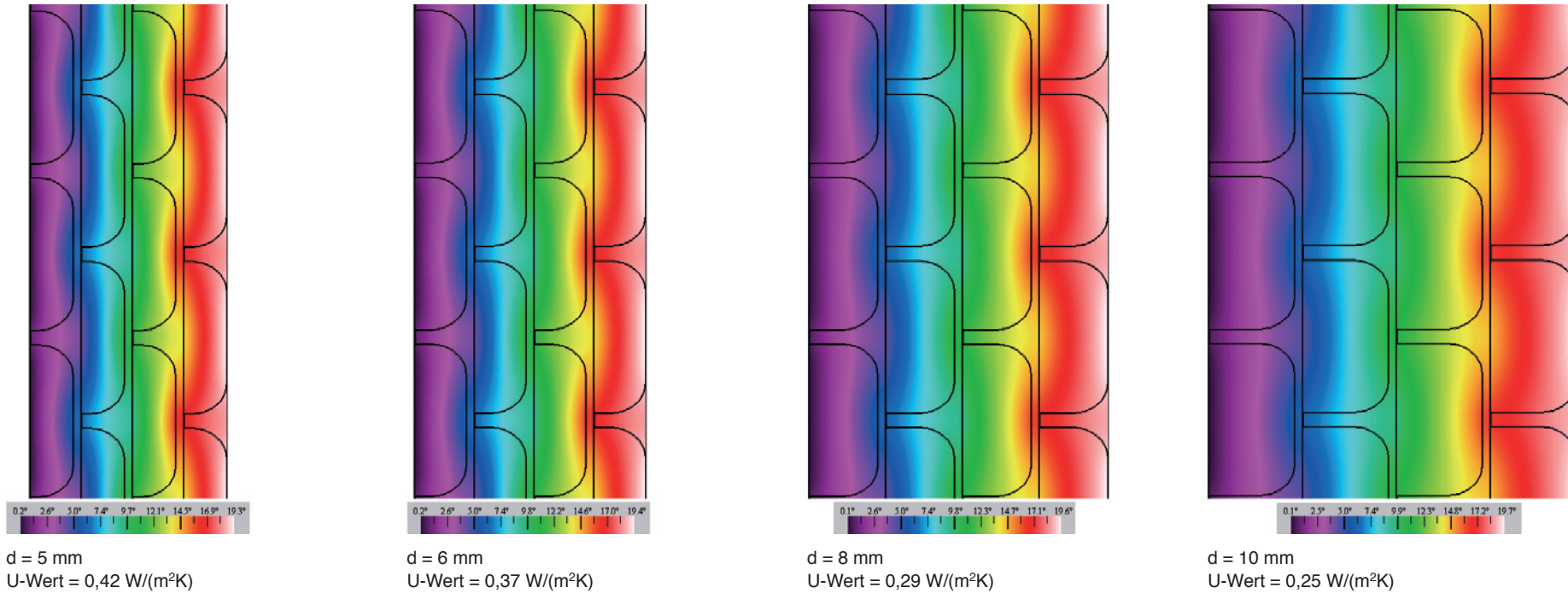


Abb. 5.24 Veränderung des U-Wertes und Einfluss auf den Isothermenverlauf durch Variation der Zellstärke (d) (konstant: $s = 2 \text{ mm}$; $z = 20 \text{ mm}$, 4-lagig, asymmetrische Geometrie), Abbildungsmaßstab ca. 1,5 : 1

4.2 Aufbau und Materialien

Den Simulationen liegt ein Aufbau gemäß Abb. 5.22 zugrunde, wobei die Ränder, ähnlich wie bei den Betrachtungen im vorangegangenen Abschnitt 3, genau auf die Rapportmitten abgestimmt sind, um von dieser Seite keine Verzerrungen zuzulassen.

Hinsichtlich möglicher Materialien gilt analog das zu konventionellen VIP in Teil 3 Abschnitt 2.2 (Kernmaterialien) und Abschnitt 2.3 (Hüllmaterialien) Ausgeführte.

Für die Simulationen wurde pyroge-ne Kieselsäure mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 20 \text{ mW}/(\text{mK})$ bei 1 bar und $5 \text{ mW}/(\text{mK})$ bei ca. 1 mbar und eine übliche Hochbarrierefolie angenommen.

4.3 Simulationsreihen

Um eine möglichst hohe Relevanz der Simulationsergebnisse zu erzielen, wurde in Anbetracht der relativ hohen Zahl an Variablen eine Basisgeometrie mit folgenden Werten als Referenzfall ausgewählt:

Zellstärke (d): 5 mm
 Zellbreite (z): 20 mm
 Zellabstand (s): 2 mm

Diese Werte wurden, von der Referenzvariante ausgehend in Simulationsreihen variiert, zusätzlich jeweils in 1-, 2-, 3- und 4-lagiger Ausführung.

4.3.1 Ein- und Mehrlagigkeit

Abb. 5.23 zeigt den Isothermenverlauf für eine ein-, zwei-, drei- und vierlagige Anwendung unter Angabe der jeweiligen U-Werte.

Es zeigt sich ein annähernd reziproker Zusammenhang zwischen U-Wert und Anzahl der Lagen, der in dieser Art auch bei allen weiteren Simulationsreihen innerhalb einer Variante zu beobachten ist.

4.3.2 Variierende Zellstärke

Abb. 5.24 zeigt den Isothermenverlauf und gibt die U-Werte für variierende Zellstärken von 5, 6, 8 und 10 mm (jeweils 4-lagig) an. Die ausführlichen Simulationsergebnisse finden sich in der Tabelle Abb. 5.27, und nach Lagenzahl⁶

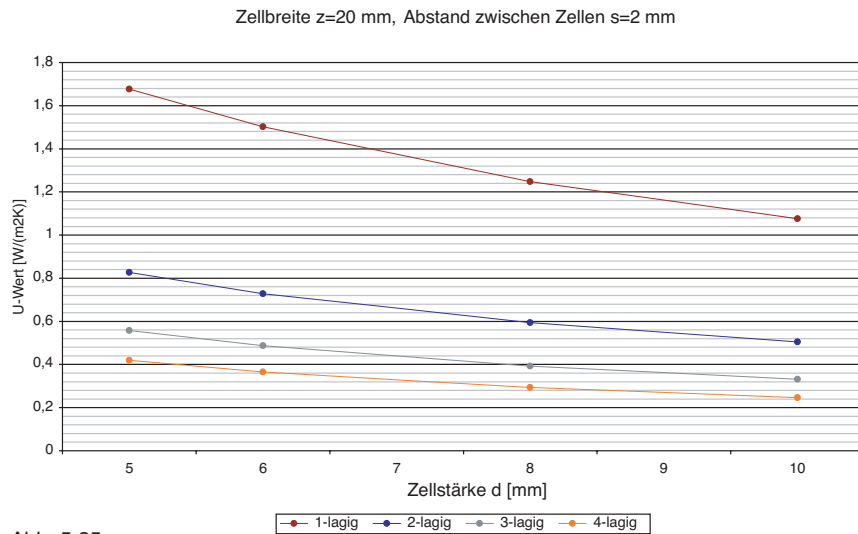


Abb. 5.25

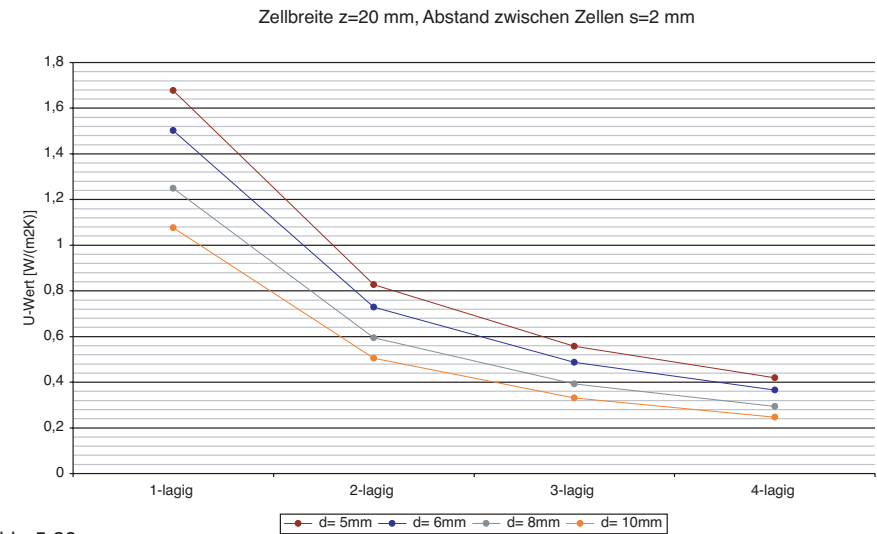


Abb. 5.26

Zellbreite (z) = 20 mm; Zellabstand (s) = 2 mm												
	d = 5 mm (Referenz)			d = 6 mm			d = 8 mm			d = 10 mm		
	U-Wert (Ges.-Stärke)	Verhältnis zu Referenz (d = 5mm)	ø-Wert für λ	U-Wert (Ges.-Stärke)	Verhältnis zu Referenz (d = 5mm)	ø-Wert für λ	U-Wert (Ges.-Stärke)	Verhältnis zu Referenz (d = 5mm)	ø-Wert für λ	U-Wert (Ges.-Stärke)	Verhältnis zu Referenz (d = 5mm)	ø-Wert für λ
	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]
1 - lagig	1,68 (5mm)	100	8,4	1,50 (6mm)	90	9,0	1,25 (8mm)	75	10,0	1,08 (10mm)	64	10,8
2 - lagig	0,83 (11mm)	100	9,1	0,73 (13mm)	88	9,5	0,59 (17mm)	72	10,0	0,50 (21mm)	61	10,5
3 - lagig	0,56 (17mm)	100	9,5	0,49 (20mm)	87	9,8	0,39 (26mm)	71	10,1	0,33 (32mm)	59	10,6
4 - lagig	0,42 (23mm)	100	9,7	0,37 (27mm)	87	10,0	0,29 (35mm)	70	10,1	0,25 (43mm)	59	10,8

Abb. 5.27 Simulationsergebnisse bei variierender Zellstärke (d), prozentuale Verhältnisse, asymmetrische Geometrie (Zellverbindungsstege am Rand)

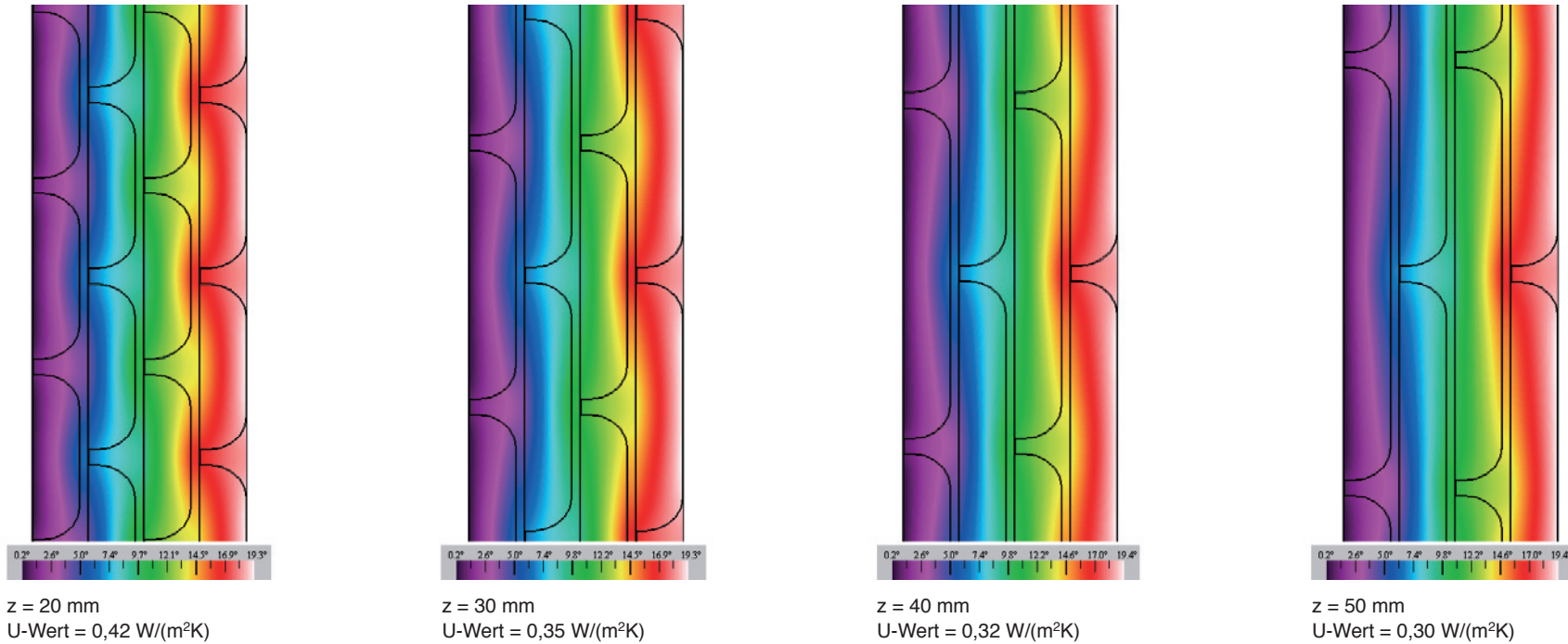


Abb. 5.28 Veränderung des U-Wertes und Einfluss auf den Isothermenverlauf durch Variation der Zellbreite (z)
(konstant: d = 5 mm; s = 2 mm; z = 20 mm, 4-lagig, asymmetrische Geometrie), Abbildungsmaßstab ca. 1,5 : 1

bzw. Zellstärke aufgetragen in Abb. 5.25 und 5.26.

Bemerkenswert sind die rechnerischen Ergebnisse für die theoretische lineare, gemittelte Wärmeleitfähigkeit λ (Produkt aus U-Wert und Gesamtsystemstärke), die mit zunehmender Lagenanzahl und Zellstärke sogar leicht ansteigt.

Dies ist auf die im Verhältnis zu den evakuierten Zellen deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit der eingeschlossenen Luftschichten zwischen den Matten zurückzuführen.

4.3.3 Variierende Zellbreite

Abb. 5.28 zeigt den Isothermenverlauf und gibt die U-Werte für variierende Zellbreiten von 20, 30, 40 und 50 mm an (jeweils 4-lagig). Die ausführlichen Simulationsergebnisse finden sich in der Tabelle (Abb. 5.31), und nach Lagenzahl bzw. Zellbreite aufgetragen in Abb. 5.29 und 5.30.

Erwartungsgemäß sinken hier die rechnerischen Ergebnisse für die theoretische lineare, gemittelte Wärmeleitfähigkeit λ mit zuneh-

mender Zellbreite, da der Fugenteil in der Projektionsrichtung des U-Wertes abnimmt.

4.4 Sonderuntersuchungen

Ebenfalls im Verhältnis zur Referenzvariante wurden zwei weitere Fragestellungen untersucht, die von Interesse schienen:
Welchen Einfluss hat die Lage der Verbindungsstege zwischen den Zellen?
Welche Auswirkungen sind für welche Anteile an defekten (belüfteten) Zellen zu erwarten?

4.4.1 Lage der Siegelnahtverbindung

In Abb. 5.7 unten finden sich zwei mögliche Arten, die beiden Hüllmaterialien zu verbinden. Links im Bild werden diese im Schnitt symmetrisch in der Mitte verbunden, rechts dagegen verläuft die eine glatt und gerade, während die andere der Form des Dämmstoffes folgt.

Beide Varianten sind vorstellbar und hängen sicherlich vor allem davon ab, welches Herstellungsverfahren gewählt wird, und ob zum

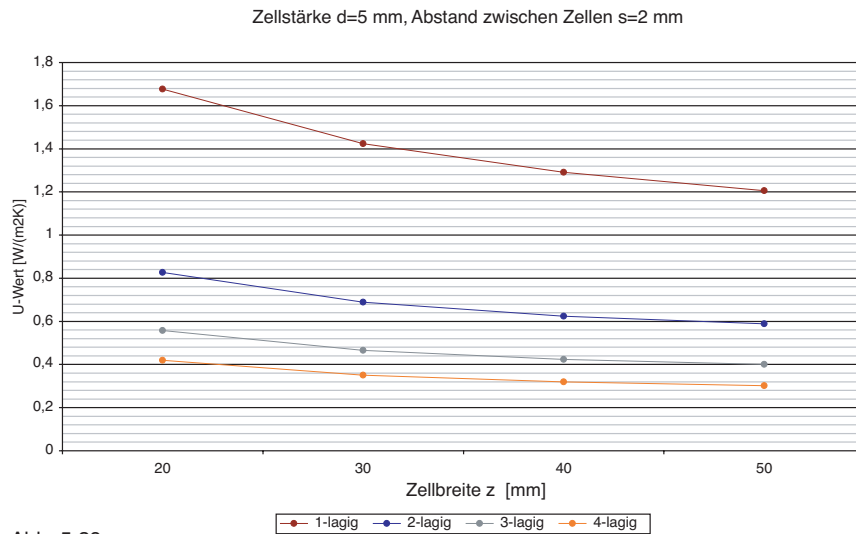


Abb. 5.29

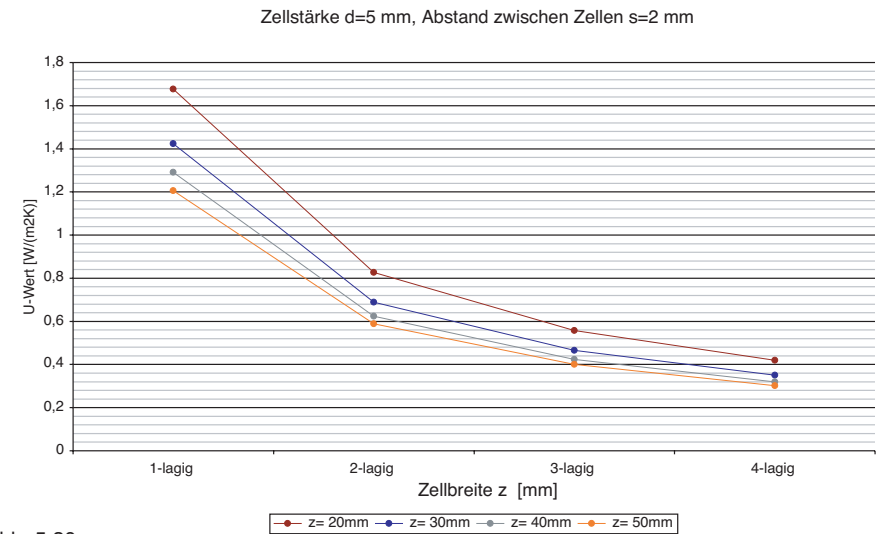
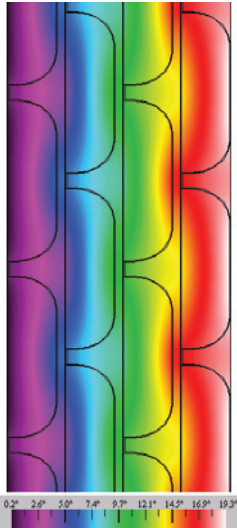


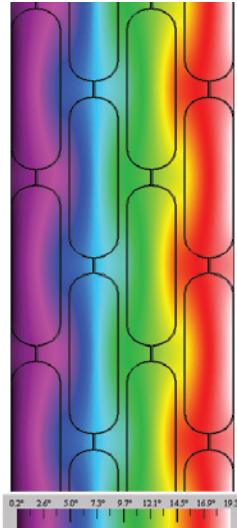
Abb. 5.30

		Zellstärke (d) = 5 mm; Zellabstand (s) = 2 mm											
		z = 20 mm, Fugenanteil 9% (Referenz)			z = 30 mm, Fugenanteil 6%			z = 40 mm, Fugenanteil 5%			z = 50 mm, Fugenanteil 4%		
Ges.-Stärke	U-Wert	Verhältnis zu Referenz (z = 20mm)	ø-Wert für λ	U-Wert	Verhältnis zu Referenz (z = 20mm)	ø-Wert für λ	U-Wert	Verhältnis zu Referenz (z = 20mm)	ø-Wert für λ	U-Wert	Verhältnis zu Referenz (z = 20mm)	ø-Wert für λ	
[mm]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	
1 - lagig	5	1,68	100	8,4	1,42	85	7,1	1,29	77	6,5	1,21	72	6,1
2 - lagig	11	0,83	100	9,1	0,69	83	7,6	0,62	75	6,8	0,59	69	6,5
3 - lagig	17	0,56	100	9,5	0,47	83	8,0	0,42	76	7,2	0,40	72	6,8
4 - lagig	23	0,42	100	9,7	0,35	83	8,1	0,32	76	7,4	0,30	72	6,9

Abb. 5.31 Simulationsergebnisse bei variierender Zellbreite (z), prozentuale Verhältnisse, asymmetrische Geometrie (Zellverbindungsstege am Rand)



4-lagig, asymmetrische Variante
U-Wert = 0,42 W/(m²K)



4-lagig, symmetrische Variante
U-Wert = 0,42 W/(m²K)

Abb. 5.32 Abhängigkeit des U-Wertes und Einfluss auf den Isothermenverlauf durch Anordnung der Zellverbindungsstege (Referenzvariante $d = 5 \text{ mm}$; $s = 2 \text{ mm}$; $z = 20 \text{ mm}$), Maßstab ca. 1,5 : 1

Beispiel für die beiden gasdichten Hüllschichten die gleichen oder unterschiedliche Materialien gewählt werden.

In den Simulationen konnte gezeigt werden, dass diese Entscheidung keinen nennenswerten Einfluss auf den Wärmedurchgang hat, soweit beide Hüllfolien über die gleiche Wärmeleitfähigkeit verfügen, siehe hierzu Abb. 5.32 und die Tabelle Abb. 5.36.

Die Darstellung des Isothermenverlaufs (hier am 4-lagigen Beispiel) macht dieses Ergebnis auch optisch anschaulich.

4.4.2 Defekte (belüftete) Zellen

Da die erwartete Fehlertoleranz des Systems im Vergleich zu konventionellen Paneelen ein Hauptargument zu Beginn der Untersuchungen darstellte, wurde in einer eigenen Simulationsreihe untersucht, welchen Einfluss defekte Zellen auf die Wärmedämmwirkung des Systems haben.

Dabei wurde eine Zerstörung durch Belüftung angenommen (zum Beispiel durch mechanische Beschädigung oder Durchdringung zu Befestigungszwecken o.ä.). Für den angenommenen Dämmstoff ergibt sich dann immer noch eine

	Referenzvariante ($d = 5 \text{ mm}$; $s = 2 \text{ mm}$; $z = 20 \text{ mm}$)		nur Folien mit Luftzwischenraum (Folienabstand 5 mm)			Folien mit durchgehenden konventionellen Dämmstoffschichten mit $\lambda = 0,042$ dazwischen (je 5mm)			Folien mit durchgehenden belüfteten Vak.-Dämmstoffschichten dazwischen (je 5mm)			Folien mit durchgehenden evakuierten Vak.-Dämmstoffschichten dazwischen (je 5mm)			
	Ges.- Stärke	U-Wert	σ -Wert für λ	U-Wert	Verhältnis zu Referenz	σ -Wert für λ	U-Wert	Verhältnis zu Referenz	σ -Wert für λ	U-Wert	Verhältnis zu Referenz	σ -Wert für λ	U-Wert	Verhältnis zu Referenz	σ -Wert für λ
	[mm]	[W/(m²K)]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]	[W/(m²K)]	[%]	[mW/(mK)]
1 - lagig	5	1,68	8,4	5,86	349	29,3	3,50	208	17,5	2,43	144	12,2	0,88	52	4,4
2 - lagig	11	0,83	9,1	3,42	413	34,2	2,30	277	23	1,45	176	14,5	0,47	57	4,7
3 - lagig	17	0,56	9,5	2,42	433	36,3	1,71	305	25,7	1,04	186	15,6	0,32	57	4,8
4 - lagig	23	0,42	9,7	1,87	447	37,4	1,36	324	27,2	0,81	192	16,2	0,24	58	4,8

Abb. 5.33 Simulationsergebnisse von drei Referenzszenarien im Vergleich zum gewählten Ausgangsformat

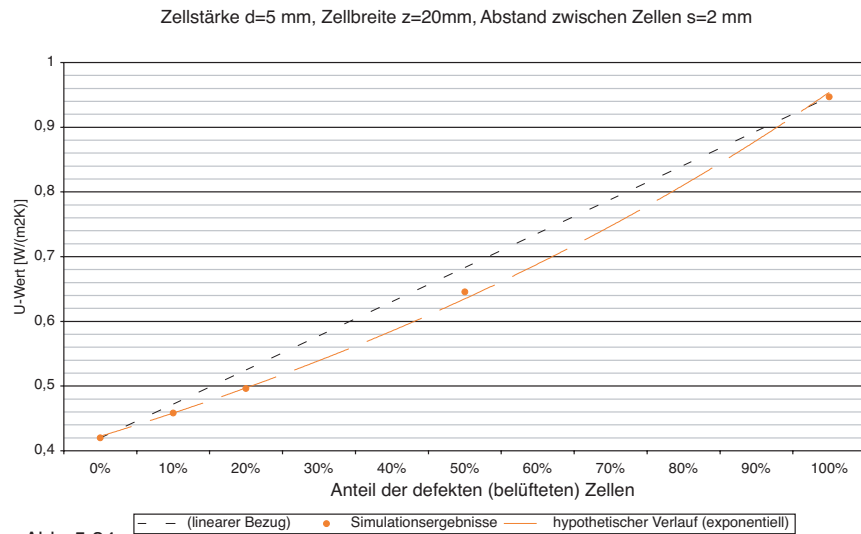


Abb. 5.34

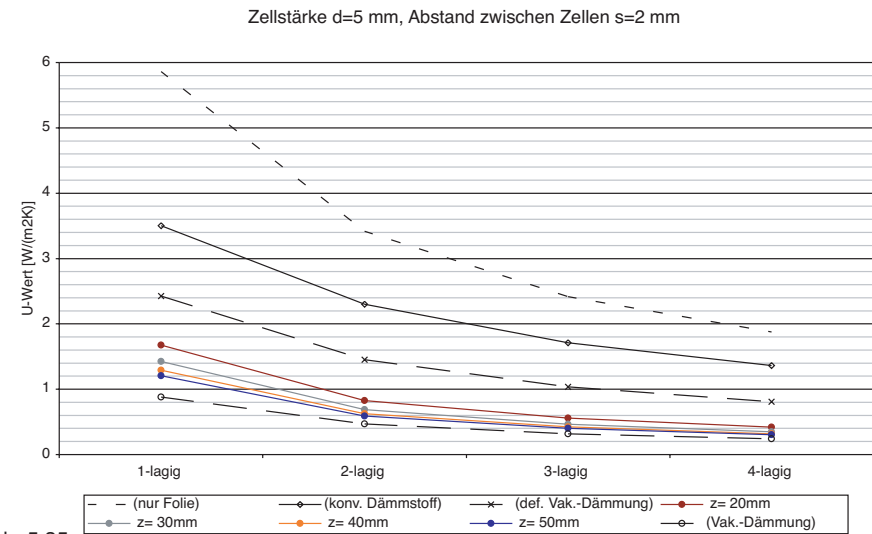


Abb. 5.35

		Referenzvariante (d = 5 mm; s = 2 mm; z = 20 mm)											
		asymmetrische Geometrie (Zellverbindungsstege am Rand)					symmetrische Geometrie (Zellverbindungsstege mittig)						
		Anteil an defekten (belüfteten Zellen)					Anteil an defekten (belüfteten Zellen)						
		0%					10%					20%	100%
Ges.-Stärke		U-Wert	Verhältnis zu Var. 1-lagig	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)	U-Wert (Verh. zu Referenz)
[mm]		[W/(m²K)]	[%]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]
1 - lagig	5	1,68	100					1,63	100				
2 - lagig	11	0,83	49					0,82	50				
3 - lagig	17	0,56	33					0,55	34				
4 - lagig	23	0,42	25	0,46 (109%)	0,50 (118%)	0,65 (154%)	0,95 (226%)	0,42	26	0,46 (109%)	0,49 (118%)	0,94 (225%)	

Abb. 5.36 Simulationsergebnisse für zwei weitere Fragestellungen:

1. Welchen Einfluss hat die Lage der Verbindungsstege an den Zellen (am Rand oder mittig)?
2. Welchen Einfluss haben defekte (also belüftete) Zellen?

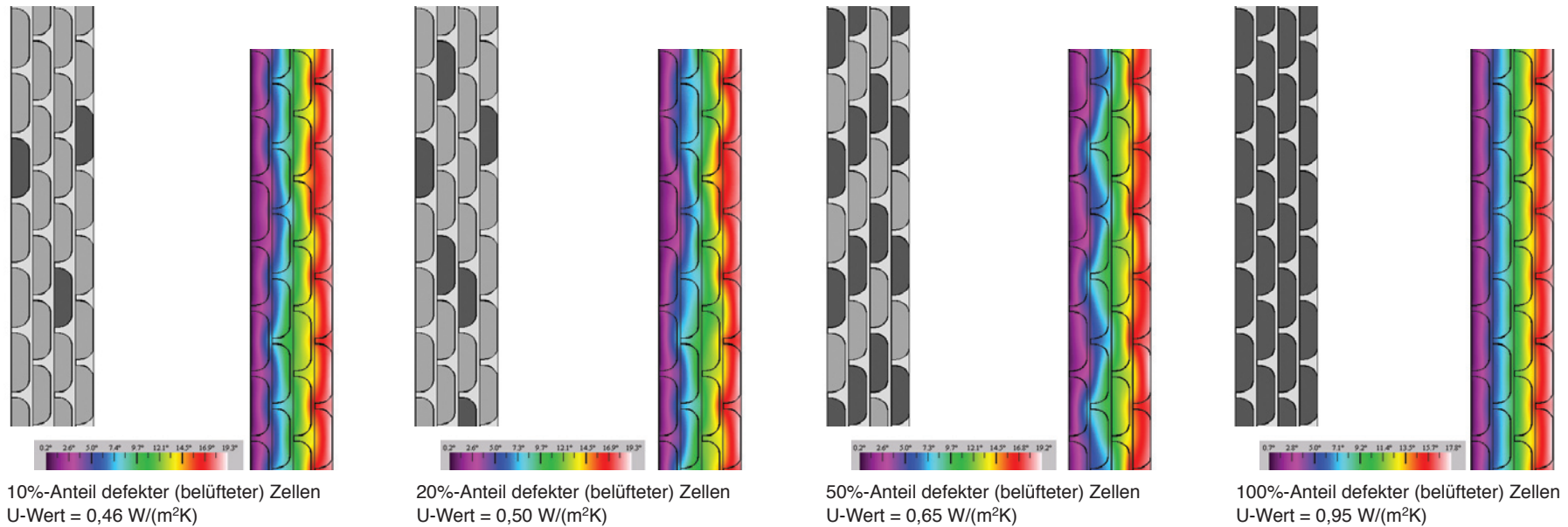


Abb. 5.37 Veränderung des U-Wertes und Einfluss auf den Isothermenverlauf durch defekte (belüftete) Zellen auf eine 4-lagige Matte (Referenzvariante $d = 5 \text{ mm}$; $s = 2 \text{ mm}$; $z = 20 \text{ mm}$)

relativ gute Wärmeleitfähigkeit von ca. $20 \text{ mW}/(\text{mK})$, die der Simulationsreihe zugrunde gelegt wurde.

Da hier vor allem die ausgleichende Wirkung der Mehrlagigkeit interessiert und auch nur hier eine ausreichende Anzahl von Zellen im Betrachtungsausschnitt liegen, wurde diese Simulationsreihe anhand der Referenzvariante in 4-lagiger Ausführung durchgeführt, und zwar sowohl für den symmetrischen, als auch für den asymmetrischen Fall der Zellverbindungsstege (Abb. 5.36).

Im Isothermenverlauf sind die defekten Zellen deutlich zu erkennen, siehe Abb. 5.37.

Trägt man die resultierenden U-Werte im Verhältnis zum Anteil an defekten Zellen auf, zeigt sich ein flacher exponentieller, nahezu linearer Zusammenhang (Abb. 5.34).

4.5 Zum Vergleich herangezogene Varianten

Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, wurden vergleichende Simulationen zu vier weiteren Situationen durchgeführt:

1. Folien mit dazwischen liegender, stehender Luftschicht⁷,
2. Folien mit durchgehenden, konventionellen Dämmstoffschichten mit $\lambda = 0,042 \text{ W}/(\text{mK})$,

3. Folien mit durchgehenden, belüfteten Kieselsäureschichten,
4. Folien mit durchgehenden, evakuierten Kieselsäureschichten.

Die Ergebnisse finden sich in der Tabelle Abb. 5.33.

Um eine Einordnung im Zusammenhang zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse mit der Simulationsreihe zu variierender Zellbreite in einer gemeinsamen Grafik in Abb. 5.35 veranschaulicht.

Hier wird deutlich, wo man das vorgeschlagene System im Verhältnis einzuordnen hat.

Dabei stellt die 4. Vergleichsvariante aufgrund des fehlenden Fugeneffekts ein nicht zu erreichendes Optimum dar, an das sich die untersuchten Dämmmatten asymptotisch annähern.

Außerdem wird der Abstand ersichtlich, den selbst eine vollständig belüftete Matte mit einer Füllung aus pyrogener Kieselsäure vor einer (hypothetischen) Matte mit einem konventionellen Dämmstoff (wie zum Beispiel Polystyrolschaum) gleicher Stärke hätte.

5 Zusammenführung der Geometrieuntersuchungen mit den Simulationsergebnissen

5.1 Einordnung der Simulationsgeometrie

Die rechnerische Simulation geht von einer zweidimensionalen Schnittfigur aus. Die resultierenden Ergebnisse (flächenbezogene U-Werte) beruhen auf der Annahme, dass die Schnittfigur in z-Richtung (also aus der Bildebene heraus) kontinuierlich ist.

Übertragen auf eine Situation, wie sie den Untersuchungen zur Geometrie aus Abschnitt 3 in diesem Teil (vor allem der Tabelle Abb. 5.8) zugrunde liegen, ergibt sich eine einlagige, rapportierbare Figur, wie sie in Abb. 5.38 in der Ansicht dargestellt ist.

Analog zu Abschnitt 3 gilt hier:

$$A_{ges} = 1 \times a = a$$

$$A_r = 1 \times f = f$$

$$U_r = 2 \times 1 = 2$$

Und damit:

$$A_r : A_{ges} = f / a \text{ (siehe Abb. 5.39)}$$

$$U_r : A_{ges} = 2 / a$$

Um die Aussagen aus den Abschnitten 3 und 4 dieses Teiles in Deckung zu bringen, werden nun die beschriebenen Geometrien zur geometrischen Situation der Simulation (in den Bildunterschriften kurz: ‚Simulation‘) ins Verhältnis gesetzt:

$$(1) \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (Kreis)} : \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (Simulation)}$$

$$(2) \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (3-Eck)} : \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (Simulation)}$$

$$(3) \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (4-/6-Eck)} : \frac{A_r}{A_{ges}} \text{ (Simulation)}$$

$$(4) \frac{U_r}{A_{ges}} \text{ (Kreis)} : \frac{U_r}{A_{ges}} \text{ (Simulation)}$$

$$(5) \frac{U_r}{A_{ges}} \text{ (3-Eck)} : \frac{U_r}{A_{ges}} \text{ (Simulation)}$$

$$(6) \frac{U_r}{A_{ges}} \text{ (4-/6-Eck)} : \frac{U_r}{A_{ges}} \text{ (Simulation)}$$

Grafische Darstellungen finden sich für

(1) in Abb. 5.40,

(2) in Abb. 5.41,

(3) in Abb. 5.42,

(4) in Abb. 5.43,

(5) in Abb. 5.44,

(6) in Abb. 5.45.

5.2 Umrechnung der Simulationsreihen in die untersuchten Mattengeometrien

Aus Abb. 5.38 ergibt sich aus der Simulation das jeweilige Rapportgrundmaß als die Summe der Zellbreite und des Fugen- bzw. Zellabstandsmaßes (Spalten 1-3 in Abb. 5.49).

Jedem in der Simulationsreihe ‚Variierende Zellbreite‘ (Abschnitt 4.3.3) ermittelten U-Wert lässt sich ein aus dem Verhältnis zur entsprechenden ‚fugenlosen Variante‘ (Fall 4 in Abschnitt 4.5) ermittelter Faktor zuordnen, der einen Vergleich der Auswirkungen des Siegelnahtanteils zulässt, siehe Spalten 5-6 in Abb. 5.49.

In Spalte 7 derselben Abbildung finden sich die Verhältnisse $A_r : A_{ges}$ und $U_r : A_{ges}$, die für den speziellen Fall der vorliegenden Simulation identisch sind.

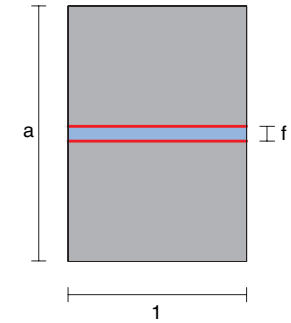


Abb. 5.38

Diese Daten liefern die Grundlage für die anschließende Umrechnung der Simulationsergebnisse auf die in Abschnitt 3 beschriebenen Geometrien.

Aus den ausgeführten Gründen können auch im folgenden die Geometrien ‚Viereck‘ und ‚Sechseck‘ zusammengefasst werden.

Da der Anteil der Wärmeübergangseffekte über den Rand im Vergleich zu dem über die Fläche mit den vorhandenen Methoden nicht bestimmbar ist, werden die

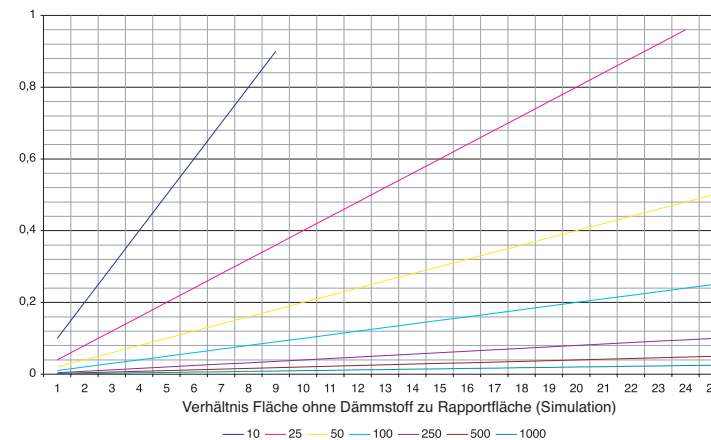


Abb. 5.39

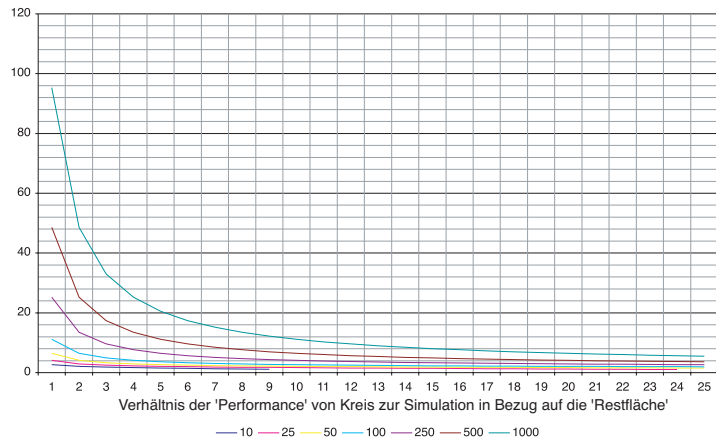


Abb. 5.40

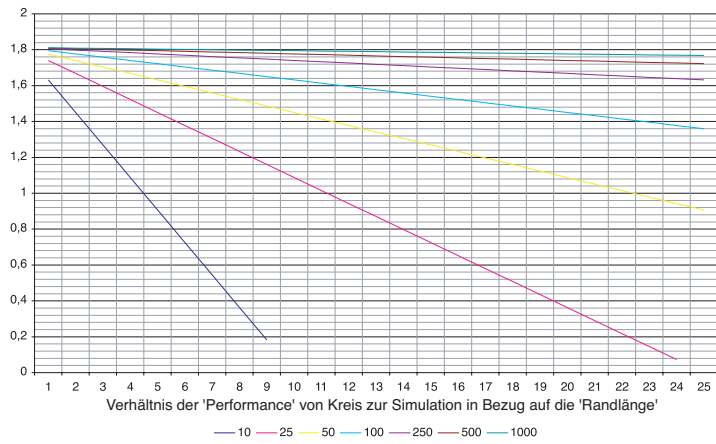


Abb. 5.43

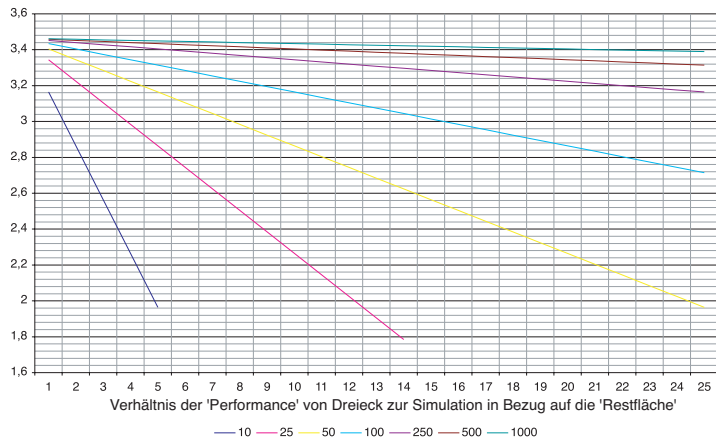


Abb. 5.41

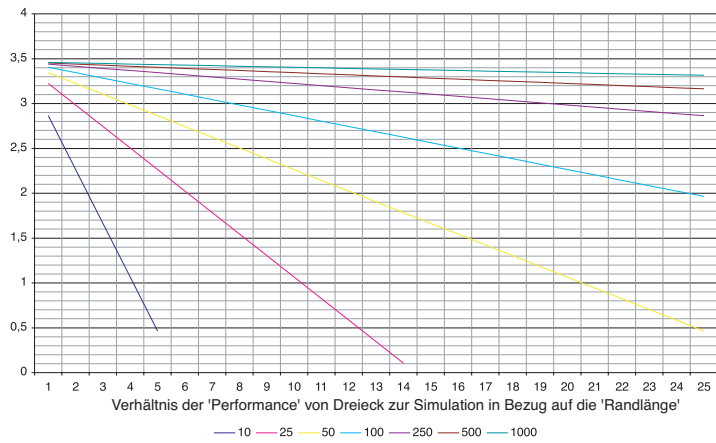


Abb. 5.44

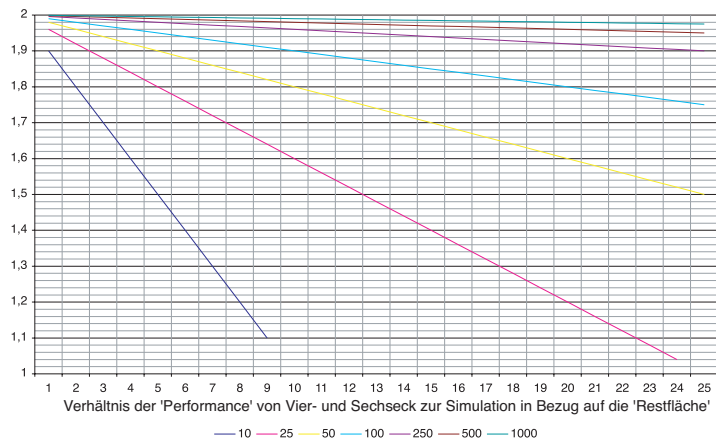


Abb. 5.42

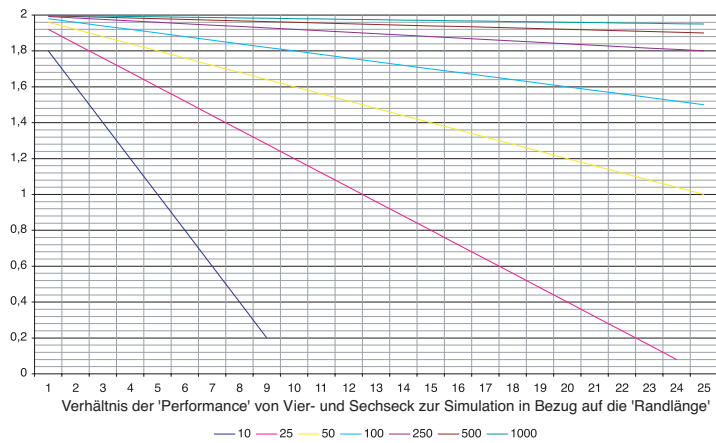


Abb. 5.45

U-Werte auf Basis beider Verhältnisse, also bezogen auf die Restfläche („Fläche“) und die Randlänge („Rand“) hochgerechnet und dann verglichen.

Der wesentliche Gedanke besteht dabei darin, das Verhältnis zwischen dem durch die Simulation ermittelten U-Wert-Faktor (Spalte 6 in Abb. 5.49) und dem geometriebedingten Restflächen- und Randlängenverhältnis (Spalte 7 in Abb. 5.49) durch eine Formel zu erfassen.

Hierbei ist auffällig, dass der U-Wert-Faktor für die zwei- bis vierlagigen Fälle nahezu identisch ist, für den einlagigen aber doch deutlich abweicht.

Für beide scheint das Verhältnis jeweils auf den ersten Blick linear zu sein. Bei näherer Betrachtung scheint es aber eher einen quadratischen Bezug zu geben (allerdings über eine sehr flache Parabel).

Da jeweils vier Wertepaare (für $z=20, 30, 40, 50$ mm) vorliegen, wurde auf dieser Annahme basierend jeweils für die Fälle ‚einlagig‘ und ‚zwei- bis vierlagig‘ eine quadratische Gleichung⁸ aufgelöst und mit dem vierten Wertepaar validiert, was eine ausgezeichnete Übereinstimmung ergab.

5.3 Ergebnisse

Mit diesen resultierenden Umrechnungsfaktoren (die U-Wert-‘Abminderungsfaktoren‘ genannt werden könnten) wurden jeweils auf die Restfläche („Fläche“) und die Randlänge („Rand“) bezogene U-Werte ermittelt.

Die Ergebnisse finden sich ebenfalls in der tabellarischen Übersicht in Abb. 5.49 und sind - grafisch auf die einzelnen Geometrien bezogen - in den Abb. 5.46, 5.47 und 5.48 veranschaulicht, wobei die durchgezogenen Linien den aus dem Restflächenverhältnis und die gestrichelten Linien derselben Farbe den aus dem Randlängenverhältnis errechneten U-Wert darstellen.

Dabei fällt deutlich auf, dass die Diskrepanz zwischen diesen beiden Werten bei der Geometrie ‚Kreis‘ sehr stark ausfällt, so dass hier eine große Unschärfe des Ergebnisses vermutet werden muss, während hingegen beide Werte der Geometrie ‚Dreieck‘ und (noch deutlicher) ‚Vier- und Sechseck‘ sehr nahe beieinander liegen.

Vergleicht man die ‚abgeminderten‘ U-Werte mit den Varianten mit konventionellem Dämmstoff gleicher Stärke (siehe Abb. 5.33), so wird deutlich, dass die neuartigen, matenartigen Vakuum-Dämmsysteme immer noch deutlich günstiger sind, nämlich um mindestens den Faktor 1,5 bis 4 bei den untersuchten Geometrien und Maßen.

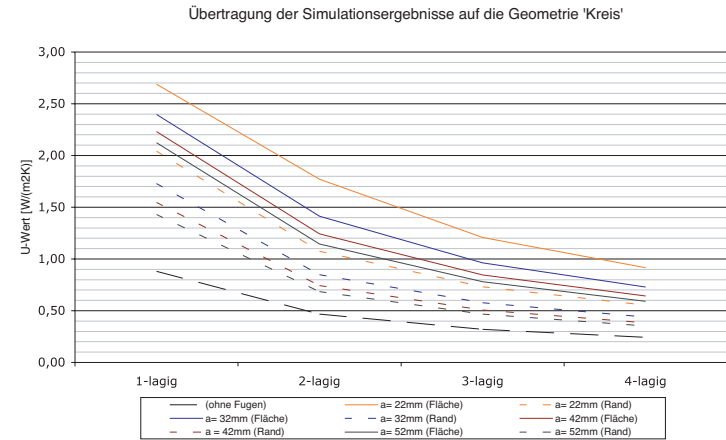


Abb. 5.46

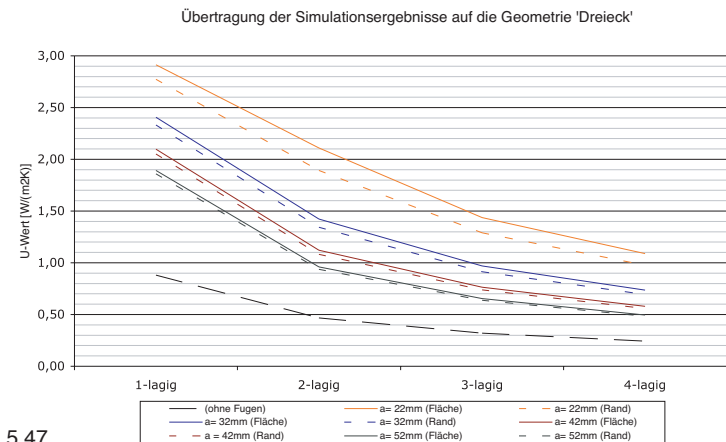


Abb. 5.47

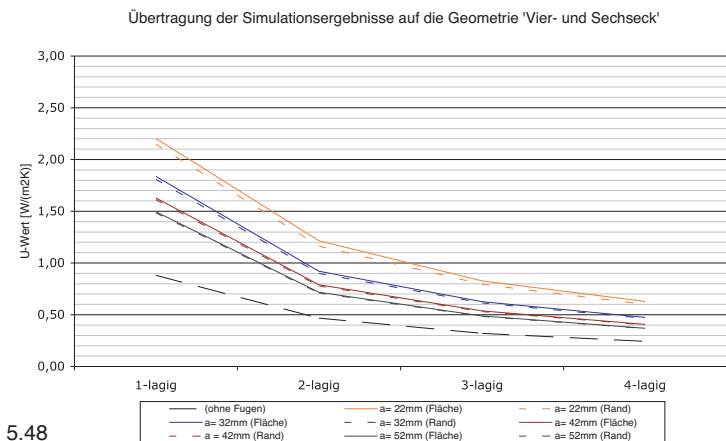


Abb. 5.48

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	Zellbreite (z)			Ergebnisse aus der 2D-Simulation				Übertragung auf die Geometrie ‚Kreis‘						
	Rapportgrundmaß (a)		U-Wert (s bzw. f)	U-Wert ohne Fugen	Spalte 4:5 Faktor ⁽¹⁾	$A_r : A_{ges}$ entspr. $U_r : A_{ges}$	$A_r : A_{ges}$	Faktor ⁽²⁾ (Fläche)	U-Wert Hochr. ⁽³⁾ (Fläche)	$U_r : A_{ges}$	Faktor (Rand)	U-Wert Hochr. ⁽⁴⁾ (Rand)		
	[mm]	[mm]											[W/(m²K)]	[W/(m²K)]
1 - lagig	20	22	2	1,68	0,88	1,91	0,09	0,25	3,06	2,69	0,15	2,32	2,04	
2 - lagig				0,83	0,47	1,77								1,77
3 - lagig				0,56	0,32	1,75								1,21
4 - lagig				0,42	0,24	1,74								0,92
1 - lagig	30	32	2	1,42	0,88	1,62	0,06	0,20	2,27	2,40	0,11	1,96	1,73	
2 - lagig				0,69	0,47	1,47								1,41
3 - lagig				0,47	0,32	1,46								0,96
4 - lagig				0,35	0,24	1,45								0,73
1 - lagig	40	42	2	1,29	0,88	1,47	0,05	0,18	2,54	2,23	0,08	1,76	1,55	
2 - lagig				0,62	0,47	1,33								1,24
3 - lagig				0,42	0,32	1,33								0,85
4 - lagig				0,32	0,24	1,32								0,64
1 - lagig	50	52	2	1,21	0,88	1,37	0,04	0,16	2,41	2,12	0,07	1,62	1,43	
2 - lagig				0,59	0,47	1,26								1,14
3 - lagig				0,40	0,32	1,26								0,78
4 - lagig				0,30	0,24	1,25								0,59

Abb. 5.49 Übertragung der Simulationsergebnisse für die Zellstärke d= 5 mm auf die Geometrien ‚Kreis‘, ‚Dreieck‘ und ‚Vier- und Sechseck‘

6 Weiteres Optimierungspotenzial

Durch mehrlagige Anwendung mit geometrischen Verschiebungen sowie den optionalen Einsatz von strahlungsreflektierenden Zwischenschichten (wie in Abb. 5.50 dargestellt) könnte die Gesamtdämmwirkung die Summe der Dämmwirkung der Einzelmatten übertreffen.

Im Gegensatz zu verfügbaren Luftpolsterfolien und deren Verwendung in mehrlagigen Foliendämmsystemen (wie zum Beispiel dem Produkt ‚Lu..po.Therm B2+8‘ der Firma LPS GmbH, Abb. 5.51) ist die vorgeschlagene Lösung um ein Vielfaches druckbelastbarer und effizienter.

Insbesondere eine mehrlagige Anwendung führt zu einer deutlich gesteigerten Fehlertoleranz

des Gesamtsystems im Falle des Versagens einzelner Füllkammern durch Belüftung.

6.1 Lichtdurchlässige Varianten

Neben der beschriebenen möglichst strahlungs- und damit auch lichtundurchlässigen Dämmmatte sind auch lichtdurchlässige Varianten vorstellbar, vorausgesetzt die verwendeten Kernmaterialien

sind porös und offenzellig und damit evakuierbar.

Als lichtdurchlässiges Material könnte Aerogelgranulat oder reine Kieselsäure (ohne zugemischte Trübungsmittel) eingesetzt werden. Hierbei gelten analoge Einschränkungen, wie in Teil 3 Abschnitt 2.2.3 beschrieben, insbesondere was die Ansprüche an das Vakuum angeht.

Eine solche Matte (in Abb. 5.55

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Übtragung auf die Geometrie ‚Dreieck‘						Übtragung auf die Geometrie ‚Vier- und Sechseck‘					
$A_r : A_{ges}$	Faktor ⁽²⁾ (Fläche)	U-Wert Hochr. ⁽³⁾ (Fläche)	$U_r : A_{ges}$	Faktor (Rand)	U-Wert Hochr. ⁽⁴⁾ (Rand)	$A_r : A_{ges}$	Faktor ⁽²⁾ (Fläche)	U-Wert Hochr. ⁽³⁾ (Fläche)	$U_r : A_{ges}$	Faktor (Rand)	U-Wert Hochr. ⁽⁴⁾ (Rand)
[-]	[-]	[W/(m ² K)]	[-]	[-]	[W/(m ² K)]	[-]	[-]	[W/(m ² K)]	[-]	[-]	[W/(m ² K)]
0,29	3,31	2,91	0,27	3,15	2,77	0,17	2,50	2,20	0,17	2,44	2,15
	4,50	2,11		4,04	1,89		2,60	1,22		2,49	1,16
		1,44			1,29			0,83			0,79
		1,09		0,98		0,63		0,60			
0,20	2,73	2,41	0,19	2,65	2,33	0,12	2,09	1,84	0,12	2,05	1,81
	3,04	1,42		2,87	1,34		1,96	0,92		1,92	0,90
		0,97			0,91			0,63			0,61
		0,74		0,69		0,48		0,47			
0,16	2,38	2,10	0,15	2,33	2,05	0,09	1,85	1,63	0,09	1,83	1,61
	2,40	1,12		2,31	1,08		1,68	0,79		1,66	0,78
		0,76			0,74			0,54			0,53
		0,58		0,56		0,41		0,40			
0,13	2,15	1,89	0,12	2,11	1,86	0,08	1,70	1,49	0,07	1,68	1,48
	2,05	0,96		2,00	0,94		1,53	0,72		1,52	0,71
		0,65			0,64			0,49			0,48
		0,50		0,48		0,37		0,37			

Anmerkungen zur obigen Tabelle:

(1) Verhältnis der U-Werte mit und ohne Fugenanteil

(2) Da die 1-lagige Variante heraussticht, wurde hier ein eigener Faktor ermittelt.

(3) Abschätzung des erwarteten U-Wertes unter Berücksichtigung des ‚Restflächenanteils‘

(4) Abschätzung des erwarteten U-Wertes unter Berücksichtigung des ‚Randlängenanteils‘

durch eine Fotomontage visualisiert), könnte als eine extrem dünne Variante einer transluzenten Wärmedämmung eine Reihe hochinteressanter Anwendungsmöglichkeiten bieten⁹.

6.2 Dampfdiffusionsvermögen

Zur Vermeidung von Dampfdiffusionsproblemen könnten in bestimmten Dämmungsmatten (abhängig

von der Einbausituation und dem erwarteten Dampfdruckgefälle) im Bereich der Verschweißungen Perforierungen vorgenommen werden, die eine bauphysikalisch möglicherweise erforderliche Dampfdiffusion ermöglichen.

6.3 Andere Geometrien

Neben den untersuchten Grundgeometrien sind auch Kombinationen dieser und anderer, auch nicht

geometrisch regelmäßiger Grundfiguren möglich, soweit sie rapportierbar sind.

Dies könnte - je nach Anwendung - zu einer Optimierung von Anschlussmöglichkeiten führen.

7 Weitere Aspekte

Die vorgestellte Untersuchung ist bislang reine Theorie, die beschriebenen Matten wurden bisher nicht hergestellt und getestet. Allerdings

sind die dazu notwendigen einzelnen Verfahrensschritte prinzipiell bekannt.

7.1 A/V-Verhältnis

Da die Funktionsdauer von Vakuum-Dämmsystemen in direkter Abhängigkeit vom jeweiligen A/V-Verhältnis steht, stellen die beschriebenen Matten im Vergleich zu konventionellen VIP deutlich höhere Anforderungen an die

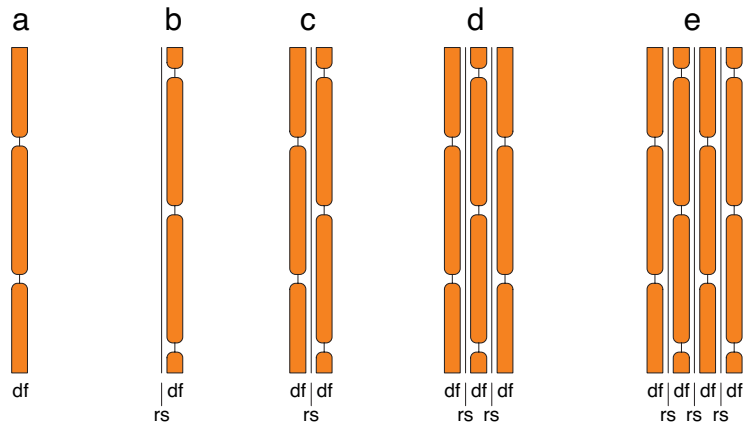


Abb. 5.50 Mehrschichtigkeit mit hochreflektierender Zwischenlage



Abb. 5.51 Wärmedämmfoliensystem ‚Lu..po.Therm B2+8‘ der Firma LPS GmbH (Muster und Eckdetail)¹¹



Gasdichtigkeit des verwendeten Hüllmaterials.

Im Vergleich zu konventionellen Platten mit ca. 20 mm Dicke, liegt das A/V-Verhältnis je nach Rapportgrundmaß bei angenommener Zweilagigkeit und gleicher Gesamtstärke um den Faktor 2-5 höher.¹⁰

Dies lässt auf eine Funktionsdauer schließen, die circa um den gleichen Faktor unter der konventioneller VIP liegt, falls ein entsprechendes Hüllmaterial verwendet wird.

Dies bedeutet im Umkehrschluss:

Die Anforderungen an das Hüllmaterial sind in Bezug auf die Gasdichtigkeit um den entsprechenden Faktor höher.

7.2 Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung

7.2.1 Herstellung von konventionellen Luftpolsterfolien

In Abb. 5.52 findet sich die schematische Darstellung eines üblichen Herstellungsverfahrens für Luftpolsterfolien aus Polyethylen. Dabei wird die Unterfolie, nachdem sie durch Matrize und Patrize umgeformt wurde, in einem kontinuierlichen Vorgang mit der Oberfolie zusammengeführt und verschweißt. Für den gesamten Vorgang ist die genaue Kontrolle der Temperatur der beteiligten Teile (insbesondere von Matrize, Patrize und Versiegelungsrolle) und der Durchlaufgeschwindigkeiten an jeder Station geboten.

Um das Haftverhalten des Materials an den einzelnen Rollen zu steu-

ern, wird mit kontrollierter elektrostatischer Aufladung gearbeitet.

Die Summe dieser Parameter hat insbesondere eine gewisse minimale Fertigungsgeschwindigkeit der Anlage zur Folge, was eine Schwierigkeit für den zusätzlich notwendigen Befüllvorgang darstellen könnte.

7.2.2 Verfahrensmodifikation für die Herstellung von Vakuum-Dämmmatten

7.2.2.1 Vakuumkammergröße

Im Unterschied zu der heute üblichen taktweisen Herstellung von Paneelen machen die untersuchten Matten eine Verlegung fast des gesamten Prozesses in Vakuumbedingungen erforderlich. Vakuum-Paneele werden nahezu vollständig unter Atmosphären-

druck gefertigt. Nur die Ausführung der letzten Siegelnaht erfolgt im Vakuum. Daher bestimmt heute die übliche Größe der Vakuumkammern von ca. 2300 x 1000 x 300 mm die maximal herstellbare Größe von VIP.

Die in Abb. 5.53 skizzierten Modifikationen zeigen, dass für eine kontinuierliche Herstellung der mattenartigen Vakuum-Dämmssysteme das Verfahren zur Luftpolsterfolienfertigung im wesentlichen durch das Einbringen des Zellkernmaterials ergänzt werden muss.

Außerdem muss das ganze Verfahren unter Vakuum durchgeführt werden, da eine ausreichende Abdichtung sowohl der Lager, Antriebe usw., aber auch der Halbzuge oder im Bereich der fertigen Folie (vor dem Endspeicher) nicht möglich erscheint. Dies bedingt eine deutliche Ver-

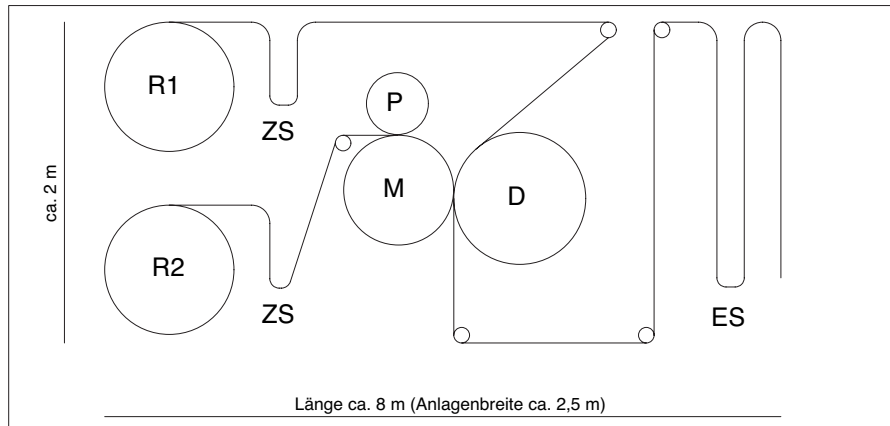


Abb. 5.52 Prinzipdarstellung eines üblichen Herstellungsverfahrens¹² für Luftpolsterfolie

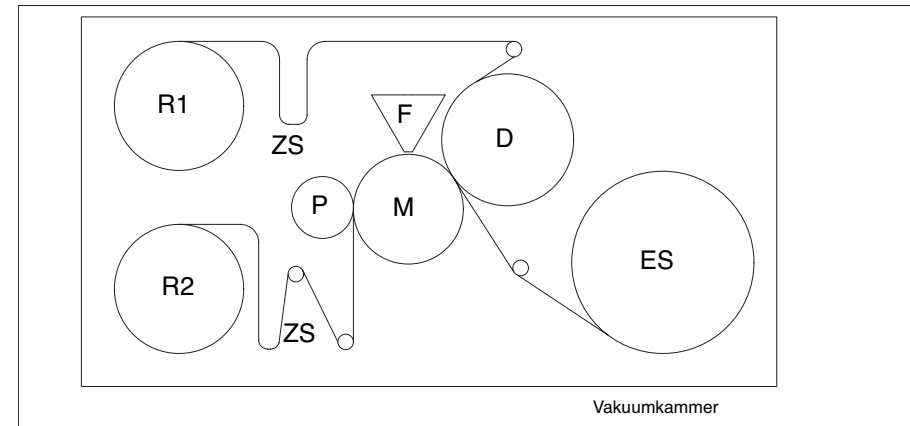


Abb. 5.53 Erforderliche Modifikationen für die Herstellung von Vaku-Dämmmatten (Prinzipdarstellung)

Legende zu Abb. 5.52 und 5.53

R1	Rolle 1 mit Basismaterial (Deckschicht)
R2	Rolle 2 mit Basismaterial (Umformmaterial)
ZS	Materialzwischenpeicher
P	Patrize
M	Matrice
D	Rolle zur Aufbringung der Deckschicht
F	Befüllereinheit
ES	Material-Endspeicher

größerung der erforderlichen Vakuunkammer. Geht man von heute üblichen Anlagen zur Luftpolsterfolienfertigung aus, ergeben sich Mindestmaße für die Vakuunkammer von ca. 2 x 2,5 x 8 m, wenn man davon ausgeht, dass der Platzbedarf für zusätzlich benötigte Komponenten durch Komprimierung der bisherigen Anlagentechnik kompensiert werden könnte, was allerdings keinesfalls als gesichert angenommen werden kann.

Dies dürfte die entscheidende Größe für den Investitionsaufwand darstellen.

7.2.2.2 Einbringung des Kernmaterials

Eine weitere absehbare Schwierigkeit besteht in der Einbringung des Kernmaterials in die einzelnen Zellen. Soll hier weiterhin pyrogene Kieselsäure verwendet werden, so

müßte das pulverförmige, aschenartige Material unter Beibehaltung der günstigen Rohdichte (160 - 200 kg/m³), also ohne nennenswerte weitere Verdichtung, portionsweise in der richtigen Geometrie platziert werden. Die jetzt übliche vorangehende Kaschierung (beispielsweise in ein Glasfaservlies) wäre so nicht mehr möglich.

Die zellgroßen Portionen müssen linear, je nach Geometrie in mehreren Reihen gleichzeitig (im Fall ‚6-Eck‘ beispielsweise in zwei Reihen) in die vorher umgeformte Unterfolie eingebracht werden.

Dabei darf der spätere Siegelnahtbereich, der aus wärmetechnischen Gründen möglichst schmal gestaltet werden sollte, nicht verunreinigt werden, da die Herstellung eines gasdichten Abschlusses sonst kaum möglich ist.

7.2.3 Folienmaterialien

Die untersuchten Geometrien lassen sich mit den heute verwendeten metallisierten Hochbarrierefolien nicht durch Tiefziehen herstellen, da diese Verbundfolien nicht ohne Zerstörung der Barriereigenschaften heiß-umformbar sind.

Durch Kaltumformung lassen sich nach Schätzungen der Firma va-Q-tec AG (Würzburg) entsprechend der untersuchten Geometrien nur Systemdicken bis ca. 5 mm realisieren.

Allerdings sind tiefziehbar Hochbarrierefolien auf Polymerbasis (siehe Teil 3 Abschnitt 2.3.3.2) verfügbar, die derzeit jedoch noch nicht die hohen Anforderungen an das Vakuum und die Funktionsdauer erfüllen können.

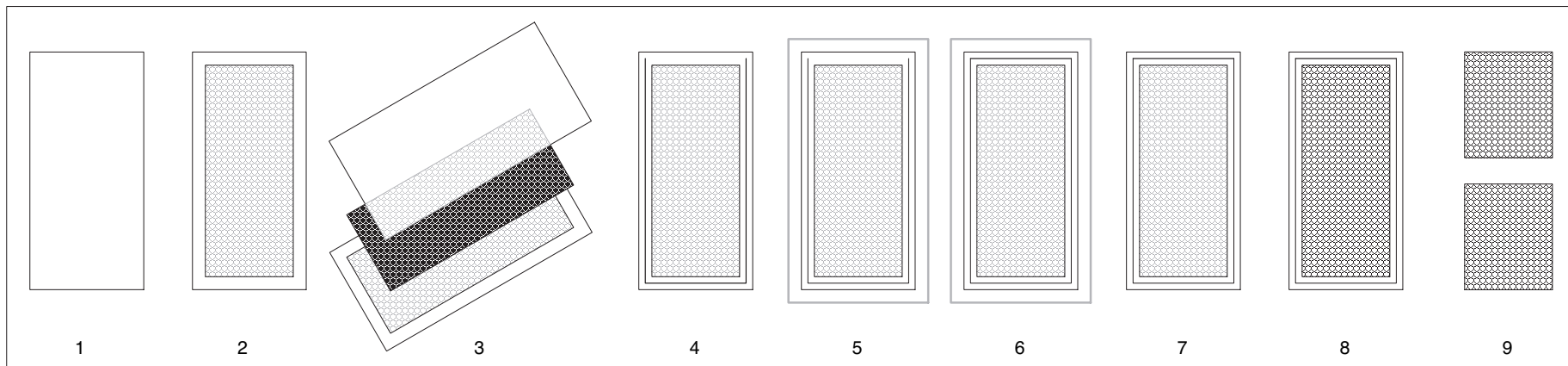


Abb. 5.54 Vorschlag des Autors für eine nicht-kontinuierliche Herstellungsweise von Vakuum-Dämmungsmatten, die ggf. auch zur Herstellung von Mustern im Labormaßstab herangezogen werden könnte.

Legende zu Abb. 5.54:

7.2.4 Kontinuierliche Herstellung: vorläufiges Resumée

Gemäß den bisherigen Überlegungen scheint eine kontinuierliche Herstellung von Vakuum-Dämmungsmatten nur im (groß-) industriellen Stil möglich. Der Gesamtaufwand dafür ist als hoch einzustufen. Er würde sich erst bei einem Mengenumsatz amortisieren, der sicher in absehbarer Zukunft nicht zu erwarten sein wird.

Auch fehlt es bisher an den Anforderungen genügenden Halbzeugen, insbesondere im Bereich der Hochbarrierefolien.

Einen den Ansprüchen genügenden Prototyp aus einer kontinuierlichen Herstellung wird es daher vermutlich mittelfristig nicht geben können.

7.3 Nicht-kontinuierliche Verfahren zur Herstellung

Verzichtet man jedoch auf die Vorteile, die sich aus der kontinuierlichen Herstellung ergeben, ist ein Herstellungsprozess denkbar, der mit heutigen Mitteln umsetzbar scheint und ein Produkt in Aussicht stellt, das in einigen Punkten immer noch Vorzüge gegenüber üblichen Paneelen aufweisen könnte.

Die einzelnen Schritte sind schematisch in Abb. 5.54 aufgezeigt und beschrieben.

Die maximal herstellbare Mattengröße wird hierbei - wie bei konventionellen Paneelen - durch die Größe der Vakuumkammer bestimmt.

Ob die Matten vor der Evakuierung aufgewickelt werden können, um größere Formate zu ermöglichen,

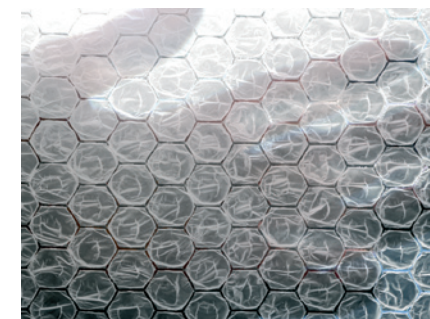
hängt von Mattendicke, der gewählten Geometrie und den verwendeten Materialien ab.

In wieweit die gewünschten Geometrien den Evakuierungsprozess über eine Seite erschweren, kann im Voraus nicht abgeschätzt werden. Diese Frage kann nur durch Versuche geklärt werden.

Das vorgeschlagene Herstellungsverfahren könnte auch dazu genutzt werden, funktionierende Prototypen herzustellen, die den vormals beschriebenen, auf kontinuierliche Weise hergestellten entsprechen und diese dann zu testen.

Abb. 5.55 Transluzente Vakuumdämmungsmatte (Fotomontage)

- 1 Ausgangsmaterial: Folien im rechteckigen Zuschnitt
- 2 Umformung gemäß Geometrievorgabe unter Beibehaltung eines freien Randstreifens
- 3 Befüllung der Zellen mit Kernmaterial und Abdeckung mit Oberfolie
- 4 Dreiseitige gasdichte Versiegelung
- 5 Evakuierung in der Vakuumkammer
- 6 Versiegelung der letzten verbliebenen Seite im Vakuum
- 7 Entnahme aus der Vakuumkammer
- 8 Versiegelung der Zellstege mit geeignetem Formteil
- 9 Die Zellen sind nun autarke Einheiten, die Matte kann behandelt werden wie eine kontinuierlich hergestellte.



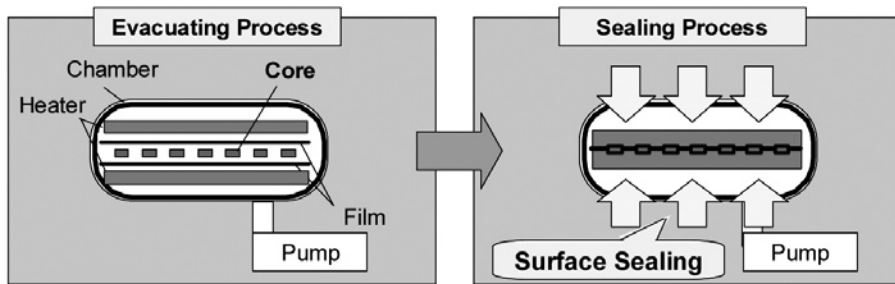


Abb. 5.56 Herstellungsprinzip von ‚Chip-Vacua‘ der Firma Matsushita¹³

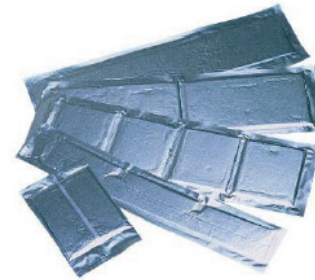


Abb. 5.57 Probekörper zu verschiedenen Grundgeometrien

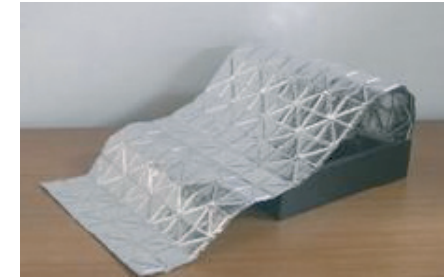


Abb. 5.58 ‚Chip-Vacua‘ in gerolltem Zustand

7.4 Vergleich mit der Entwicklung ‚Chip-Vacua‘ der japanischen Firma Matsushita

Ende September 2005 präsentierte die japanische Firma Matsushita (Panasonic Home Applications) auf dem maßgeblichen internationalen Kongress zum Thema ‚Vakuum-Dämmsysteme‘ in der Schweiz eine Entwicklung, die den in diesem Teil vorgestellten Grundprinzipien und -überlegungen weitgehend entspricht.¹⁴

Es scheint daher geboten, die beiden Ansätze - soweit dies mit den vorliegenden Informationen möglich ist - miteinander zu vergleichen.

7.4.1 Der japanische Ansatz

Ausgehend von einer Argumentation, die derjenigen des Verfassers (vergleiche Absatz 1) in den Kernpunkten entspricht, wird der Herstellungsprozess der ‚Chip-Vacua‘ wie folgt beschrieben¹⁵:

Eine große Vakuum-Kammer wird durch eine obere Folienebene in

zwei Abschnitte geteilt. Oberhalb dieser Folie ist eine Flächenheizung eingebaut. Unterhalb befinden sich die zweite Folienlage und darauf platziert die portionierten Kernmaterialkörper (hier gepresste Glasfasern). Darunter wiederum ist eine weitere Flächenheizung positioniert.

Vergleichbar der Funktionsweise einer konventionellen Vakuum-Umformmaschine (wie sie z.B. in Teil 7 Abschnitt 4.2.4 beschrieben ist) wird nun unter Hitzeeinwirkung durch unterschiedliche Druckverhältnisse in den beiden Abschnitten innerhalb der Vakuum-Kammer die obere Folienebene über die Kernmaterialkörper auf die untere Folienebene gezogen.

Die von der Firma gezeigten Herstellungsschemata, die in Abb. 5.56 wiedergegeben sind, zeigen diesen Prozess nur ungenügend.

Die Flächenheizungen bewirken keine Versiegelung der Folienlagen (dafür bräuchte man deutlich höhere Temperaturen), sondern ermög-

lichen die für den Umformvorgang notwendigen Materialdehnungen.

Die Firma behauptet, eine abschliessende Versiegelung sei möglich (durch lineares ‚Nachfahren‘ der entstehenden Rillen), aber für die meisten Anwendungen nicht notwendig, da der durch den anliegenden Atmosphärendruck gegebene Druckunterschied zwischen innen und außen für eine ausreichend gasdichte und dauerhafte Verbindung Sorge.

Das Verfahren schränke die Auswahl an möglichen Geometrien nicht ein, so dass je nach Anwendung die optimale ausgeführt werden könne. Die Abbildungen 5.57 und 5.59 zeigen hier eine Auswahl.

Abb. 5.58 vermittelt den Eindruck, als sei es gelungen, eine größere Matte mit dreieckigen Zellen herzustellen. Desweiteren scheint diese rollbar zu sein.

Neben dem Einsatz in der Bauindustrie benennt die Firma weitere Anwendungsgebiete wie Heiß-

Abb. 5.59 ‚Chip-Vacua‘ mit dreieckiger Grundgeometrie



wassertanks, Kühlschränke, spezielle Kleidung für extremes Klima (Kälte) und Isomatten.

7.4.2 Offene Fragen

Die sehr knappe Präsentation des bisherigen Entwicklungsstandes lässt einige maßgebliche Fragen unbeantwortet:

- Welcher Folientyp wurde verwendet?
- Was sind mögliche Grundmaße (Größe der Kernmaterialkörper, Fugen zwischen den ‚Chips‘, Stärke der Matte, mögliche Gesamtmaße der Matten)?
- Welche flächenbezogenen Wärmeleitfähigkeiten können erreicht werden?
- Wie schätzt die Firma die mittel- und langfristige Funktionsdauer ein?

7.4.3 Unterschiede zum Ansatz des Verfassers

Neben dem andersartigen Herstellungsverfahren können insbesondere folgende Aspekte benannt werden, die von dem in diesem Teil beschriebenen Ansatz abweichen:

- Als Kernmaterial wurden durch die Firma Matsushita nur Glasfasern untersucht, keine Formkörper aus mikroporösem Kieselsäurepulver.

- Eine Heißversiegelung sämtlicher Fugen zwischen den ‚Chips‘ ist nicht vorgesehen.

7.4.4 Einschätzung der Entwicklung ‚Chip-Vacua‘

Aus Sicht des Verfassers der vorliegenden Arbeit sind die Vorbehalte gegen die eigenen, in diesem Teil beschriebenen Überlegungen auf die Entwicklung der Firma Matsushita in vollem Umfang übertragbar (vergleiche hierzu v.a. Absatz 7.1, aber auch 7.2.2.1 und 7.2.2.2). Dies betrifft die Frage nach der grundsätzlich möglichen flächenbezogenen Wärmeleitfähigkeit genauso wie die Auswirkungen des ungünstigen A/V-Verhältnisses.

Zum Thema der möglichen Dämmwirkung verweist die japanische Firma nur auf die extrem geringe Wärmeleitfähigkeit evakuierter Glasfasern von ca. 2 mW/(mK). Diese bekannte Aussage hat allerdings für den beschriebenen Ansatz wenig Relevanz, da sie die Frage nach den linearen Verlusten über die ‚Chip‘-Ränder und die flächenbezogenen Verluste über die Fugen ausklammert (entsprechend A_r und U_r gem. Abb. 5.8). Diese Aspekte berücksichtigende Abschätzungen oder gar Messergebnisse für die gezeigten Prototypen hat die Firma bisher nicht vorgelegt.

Die Frage der zu erwartenden Funktionsdauer wird durch die Wahl von Glasfasern als Kernmaterial massiv verschärft, da hier die

Anforderungen an den Innendruck gegenüber mikroporöser Kieselsäure deutlich höher liegen (vergl. Teil 3 Absatz 2.2.6 und Abb. 2.22).

Dies hat nicht nur Konsequenzen für die Herstellungsapparatur, sondern wirkt als Anforderung direkt auf die Auswahl möglicher Folien und die Qualität der Fugen bzw. Siegelnähte. Der notwendige, extrem geringe Innendruck (i.d.R. < 0,1 mbar) und die damit im Zusammenhang stehenden üblichen Anforderungen an die Funktionsdauer lassen zudem die Aussage, eine Heißversiegelung der Fugen sei nicht erforderlich, kaum gerechtfertigt erscheinen.

Diese Behauptung steht nach Ansicht des Verfassers auch in Widerspruch zu einem Hauptvorteil des gemeinsamen Ansatzes, nämlich der hohen Fehlertoleranz:

Wie in Absatz 2.2.3 vermutet und durch die Untersuchungen im Absatz 4.4.2 bestätigt, ist es für die Wärmedämmwirkung des Gesamtsystems relativ verträglich, wenn einzelne Zellen ausfallen, allerdings unter der Voraussetzung, dass dadurch die benachbarten Kammern nicht in Mitleidenschaft gezogen werden.

Genau dies scheint aber aufgrund der fehlenden Versiegelung der Fugen nicht gegeben: Der im Falle eines Defekts lokal fehlende Druckunterschied zwischen innen und außen, der die

notwendige Pressung der Folien im Bereich der Fugen gewährleisten soll, führt in der Folge zwangsweise zu einer Belüftung der Nachbarzellen und damit letztendlich zu einem Versagen der gesamten Dämmzellen-Matte.

Auch die für viele Anwendungen möglicherweise sinnfällige Wahl der Dreiecksgeometrie (Abb. 5.59) scheint dem Verfasser nicht unproblematisch, da es im Bereich der spitzen Winkel in den Ecken zu starken Belastungen der umgeformten Folien kommen muss, die vermutlich zu lokal deutlich erhöhten Permeationsraten führen dürften.

Somit kann konstatiert werden, dass es weiterhin unklar ist, ob es gelingen kann, die prinzipiellen Vorteile, die der in diesem Teil untersuchte Ansatz aus Sicht des Verfassers (und wohl auch der Firma Matsushita) bietet, am Ende in ein Produkt umzusetzen, das funktionalen und letztendlich auch wirtschaftlichen Erfordernissen gerecht wird.

Auf dem Weg zur Klärung dieser Frage stellt der von der Firma Matsushita präsentierte Entwicklungsstand zu den ‚Chip-Vacua‘ jedoch einen wichtigen Schritt dar.

Anmerkungen

1. Diese Folie ist Teil des Trittschall-dämmung-Produktes ‚4M-Softstep‘ der Firma LPS-GmbH, Handenberg, Österreich, die aus zwei Hochbarrierefolien mit insgesamt 14 Lagen in einem Co-Extrusionsverfahren hergestellt wird. Das Flächengewicht liegt bei 200 g / m². Der angegebene Verkaufspreis liegt bei ca. 4 € / m² (Stand 07.2004).

2. Diese spezielle Luftpolsterfolie ist Bestandteil des Foliendämm-Verbundsystems ‚Lu..po.Therm B2+8‘ der Firma LPS-GmbH, Handenberg, Österreich. Das System besteht insgesamt aus acht solchen Folien, zwischen denen insgesamt drei IR-Reflexionsfolien liegen. Die Außenseite des Systems bilden darüber hinaus zusätzliche gewebeverstärkte metallisierte Folien, die umlaufend randverschweißt sind. Das Flächengewicht des Gesamtsystems liegt bei 430 g / m² bei einer Gesamtstärke von 30 mm.

Das System hat lt. DIBT-Zulassung eine vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit von 0,022 W/(mK). Der angegebene Verkaufspreis liegt bei ca. 16 € / m² (Stand 07.2004).

3. Die in diesem Teil diskutierten Ideen wurden durch den Verfasser am 2. Juni 2004 beim Deutschen Patent- und Markenamt (DPMA) zum Patent angemeldet. Der Antrag wird unter dem Aktenzeichen 10 2004 026 894.0 geführt.

4. Die dargestellte Folie ‚LP M 400μ‘ aus sehr dickem Grundmaterial (0,4 mm) wurde von der Firma LPS-GmbH, Handenberg, Österreich, als Schwimmbadabdeckung entwickelt und wird zu einem Verkaufspreis von ca. 9 € / m² (Stand 07.2004) vertrieben.

5. Der Begriff ‚Rapport‘ [franz. eigtl. ‚das Wiederbringen‘] stammt aus der Textiltechnik und bezeichnet die kleinste Einheit eines Musters, das durch die ständige Wiederholung dieser Einheit gebildet wird. In der Baukunst finden sich besondere Anwendungen dieser Technik in der islamischen Ornamentik (hier der sogenannte ‚unendliche Rapport‘).

6. Obwohl die Darstellung von Werten bezogen auf die Lagenzahl eigentlich eine punktförmige Grafik verlangen würde, da es hier sprunghafte Übergänge in ganzen Zahlen gibt, wurde eine linienförmige Verbindung der einzelnen Punkte gewählt (z.B. in Abb. 5.26), um die Zusammengehörigkeit der einzelnen Werte einer Simulationsreihe (hier z.B. einer Zellstärke in unterschiedlicher Lagenanzahl) zu verdeutlichen. Die Linienverbindung hat hier also nur illustrativen Charakter, macht aber keine Interpolation möglich. Dies gilt analog für alle weiteren derartigen Diagramme in diesem Teil.

7. An dieser Stelle wurde die Frage, wieviele Lagen Folie mit Luftzwischenraum als Referenz sinnvoll anzusetzen sind (die gleiche Folienszahl oder die gleiche Dämmstofflagenanzahl?) zugunsten der Folienszahl entschieden, da diese die eigentliche Konstante darstellt (wenn man die Dämmstoffmaten im Sinne dieser Untersuchung als ‚optimierte Folien‘ versteht.)

8. Im Sinne der Nachvollziehbarkeit seien die ermittelten Koeffizienten der Formeln hier angegeben.

Für den Fall ‚einlagig‘:

$$y = -6,02 x^2 + 9,7036 x + 1,$$

für den Fall ‚zwei- bis vierlagig‘:

$$y = 25,6 x^2 + 4,493 x + 1,045,$$

wobei jeweils x das Verhältnis $A_r : A_{ges}$

bzw. $U_r : A_{ges}$ angibt, und y den resultierenden U-Wert-Faktor liefert.

9. Eine nach wie vor aktuelle Zusammenfassung dieser Thematik und Klärung der betreffenden Begriffe findet sich in Herzog, Thomas: Transluzente Bauteile - Anmerkungen zu ihrer Wirkung (1992), S. 92-95

10. Dies soll ein Beispiel verdeutlichen: Eine Fläche von 1 m² wird einmal bedeckt von 2 VIP a 50 x 100 cm mit einer Stärke von 20 mm. Hier liegt das A/V-Verhältnis bei 106 m²/m³. Wird die gleiche Fläche von einer 2-lagigen 6-Eck-Wabenmatte mit einer Gesamtstärke von ebenfalls 20 mm, einem Rapportgrundmaß von 20 mm und einem Fugenmaß von 2 mm abgedeckt (dies entspricht pro Lage ca. 5814 Wabenzellen), so ergibt sich ein A/V-Verhältnis von ca. 424 m²/m³.

11. siehe Angaben zum Produkt ‚Lu..po.Therm B2+8‘ in Anmerkung [2].

12. Diese Darstellung des Autors basiert auf Angaben vom 16.07.2004 von Herrn Wilfried Jung, geschäftsführender Gesellschafter der Firma LPS-GmbH, Handenberg, Österreich, einem der größten Hersteller von Luftpolsterfolien aus HD-PE im deutschsprachigen Raum.

13. Die Abbildungen 5.56, 5.57, 5.58 und 5.59 sind entnommen aus Yamada, Muneto: Development on New Vacuum Insulation Panel, „Chip-Vacua“, Matsushita (Panasonic), Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 181-188 (Präsentation und Paper).

14. vergleiche hierzu: Yamada, Muneto: Development on New Vacuum

Insulation Panel, „Chip-Vacua“, Matsushita (Panasonic), Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 181-188.

15. ebd., S. 181 und Präsentation Folien 4 und 5.

Inhaltsverzeichnis

Teil 6

Nichttragende Außenwandsysteme mit integrierten Vakuum-Dämmsystemen

Abschnitt	Seite	
1	Ausgangslage	142
2	Lösungsansätze	142
3	Weitere Anmerkungen zu den vorgestellten Varianten	143
4	Beispielhafte Varianten	144
4.1	Variante 1a	144
4.1.1	Aufbau	144
4.1.2	Besonderheiten und weitere Aspekte	144
4.2	Variante 1b	146
4.2.1	Aufbau	146
4.2.2	Besonderheiten und weitere Aspekte	146
4.3	Variante 2a	148
4.3.1	Aufbau	148
4.3.2	Besonderheiten und weitere Aspekte	148
4.4	Variante 2b	150
4.4.1	Aufbau	150
4.4.2	Besonderheiten und weitere Aspekte	150
4.4.3	Prototypische Umsetzung, Modell	152
4.5	Variante 3	154
4.5.1	Aufbau	154
4.5.2	Besonderheiten und weitere Aspekte	154
5	Resumée und Ausblick	156
Anmerkungen		156

Teil 6

Nichttragende Außenwandsysteme mit integrierten Vakuum-Dämmsystemen

1 Ausgangslage

Während nahezu alle bisherigen Anwendungen von Vakuum-Dämmsystemen den Ansatz verfolgen, mit diesen neuartigen Systemen konventionelle Dämmstoffe in bekannten Konstruktionen zu substituieren (unter Berücksichtigung eventuell notwendiger Anpassungen), sollen hier beispielhaft aus den die neuen Systemen bestimmenden Merkmalen entwickelte Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Vakuum-Dämmsysteme¹ weisen insbesondere folgende Eigenschaften auf:

- sehr hohes Wärmedämmvermögen bei minimaler Dicke
- statisch nur durch flächig aufbrachten Druck belastbar
- in Grenzen verformbar²
- Versagensfall ohne Gefahr für Leib und Leben (im Unterschied zum Beispiel zu Glas)
- nicht penetrierbar (beispielsweise zu Befestigungszwecken)

Diese an anderer Stelle in der vorliegenden Arbeit ausführlicher diskutierte Liste an speziellen Merkmalen liefert neben dem oben beschriebenen konventionellen Ansatz weitere Gründe für die bisher hauptsächlich betrachtete Anwen-

dung als Dämmschicht vor tragenden Wänden oder als besonders gut dämmende ‚Einlage‘ in Tafel- oder sandwichartigen Elementen.

2 Lösungsansätze

Aus Sicht des Verfassers legen die genannten Eigenschaften mit Ausnahme des letzten Punktes eine Beschäftigung mit dem Typ der ‚hängenden Fassade‘ aus der Gruppe der nichttragenden Außenwandkonstruktionen nahe (im Unterschied zur ‚stehenden Fassade‘, siehe Abb. 6.1, links und rechts), wenn ein weiteres Ziel darin besteht, möglichst wenig weitere Elemente hinzuzufügen.

Diese Grundannahme bildet zusammen mit der Entscheidung für eine zweilagige, versetzte Anwendung der Vakuum-Dämmsysteme, wie sie in Teil 4 und insbesondere Teil 5 dieser Arbeit vorgestellt und besprochen wurden, die Basis für die weiteren Ausführungen in diesem Teil.³

Durch die versetzte Anordnung ergeben sich mögliche, regelmäßige, punktförmige Verbindungsstellen, die in mindestens zweierlei Hinsicht genutzt werden können, nämlich einerseits zur Fixierung und Lagesicherung der Vakuum-Dämmsysteme untereinander und andererseits zu deren Befestigung an einer Tragstruktur.

Dabei könnte weiterhin eine Rolle spielen, ob die in einer Lage ne-

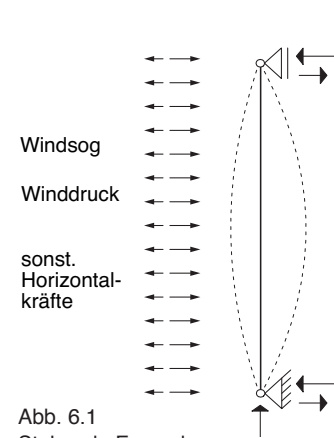
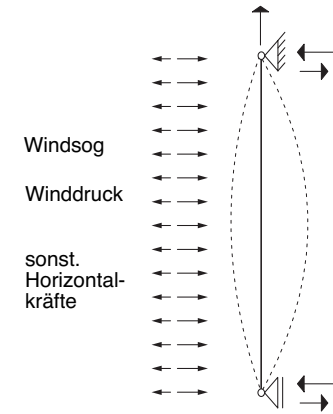


Abb. 6.1
Stehende Fassade



Hängende Fassade

beneinander befindlichen Vakuum-Dämmsysteme untereinander verbunden sind und somit eine kontinuierliche Lage bilden⁴, zum Beispiel durch eine Zusammenlegung der Randverbundzonen, eventuell aber auch durch ein weiteres (‚drittes‘) Element. Hierfür gibt es zwar bisher keine Beispiele, dies ist aber als zukünftige Möglichkeit prinzipiell vorstellbar.

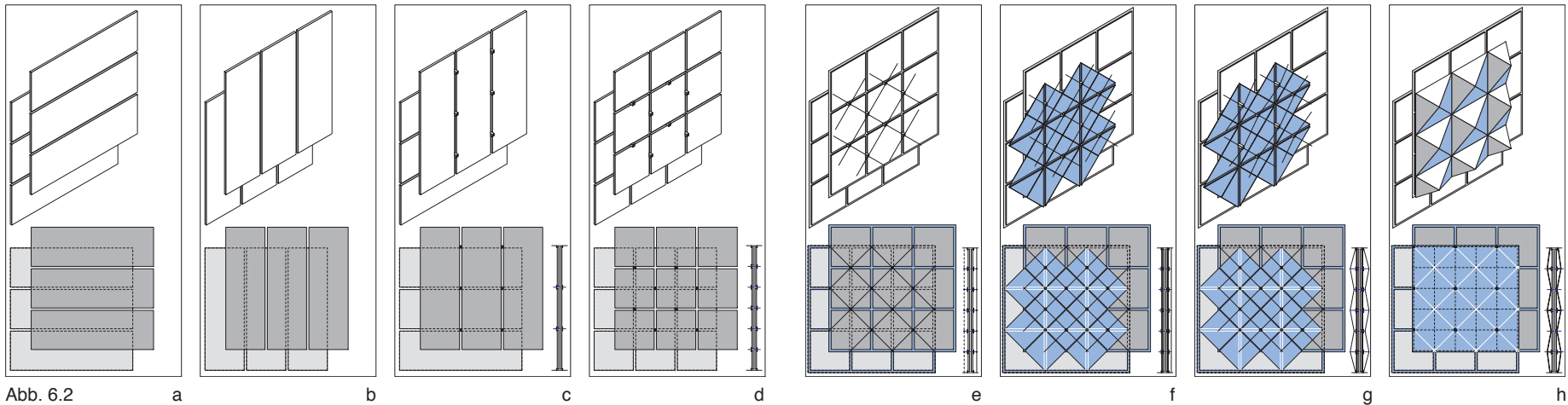
Wenn die Vakuum-Dämmsysteme direkt Außenbedingungen ausgesetzt werden können und die Fugenausbildung zwischen den Platten gelöst ist, benötigt man in einem ersten Ansatz nur eine Tragstruktur, die die einzelnen Befestigungspunkte in ihrer Lage fixiert.⁵

Dies könnte eine Seilnetz-Konstruktion leisten, die entweder ein- oder beidseitig angeordnet ist. Diese Variante ist hier als Fall 1a aufgeführt.

Hängen die einzelnen Vakuum-Dämmsysteme über den Randverbund zusammen, so könnte unter Umständen auf einen Teil (zum Beispiel jeden zweiten) der Durchstoßpunkte verzichtet werden (Fall 1b).

Ist die Außenseite des Vakuum-Dämmsystems den anliegenden Außen- und/ oder Innenbedingungen nicht gewachsen, könnte zwischen der Dämmlage und dem Tragwerk ein- oder beidseitig eine weitere dafür geeignete Schutzschicht vorgesehen werden, wie dies beispielhaft in Fall 2a und 2b dargestellt ist.

Fall 2b zeigt außerdem, wie durch eine beidseitig angeordnete Seilhinterspannung sowohl die Tragwirkung optimiert, als auch auf jeden zweiten Durchstoßpunkt verzichtet werden könnte, wenn die Übertragung der Druckkräfte



über die Vakuum-Dämmsysteme direkt erfolgte. Im Fall 3 wird dieser Gedanke fortgesetzt, wobei die Seilhinterspannung beidseitig durch eine Membrankonstruktion ersetzt wird, wodurch unter Umständen auf die in Fall 2 (a+b) eingefügte Zwischenschicht verzichtet werden könnte. Die geschilderte Abfolge der Lösungsvarianten und ihrer Prinzipien ist in Abb. 6.2 visualisiert.

3 Weitere Anmerkungen zu den vorgestellten Varianten

Alle Varianten sind skizzenartig für Paneelgrößen von ca. 50 cm x 50 cm dargestellt. Diese Vorschläge können insofern nur abstrakt und ihrem Prinzip nach erläutert werden, als nahezu alle weiteren Randbedingungen nicht konkret bekannt und berücksichtigt sind. Dies sind zum Beispiel

- die Gesamtabmessungen,
- zu erwartende Außenbedingungen (z.B. Winddruck und -sog),
- bauliche Randbedingungen, v.a. seitliche An- und Abschlüsse etc.

Die vorgestellten Prinzipien sind daher weitgehend schematisch dargestellt. Realiter werden die möglichen Abmessungen und die konstruktive Ausbildung der einzelnen Bestandteile aber von einer Reihe an Faktoren bestimmt, zu denen insbesondere die Beschaffenheit der Vakuum-Dämmsysteme, ihre Eigenschaften (zulässige Verformungen, Druckfestigkeiten pro Fläche, Widerstandsfähigkeit gegenüber Außenbedingungen u.v.m.), die aufzunehmenden Kräfte usw. zählen.

Des Weiteren setzen alle dargestellten Beispiele auf eine mehr oder weniger große zulässige Durchbiegung der Systeme, die in den

Anschlüssen und in den Vakuum-Dämmsystemen aufgenommen werden muss. Diese Größe steht in direkter Abhängigkeit zum Maß der Vorspannung der Seilnetz- bzw. Membrankonstruktion.

Alle angeführten Vorschläge sind mit opaken, transluzenten oder gar transparenten Vakuum-Dämmsystemen vorstellbar, wobei aus Sicht des Verfassers vor allem die beiden letzteren, also die lichtdurchlässigen, von Interesse sind, da nur sie die optische Wahrnehmung der konstruktiven Struktur ermöglichen können. Solche Vakuum-Dämmsysteme sind allerdings, wie in Teil 3 ausgeführt, derzeit noch nicht verfügbar.

Obwohl auf jede lineare Durchdringung verzichtet wurde, stellen die verbleibenden punktuellen Verbindungen signifikante Wärmebrücken dar, die entsprechend sorgfältig zu

behandeln sind. Vorteilhaft wäre die Verwendung von relativ schlecht wärmeleitendem Material im Bereich der eigentlichen Verbindung der Dämmlagen. Zum Beispiel könnten hier faserverstärkte Kunststoffe (sog. Pulltrusion-Materialien) zum Einsatz kommen.

Die in diesem Teil vorgestellten, aus den speziellen Eigenschaften von (weichen) Vakuum-Dämmsystemen entwickelten Wandsysteme befinden sich hinsichtlich des Verhältnisses Wandstärke zu Wärmedämmleistung in der Nähe des derzeit technischen Optimums. Die resultierenden U-Werte werden nahezu ausschließlich von den verwendeten Dämmsystemstärken bestimmt. Sie sind daneben abhängig von den Randanschlüssen, die ebenso wie die Art der statischen Integration von den individuellen Bedingungen der jeweiligen Bauaufgabe abhängen.

4 Beispielhafte Varianten

4.1 Variante 1a

Eine aus versetzten VIP gebildete, zweilagige Schicht ist ein- oder beidseitig an eine Seilnetzkonstruktion angehängt. Je nach Ausführung nehmen die Seile mindestens die Horizontallasten, in der Variante mit beidseitigen Seilnetzen möglicherweise auch die Vertikallasten auf.

4.1.1 Aufbau

Abb. 6.4 zeigt einen schematischen Horizontalschnitt (M 1:5), Abb. 6.7 einen Vertikalschnitt und eine Ansicht (M 1:10), Abb. 6.5 eine dreidimensionale Detail-Ansicht.

4.1.2 Besonderheiten und weitere Aspekte

In dem hier gezeigten Beispiel bildet die Außenhülle des Vakuum-Dämmsystems gleichzeitig die äußere und innere Abschluss-Schicht des Wandaufbaus. Sie muss daher in der Lage sein, die sich daraus ergebenden Anforderungen (Witterungsschutz und Bestehen gegenüber mechanischen Anforderungen uvm.) zu erfüllen. Konventionelle VIP sind dazu bisher nicht in der Lage.

Für die Zukunft wären allerdings durchaus Modifikationen der bisher eingesetzten Verbundmaterialien vorstellbar, die einen solchen Einsatz ermöglichen.

Beispielsweise könnte die exponierte Außenschicht aus mit UV-Schutz ausgestatteter ETFE-Folie bestehen.

Als Beispiel für das statische System der Varianten 1a, 1b und 2a kann die Glasfassade des Kempinski-Hotels am Münchner Flughafen angeführt werden.⁶ Prinzipbedingt ergeben sich bei diesem Tragwerkstyp sehr hohe erforderliche Vorspannkräfte in den Seilen.⁷

Neben der Klemmteller-Variante dieses Projekts, die je ein Stahlseil pro Richtung erfasst (Abb. 6.3), sind auch Ausführungen für je zwei Seile bekannt, die den Vorteil bieten, dass die ‚Mitte‘ für die Führung der Achse frei bleibt und Momente in der Verbindung vermieden werden.

Ein Beispiel für eine solche Ausbildung des Klemmtellers stellt die verglaste Netzkuppel eines Schwimmbades in Neckarsulm dar, siehe Abb. 6.6.⁸

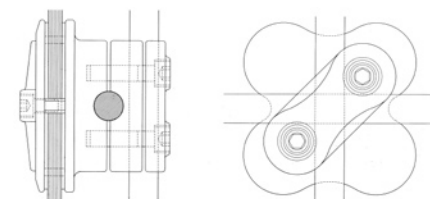


Abb. 6.3 Klemmteller Kempinski-Hotel⁹

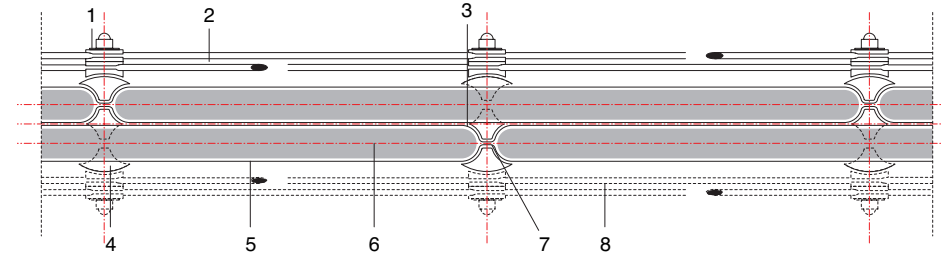
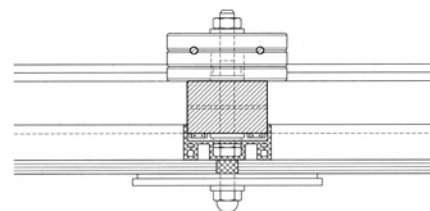


Abb. 6.4 Variante 1a, Horizontalschnitt, M 1:5

- 1 Knoten
- 2 Verspannungsebene
- 3 Luftkammer im Bereich eines Elements, seitlich abgeschlossen durch (4), zum Dampfaustausch innen-außen, siehe (7)
- 4 Formteile aus Dämm-Material, Achse aus Kunststoff oder Edelstahl
- 5 VIP-Hülle (opak, transluzent oder transparent)
- 6 VIP-Kernmaterial (opak, transluzent oder transparent)
- 7 VIP-Laschenbereich kontinuierlich (oder verbunden), Klebebereich mikroperforiert
- 8 Alternativ Verspannungsebene beidseitig



Abb. 6.5 Detail-Ansicht Variante 1a

Abb. 6.6 Klemmteller Netzkuppel Neckarsulm (links)

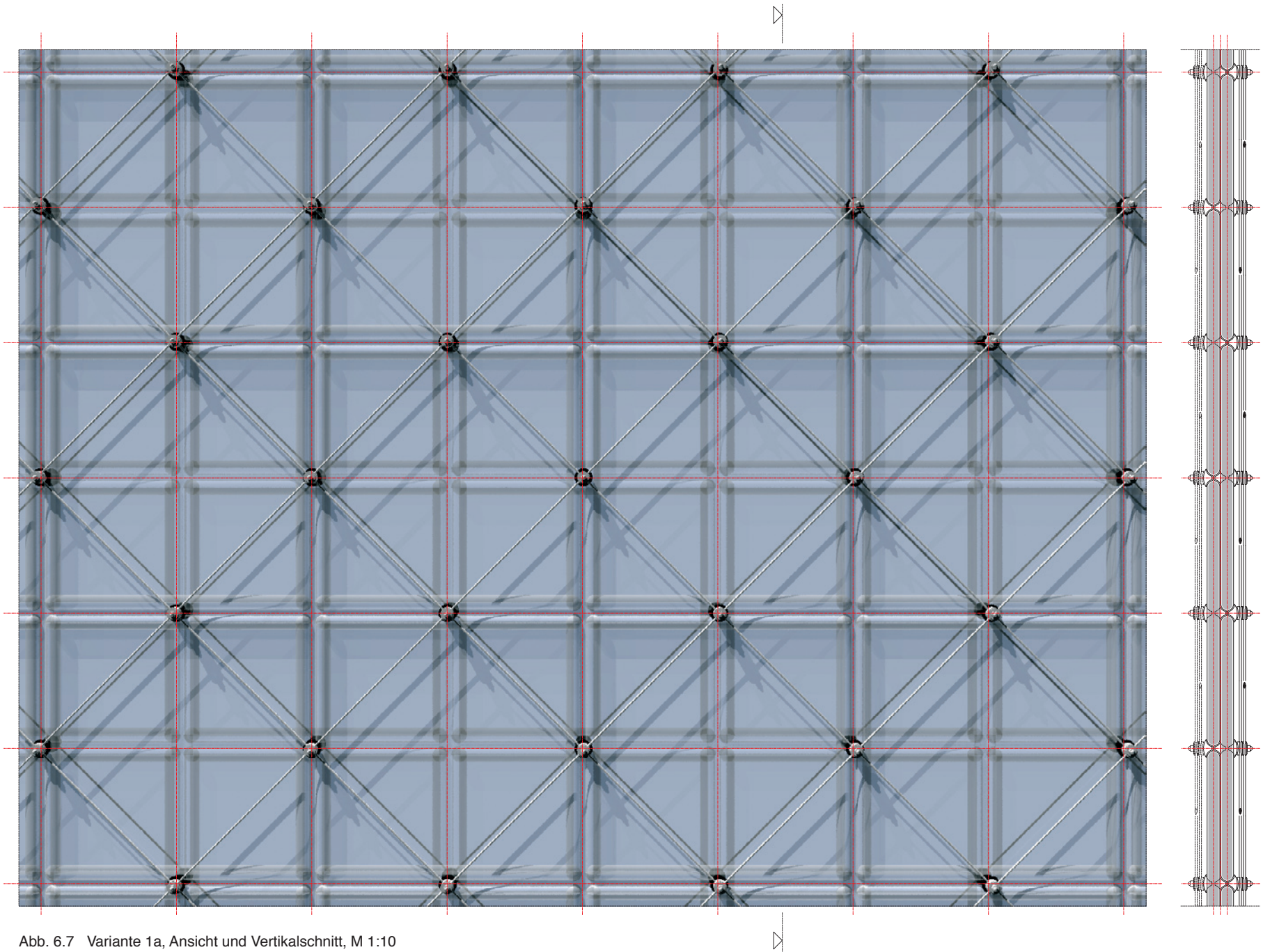


Abb. 6.7 Variante 1a, Ansicht und Vertikalschnitt, M 1:10

4.2 Variante 1b

Die Variante unterscheidet sich von Beispiel 1a durch zwei Merkmale:

- Erstens wird angenommen, dass die Vakuum-Dämmsysteme untereinander verbunden sind (sei es durch die Fertigung oder nachträglich). Daraus ergibt sich
- zweitens, dass auf jeden zweiten Knotenpunkt verzichtet werden könnte.

Hierdurch kann zwar die Anzahl der Spannseile nicht reduziert werden, jedoch die der punktuellen Wärmebrücken um die Hälfte.



Abb. 6.8 Messestand mit dem System ‚Nautilus‘ der Firma Mero¹⁰.

4.2.1 Aufbau

Abb. 6.9 zeigt einen schematischen Horizontalschnitt (M 1:5), Abb. 6.11 einen Vertikalschnitt und eine Ansicht (M 1:10), Abb. 6.10 eine dreidimensionale Detail-Ansicht.

4.2.2 Besonderheiten und weitere Aspekte

Die hier dargestellte einseitige Abspannung erfordert eine deutlich höhere Vorspannung gegenüber einer beidseitigen Ausführung, da hierdurch je nach Lage der Seilkonstruktion entweder der Druck- oder der Sogfall kompensiert werden muss. Zudem kommt es zu Momenten in den Knoten, wenn die Vertikallasten (Eigengewicht) nicht durch die zusammenhängenden Vakuum-Dämmsysteme aufgenommen werden können.

Je nach Ausführung der Vakuum-Dämmsysteme, insbesondere wenn sie ‚kontinuierlich‘ (vergl. Teil 5) gefertigt sind, führt der Effekt einer unregelmäßigen Faltenbildung (vergleiche Abb. 6.8) möglicherweise zu einer zusätzlichen Stabilisierung der Flächen.

Das Merosystem M12 wurde durch eine transluzente PVC-Folie beidseitig ergänzt, deren Zwischenraum anschließend evakuiert wurde. Die Haftreibung zwischen den Folien sowie die entstehenden unregelmäßigen Falten führen zu einer wirksamen Stabilisierung der Flächen zwischen der Metallgitterkonstruktion.

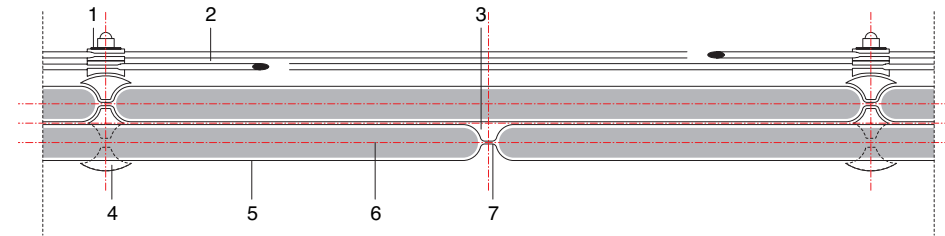


Abb. 6.9 Variante 1b, Horizontalschnitt, M 1:5

- 1 Knoten
- 2 Verspannungsebene
- 3 Luftkammer im Bereich eines Elements, seitlich abgeschlossen durch (4), zum Dampfaustausch innen-außen, siehe (7)
- 4 Formteile aus Dämm-Material, Achse aus Kunststoff oder Edelstahl
- 5 VIP-Hülle (opak, transluzent oder transparent)
- 6 VIP-Kernmaterial (opak, transluzent oder transparent)
- 7 VIP-Laschenbereich kontinuierlich, Klebebereich mikroperforiert

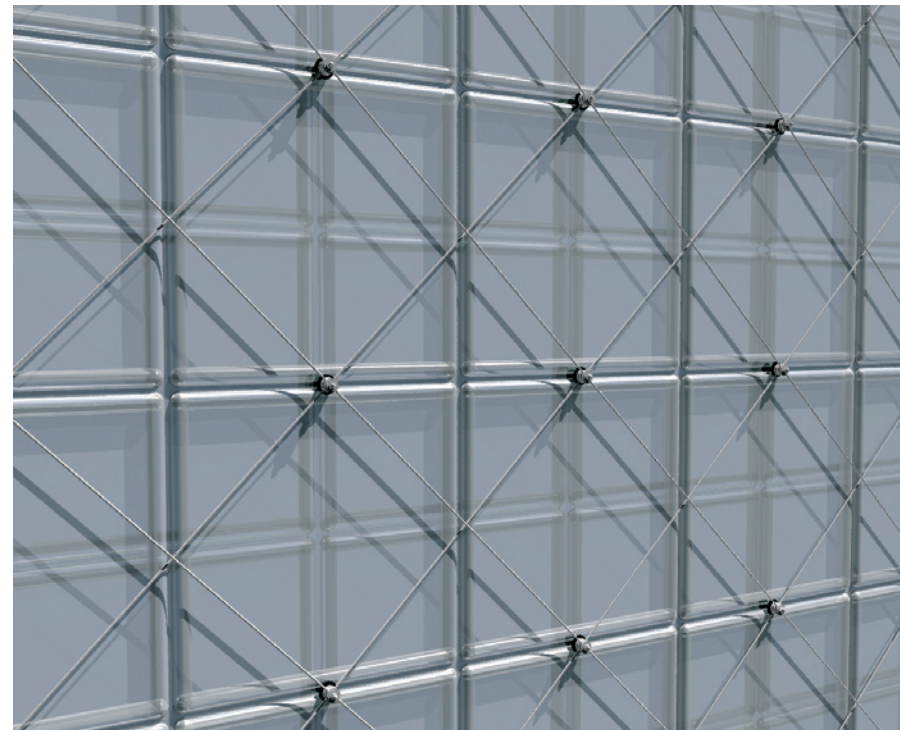


Abb. 6.10 Detail-Ansicht Variante 1b

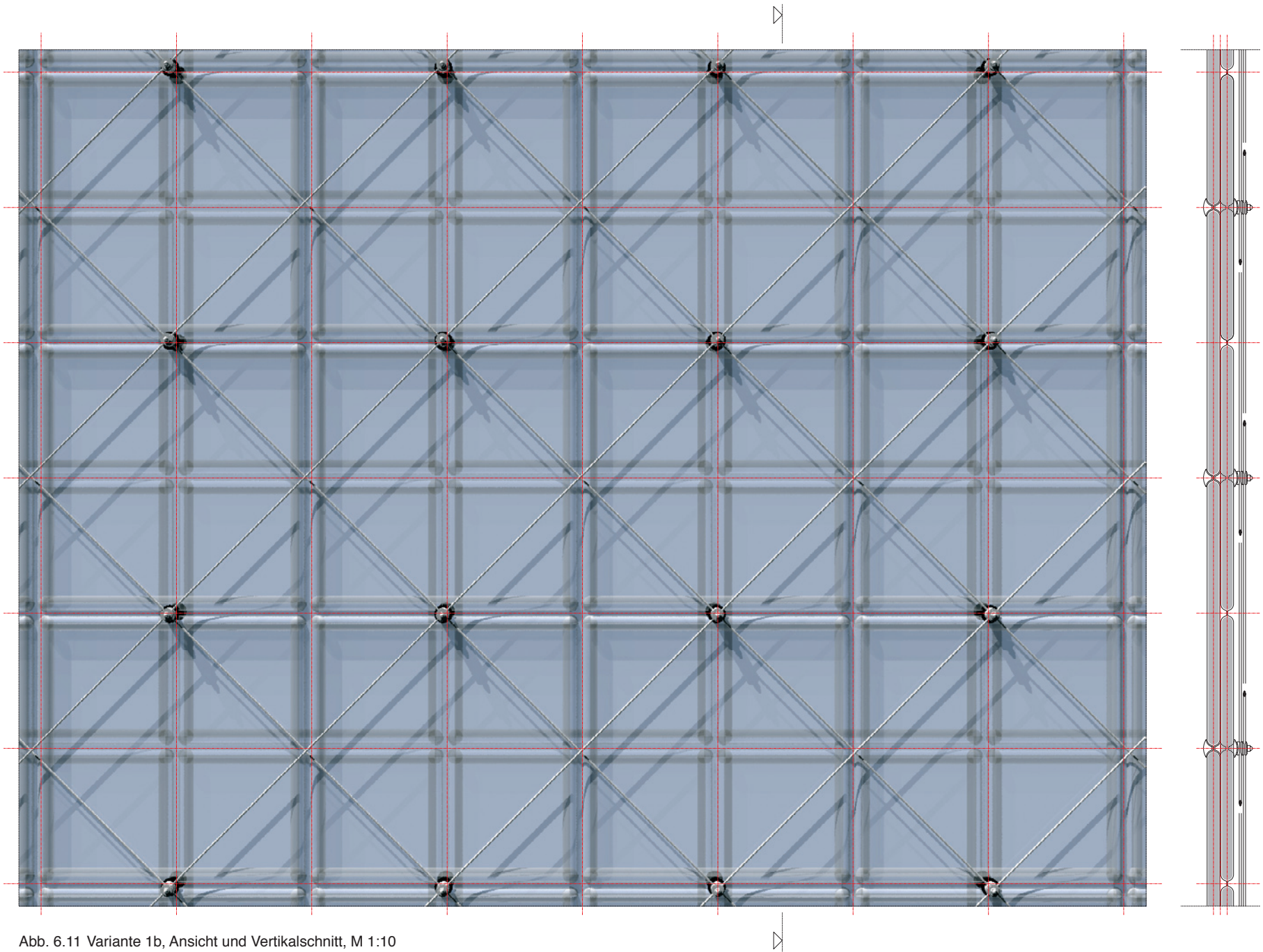


Abb. 6.11 Variante 1b, Ansicht und Vertikalschnitt, M 1:10

4.3 Variante 2a

Diese Variante unterscheidet sich von Beispiel 1a durch eine beidseitig eingefügte Schicht aus Formteilen, die den geometrischen Vorgaben der Dämmplattenanordnung folgen (vergl. Schritt f in Abb. 6.2).

4.3.1 Aufbau

Abb. 6.14 zeigt einen schematischen Horizontalschnitt (M 1:5), Abb. 6.16 einen Vertikalschnitt und eine Ansicht (M 1:10), Abb. 6.15 eine dreidimensionale Detail-Ansicht.

4.3.2 Besonderheiten und weitere Aspekte

Die Formteile der Außenschichten, die beispielsweise durch einen Tiefziehvorgang aus Blech herstellbar wären, sind quadratisch, aber im Verhältnis zu den Vakuum-Dämm-

systemen um 45° gedreht und durch eine Sicke im Bereich der dahinterliegenden Übergangsstelle der Dämmplatten in eine Richtung stabilisiert.¹¹

Dabei sind nebeneinander liegende Elemente immer um 90° gedreht angeordnet. Die Außenränder und damit auch Elementstöße befinden sich durchlaufend in einer 45°-Neigung, was eine den Wasserablauf und damit die Dichtigkeit begünstigende Situation darstellt.

Neben Blech könnte für die Außenformteile auch Kunststoff zum Einsatz kommen, beispielsweise Polyester, wie im unten gezeigten Beispiel von Renzo Piano (Abb. 6.12 und 6.13), das neben einer oberflächlich formalen Verwandtschaft eine Konstruktion aufweist, deren Verhältnis von flächigen Elementen und Tragstruktur den in diesem Teil behandelten Wandsystemen nicht unähnlich ist.

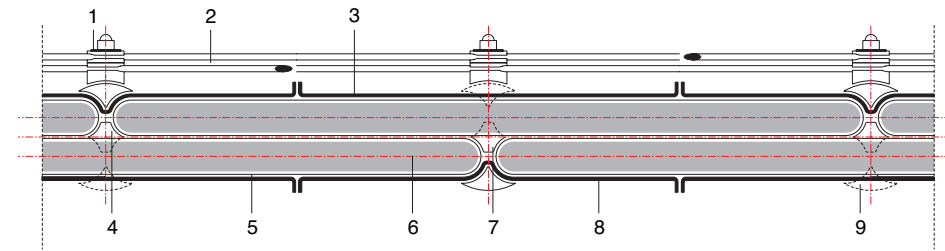


Abb. 6.14 Variante 2a, Horizontalschnitt, M 1:5

- 1 Knoten
- 2 Spannungsebene
- 3 Wandhaut aussen, z.B. Blech
- 4 Formteile aus Dämm-Material, Achse aus Kunststoff oder Edelstahl
- 5 VIP-Hülle (opak, transluzent oder transparent)
- 6 VIP-Kernmaterial (opak, transluzent oder transparent)
- 7 Luftkammer im Bereich eines Elements, seitlich abgeschlossen durch (4)
- 8 Wandhaut innen, z.B. Blech
- 9 Befestigung an Verspannknoten von innen, Innenhaut abnehmbar, dadurch VIP-Elemente einzeln tauschbar

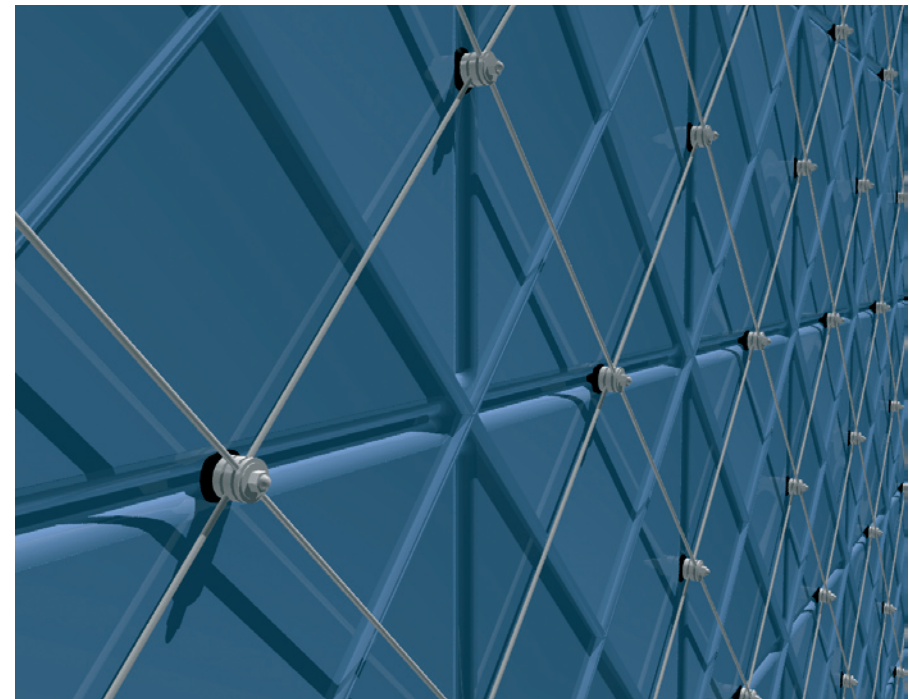


Abb. 6.15 Detail-Ansicht Variante 2a

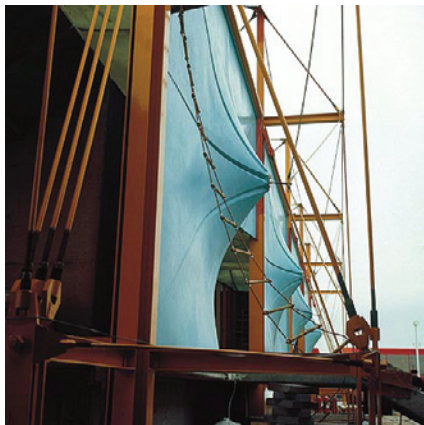
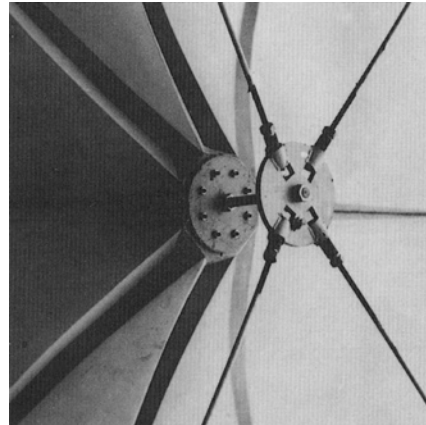


Abb. 6.12 und 6.13
Pavillon auf der Weltausstellung 1970 in Osaka (Architekt Renzo Piano)¹²



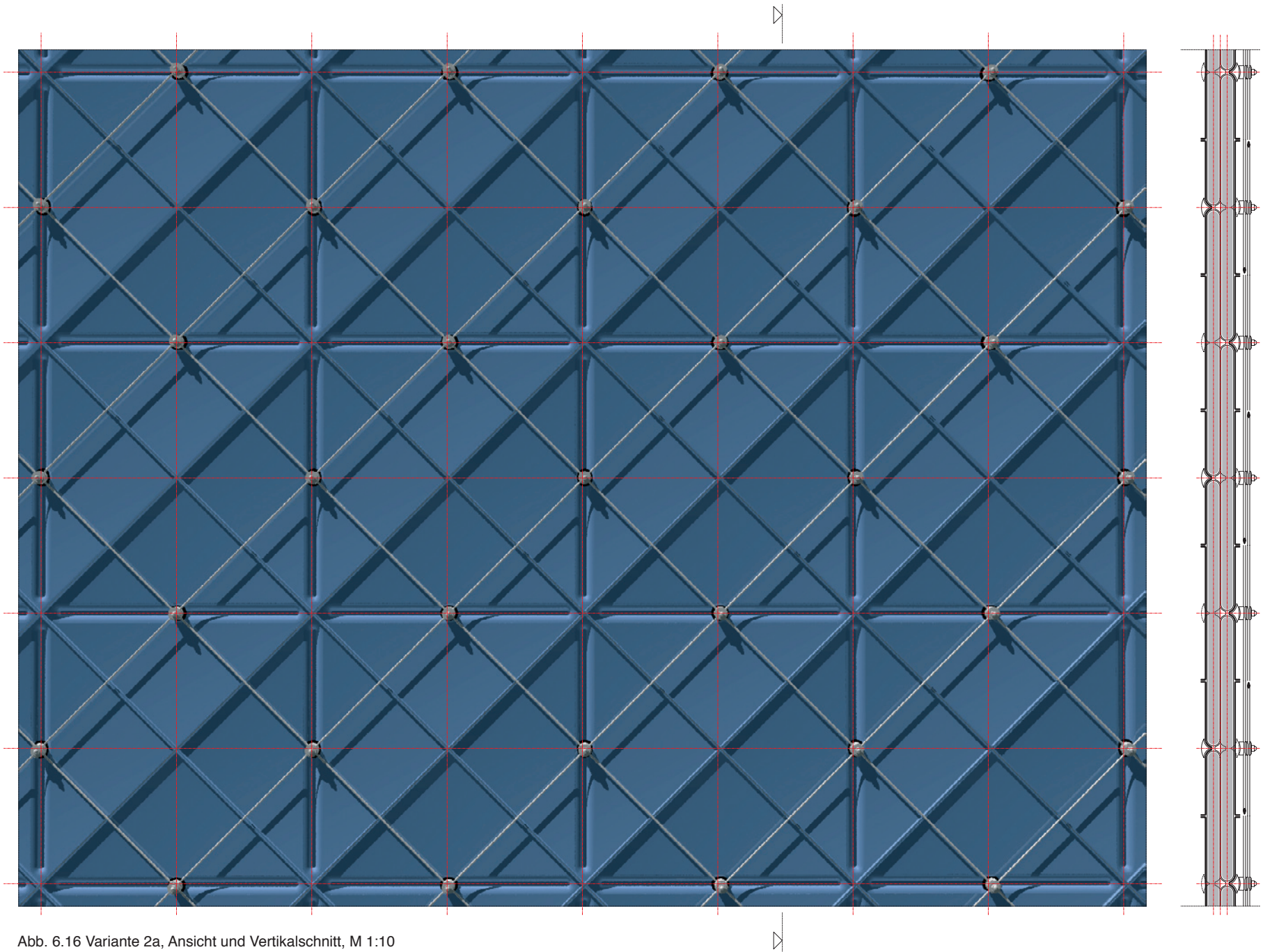


Abb. 6.16 Variante 2a, Ansicht und Vertikalschnitt, M 1:10

4.4 Variante 2b

Diese Variante unterscheidet sich von Beispiel 2a durch einen Stich der Seilnetzkonstruktion, entsprechend Schritt g in Abb. 6.2.

Durch die Unter- bzw. Überspannung werden die erforderlichen Vorspannkräfte in den Seilen erheblich reduziert und die Knoten eindeutig hinsichtlich Zug- und Druckbelastung differenziert.

Dies hat eine größere, absolute Wandstärke (Außenkante Konstruktion) zur Folge.

4.4.1 Aufbau

Abb. 6.17 zeigt einen schematischen Horizontalschnitt (M 1:5), Abb. 6.19 einen Vertikalschnitt und eine Ansicht (M 1:10), Abb. 6.18 eine dreidimensionale Detail-Ansicht.

4.4.2 Besonderheiten und weitere Aspekte

Eine Besonderheit dieses Aufbaus ergibt sich aus der hohen Druckfestigkeit der VIP, die es - vor allem in Zusammenhang mit der druckverteilenden Wirkung der äußeren Formelemente (3) - unter Umständen erlaubt, im Bereich des druckbelasteten Knotens auf eine Durchdringung der Dämmebene zu verzichten, wodurch die punktförmigen Wärmebrücken auf die Hälfte reduziert werden können.

Analog zu den anderen in diesem Teil vorgestellten Varianten könnten auch die Beispiele 2a und 2b in transluzenter Form umgesetzt werden, gäbe es entsprechende Vakuum-Dämmsysteme. Da sich keine erhöhten Dampfdichtigkeits-Anforderungen an die äußeren Formelemente ergeben, könnten diese aus konventionellen, transparenten oder transluzenten Kunststoffen hergestellt werden, zum Beispiel aus Polycarbonat (PC) oder Polymethylmethacrylat (PMMA).

Neben vielen Aspekten, die in einer detaillierteren konstruktiven Betrachtung zu berücksichtigen wären, steht folgender in besonderem Zusammenhang mit den innenliegenden Vakuum-Dämmsystemen:

Aufgrund von deren äußerst geringen Wärmeleitfähigkeit kommt es zu einer besonders starken Erwärmung der Außenschicht durch Solarstrahlung. Hierdurch darf es nicht zu einem Versagen bzw. zu einer Zerstörung des Materials der Außenschicht und der Hülle des Vakuum-Dämmsystems kommen. Eine helle Farbgebung und ein hohes Reflexionsvermögen der Oberfläche der Außenschicht wird daher von Vorteil sein. Unter Umständen muss zusätzlich eine thermische Trennlage (z.B. ein Glasfaservlies) eingelegt werden.

Außerdem müssen die Auswirkungen der Wärmeausdehnung für die Ausbildung der Fügungen (v.a. der Außenformteile) berücksichtigt

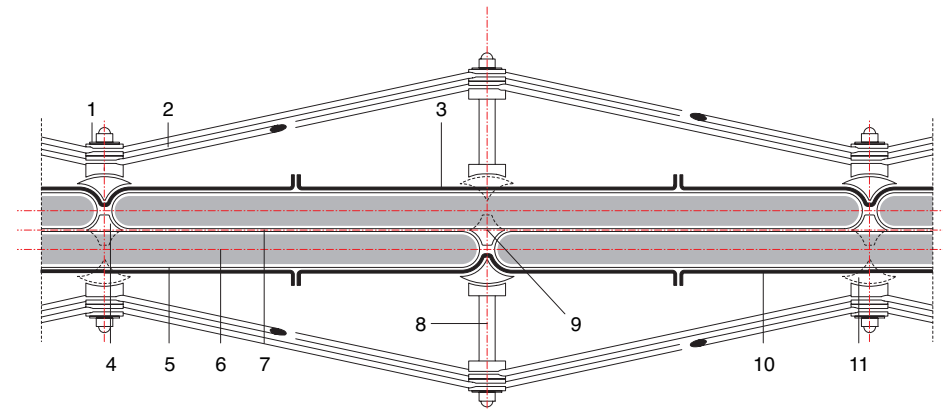


Abb. 6.17 Variante 2b, Horizontalschnitt, M 1:5

- 1 Zugbelasteter Knoten, Seilfixierung über Klemmteller
- 2 Spannungsebene
- 3 Wandhaut aussen, z.B. Blech
- 4 Formteile aus Dämm-Material, Achse aus Kunststoff oder Edelstahl
- 5 VIP-Hülle (opak, transluzent oder transparent)
- 6 VIP-Kernmaterial (opak, transluzent oder transparent)
- 7 Luftkammer im Bereich eines Elements, seitlich abgeschlossen durch (4)
- 8 Abstand zum Verspannknoten über Druckstange
- 9 Je nach Druckfestigkeit der VIP obsoleter Durchdringung, Druckverteilung durch (3)
- 10 Wandhaut innen, z.B. Blech
- 11 Befestigung an Verspannknoten (Zugelement)



Abb. 6.18 Detail-Ansicht Variante 2b

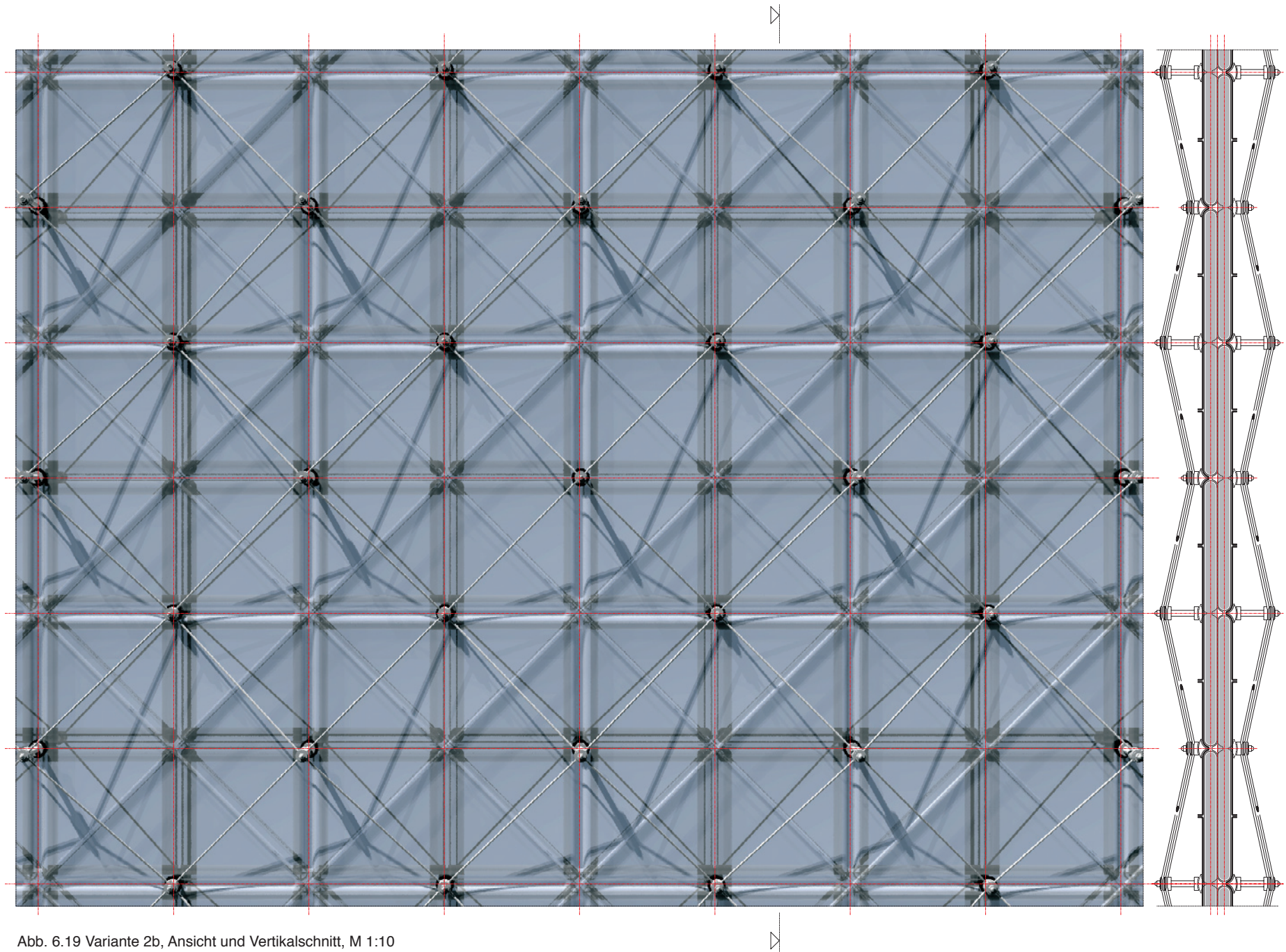


Abb. 6.19 Variante 2b, Ansicht und Vertikalschnitt, M 1:10

werden. Dabei gilt es, eine hierdurch bedingte asymmetrische Verformung („Bauchung“) der Gesamtkonstruktion zu verhindern.

Die außen und innen angeordneten Teile der Seilnetzkonstruktion unterliegen sehr unterschiedlichen Temperaturschwankungen. Im Bereich einer exponierten Südseite können dies bis ca. 100 K sein (-25 °C bis 75 °C), innen dagegen in Abhängigkeit von der Nutzung beispielsweise nur 10 K (17 °C bis 27 °C).

Der Unterschied zwischen beiden Seiten führt zu ungleichmäßigen thermischen Längenänderungen in den Seilen und damit zu uneinheitlichen Vorspannkräften.

Der Kräfte-‘Kurzschluss‘ im Bereich der zugbelasteten Durchdringungen führt jedoch dazu, dass sich diese nur in den dazwischen liegenden Feldern durch sehr geringe Verformungen bemerkbar machen.

Die mit der vorgeschlagenen Konstruktion realisierbaren Außenmaße werden durch die erforderlichen Vorspannkräfte begrenzt, die von einem Primär-Tragwerk aufgenommen werden müssen.

Das gleichmäßige Einbringen der Vorspannkräfte in die Seilnetzkonstruktion kann in Abhängigkeit vom geplanten Stich und den Außenmaßen auf verschiedene Weise erfolgen. Zielführend scheint dem Verfasser hierzu, den Stich der

Seilkonstruktion durch eine geeignete Ausbildung der Konstruktion im Bereich der Durchdringungen zu erhöhen, zum Beispiel durch Verlängerung der Druckstäbe (und / oder durch Verkürzung der Zugstäbe).

4.4.3 Prototypische Umsetzung, Modell

Die beschriebene Variante 2b wurde im Hinblick auf später geplante U-Wert-Messungen in einem Ausschnitt von ca. 1 m x 1 m im Technischen Zentrum (TZ) der TUM als Modell umgesetzt.

Dabei wurden entsprechend der Zeichnungen in Abb. 6.17 und 6.19 Dämmpaneele (VIP) von ca. 50 cm x 50 cm in einer Stärke von 15 mm zugrunde gelegt, die die Firma Porextherm (Kempten) freundlicherweise zur Verfügung stellte.

Da die Umsetzung der Außenformteile (3 und 10 in Abb. 6.17) für den Modellbau im Hinblick auf die Zielsetzung der Untersuchung in Kunststoff (Polystyrol) ausreichend war, gleichwohl sehr aufwändig (Abb. 6.20 und 6.21), wurden zur Anpassung an die Randsituation keine eigenen Teile hergestellt, sondern die Regelfeldteile entsprechend zugeschnitten (vergl. Abb. 6.22).

Die so entstandenen Randteile könnten jedoch in einem nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Stabilität

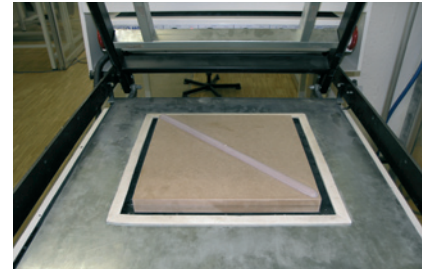


Abb. 6.20 Die fertige Form in der Vakuuum-Umform-Maschine¹³

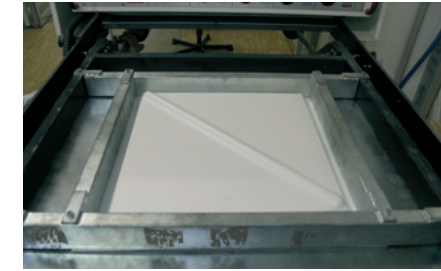
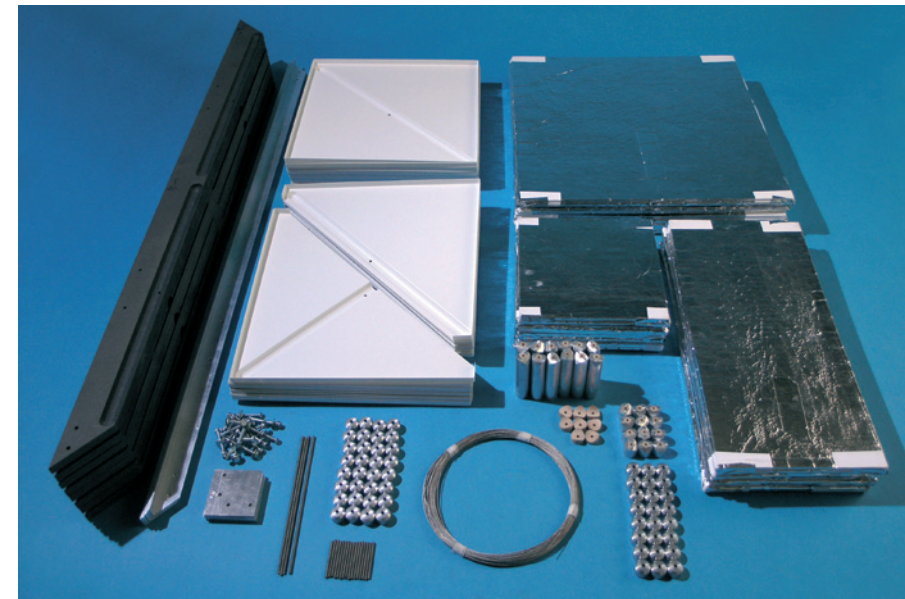


Abb. 6.21 Das Polystyrol-Formteil nach dem Umform-Vorgang

Abb. 6.22 Alle Teile zum Bau des Modells im Überblick



optimiert werden, zum Beispiel durch Aufkantungen im Randbereich.

Um den Aufwand für den Modellbau in Grenzen zu halten, wurden die Hoch- und Tiefpunkte konstruktiv weitgehend identisch ausgebildet. Da im Falle der zugbelasteten Tiefpunkte das jeweilige Material deutlich günstiger beansprucht wird, könnte dieser Punkt in einem nächsten Schritt minimiert werden.

Abb. 6.22 zeigt alle zum Bau des Modells hergestellten Teile.

Aus den Abb. 6.23 und 6.24, die den Modellaufbau zeigen, werden die grundlegenden geometrischen Überlegungen deutlich, die sich aus den um 50% versetzten VIP-Lagen ergeben.

Der Sickenverlauf der Außenformteile zeichnet das Fugenbild der dahinter liegenden VIP deutlich nach (Abb. 6.25 und 6.26).

Abb. 6.27 zeigt das fertige Modell in einer Schrägansicht.

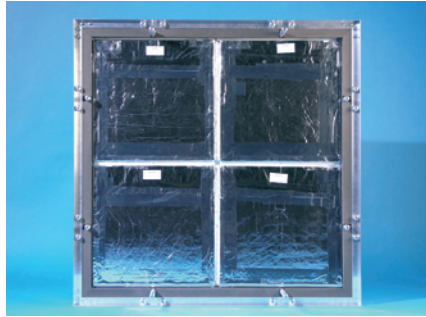


Abb. 6.23
Die erste Lage
VIP

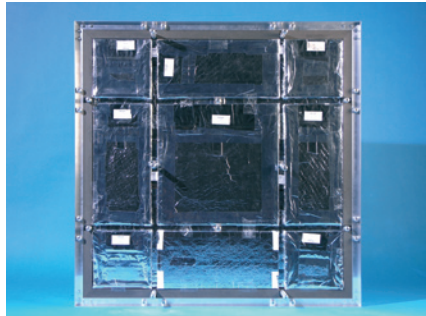


Abb. 6.24
Die zweite Lage
VIP

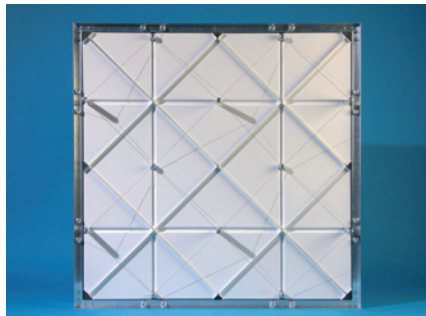


Abb. 6.25
Das fertige Modell
von der einen...

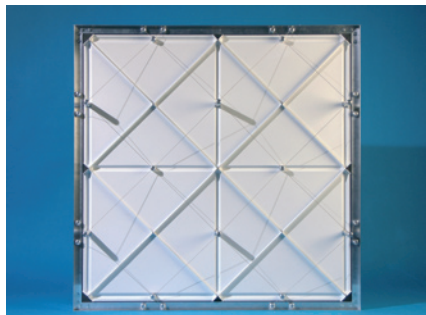


Abb. 6.26
... und der anderen
Seite

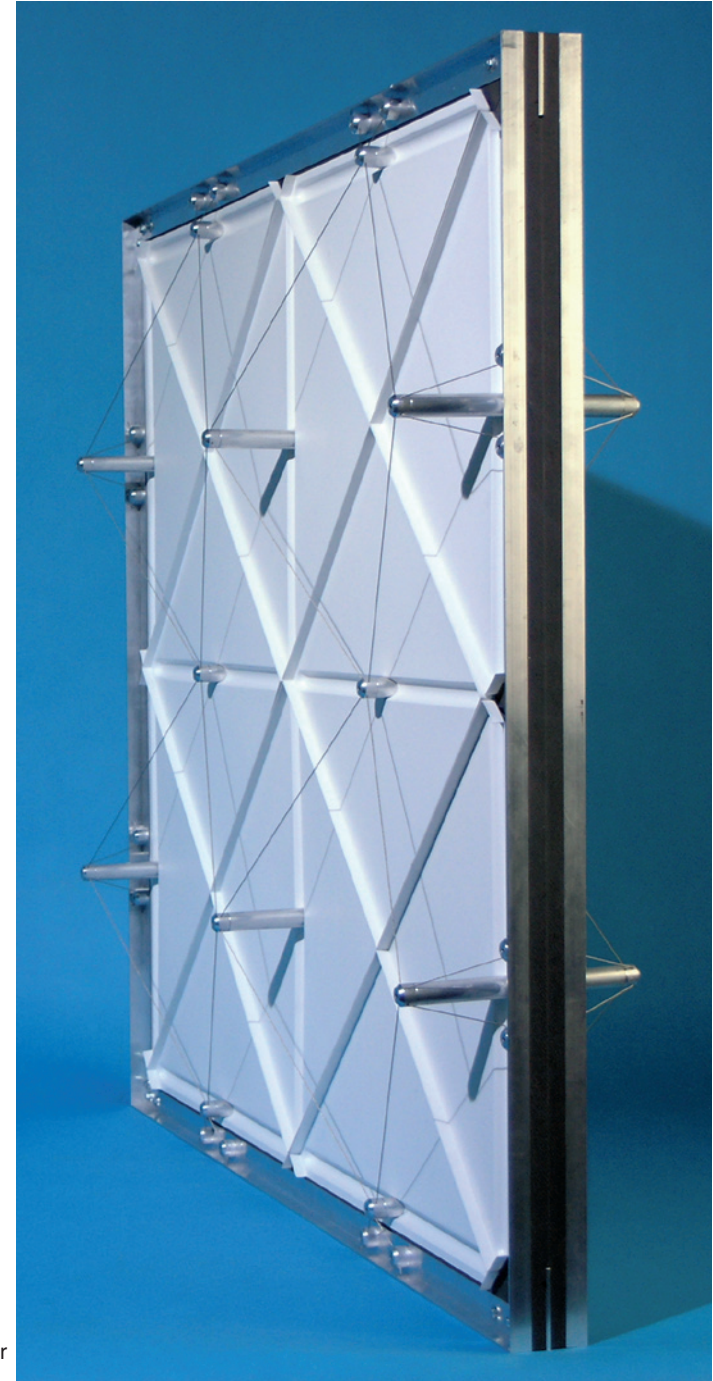


Abb. 6.27
Das Modell in der
Schrägansicht



Abb. 6.28 Das Orchester-Schutzdach auf der Interbau in Berlin, 1957, von Frei Otto¹⁴

4.5 Variante 3

Die Stabilisierung dieser Variante erfolgt nicht durch eine Seilnetzkonstruktion, sondern durch eine beidseitig angebrachte ‚aufgebuckelte Membran‘.¹⁵

4.5.1 Aufbau

Abb. 6.29 zeigt einen schematischen Horizontalschnitt (M 1:5), Abb. 6.32 einen Vertikalschnitt und eine Ansicht (M 1:10).

4.5.2 Besonderheiten und weitere Aspekte

Hauptziel während der Umsetzung des hier gezeigten Vorschlags müsste der Einsatz einer nicht zugeschnittenen Membran sein. Der anzusetzende Stich ergäbe sich dann aus den Materialeigenschaften.

Dies setzt ein weiches, aber sehr festes Membranmaterial voraus - nach derzeitigem Stand der Technik zum Beispiel ein PTFE-beschichtetes PTFE-Gewebe.¹⁶

Wesentlicher baugeschichtlicher Bezugspunkt für diese Variante sind die frühen, sogenannten Buckelzelte und ‚Flächen mit Hoch- und Tiefpunkten‘ von Frei Otto.¹⁷ Beispiele hierfür finden sich in den Abb. 6.28 und 6.31.

Folgendes ist für die konstruktive Ausbildung der Hoch- und Tiefpunkte zu beachten:

- Die Unterstützung der Hochpunkte muss ausreichend großflächig ‚ausgerundet‘ sein.¹⁸ Abb. 6.30 zeigt einen solchen Punkt (allerdings in einem anderen Maßstab).
- Der zugbelastete Tiefpunkt erfordert im Bereich des Klemmtellers und der Membrandurchdringung in der Regel eine Materialverstärkung, vor allem um auch die zusätzlichen Zugkräfte aus auf die Fassade wirkenden Windlasten aufnehmen zu können.

Sind die linearen Verbindungsstellen der VIP perforiert und die jeweils zwischen Membran und VIP

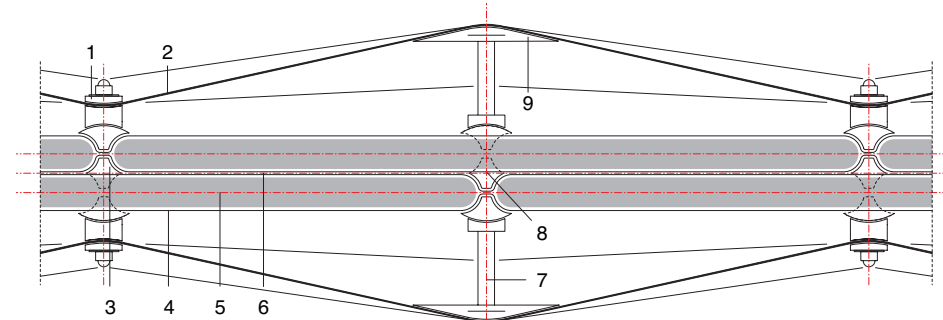


Abb. 6.29 Variante 3, Horizontalschnitt, M 1:5

- 1 Zugbelasteter Knoten, Membran lokal verstärkt im Bereich des Klemmtellers
- 2 Membran, Aussenhaut
- 3 Formteile aus Dämm-Material, Achse aus Kunststoff oder Edelstahl
- 4 VIP-Hülle (opak, transluzent oder transparent)
- 5 VIP-Kernmaterial (opak, transluzent oder transparent)
- 6 Luftkammer im Bereich eines Elements, seitlich abgeschlossen durch (3)
- 7 Druckbelasteter Knoten, Membran nicht fixiert
- 8 Je nach Druckfestigkeit der VIP obsoletе Durchdringung
- 9 Ausgerundete Hochpunktunterstützung

befindlichen, luftgefüllten Bereiche mit dem Außen- bzw. Innenraum verbunden, so dass ein Luftaustausch stattfinden kann, ist eine anhaltende Kondensatbildung auf der Membran weitgehend ausgeschlossen.

Aus Sicht des Verfassers wäre eine transluzente oder transparente Ausführung insbesondere dieser Variante sehr interessant, da die geometrisch und stofflich unterschiedlichen Schichten dieses Aufbaus einen komplexen gestalterischen Ausdruck erwarten lassen.



Abb. 6.30

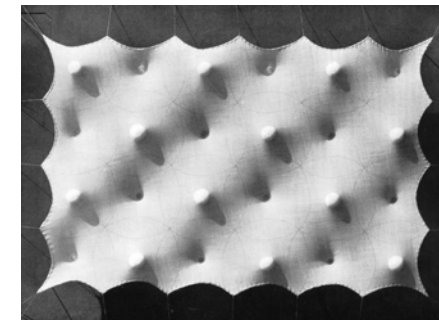


Abb. 6.31

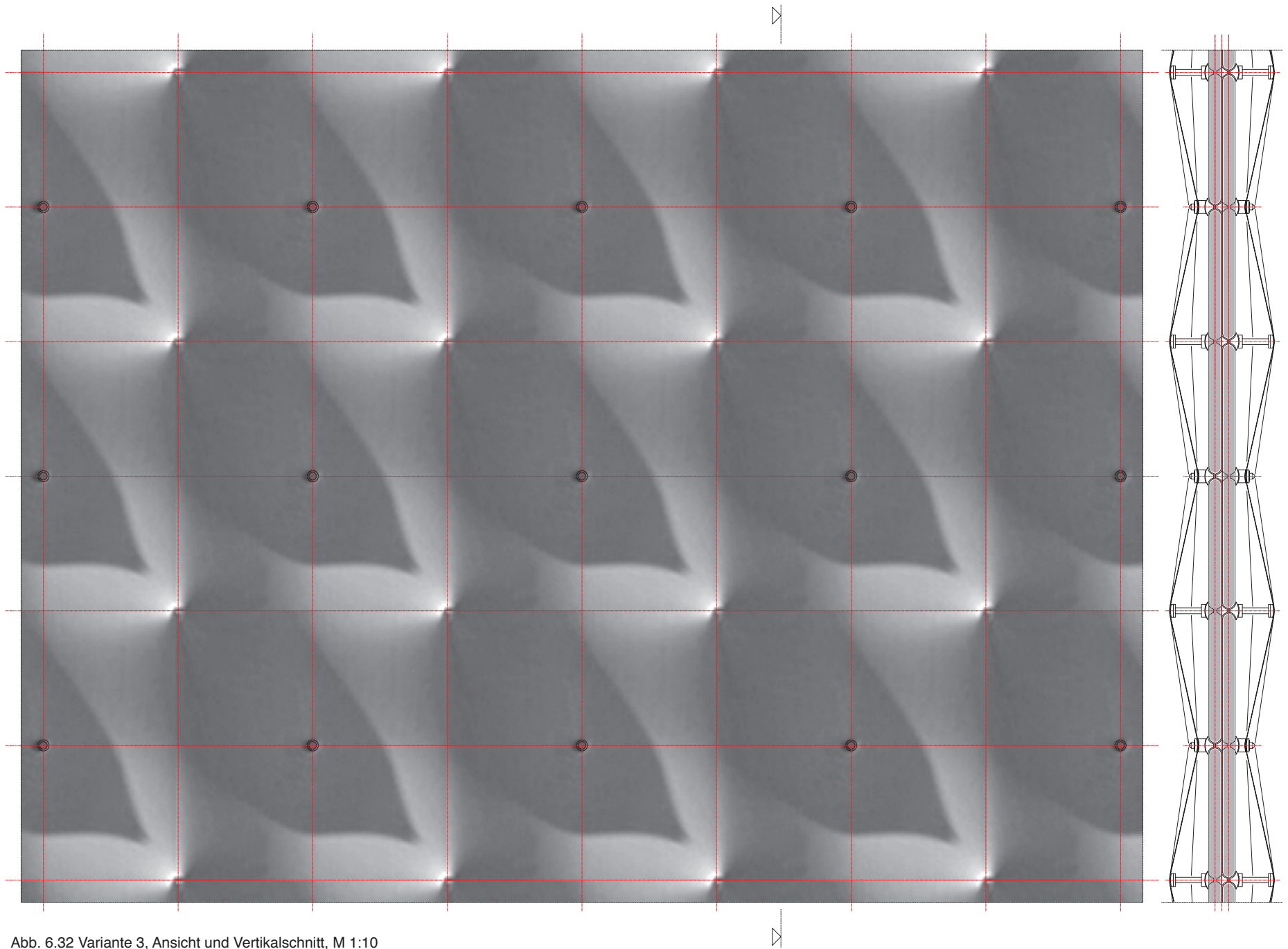


Abb. 6.32 Variante 3, Ansicht und Vertikalschnitt, M 1:10

5 Resumée und Ausblick

Die vorgestellten Wandsysteme lassen hervorragende U-Werte erwarten, beispielsweise

- ca. 0,10 - 0,12 W/(m²K) für einen Aufbau mit zweimal 3 cm VIP,
- ca. 0,08 - 0,10 W/(m²K) für einen Aufbau mit zweimal 4 cm VIP.

Gleichzeitig handelt es sich um sehr schlanke Konstruktionen, deren Charakter eher haut- als wandartig anmutet.

Sollte der zweilagige VIP-Einsatz einer ökonomisch erfolgreichen Umsetzung im Wege stehen, ist es auch denkbar, eine Lage durch konventionelle Dämmstoffe (z.B. Dämmschaumplatten aus PU oder PS) zu ersetzen, da eine wesentliche Funktion der zweiten Lage die Vermeidung von linearen Wärmebrücken darstellt. Diese sollte aus bauphysikalischen Gründen vorzugsweise außen angeordnet werden.

Im Hinblick auf Einsatzmöglichkeiten der dargestellten Varianten sind folgende weitere Merkmale von Bedeutung:

- Innerhalb der Wandsysteme ist eine Integration von Öffnungen durch den 50%-igen Versatz nicht möglich, ohne den Rapport zu stören
- Die Ausbildung der Randschlüsse ist aufwändig

- Die erforderlichen Vorspannkkräfte bedingen eine entsprechende primäre Tragstruktur
- Die Wärmespeichermasse ist (ohne weitere Maßnahmen) verhältnismäßig gering
- Ein horizontaler Einsatz der Systeme als Dachfläche ist nicht ohne Modifikationen möglich¹⁹

Daraus ergibt sich eine besondere Eignung der Wandsysteme für

- einen Einsatz großer, ungestörter Flächen,
- Gebäude mit Anforderungen an hohe Innentemperaturen,
- Gebäude, die aus anderen Gründen über eine geeignete, primäre Tragstruktur verfügen,
- Gebäude mit ausreichender innerer Wärmespeichermasse.

Solche Bedingungen können beispielsweise bei Industriehallen mit besonderen Anforderungen an die Fertigungsumgebung, großen Schwimmhallen, Atelierräumen oder Museen gegeben sein.

Anmerkungen

1. Gemeint sind hier Vakuum-Dämmsysteme gemäß den Ausführungen in Teil 3 mit Ausnahme von ‚Vakuum-Verglasungen‘.

2. Hierzu liegen bisher keine belastbaren Werte vor. Die zulässige Biegung ist außer von dem Hüllmaterial von der Art des Randverbundes und der Paneelstärke abhängig.

3. Der hier vorgestellte Ansatz wurde erstmals veröffentlicht in Cremers, Jan: Systematisierung architektonischer Anwendungsmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle (2005), S. P9 - P11. Das betrifft insbesondere die Variante 2a und die Abbildungen 6.2, 6.14 und 6.15.

4. Die in Teil 5 beschriebenen und untersuchten Vakuum-Dämmsmatten folgen demselben Prinzip, nur in einem anderen Maßstab. Hier ist damit die Verbindung von plattenartigen Vakuum-Dämmsystemen gemeint, die zum Beispiel 50 cm x 50 cm messen könnten.

5. Für die in Teil 3 beschriebenen Paneele mit Edelstahl als Hüllmaterial (sog. ‚VIS‘) gilt dies weitgehend. Hier stellt allerdings der Randverbund der Paneele eine gravierende lineare Wärmebrücke dar.

6. Gemeint ist die 25 x 45 Meter messende Fassade der Eingangshalle des Kempinski Hotels am Flughafen München, die 1994 erbaut wurde (Architektur: Murphy / Jahn, Chicago). Die Tragwerksplanung der Seilnetzkonstruktion wurde von Schlaich Berger-

mann und Partner, Stuttgart, entwickelt. Die Ableitung der Horizontal- und Vertikallasten erfolgt durch 22 mm starke, vertikale und horizontale Edelstahlseile.

7. Beispielsweise betragen die Vorspannkraft im Falle der Seilnetzkonstruktion des Kempinski-Hotels hohe 85 kN (horizontal). [DBZ 10/95, S. 87-92].

8. Die Tragswerkplanung für dieses Projekt erfolgte ebenfalls durch das Büro Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart. Vergl. Schlaich, Jörg; Schober, Hans: Verglaste Netzkuppeln (1992), S. 4-8

9. Bildquellen zu den Klemmteller-Darstellungen: Schittich, C.; Staib, G.; Balkow, D.; Schuler, M.; Sobek, W.: Glasbau Atlas (1998), S. 158 (Abb. 6.3), S. 109 (Abb. 6.6)

10. Die Bilder wurden freundlicherweise von der Firma Mero / Würzburg zur Verfügung gestellt. An dem dargestellten Messestand war außer der Firma Mero noch die Firma 3e / Stuttgart beteiligt. Weitere Information findet sich unter <http://www.meroform.com/> <01.2004>

11. Somit ergeben sich zwei ungleich stabilisierte Ecken der Formteile, da sich jeweils vier Sicken in einem Punkt treffen. Der anderen Eckpunkte müssen gegebenenfalls durch eine weitere Maßnahme stabilisiert werden, zum Beispiel durch einen zusätzlichen, um 90° zur Sicke versetzten, erhabenen Grat. Die Wahl eines quadratischen Ausgangsformats für die Vakuum-Dämmsysteme ermöglicht die Beschränkung auf nur ein Formteil, das in zwei Drehzuständen (0° und 90°) eingebaut

werden kann. Ist das Ausgangsformat ein nicht quadratisches Rechteck, so ergeben sich geometrisch zwei rautenförmige Formteile, die sich in der Lage der Sicke entsprechend den beiden Diagonalen unterscheiden. Alle derartigen Lösungen bedingen Sonderformteile in den Randbereichen, die für die hier vorgenommene Betrachtung ausgeklammert werden.

12. Der italienische Architekt Renzo Piano hat 1969 einen Ausstellungspavillon mit 7000 qm für die italienische Industrie (für die Weltausstellung in Osaka 1970) entworfen, der in Einzelteilen nach Japan geschickt wurde und dort innerhalb von 60 Tagen zusammengebaut wurde.

„Es scheint, als würden sich die großen Polyester-schalen dieses Pavillons gerade öffnen und dabei Zug- und Druckkräfte im Innern auslösen. (...) Das System der äußeren Windverstreungen und die kräftige Verankerung im Boden sind der sichtbare Ausdruck dafür, dass bei diesem Gebäude die Trennung der Statik vom Raumvolumen vollzogen wurde. Hier beginnt nichts weniger als ein neuer Abschnitt in der zeitgenössischen Architektur.“ [Pizzi, Emilio: Renzo Piano, Basel: Birkhäuser, 2003, S. 64].

Das aus großformatigen eigenformstabilisierten, transluzenten Kunststoffelementen bestehende System wird gleichermaßen für Dach- und Wand eingesetzt. Die glasfaserbewehrten, vorgespannten, zweilagigen Polyester-elemente mit Luftzwischenraum bestehen geometrisch gesehen aus zwei (räumlich gespiegelten) Schalenelementen, von denen je 4 zu einem das Tragsystem ausfüllenden Feld zusammengesetzt werden. Der entstehende Hochpunkt wird über die Diagonale doppelt abgespannt.

Das Projekt ist u.a. veröffentlicht in a+u 3/1989: Renzo Piano Building Workshop 1964-1988, S. 170ff; Pizzi, Emilio: Renzo Piano, Basel: Birkhäuser, 2003, S. 64f; Dino, Massimo: Renzo Piano Progetti e architettura 1964-1983, Mailand: Electa, 1983, S. 32ff

Bildquellen:

Abb. 6.12 www.rpww.org <09.2003>

Abb. 6.13 a+u 3/1989: Renzo Piano Building Workshop 1964-1988, S. 170f

13. Es handelt sich um eine Vacuum Forming Machine der englischen Firma Formech International Ltd. (Modell F660).

14. Das abgebildete Orchester-Schutzdach war der erste ausgeführte Versuchsbau aus einer Membran mit einem Hochpunkt und vier Tiefpunkten. Es handelt sich um ein seilbegrenztes, Kunststoff-beschichtetes Baumwollgewebe.

Abbildungsquelle: Roland, Conrad: Frei Otto - Spannweiten. Ideen und Versuche zum Leichtbau (1965), S. 73 (Abb. 6.31), S. 66 (Abb. 6.30), S. 73 (Abb. 6.31)

15. Dieser Begriff stammt von Frei Otto, vergl.: Roland, Conrad: Frei Otto - Spannweiten. Ideen und Versuche zum Leichtbau (1965), S. 66. Diese Art der Flächenstabilisierung fand v.a. bei den frühen Buckelzelten Anwendung, zum Beispiel für die Interbau Berlin 1957.

16. Ein solches, allerdings sehr teures (ca. 40-45 €/m²) Gewebe-Produkt wird von der Firma Gore GmbH unter dem Namen ‚TENARA‘ angeboten. Näheres zum aktuellen Stand möglicher weiterer geeigneter Membran-Materialien findet sich in: Koch, K.-M. (Hrsg.): Bauen mit Membranen. München, Berlin, London: Prestel, 2004, S. 46-65

Insbesondere sei auch auf das im selben Werk erschienene Kapitel ‚Bauen mit Membranen - Perspektiven und künftige Optionen‘ von Thomas Herzog (S. 244-251) verwiesen. Von Interesse in Zusammenhang mit diesem Teil sind insbesondere die Ausführungen zu verschiedenen, experimentellen Wandbauteilen mit Membranen, S. 248 und 249.

17. vergl.: Roland, Conrad: Frei Otto - Spannweiten. Ideen und Versuche zum Leichtbau (1965), S. 62-63, 72

18. ebd., S. 73

19. Dies hat seine Ursache vor allem in den für die Außenwandsysteme nicht berücksichtigten Aspekten des Wasserablaufes und möglicher Schneelasten.

Inhaltsverzeichnis

Teil 7

Der Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen als temporärer Wärmeschutz

Abschnitt	Seite	Abschnitt	Seite		
1	Vorüberlegungen	160	3	Abschätzung des Wirkungspotenzials von temporärem Wärmeschutz	175
1.1	Temporärer Wärmeschutz	160			
1.2	...unter Verwendung von Vakuumdämmung	160			
1.2.1	Verfügbare Produkte mit integrierten Vakuum-Dämmsystemen	160	4	Detailliertere Untersuchungen und prototypische Entwicklung einzelner Lamellen	176
1.3	Der Bezug zur Energie-Einsparverordnung	161	4.1	Membranbespannte Lamelle mit VIP-Kern	176
1.4	Testfall ‚Lamelle‘	161	4.1.1	Beschreibung der Konstruktion	176
1.5	Optimierungsmaßnahmen	164	4.1.2	Gestalterische Intention	177
1.5.1	Ausbildung der Ränder	164	4.1.3	Abschätzung der Dämmwirkung (U-Wert und Heat-Flux)	177
1.5.1.1	Der Stoß zwischen zwei Lamellen	164	4.1.3.1	Grundlagen	177
1.5.1.2	Der obere und untere Anschluss	164	4.1.3.2	Simulationsergebnisse	179
1.5.1.3	Der seitliche Anschluss	164	4.1.4	Prototypische Umsetzung	180
1.5.2	Thermische Trennung in der Hülle der Lamelle	165	4.2	Polycarbonat-Lamelle mit Aerogel-Granulat-Füllung	182
1.5.3	Weitere Aspekte	165	4.2.1	Beschreibung der Konstruktion	182
1.6	Lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Lamellen	165	4.2.2	Funktionale und gestalterische Intention	182
1.7	Sekundärstrahlungseffekte	166	4.2.3	Abschätzung der Dämmwirkung (U-Wert und Heat-Flux)	184
1.8	Anwendungsbeispiele	166	4.2.3.1	Grundlagen	184
			4.2.3.2	Simulationsergebnisse	185
2	Untersuchungen verschiedener Lamellentypen	166	4.2.4	Prototypische Umsetzung, Modell	187
2.1	Aufbau	166	4.2.5	Erfahrungen und weiteres Vorgehen	188
2.1.1	Einbausituation	166			
2.1.2	Beschreibung der Lamellentypen	166	Anmerkungen		190
2.1.2.1	Lamelle Typ 1	167			
2.1.2.3	Lamelle Typ 2	167			
2.1.2.3	Lamelle Typ 3	167			
2.1.3	Ziele der Untersuchungen	167			
2.1.4	Simulationstechnik und Hinweise zu den Ergebnissen	167			
2.1.5	Hinweise zu den Isothermendarstellungen	167			
2.2	Wärmetechnische Untersuchungen	168			
2.2.1	Lamelle Typ 1	168			
2.2.2	Lamelle Typ 2	170			
2.2.3	Lamelle Typ 3	172			
2.3	Ergebnisse, Zusammenfassung	174			

Teil 7

Der Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen als temporärer Wärmeschutz

1 Vorüberlegungen

Wärmedämmende bewegliche Elemente im Bereich der Gebäudehülle zum temporären Wärmeschutz einzusetzen, stellt im Prinzip keine Neuerung dar. Jeder Klapp- oder Rollladen erfüllt diesen Zweck bis zu einem gewissen Grad.

Insbesondere in nördlichen Breiten ist der im wesentlichen auf der dämmenden Wirkung der stehenden Luftschicht zwischen Laden und Fenster beruhende Effekt (und der damit verbundenen Verringerung der Konvektion) vielleicht nicht der primäre, aber dennoch ein vorrangiger Anlass für den Einsatz solcher Systeme.

In den letzten Jahren wurden einige verfügbare Systeme auch unter den Gesichtspunkten des Wärmeschutzes optimiert. Zu verweisen ist hier zum Beispiel auf ausgeschäumte Kunststoffrollläden oder mit Hartschaumkern versehene Klappläden.¹

In diesem Teil wird die Frage aufgeworfen, ob die Integration solcher Systeme in die Gebäudehülle potenziell einen Gewinn darstellen kann, insbesondere unter der Berücksichtigung von Vakuum-Dämmsystemen.

1.1 Temporärer Wärmeschutz

Insbesondere in Breiten mit saisonal schwankendem Klima und deutlichen Kontrasten zwischen Tag und Nacht sind die wärmeschutztechnischen Anforderungen an die Gebäudehülle nicht konstant.

Gebäudehüllen und daran anknüpfend auch gebäudetechnische Anlagen müssen in der Regel nach einem ‚worst case‘-Szenario ausgelegt werden, um auch bei widrigsten Bedingungen die an das Innenklima gestellten Anforderungen erfüllen zu können.

Daher werden Gebäudehüllen mit zunehmend mehr Dämmmaterial und immer besser dämmenden Verglasungen ausgestattet.

Obwohl die letzten und aktuellen Verordnungen und Vorschriften in zunehmender Weise eine komplexe, energetische Gewinn- und Verlustrechnung berücksichtigen, ist eine gebäudeseitig flexible bzw. adaptable Lösung in den Verfahren bislang nicht vorgesehen, das heißt, es werden konstante U-Werte für opake Bauteile und Fenster zugrunde gelegt.²

Es könnte durchaus sinnvoll sein, die wärmedämmtechnische Ausrüstung einer Gebäudehülle für eine durchschnittliche Klimasituation auszulegen und nur für die Kälte- bzw. Wärmespitzen einen temporären Wärmeschutz vorzuhalten

(ähnlich einer Vorhaltung für den Sonnenschutz, Verschattung). Dieser könnte auf saisonale Nutzung (wie das ehemals weit verbreitete und lange Zeit gebräuchliche ‚Winterfenster‘) oder auf den Tag- / Nachtzyklus (entsprechend der traditionellen Nutzung eines einfachen Klapp- oder Rollladens) ausgelegt sein.

In einem ersten Ansatz ist es denkbar, dass es hierdurch gelingen könnte, insgesamt mit einer deutlich geringeren ‚Grundausstattung‘ der Gebäudehülle zu vergleichsweise besseren Lösungen zu gelangen (insbesondere bei Wärmeschutzverglasungen).

Dies könnte insbesondere dann von Vorteil sein, wenn hocheffektiv gedämmte, transluzente oder gar transparente Systeme verfügbar wären, da diese ein zusätzliches großes Nutzungsspektrum bieten könnten.

1.2 ...unter Verwendung von Vakuumdämmung

Der gezielte Einsatz von hoch wärmedämmenden Elementen (zum Beispiel durch Vakuum-Dämmsysteme) und die Optimierung der Anschlüsse erhöhen den oben beschriebenen Wärmedämmeffekt signifikant. Durch größere Dichtigkeit werden konvektive Effekte weiter reduziert.

Vor allem werden aber Wärmeleitung und (bei opaker Ausführung)

der Durchlass von IR-Strahlung sowie Sekundärstrahlungseffekte nahezu vollständig unterbunden.

Der im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen erheblich reduzierte Wärmetransport lässt (vielleicht erstmals) einen deutlichen Wirkungssprung erwarten.

Diese Art der Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen wurde bereits explizit in der Teil 4 einleitenden Typologie aufgeführt (Abb. 4.1, Fälle LU.F.oÖ.2, LU.F.oÖ.3, LU.F.mÖ.2, LU.F.mÖ.3, LU.D.mÖ.2 und die analogen Fälle für lichtdurchlässige Systeme LD.F.oÖ.2, LD.F.oÖ.3, LD.F.mÖ.3, LD.F.mÖ.4 und LD.D.mÖ.3).

1.2.1 Verfügbare Produkte mit integrierten Vakuum-Dämmsystemen

Das einzige dem Autor bekannte und bereits auf dem Markt verfügbare Produkt für temporären Wärmeschutz, das Vakuum-Dämmsysteme beinhaltet, ist das in Abb. 7.1 vorgestellte Schiebeladensystem vakutemp® der Firma Denk-Rollladentechnik aus Gangkofen.³

Der segmentierte Schiebeladen besteht aus einzelnen Dämmelementen aus stranggepressten, 155 mm breiten Aluminiumelementen, die auf der Innenseite mit 7 mm dicken VIP bekleidet sind und seitlich über 13 mm breite Schienen geführt werden.

Der Hersteller gibt an, dass ein Passivhausfenster im europäischen Standardformat 1,23 m x 1,48 m mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten U_w von $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ durch ein davor befindliches und geschlossenes vakutemp-System einschließlich aller Randverluste auf einen U_w -Wert von $0,61 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verbessert werden könne.

Daraus errechnet sich ein sehr geringer, auf das temporäre Wärmeschutzsystem zurück zu führender, zusätzlicher Wärmewiderstand von ca. $0,25 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, der deutlich unter dem in Anhang 2 ermittelten Wert für einen einfachen Holzklappladen ($0,75 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$) liegt.

Dies lässt vermuten, dass die bestehenden Verluste über seitliche und innere Anschlüsse v.a. wegen durchgehender Aluminiumteile im derzeitigen Entwicklungsstadium so hoch sind, dass der Aufwand für das ganze System und insbesondere den Einsatz von VIP als Dämmkern nicht gerechtfertigt erscheint.⁴

1.3 Der Bezug zur Energie-Einsparverordnung

Systeme zum temporären Wärmeschutz werden durch die aktuelle Energie-Einsparverordnung (EnEV 2002/04) nicht erfasst und es ist zu erwarten, dass sich dies auch für die anstehende Novelle (EnEV 2006), die auf der Umsetzung der Eurorichtlinie 2002/91/EG (die sog. EPDB, Energy Performance of Building Directive) und der in Planung

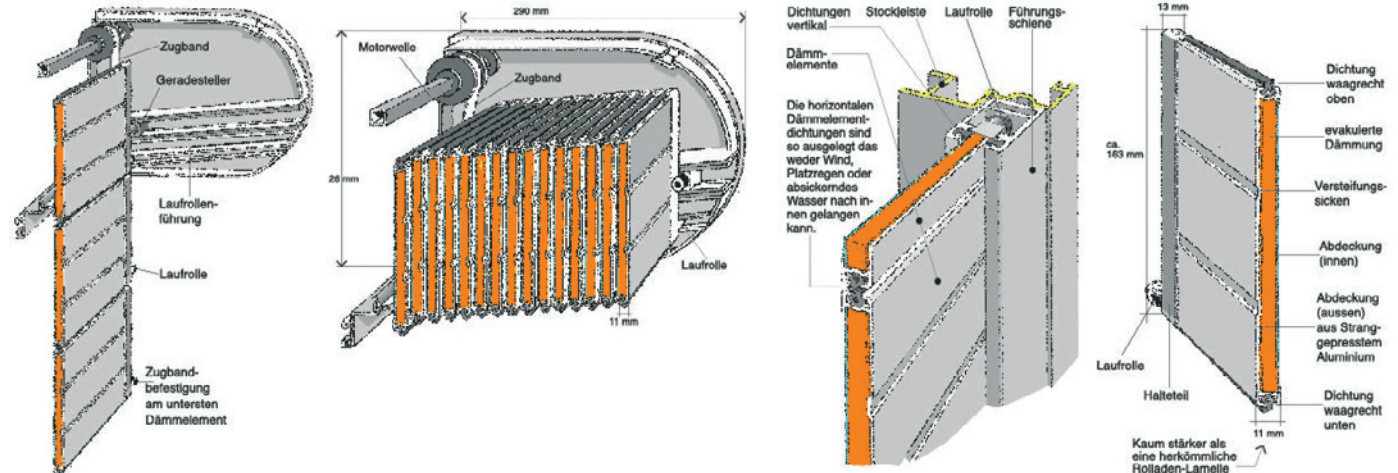


Abb. 7.1 Das Schiebeladen-Produkt vakutemp® der Firma Denk-Rollladensysteme (Gangkofen), Firmendarstellungen

befindlichen DIN 18599 beruht, nicht ändern wird.⁵

Grundsätzlich gehen aktuelle Verordnungen von den Eigenschaften einer (baulich) statischen Gebäudehülle aus, mit der einzigen Ausnahme des Sonnenschutzes.

Insbesondere ist die Berücksichtigung adaptiver Wärmedurchgangskoeffizienten nicht vorgesehen.

Es gibt derzeit keine andere offizielle Möglichkeit, solche Maßnahmen in das rechtlich erforderliche Nachweisverfahren einzubeziehen.

Hierfür werden neben dem Bestreben, die Verordnung so unkompliziert wie möglich zu halten, insbesondere drei Gründe angeführt⁶:

1. Der Nutzen von Maßnahmen zum temporären Wärmeschutz sei aufgrund der sehr hochwertigen,

verfügbaren Gläser mit U-Werten um $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nur noch sehr gering.

2. Im Einsatzfall solcher Systeme stelle der Nutzer einen unkontrollierbaren Faktor dar. Für eine Berechnung müßte daher von einem automatisierten System ausgegangen werden.

3. Für den Großteil der Neubauvorhaben spielt eine weitere Reduktion des Heizenergiebedarfs eine untergeordnete Rolle.

Unabhängig von der komplexen Frage, ob und wie sich die hier untersuchten Maßnahmen in gesetzlichen Nachweisverfahren integrieren lassen, ist dem Folgenden entgegen zu halten:

1. Was für ein Potenzial ist wirklich zu erwarten (vor allem unter Einbeziehung von Vakuum-Dämmsystemen)?

2. Lassen sich so aufwändige und schwere 3-fach-Wärmeschutzverglasungen zugunsten einfacherer Produkte sinnvoll vermeiden?

3. In wieweit ist der untersuchte Maßnahmentyp für Bestandsituationen geeignet und interessant?

Daher wurde entgegen der oben wiedergegebenen Bedenken eine genauere Untersuchung für sinnvoll gehalten und durchgeführt.

1.4 Testfall ‚Lamelle‘

Da - wie oben schon für den Fall des Systems ‚vakutemp‘ beschrieben - die inneren und äußeren Randanschlüsse einen entscheidenden Einfluss auf den resultierenden Wärmedurchlasswiderstand haben, diese aber von einer großen Zahl weiterer Aspekte bestimmt werden (Bewegungsart, Einbausituation usw.), wurde für

Bewegungsart der Lamelle

Rotation & Translation

An der Unterkonstruktion fixierte Elemente

Schere stirnseitig

Schere längsseitig

Position der fixierten Elemente

außen

innen

außen

innen

Position der bewegungsauslösenden Elemente

oben

unten

oben

unten

Gleitpunkt stirnseitig

Gleitpunkt längsseitig

Gleitpunkt stirnseitig

Gleitpunkt längsseitig

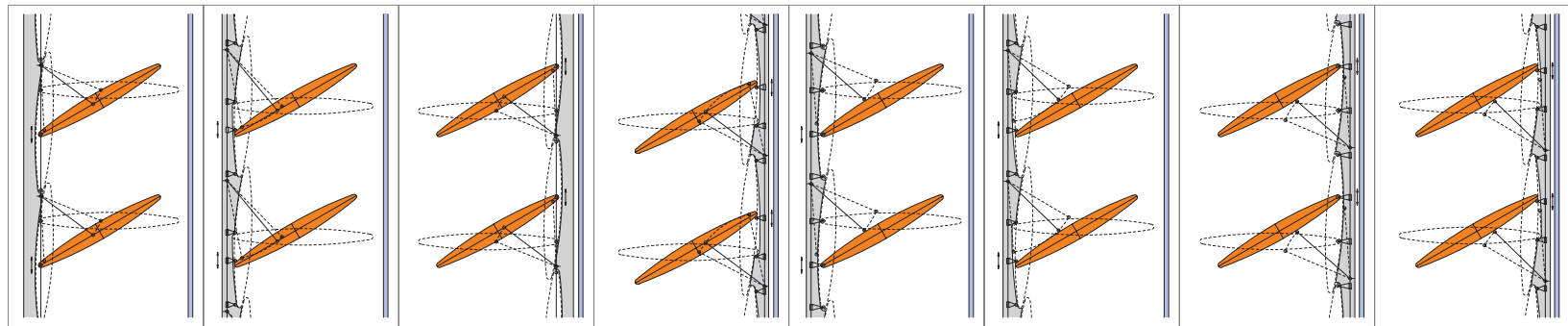
Gleitpunkt stirnseitig

Gleitpunkt längsseitig

Gleitpunkt stirnseitig

Gleitpunkt längsseitig

Prinzipdarstellung



Fallnummer

RT.1

RT.2

RT.3

RT.4

RT.5

RT.6

RT.7

RT.8

Abb. 7.2
Zusammenhang zwischen Befestigung, Bewegungsart und Form eines seitlichen, abdichtenden Randprofils (Typologie: Vorschlag des Verfassers), Vereinfachte Prinzipdarstellungen ohne Maßstab

Für alle Prinzipdarstellungen gilt links: außen und rechts: innen

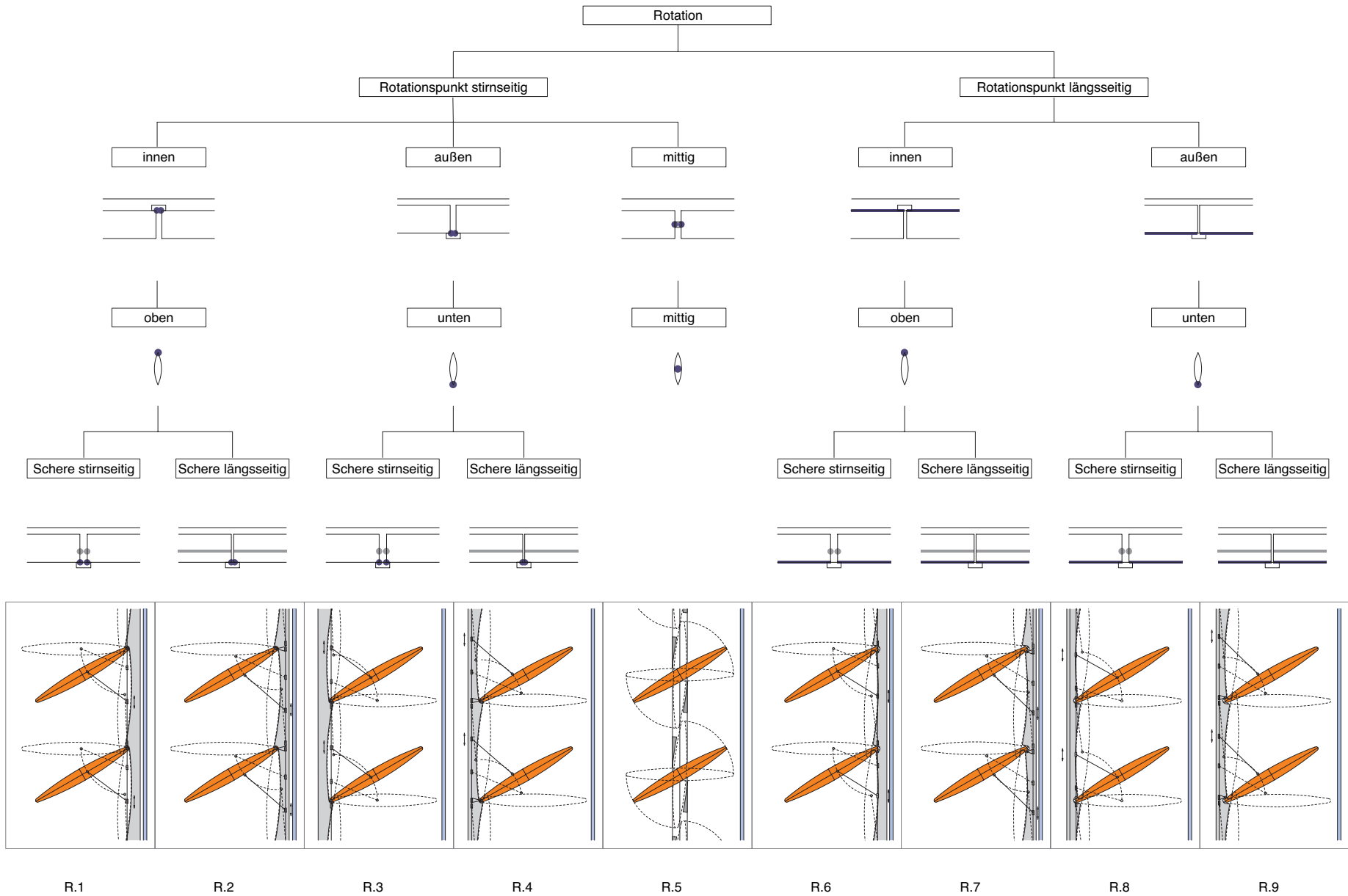


Abb. 7.2
(Fortsetzung)

die vorliegende Arbeit der spezielle Fall waagrecht angebrachter, gedämmter Lamellen ausgesucht und untersucht.⁷

Dies begründet sich in der damit verbundenen Möglichkeit, dass das System auf diese Weise potenziell auch Aufgaben des Sonnenschutzes, der Lichtlenkung und des Blendschutzes erfüllen könnte.⁸

Neben diesem möglichen Mehrwert liegt ein weiterer, wesentlicher Grund auf einer pragmatischen Ebene:

Die Wahl der Lamellenform aus dem umfangreichen Fundus für diesen Zweck vorstellbarer Manipulatoren⁹ bietet für eine systematische Untersuchung den Vorteil einer immanenten und damit erfassbaren Stoßstelle, die von individuellen Randbedingungen (wie bauseitigen Einbausituationen) unabhängig ist: die lineare Fuge zwischen zwei Lamellen in geschlossenem Zustand.

Grundsätzlich könnten darüber hinaus aber auch alle Arten von Roll-, Klapp-, Schiebeläden und dergleichen durch den Einsatz von Hochleistungswärmedämmung im beschriebenen Sinne modifiziert werden.

Mit Ausnahme der im Anhang 2 beschriebenen Variante 3 (ein mit VIP gedämmter Klappladen, siehe dortige Ausführungen) wird in der vorliegenden Arbeit hierauf jedoch nicht weiter eingegangen.

1.5 Optimierungsmaßnahmen

1.5.1 Ausbildung der Ränder

Neben der Aufgabe der Befestigung und Bewegungsführung der Lamellen kommt der Randausbildung die Bedeutung zu, den Wärmedurchgang über den seitlichen, den oberen und unteren Randanschluss möglichst weitgehend einzuschränken.

Hier gibt es prinzipiell drei zu differenzierende Anschluss-Situationen, die jeweils ausreichend dicht ausgeführt werden müssen, wenn das System zum Zwecke des temporären Wärmeschutzes eingesetzt werden soll:

- der waagrechte, lineare Stoß zwischen zwei Lamellen
- der waagrechte, abschließende Anschluss oben und unten
- der seitliche Anschluss (in besonderer Abhängigkeit von Befestigung und Bewegungsart der Lamelle)

Die Vollständigkeit verlangt zudem den Hinweis auf die Ecken, die - abhängig von der konkreten Umsetzung - durchaus von Bedeutung sein können, sich aber einer systematischen Betrachtung an dieser Stelle entziehen.

1.5.1.1 Der Stoß zwischen zwei Lamellen

Um Wärmebrücken im Bereich der linearen Stöße geschlossener La-

mellen weitgehend zu vermeiden, ist es sinnvoll, diese überlappend auszubilden. Das Maß ist allerdings im Falle einer mittig angeordneten Drehachse zu minimieren, da es dann - geometrisch bedingt - eine thermische Schwächung des seitlichen Randanschlusses darstellt, da dann im Überlappungsbereich keine Dämmschicht vor bzw. hinter der Lamelle angeordnet werden kann. Dies wird aus Fall R.5 in Abb. 7.2 deutlich.

An solchen Stellen bleiben dann nur noch beispielsweise Bürstendichtungen oder Lippenprofile, um die Wärmeverluste auf ein Minimum zu reduzieren.

1.5.1.2 Der obere und untere Anschluss

Für diese Bereiche gilt analog das im vorigen Absatz ausgeführte, wobei sich der bauseitige lineare Anschluss - ähnlich wie die Ecken - nicht ohne weiteres verallgemeinernd betrachten lässt.

1.5.1.3 Der seitliche Anschluss

Auf die komplexen Abhängigkeitsverhältnisse, die sich während der Bestimmung der Geometrie eines geeigneten, seitlichen Randanschlussprofils ergeben, soll hier dagegen mindestens ansatzweise eingegangen werden.

Abb. 7.2 zeigt für eine ellipsenförmige Lamelle den Zusammenhang zwischen der Bewegungsart, der

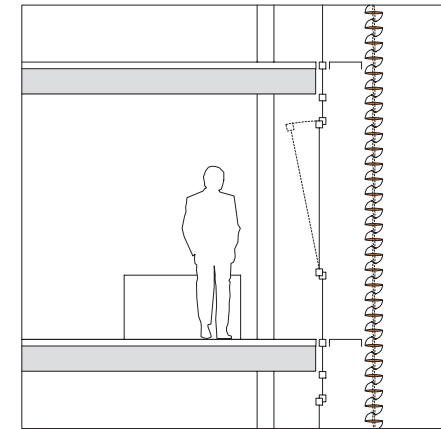


Abb. 7.3 Beispielanwendungen von Wärmeschutz-Lamellen als ‚Zweite-Haut‘

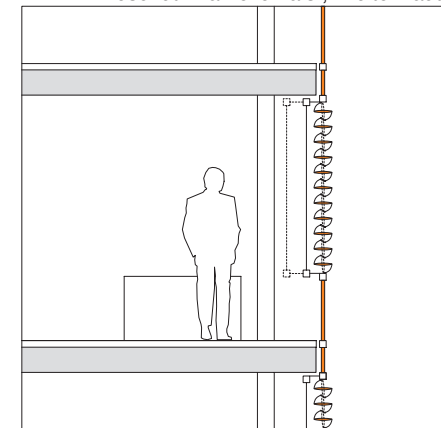


Abb. 7.4 ... oder als ‚Kastenfenster‘

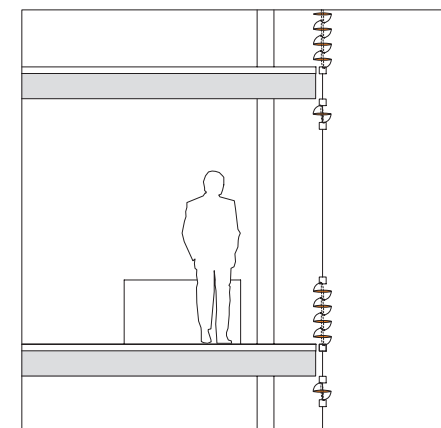


Abb. 7.5 ...oder als Lüftungselemente.

Befestigung und der sich ergebenden Geometrie des seitlichen Randanschlusses auf. Der obere und untere Randanschluss bleiben in der Darstellung unberücksichtigt.

In einer ersten Ebene wird zwischen den beiden Bewegungsarten Rotation-Translation (in Kombination) und reiner Rotation, jeweils bezogen auf die Lamelle, unterschieden. Erstere ist hier am Beispiel einer einfachen Schere mit einem Fixpunkt dargestellt. Dies bedingt einen Gleitpunkt an der Lamelle.

Ebenso denkbare, komplexere Varianten bleiben unberücksichtigt.

In einer zweiten Ebene wird nach der Position des Randanschlusses (außen-, innenseitig oder mittig) differenziert.

Darauf folgt die Position der bewegungsauslösenden Elemente bezogen auf die zugehörige Lamelle.

Das letzte Unterscheidungsmerkmal bildet die grundrissbezogene Lage des Gleitpunkts (Rotation-Translation) bzw. der Angriffspunkt der Schere (Rotation) - soweit vorhanden - jeweils längs- oder stirnseitig.

Gemeinsames Merkmal aller Varianten ist eine geringfügige Überlappung der Lamellen in geschlossenem Zustand (unter der Berücksichtigung ablaufenden Regenwassers) und die Annahme, dass die Lamellen, wenn die Befestigung nicht in ‚neutraler‘ Mittel-

achsenposition erfolgt, durch eine Art (einfache) Scherenkonstruktion¹⁰ befestigt und geführt werden müssen, wobei deren Länge sowie der Lamellenangriffspunkt geometrisch durch die Drehbewegung von knapp 90° bestimmt werden.

Aus der Beschränkung auf diese einfachen Befestigungs- und Bewegungsarten ergibt sich zum Beispiel auch, dass fixe Drehpunkte immer in der Dämmebene liegen.

Weiterhin berücksichtigt die Darstellung nur Varianten, die die Außenhülle der Lamelle geometrisch nicht verletzen (zum Beispiel durch Einschnitte für die Parkposition der Schere). Alle Angriffspunkte an die Lamelle liegen entweder stirn- oder außenseitig.

Es soll deutlich darauf hingewiesen werden, dass Abb. 7.2 den beschriebenen Zusammenhang nur in einem ersten Ansatz aufzuzeigen vermag.

Wichtige Aspekte bedürften einer vertieften Betrachtung, um dem Sachverhalt gerecht zu werden. Hierzu ist beispielsweise die hier nur sehr abstrakt dargestellte Art und Lage der Antriebsführung und -kopplung zu rechnen. Dies erscheint jedoch im Hinblick auf die in dieser Arbeit verhandelte Thematik zweitrangig.

1.5.2 Thermische Trennung in der Hülle der Lamelle

Für den geschlossenen Zustand wird es erforderlich, verhältnismäßig gut wärmeleitendes Hüllmaterial im Bereich des Überganges außen-innen thermisch zu trennen und an der Verbindungsstelle durch ein relativ schlecht wärmeleitendes Material zu ersetzen.

Diese Technik ist aus dem Fensterahmenbau bekannt und bewährt.

Die thermische Trennung muss geometrisch genau in der Übergangsstelle außen-innen liegen. Sie kann als Materialwechsel entfallen, wenn das Hüllmaterial selbst über eine ausreichend geringe Wärmeleitfähigkeit verfügt.

1.5.3 Weitere Aspekte

Eine sinnvolle Bestimmung der Form ist außerdem abhängig von der Länge, der Dicke und dem Abstand der Lamellen, vom eingesetzten Material, hier insbesondere von dessen Reflexions- und Absorptionseigenschaften, von der Statik, den erwarteten Außenbedingungen, den gestalterischen Anforderungen usw.

1.6 Lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Lamellen

Im Sinne einer Verbreiterung des Einsatzspektrums des entwickelten temporären Wärmeschutzes sind

lichtdurchlässige und lichtundurchlässige Varianten vorstellbar.

Lichtdurchlässige Varianten führen zu Strahlungseintrag in das Gebäudeinnere auch in geschlossenem Zustand. Dies hat eine Reihe an Effekten zur Folge, die es zu berücksichtigen gilt:

- Der optische Bezug zum Außenraum wird gestärkt (je nach Transluzenz- und Transparenzgrad, Wetter, Lichtfarbe, Sichtbeziehungen usw...).
- Der sogenannte Treibhauseffekt wird gefördert. Dies kann zur Erzielung solarer Gewinne genutzt werden. Einer Überhitzung im Sommerfall ist durch geeignete Maßnahmen zu begegnen.

Außerdem sind solche Lamellen je nach Grad der Lichtdurchlässigkeit als Verschattungssystem lichtundurchlässigen Varianten vorzuziehen, da sie zu geringeren Leuchtdichtekontrasten und damit zu weniger Blendung führen können.

Sie reduzieren in der Regel auch den Bedarf an künstlicher Beleuchtung, da - je nach Ausbildung - selbst im Verschattungsfall mit vollständig geschlossenen Lamellen noch ausreichend Licht z.B. zum Arbeiten in das Gebäudeinnere gelangen kann.

Ist der Grad der Lichtdurchlässigkeit jedoch zu groß, können insbesondere lichtstreuende Varianten

auch zu einer deutlichen Verstärkung der Blendung führen.

1.7 Sekundärstrahlungseffekte

Durch die hochwirksame Dämmung in den Lamellen wird der Effekt der so genannten Sekundärstrahlung stark reduziert. Werden die Lamellen als Sonnenschutz eingesetzt, erwärmt sich die der Sonne zugewandte Seite durch Absorption stark.

Durch die Dämmung in der Lamelle wird verhindert, dass das erwärmte Material die Energie auf der Rückseite in Form von Wärmestrahlung in das Gebäudeinnere abgibt, wie dies bei konventionellen, nicht wärmedämmten Lamellen aus Metall in hohem Maße der Fall ist.

Dies macht den Einsatz vor allem auch in heißen Breitengraden mit hohen Tag- / Nachttemperaturkontrasten interessant, da neben der sinnvollen Anwendung in der Nacht wie oben beschrieben auch der Einsatz am Tage zu erheblichen Nutzungsgewinnen im Vergleich zu konventionellen Lamellen führt.

1.8 Anwendungsbeispiele

Die wärmedämmenden Lamellen könnten in Form einer Zweite-Haut-Fassade vor einer konventionellen vollverglasten Fassade mit Öffnungsmöglichkeiten angeordnet werden (siehe Abb. 7.3).

Zu Lüftungszwecken werden Lamellen und Fenster geöffnet. Der Öffnungsgrad der Lamellen bestimmt die Luftzufuhr in den Fassadenzwischenraum und je nach Lichtdurchlässigkeitsgrad auch den Umfang für einen möglichen Aus- bzw. Einblick.

Die Lamellen dienen als Verschattung und Lichtlenkungselemente. Je nach Grad der Lichtdurchlässigkeit können sie auch als Blendenschutz herangezogen werden. Speziell in kalten Winternächten könnte durch die geschlossenen Lamellen eine Auskühlung des Gebäudes deutlich verringert werden.

Ein anderes Beispiel zeigt Abb. 7.4, hier gilt das oben ausgeführte analog, allerdings beschränkt sich der Einsatz hier auf den Bereich einzelner Öffnungen.

Die wärmedämmenden Lamellen könnten aber auch beispielsweise in Fortsetzung der thermischen Trennebene in der Funktion von Lüftungselementen in eine Außenwand eingesetzt werden (siehe Abb. 7.5).

Zu Lüftungszwecken werden die Lamellen geöffnet. Sie dienen dann durch die Art ihrer Anordnung im Unter- und Oberlichtbereich als effektive und fein zu justierende Lüftungsein- bzw. Auslässe. Dadurch könnte ggf. (und je nach Reinigungsmöglichkeit) auf Öffnungsflügel im Fensterbereich verzichtet werden.

2 Untersuchungen verschiedener Lamellentypen

2.1 Aufbau

2.1.1 Einbausituation

Untersucht wurde eine Einbausituation der Lamellen auf der Außenseite einer mit einer wärmedämmenden Mehrscheibenverglasung versehenen Raumöffnung. Es wurde eine einfache Standardverglasung mit folgenden Werten angenommen:

- 2-fach-Verglasung mit getrockneter Luft im Scheibenzwischenraum, Gesamtdicke $d = 21,6$ mm
- Low-E-Beschichtung
- $U_g = 1,66$ W/(m²K)

Der gewählte symmetrische Betrachtungsausschnitt beinhaltet je zwei vollständige und zwei ‚halbe‘ Lamellen (jeweils in der Mitte geschnitten). Somit sind drei der für die Untersuchung wichtigen Lamellenstöße enthalten und die gewonnenen Werte haben auch für einen größeren Ausschnitt Gültigkeit.

Für die Simulation wurde eine Einbausituation angenommen, in der der zwischen Lamellen und Verglasung befindliche Luftbereich durch eine geeignete Randausbildung oben, unten und seitlich vollständig von der Außenluft abgeschnitten ist. Während für diese außerhalb des betrachteten Simulationsaus-

schnittes liegenden Stellen also keinerlei Undichtigkeiten angesetzt werden, ermöglicht das Simulationsprogramm für den zwischen den Lamellen befindlichen Zwischenraum (die Lamellenstoßstellen) die Annahme eines Luftraums mit geringen Ventilationseffekten.

Sowohl der seitliche als auch der obere und untere Randanschluss können in einer solchen vergleichenden Untersuchung keine Berücksichtigung finden, da hier zu große Abhängigkeiten von einer jeweils individuellen Einbausituation bestehen.

Insofern besitzen die Ergebnisse ausschließlich für den ungestörten Mittelbereich Gültigkeit und sind entsprechend zu interpretieren.

2.1.2 Beschreibung der Lamellentypen

Alle Lamellentypen sind ca. 330 mm breit und aufgrund des notwendigen Freiraums für die Drehbewegung in einen mittleren Abstand von ca. 180 mm vor der Verglasung angeordnet.

Im Hinblick auf den Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen wurden drei Lamellentypen untersucht, die sich vor allem durch die Art der Integration dieser Systeme unterscheiden.

Für alle Lamellentypen wurden die gleichen Materialgruppen untersucht, jeweils bezogen auf Schalenmaterial, Dämmstoff und

Ausführung einer ggf. vorhandenen thermischen Trennung.

Für die Schalen wurde neben dem am weitesten verbreiteten Aluminium, das daher als Referenz dienen kann, Kunststoff (Polymethylmethacrylat oder Polycarbonat¹¹), Holz¹² (Ahorn) und der im Vergleich zu Aluminium deutlich schlechter wärmeleitende Edelstahl untersucht.

2.1.2.1 Lamelle Typ 1

Ausgehend von der vorrangigen Verfügbarkeit von plattenförmigen VIP wurde für eine erste Variante davon ausgegangen, dass diese durch eine genau der Form folgende Lamellenschale aufgenommen werden. Die vorgeschlagene Form des Lamellenkopfes (hier rund) ist dabei nicht von Bedeutung und prinzipiell austauschbar. Die VIP in den Lamellen überlappen genau im Maß der ‚thermischen Trennung‘.

2.1.2.3 Lamelle Typ 2

Lamellen mit gewölbter Schale haben für die Funktionen des Sonnenschutzes und der Lichtlenkung erhebliche Vorteile.

Daher wurde als Grundlage für eine zweite Variante die erste durch eine gebogene Schale modifiziert, wodurch beidseitig ein zusätzlicher Bereich mit stehender Luftschicht hinzukommt.

Außerdem wird der Abstand zwischen den VIP im Bereich der ‚thermischen Trennung‘ geometrie-

bedingt geringfügig größer. Auch hier überlappen die VIP in den Lamellen genau im Maß der ‚thermischen Trennung‘.

2.1.2.3 Lamelle Typ 3

Dieser Variante liegt der Gedanke zugrunde, dass die oben beschriebene Variante 2 grundsätzlich auch durch ein der Form folgendes Vakuum-Dämmsystem gefüllt werden könnte. Insbesondere könnte auch die Lamellenschale selbst die Funktion der gasdichten Hülle übernehmen.

2.1.3 Ziele der Untersuchungen

Im Vordergrund der ausgeführten Untersuchungen standen folgende Fragen:

- In wiefern unterscheiden sich gedämmte Lamellen von ungedämmten hinsichtlich der Dämmwirkung?
- Wie machen sich verschiedene Dämmstoffe bemerkbar?
- Wie wirkt sich jeweils das Vorhandensein einer ‚thermischen Trennung‘ im Bereich des Lamellenstoßes aus?
- Welchen Einfluss haben verschiedene Lamellenschalenmaterialien?
- Haben verschiedene Konstruktionsvarianten (Lamellentypen 1-3)

gravierende Auswirkungen auf den Wärmefluss?

- Wie groß ist der Unterschied zwischen Lamellen mit funktionierenden (evakuierten) Vakuumdämmsystemen und defekten (belüfteten)?

Um für diese Fragen aussagekräftige Antworten zu finden, wurden andere Parameter im Verlauf der Simulationen bewusst nicht verändert (z.B. die Breite der ‚thermischen Trennung‘ oder die Materialstärke der Lamellenschalen).

2.1.4 Simulationstechnik und Hinweise zu den Ergebnissen

Die Simulationen wurden mit den Programmen WINDOWS 5 und THERM 5.2 durchgeführt, die am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL, San Francisco, USA) entwickelt wurden. Weiteres hierzu siehe Teil 5, Abschnitt 4.1.

Die ermittelten Temperaturverläufe beziehen sich auf folgende, der Simulation zugrunde gelegten Randtemperaturen von 0 °C außen und 20 °C innen.

Die Untersuchungen erfolgten mit einer Ausnahme in gleichen Varianten für die einzelnen Lamellentypen ohne Berücksichtigung der Verglasung (um nur auf die Lamellen bezogene Aussagen zu erhalten).

Jeweils für die Variante mit eingebautem (und funktionierendem) VIP

wurde zusätzlich eine Simulation in vor der Verglasung eingebautem Zustand durchgeführt.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass die ermittelten Werte ohne empirische Validierung keinesfalls als abgesichert gelten können.

Die absoluten Werte können jedoch einen Anhaltspunkt für die (in realita) zu erwartenden Größenordnungen geben und die in vergleichenden Simulationen gewonnenen Verhältnisse einzelner Varianten sind vermutlich von relativ hoher Genauigkeit.

2.1.5 Hinweise zu den Isothermendarstellungen

Neben dem U-Wert, der von einer kontinuierlichen Ausdehnung des gezeichneten Schnittbildes in z-Richtung und einer senkrechten Projektion in y-Richtung (also nicht kantenlängenbezogen) ausgeht, liefert die Simulationssoftware als weiteres Ergebnis den Verlauf der Isothermen durch das Bauteil.

Für die grafische Darstellung wird das jeweils auftretende Temperaturspektrum (zwischen Minimum und Maximum auf den Oberflächen) auf die verfügbaren Farben aufgespreizt. Daher ist für die Interpretation die jeweilige Farblegende elementarer Bestandteil.

Die Temperaturzuordnung der einzelnen Farben ist somit in jeder Darstellung unterschiedlich.

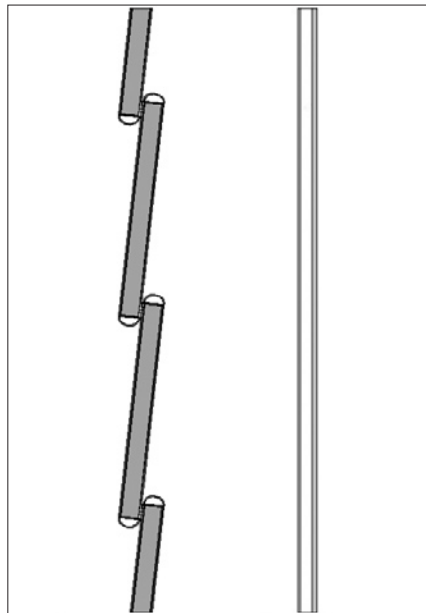


Abb. 7.6 Einbausituation Lamelle 1, M 1:10, links: Außen



Abb. 7.7 Isothermenverlauf durch den betrachteten Ausschnitt, M 1:5, für den Fall Lam1.05

Sehr gut zu erkennen sind in dieser Darstellungsart, wie gut die jeweilige Variante dem Ideal nahekommt, bei dem die Isothermen durchgängig genau senkrecht zur Wärmeflussrichtung verlaufen.

Des weiteren wird ersichtlich, in welchen Bereichen der Konstruktion ohne Probleme auch gut wärmeleitendes Material eingesetzt werden kann, nämlich immer parallel zu den Isothermen, und wo dies unbedingt zu vermeiden ist.

Außerdem gibt die Darstellung Auskunft über die zu erwartenden Oberflächentemperaturen. Zusammen mit einer entsprechenden Annahme von anzusetzenden Luftfeuchtigkeiten und Luftströ-

mungsgeschwindigkeiten ließe dies Aussagen über zu erwartenden Tauwasserausfall zu.

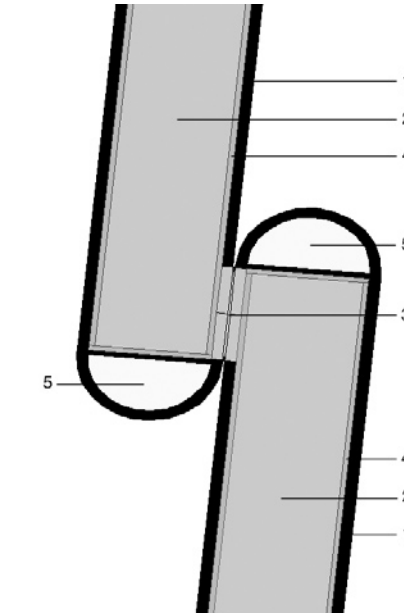


Abb. 7.8 Aufbau der untersuchten Lamelle 1

Legende zu Abb. 7.8

- 1 Material der Lamellenschalen
- 2 Material im Kernbereich der Lamelle: Dämmstoff / Luft
- 3 Material der thermischen Trennung
- 4 Hüllmaterial des Dämmstoffes
- 5 Material im ‚Lamellenkopf‘

Lamellenbreite ca. 330 mm
Dämmstoffstärke konstant 20 mm
Stärke der Lamellenschalen 2 mm

Betrachtungsausschnitt für die thermische Simulationen:

Lamellen geschlossen ca. 180 mm vor einer wärmedämmenden Mehrscheibenverglasung mit einem U_g -Wert von $1,66 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, Höhe des Betrachtungsausschnittes ca. 900 mm mit drei überlappenden Lamellenstößen. Keine Berücksichtigung von seitlichen Anschlüssen.

Die im Folgenden angegebenen U-Werte sind für den o.g. Betrachtungsausschnitt und nur für die Lamellen selbst (ohne Berücksichtigung der Verglasung) ermittelt worden.

2.2 Wärmetechnische Untersuchungen

2.2.1 Lamelle Typ 1

Der Untersuchung liegt eine Situation zugrunde, wie sie in Abb. 7.6 dargestellt ist.

Der Aufbau der Lamelle Typ 1 findet sich in der schematischen Zeichnung Abb. 7.8 beschrieben.

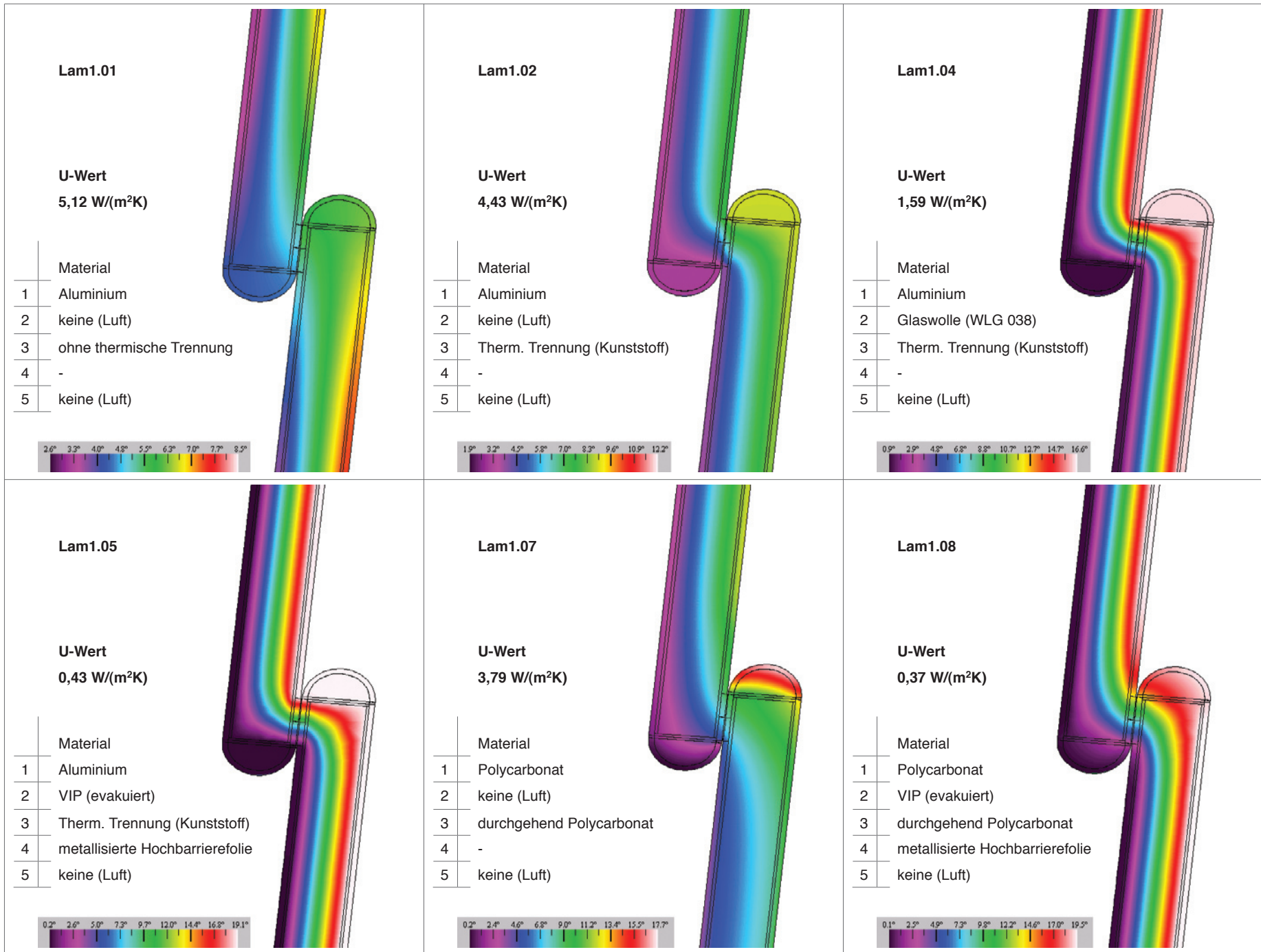
Abb. 7.7 zeigt das Ergebnis für die Simulation der Einbausituation vor der Verglasung (Variante Lam1.05) als Darstellung eines Ausschnittes des Isothermenverlaufs.

Der für diese Variante ermittelte U-Wert des gesamten Querschnittes inklusive Verglasung liegt bei $0,34 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die Ergebnisse für die Simulationen der verschiedenen untersuchten Varianten des Typ 1 finden sich in Abb. 7.9.

(rechte Seite)

Abb. 7.9 Ausgewählte Simulationsergebnisse der untersuchten Lamelle Typ 1



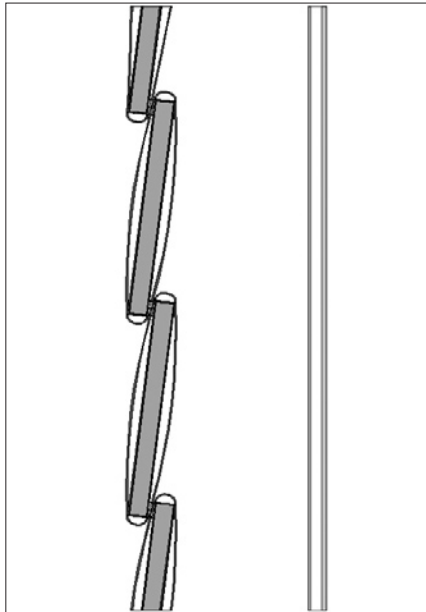


Abb. 7.10 Einbausituation Lamelle 2, M 1:10, links: Außen



Abb. 7.11 Isothermenverlauf durch den betrachteten Ausschnitt, M 1:5, für den Fall Lam2.05

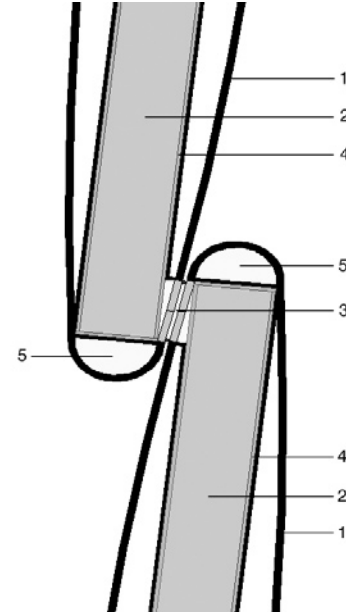


Abb. 7.12 Aufbau der untersuchten Lamelle 2

2.2.2 Lamelle Typ 2

Der Untersuchung liegt eine Situation zugrunde, wie sie in Abb. 7.10 dargestellt ist.

Der Aufbau der Lamelle Typ 2 findet sich in der schematischen Zeichnung Abb. 7.12 beschrieben.

Abb. 7.11 zeigt das Ergebnis für die Simulation der Einbausituation vor der Verglasung (Variante Lam2.05) als Darstellung eines Ausschnittes des Isothermenverlaufs.

Der für diese Variante ermittelte U-Wert des gesamten Querschnittes inklusive Verglasung liegt bei $0,34 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die Ergebnisse für die Simulationen der verschiedenen untersuchten Varianten des Typ 2 finden sich in Abb. 7.13.

Legende zu Abb. 7.12

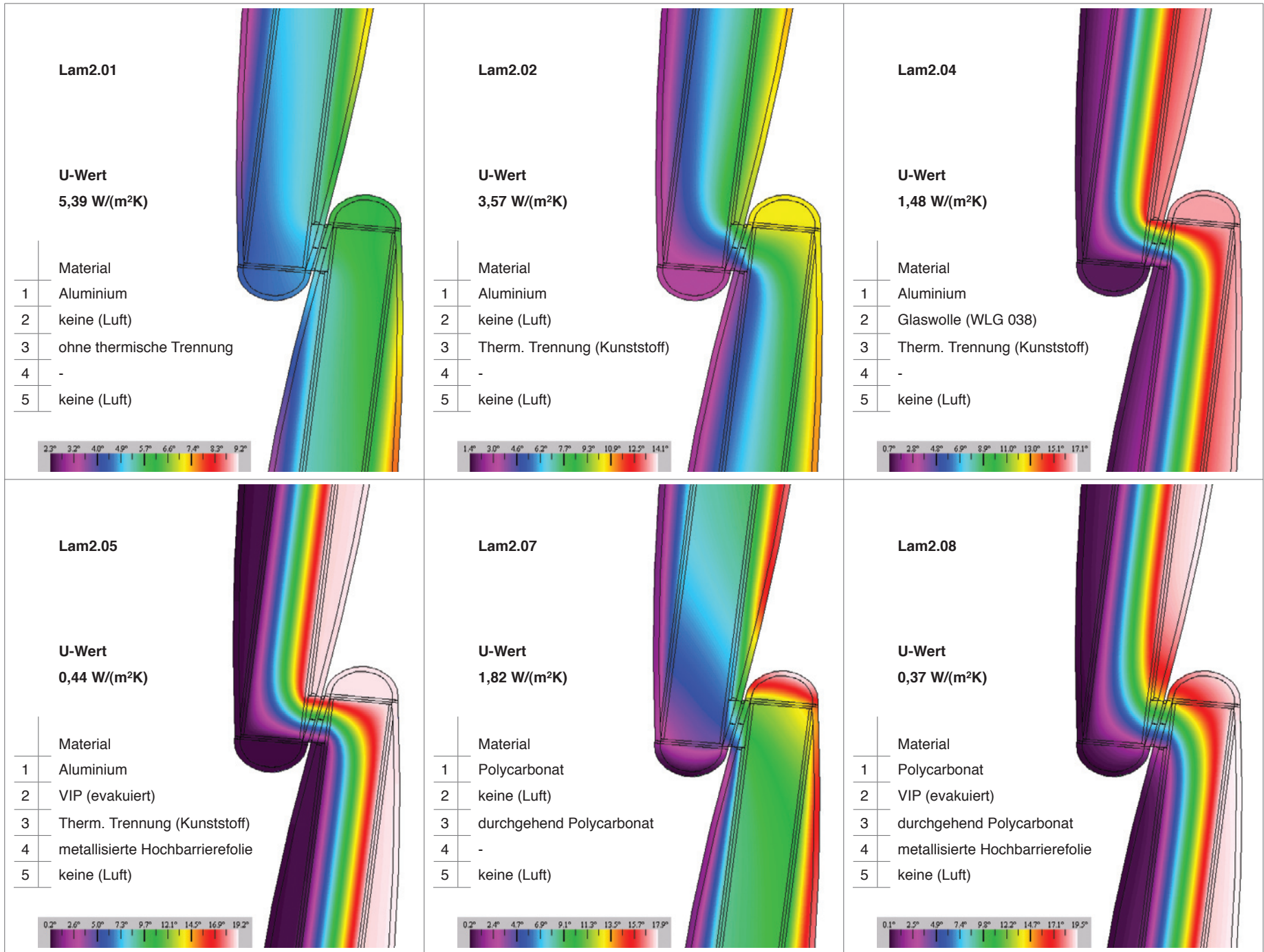
- 1 Material der Lamellenschalen
- 2 Material im Kernbereich der Lamelle: Dämmstoff / Luft
- 3 Material der thermischen Trennung
- 4 Hüllmaterial des Dämmstoffes
- 5 Material im ‚Lamellenkopf‘

Lamellenbreite ca. 330 mm
 Dämmstoffstärke konstant 20 mm
 Lamellenstärke 20-45 mm
 Stärke der Lamellenschalen 2 mm

Betrachtungsausschnitt für die thermische Simulationen:

Lamellen geschlossen ca. 180 mm vor einer wärmedämmenden Mehrscheibenverglasung mit einem U_g -Wert von $1,66 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, Höhe des Betrachtungsausschnittes ca. 900 mm mit drei überlappenden Lamellenstößen. Keine Berücksichtigung von seitlichen Anschlüssen.

(rechte Seite)
 Abb. 7.13 Ausgewählte Simulationsergebnisse der untersuchten Lamelle Typ 2



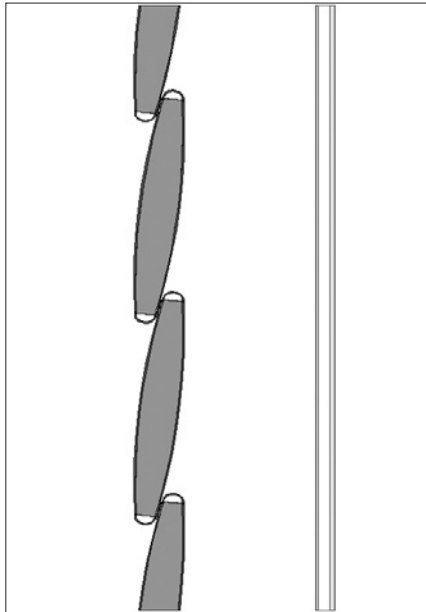


Abb. 7.14 Einbausituation Lamelle 3, M 1:10, links: Außen



Abb. 7.15 Isothermenverlauf durch den betrachteten Ausschnitt, M 1:5, für den Fall Lam3.05

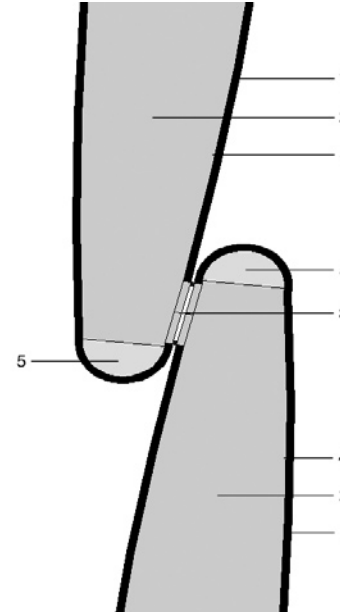


Abb. 7.16 Aufbau der untersuchten Lamelle 3

2.2.3 Lamelle Typ 3

Der Untersuchung liegt eine Situation zugrunde, wie sie in Abb. 7.14 dargestellt ist.

Der Aufbau der Lamelle Typ 3 findet sich in der schematischen Zeichnung Abb. 7.16 beschrieben.

Abb. 7.15 zeigt das Ergebnis für die Simulation der Einbausituation vor der Verglasung (Variante Lam3.05) als Darstellung eines Ausschnittes des Isothermenverlaufs.

Der für diese Variante ermittelte U-Wert des gesamten Querschnittes inklusive Verglasung liegt bei $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die Ergebnisse für die Simulationen der verschiedenen untersuchten Varianten des Typ 3 finden sich in Abb. 7.17.

Legende zu Abb. 7.16

- 1 Material der Lamellenschalen
- 2 Material im Kernbereich der Lamelle: Dämmstoff / Luft
- 3 Material der thermischen Trennung
- 4 Hüllmaterial des Dämmstoffes
- 5 Material im ‚Lamellenkopf‘

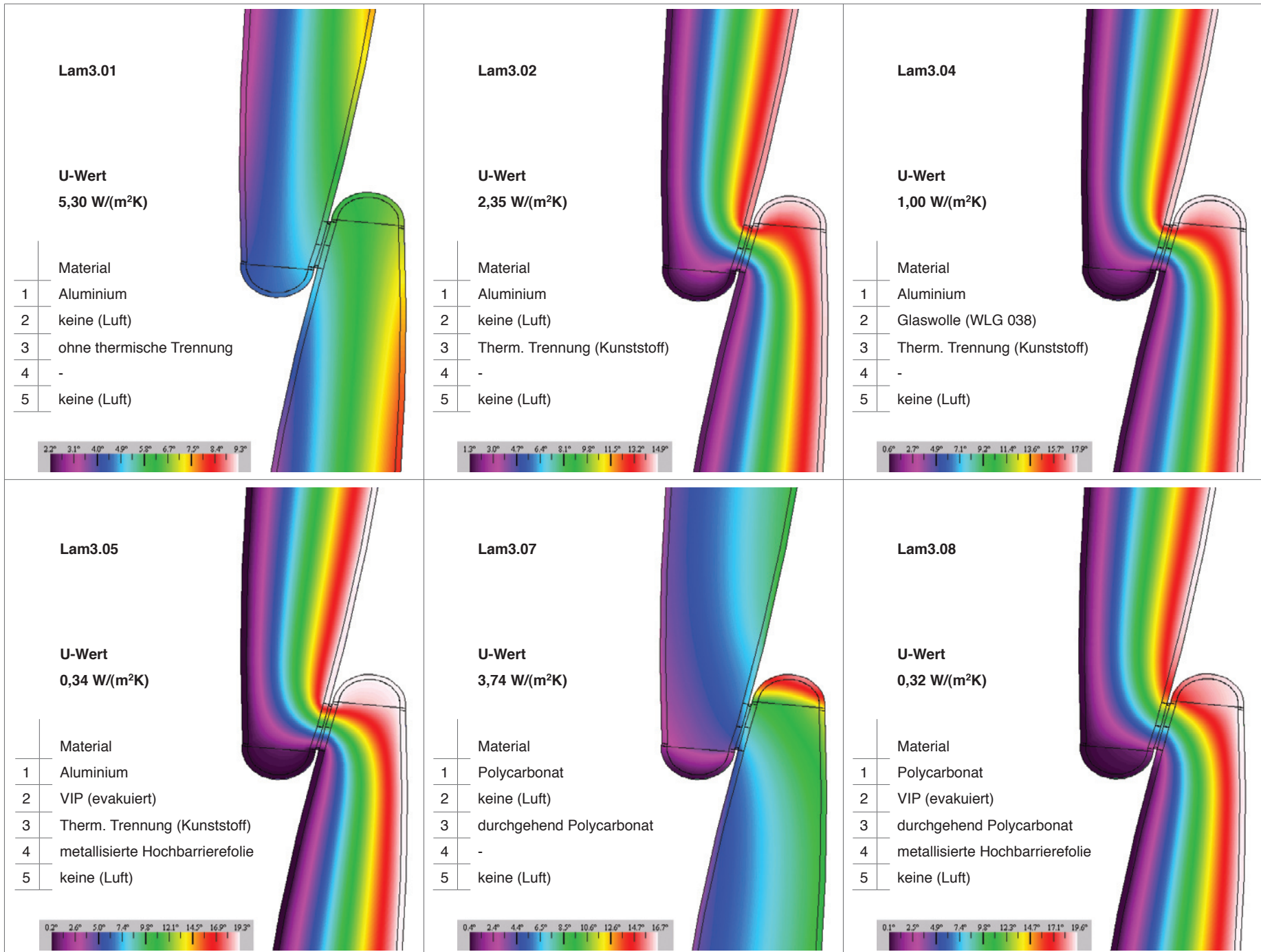
Lamellenbreite ca. 330 mm
Dämmstoff- und Lamellenstärke 20-45 mm
Stärke der Lamellenschalen 2 mm

Betrachtungsausschnitt für die thermische Simulationen:

Lamellen geschlossen ca. 180 mm vor einer wärmedämmenden Mehrscheibenverglasung mit einem U_g -Wert von $1,66 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, Höhe des Betrachtungsausschnittes ca. 900 mm mit drei überlappenden Lamellenstößen. Keine Berücksichtigung von seitlichen Anschlüssen.

(rechte Seite)

Abb. 7.17 Ausgewählte Simulationsergebnisse der untersuchten Lamelle Typ 3



Fall-Nummer	Materialien					Lamelle Typ 1			Lamelle Typ 2			Lamelle Typ 3		
						U-Wert Lamelle	U-Wert vor Glas ²	U-Wert-Verhältnis ³	U-Wert Lamelle	U-Wert vor Glas ²	U-Wert-Verhältnis ³	U-Wert Lamelle	U-Wert vor Glas ²	U-Wert-Verhältnis ³
	Lamellenschale	Dämmstoff	Thermische Trennung	Hüllmaterial Dämmstoff ¹	im Lamellenkopf	[W / (m ² K)]	[W / (m ² K)]		[W / (m ² K)]	[W / (m ² K)]		[W / (m ² K)]	[W / (m ² K)]	
01	Aluminium	Luft	keine	-	Luft	5,51	<i>1,28</i>	100%	5,39	<i>1,27</i>	100%	5,30	<i>1,26</i>	100%
02	Aluminium	Luft	Kunststoff	-	Luft	4,43	<i>1,21</i>	80%	3,57	<i>1,13</i>	66%	2,35	<i>0,97</i>	44%
03	Aluminium	Glaswolle	keine	-	Luft	5,36	<i>1,27</i>	97%	5,35	<i>1,27</i>	99%	5,24	<i>1,26</i>	99%
04	Aluminium	Glaswolle	Kunststoff	-	Luft	1,59	<i>0,81</i>	29%	1,48	<i>0,78</i>	27%	1,00	<i>0,62</i>	19%
05	Aluminium	VIP	Kunststoff	Folie	Luft	0,43	0,34	8%	0,44	0,34	8%	0,34	0,28	6%
06	Aluminium	VIP (belüftet)	Kunststoff	Folie	Luft	1,02	<i>0,63</i>	19%	0,99	<i>0,62</i>	18%	0,61	<i>0,45</i>	12%
07	Polycarbonat	Luft	durchg. PC	-	Luft	3,79	<i>1,15</i>	69%	1,82	<i>0,87</i>	34%	3,74	<i>1,15</i>	71%
08	Polycarbonat	VIP	durchg. PC	Folie	Luft	0,37	<i>0,30</i>	7%	0,37	<i>0,30</i>	7%	0,32	<i>0,27</i>	6%
09	Ahorn	VIP	durchg. Ahorn	Folie	Glaswolle ⁴	0,42	<i>0,34</i>	8%	0,40	<i>0,32</i>	7%	0,34	<i>0,28</i>	6%
10	Edelstahl	VIP	Kunststoff	Folie	Luft	0,42	<i>0,34</i>	8%	0,42	<i>0,34</i>	8%	0,34	<i>0,28</i>	6%
11	Aluminium	Kieselsäure	Kunststoff	<i>keines</i> ⁵	Luft	-	-	-	-	-	-	0,23	<i>0,20</i>	4%

Anmerkungen

1 Bei VIP: metallisierte Hochbarrierefolie

2 U-Wert vor Verglasung gemäß vereinfachender Berechnung (Darstellung kursiv), für Fall 05 gemäß Simulation

3 Verhältnis des jeweiligen lamellenbezogenen U-Wertes zur ungedämmten Lamelle gleichen Typs ohne thermische Trennung mit der Fallnummer 01

4 Eine Dämmung des Lamellenkopfes bringt im besten Fall (VIP) eine Verbesserung des U-Wertes um ca. 0,001 W/(m²K), dieser Aspekt kann also vernachlässigt werden

5 Der hier untersuchte Fall beruht auf der Annahme, die Lamellenschale könnte im Idealfall die Funktion der gasdichten Hülle übernehmen

Abb. 7.18 Tabellarische Zusammenstellung aller Simulationsergebnisse zu den einzelnen Lamellentypen

2.3 Ergebnisse, Zusammenfassung

Die in den einzelnen Simulationen ermittelten U-Werte sind in Abb. 7.18 zusammengestellt und in Abb. 7.19 grafisch ins Verhältnis gesetzt.

Folgende Schlussfolgerungen können aus den vorliegenden Ergebnissen gezogen werden:

Wird für die Lamellenschale als Material ein guter Wärmeleiter wie Aluminium zum Beispiel wegen

sonst gewünschter Eigenschaften wie gutes Reflexionsvermögen, einfacher Fertigung, Stabilität, Dauerhaftigkeit, Kosten usw. gewählt, ist eine thermische Trennung im Bereich der Überlappung der Lamellen von ausschlaggebender Bedeutung.

Ohne diese ist es ohne Bedeutung, ob die Lamelle gedämmt ist oder nicht, da der Wärmetransport nahezu vollständig über die Lamellenschale erfolgt (siehe Fälle 01 und 03 zu 04 und beispielhaft den Isothermenverlauf zu Lam1.01).

Wird jedoch eine thermische Trennung vorgesehen, so lassen sich mit einem Hochleistungsdämmsystem nochmals deutliche Verbesserungen gegenüber konventionellen Dämmstoffen wie z.B. Glaswolle erreichen (eine zusätzliche Reduzierung des U-Wertes um 65-70 %, Fall 04 zu 05).

Wird als Material für die Lamellenschale ein relativ schlechter Wärmeleiter gewählt und auf die thermische Trennung verzichtet, so sind solche mit Vakuum-Dämm-

systemen ausgestatteten Lamellen in etwa untereinander gleichwertig hinsichtlich ihrer Dämmwirkung (Fall 08 und 09). Sie sind auch den entsprechend gedämmten Lamellen mit Matallschale und thermischer Trennung (Fall 05 und 10) durchaus vergleichbar.

Das in Abb. 7.19 auffällige Abweichen des Lamellentyps 2 für den Fall 07 hat folgende Erklärung: Die betreffende Lamelle verfügt im Gegensatz zu den anderen beiden

Varianten über eine in Wärmeflussrichtung angeordnete Abfolge von untereinander getrennten Luftkammern, die sich insbesondere im untersuchten Fall 07 bemerkbar machen und für eine Halbierung des U-Wertes sorgen¹³.

Der Vergleich der entsprechenden Isothermendarstellungen zeigt, dass der Effekt sich allerdings im Wesentlichen in Lamellenmitte bemerkbar macht, im Kopfbereich sind kaum Unterschiede auszumachen (Abb. 7.9, 7.13 und 7.17).

Ein Versagen der Vakuum-Dämmsysteme (durch vollständige Belüftung) führt zu einem Anstieg des U-Wertes um den Faktor 2-2,5 (Fall 05 und 06).

Insbesondere die mit Vakuum-Dämmsystemen ausgerüsteten Lamellen können in geschlossenem Zustand den U-Wert einer wärmedämmenden Verglasung drastisch verbessern (von 1,66 auf bis zu ca. 0,3 W/[m²K]).

Eine sehr hochwertige 3-fach-Verglasung mit Argonfüllung und einem U_g-Wert von ca. 0,6 W/(m²K) könnte durch solche Lamellen in geschlossenem Zustand auf ca. 0,2 W/(m²K) verbessert werden.

Damit kommen solcherart ‚manipulierte‘ Öffnungsbereiche in der Gebäudehülle in den Bereich hochgedämmter opaker Außenwandsysteme, wie sie derzeit z.B. im Passivhausbau eingesetzt werden.

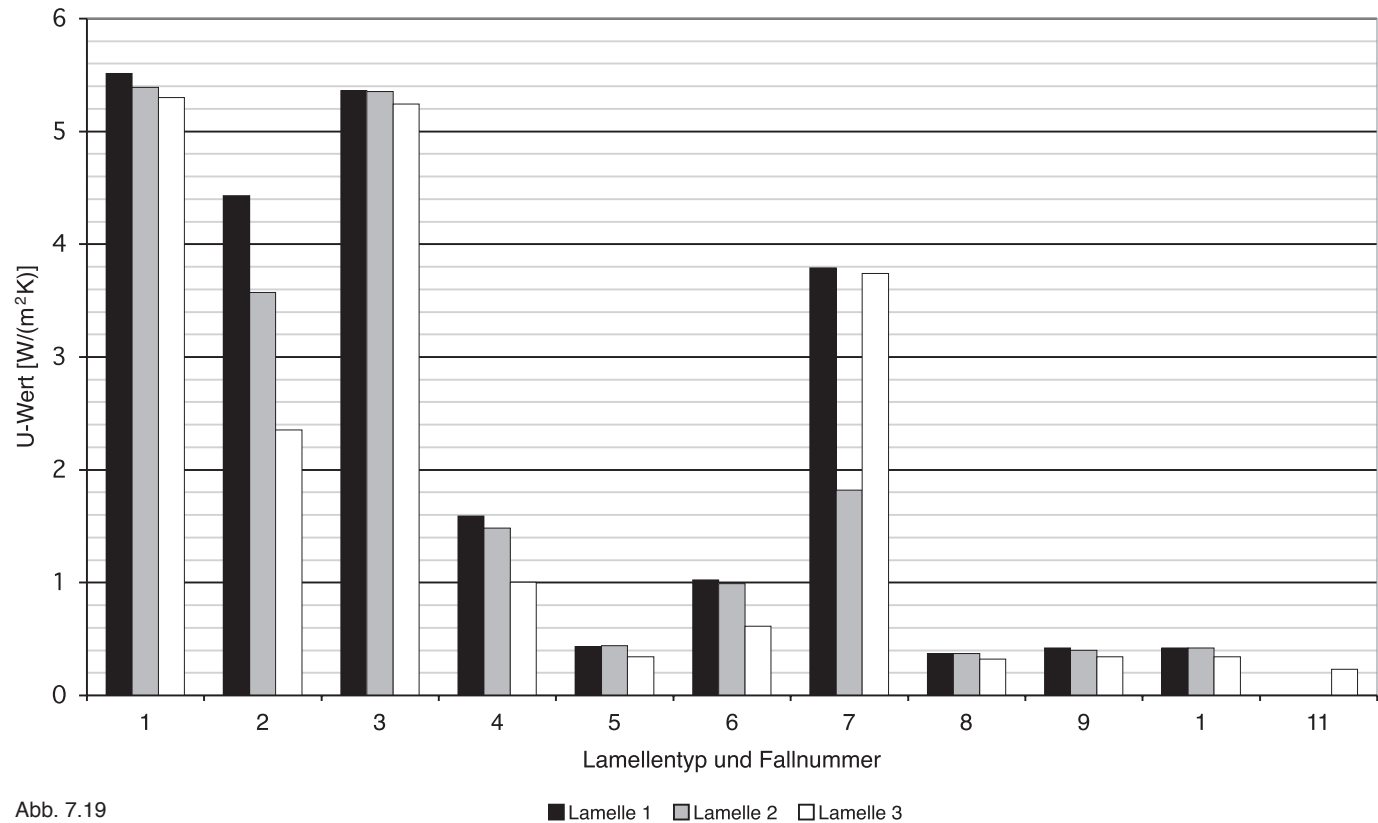


Abb. 7.19
Diagrammatische Zusammenstellung der durch die Simulationen ermittelten U-Werte

3 Abschätzung des Wirkungspotenzials von temporärem Wärmeschutz

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten die mit den neuen Lamellen erreichbaren U-Werte im Vergleich zu konventionellen Lösungen abgeschätzt werden konnten, bleibt die grundsätzliche Frage, wie groß der Nutzen solcher Systeme für das Gebäude als Ganzes sein wird und damit letztlich, ob der betriebene, zusätzliche

Aufwand überhaupt gerechtfertigt scheint.

Anhand einer Standardbürozone von 3 x 4 m wurde für vier Ausrichtungen entsprechend den vier Himmelsrichtungen das Potenzial von drei Varianten an temporären Wärmeschutzmaßnahmen im Vergleich zu einer Referenzsituation ohne temporärem Wärmeschutz mittels thermischer Simulationen untersucht.

Die ausführliche Darstellung dieser Simulationen und deren Resultate finden sich in Anhang 2. Dort sind die Ergebnisse ausführlich diskutiert.

Zusammenfassend wurde ein deutliches Potenzial zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs identifiziert, insbesondere für Fassadenöffnungen mit einem relativ hohen U_g-Wert der Verglasung.

4 Detailliertere Untersuchungen und prototypische Entwicklung einzelner Lamellen

Ausgehend von den vorangegangenen Untersuchungen wurden zwei der vorgestellten Ansätze im Sinne eines ‚Brückenschlags in die Baupraxis‘ exemplarisch ausgewählt, weiterentwickelt, untersucht und bis zum Prototyp bzw. Modell im Maßstab 1:1 voran getrieben:¹⁴

- Eine Membran-bespannte Variante des Typs 2 mit VIP-Kern und
- eine mit Aerogel-Granulat gefüllte transluzente Polycarbonatlamelle als Variante des Typs 3.

Diese Auswahl ist geprägt durch das Bestreben, die beiden vielversprechendsten Typen (2 und 3) in jeweils einer Variante zu betrachten, die zusätzlich über eine dem Verfasser wichtig erscheinende Eigenschaft verfügen: Sie sollen ihrem Dämmvermögen in ihrer Gestaltung einen eigenen Ausdruck verleihen, dieses Merkmal gleichsam sichtbar machen.

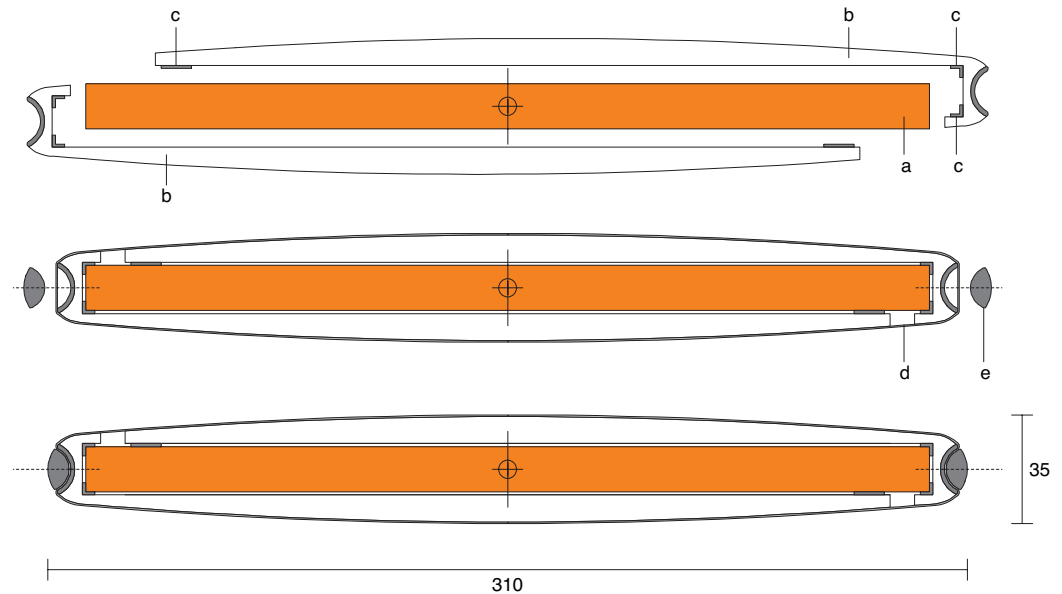
Genau diese Eigenschaft aber fehlt der Variante Lam2.05, deren Entwicklung zur Produktreife vermutlich die geringsten Probleme bieten würde. Eine solche Aluminiumlamelle, hergestellt beispielsweise aus stranggepressten Profilen, die je eine Lamellenhälfte bilden, verbunden durch eingerollte Kunststoffprofile für die thermische Trennung, wäre am Ende in der

Abb. 7.20
Aufbau der untersuchten Membranlamelle, M 1:2,5

- a VIP-Kern
- b Rippenformteil
- c Kunststoffprofile zum Schutz des VIP-Kerns
- d Membran-‘Schlauch’
- e Anpressprofil Aluminium

Dargestellt sind die drei wichtigsten Herstellungsschritte:

1. Der VIP-Kern wird beidseitig mit gleichen Rippenunterkonstruktionen versehen.
2. Der Membranschlauch wird übergezogen.
3. Durch Anbringung der zwei Anpressprofile wird die Membran und die Unterkonstruktion unter Spannung gesetzt.



Erscheinung kaum von einer konventionellen Sonnenschutzlamelle zu unterscheiden.

4.1 Membranbespannte Lamelle mit VIP-Kern

Die in Abschnitt 2 beschriebenen Lamellentypen 1 und 2 werden durch den Einsatz von VIP als Kerndämmung charakterisiert.

VIP können, wie andernorts beschrieben, nicht oder nur sehr bedingt wie Kerndämmung im Sandwichbau eingesetzt werden, da sie keinerlei Schub-, Scher- oder Zugkräfte aufnehmen können. Daher eignen sie sich auch nicht für eine entsprechende Herstellung einer Lamelle (z.B. durch vollflächige Verklebung).

Bei der Konstruktion ist vielmehr darauf zu achten, dass die VIP möglichst ausschließlich Druckspannungen ausgesetzt werden und es nicht zu hohen Punktlasten kommt, wodurch die empfindliche Hülle verletzt werden könnte.

4.1.1 Beschreibung der Konstruktion

Im Anwendungsbeispiel gemäß Abb. 7.20 wird der VIP-Kern (a) von zwei gleichen, winkelförmigen Rippenkonstruktionen (b+c) umgeben, deren Stoßstellen für den geschlossenen Zustand genau im Bereich der erforderlichen thermischen Trennung liegen.

Somit sind die beiden gut wärmeleitenden Unterkonstruktionen klar

der kalten bzw. der warmen Seite zugeordnet.

Das Flach- und die beiden Winkelprofile (c) verbinden zum einen die Rippenformteile und schützen zum anderen den empfindlichen Kern, indem sie die Rippen auf Abstand halten und für eine günstigere Krafteinleitung in den Dämmkern sorgen.

Die Membran (d), über die die gesamte Konstruktion durch die Wegverlängerung an der Kontur des Anpressprofils (e) vorgespannt und zusammengehalten wird, bildet neben dem Hüllmaterial des VIP das einzige im Bereich der thermischen Trennung vorhandene wärmeleitende Material.

Die im Bereich der thermischen Trennung befindliche Luftmenge dürfte aufgrund des sehr kleinen Volumens kaum konvektive Effekte zulassen.

In wieweit die vorgeschlagene Konstruktion statisch belastbar ist, bzw. welche Spannweiten unter welchen Umständen damit zu erzielen sind, wurde im Vorfeld nicht abgeschätzt.

Grundsätzlich ist hier anzumerken, dass die vorhandene ‚statische Höhe‘ besonders durch den Umstand sehr gering ist, dass die vorhandene Steifigkeit des (funktionierenden) VIP-Kerns nicht in Ansatz gebracht werden darf, da sie im Versagensfall nicht gewährleistet ist. Damit ist auf die Verbundwirkung der Rippen mit den längslaufenden Profilen im Bereich des seitlichen Randes zu setzen, was sich einer überschlägigen Abschätzung entzieht.

Die Art des stirnseitigen Abschlusses, der Befestigung an einer Unterkonstruktion und die genauen Eigenschaften des eingesetzten Membranmaterials bestimmen darüber, ob und gegebenenfalls wie lange die Lamelle der Witterung ausgesetzt werden kann.

In wieweit und vor allem wie lange der VIP-Kern Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen, und insbesondere UV-Strahlung standhalten kann, bedürfte eingehender Untersuchungen. Dieser Aspekt kann keineswegs als geklärt gelten.

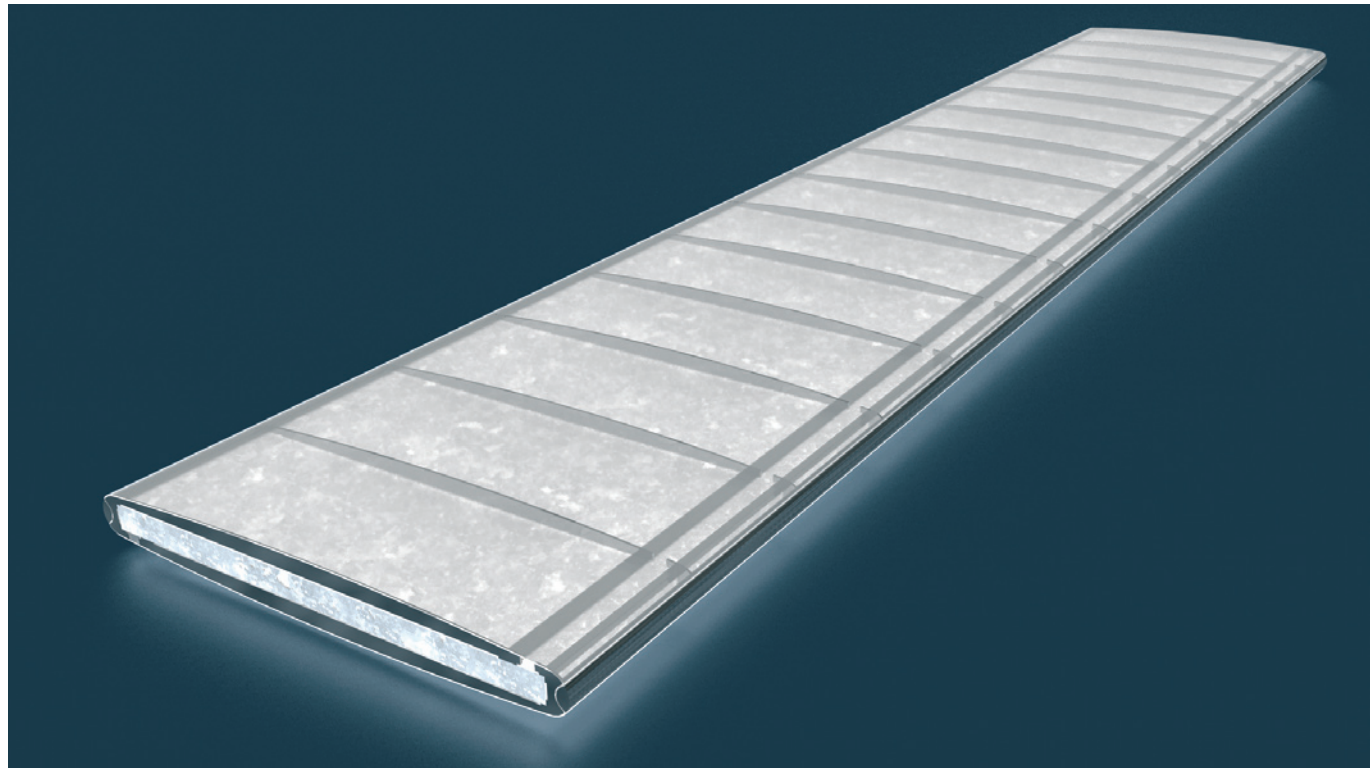


Abb. 7.21
Rechnergenerierte Visualisierung der Lamelle (Planungsstadium)

Entsprechendes gilt für eine je nach eingesetztem VIP-Produkt (und vor allem je nach dessen Hüllmaterial) variierende maximal zulässige Einsatztemperatur.

Die zu erwartenden Temperatur-Maxima hängen von der genauen Einbausituation (zum Beispiel Standort und Ausrichtung) ab.

4.1.2 Gestalterische Intention

Durch die Verwendung eines transluzenten Außenmaterials für die Lamelle wird die Präsenz

des neuartigen hochdämmenden Kerns spürbar gemacht, der silbrig durch die Haut hindurch schimmert. Dies soll Abb. 7.21 zum Ausdruck bringen. Die eigentlich nicht sehr ansehnliche Oberfläche der VIP wird dadurch verunklärt und indirekt aufgewertet.

Der Betrachter erfährt durch den schemenhaft sich abzeichnenden Kern, den er mehr erahnt als sieht, einen ersten Hinweis auf die neuartige Funktion der Lamelle, nämlich den temporären Wärmeschutz.

Gleichzeitig transportiert das Hüllmaterial durch die Assoziation eines Flugzeugflügels die Leichtigkeit und bis zu einem gewissen Grad die Verletzlichkeit des Kernelements.

4.1.3 Abschätzung der Dämmwirkung (U-Wert und Heat-Flux)

4.1.3.1 Grundlagen

Für den dargestellten Konstruktionsvorschlag wurden im Sinne der Vergleichbarkeit mit den in Ab-

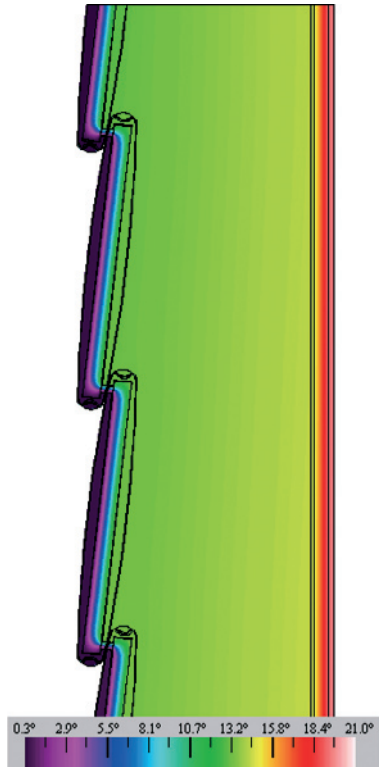


Abb. 7.22
Der Simulation zugrundeliegende Einbausituation vor einer Verglasung, hier mit überlagerter Isothermendarstellung.

schnitt 2 angestellten Untersuchungen entsprechende thermische Simulationen unter analogen Randbedingungen¹⁵ durchgeführt, siehe Abschnitt 2.1.1 und Abb. 7.22.

Dabei ist zu beachten, dass sich die vorgeschlagene Geometrie im Vergleich zu denen im Abschnitt 2 untersuchten nicht als einfache Extrusion eines zweidimensionalen Schnittprofils darstellt.

Mit zweidimensionalen Simulationen lassen sich daher die hier

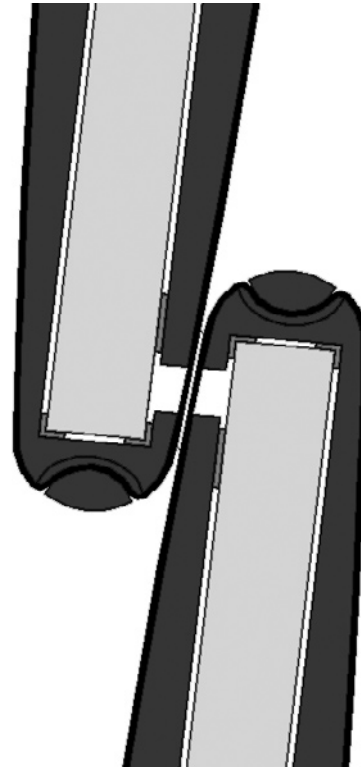


Abb. 7.23
Untersuchungsszenario 1 („worst case“):
Schnitt durch die Aluminiumrippen.

wirksamen thermischen Effekte nicht umfassend abbilden.

Der Aufwand für eine dreidimensionale Simulation ist hingegen nicht gerechtfertigt, da insbesondere die eingeschlossenen Lufträume und die Kleinteiligkeit der Übergangspunkte zum Beispiel zwischen den Kunststoffprofilen, der VIP-Hülle und den Rippen keine große Schärfe der Resultate erwarten lassen.

Daher wurde der Weg einer näherungsweise, zweidimensionalen

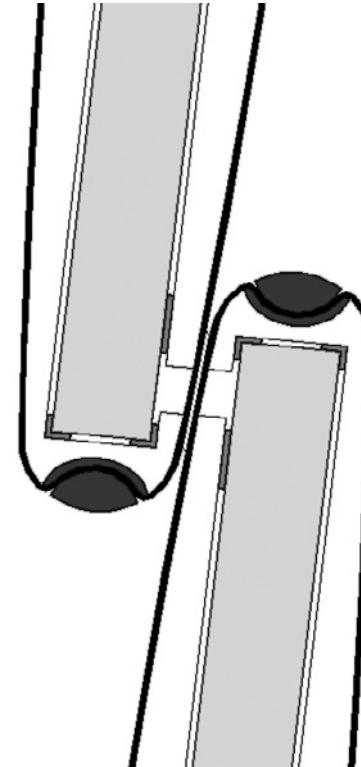


Abb. 7.24
Untersuchungsszenario 2 („best case“):
Schnitt zwischen den Aluminiumrippen.

Abschätzung über die Simulation der beiden Extremsituationen gewählt.

Dies ist zum einen der Schnitt durch die Aluminiumrippen als dem Bereich mit dem zu erwartenden höchsten Wärmefluss (Abb. 7.23) und zum anderen der Schnitt durch die Stelle zwischen zwei Rippen (Abb. 7.24).

Das Ergebnis für die Lamelle als Ganzes liegt mit hoher Sicherheit zwischen beiden Resultaten, und

zwar vermutlich näher an dem Wert für die Aluminiumrippen, da diese mit ca. 100 mm Abstand relativ nahe beieinander liegen.

Folgende Annahmen, Einschränkungen und Vereinfachungen sind bei der Einschätzung der Simulationsergebnisse weiterhin zu beachten:

- Der VIP-Kern wurde aufgrund der relativ ungünstigen Geometrie (schmale Kante von nur ca. 295 mm Länge) mit einem reduzierten Rechenwert für die Wärmeleitfähigkeit (inkl. Hüllmaterial) von $\lambda = 9 \text{ mW/mK}$ angesetzt.¹⁶
- Das Membranmaterial wurde in einer Stärke von 0,8 mm simuliert, dem Minimum, das das Simulationsprogramm auflösen kann. Dafür wurde die angesetzte Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,25 \text{ W/(mK)}$ als einem Standardwert für PTFE entsprechend reduziert.

- Im Bereich der Überlappung der beiden Lamellen wurde ein gering ventilierter Luftspalt von 0,8 mm angenommen, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Membranflächen über die volle Länge der Lamellen aufeinander zu liegen kommen.

Aufgrund dieser vornehmlich den ‚worst-case‘ beschreibenden Grundannahmen ist zu erwarten, dass die Simulationsergebnisse ‚auf der sicheren Seite‘ liegen.

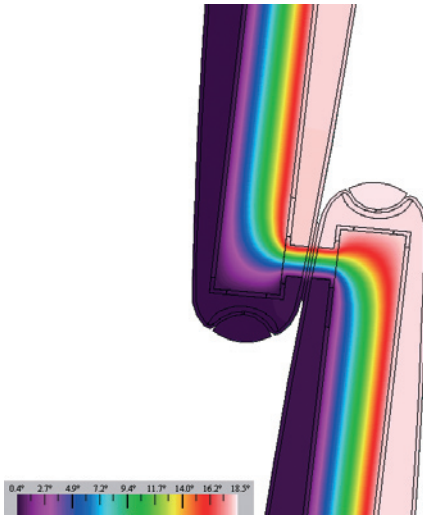


Abb. 7.25
Simulationsergebnis zum Szenario 1:
Isothermendarstellung,
Legende in [°C]

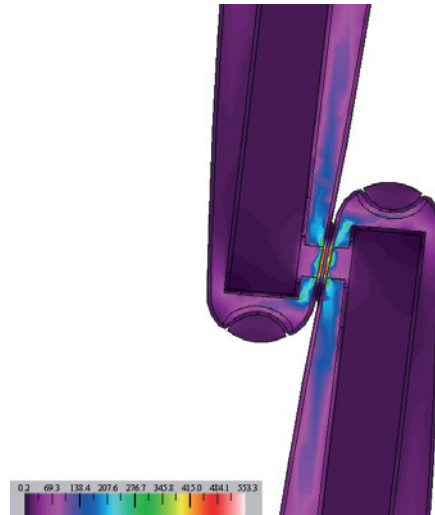


Abb. 7.26
Simulationsergebnis zum Szenario 1:
Darstellung des Wärmeflusses,
Legende in [W/m²]

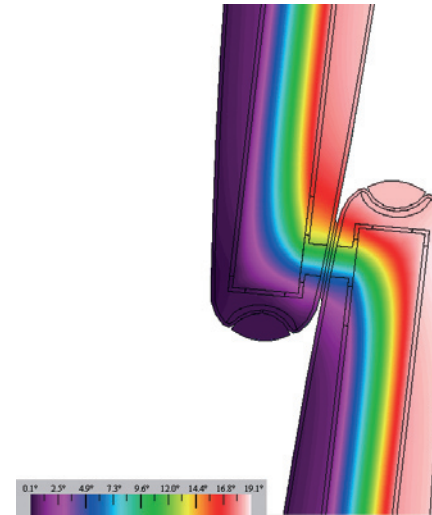


Abb. 7.27
Simulationsergebnis zum Szenario 2:
Isothermendarstellung,
Legende in [°C]

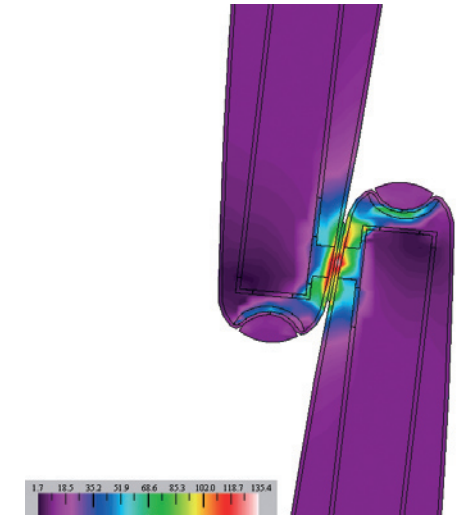


Abb. 7.28
Simulationsergebnis zum Szenario 2:
Darstellung des Wärmeflusses,
Legende in [W/m²]

4.1.3.2 Simulationsergebnisse

Die resultierenden U-Werte finden sich in der Tabelle Abb. 7.29.

Isothermendarstellungen für den Lamellenüberlappungsbereich sind für das Schnitt-Szenario 1 der Abb. 7.25 und für Szenario 2 der Abb. 7.27 zu entnehmen, Darstellungen des Wärmeflusses analog Abb. 7.26 (Szenario 1) und Abb. 7.28 (Szenario 2).

Die Isothermen- und Wärmeflussdarstellungen beruhen beide auf der Simulation der Lamellen ohne Berücksichtigung der Verglasung.

Auf diese Weise werden die Effekte durch die höhere anliegende Temperaturdifferenz (20 K) wesentlich

deutlicher. Dies ist bei der Interpretation der Darstellungen und der Werte in den Legenden zu berücksichtigen.

Die Isothermendarstellungen zeigen sehr deutlich den qualitativen Unterschied der beiden betrachteten Schnittfiguren:

Die nahezu durchgängig konstanten Temperaturen der beiden Aluminiumrippen außen und innen in Szenario 1 reduzieren die Isothermensichtung auf den Stoßbereich der thermischen Trennung. In Szenario 2 verteilt sich die Schichtung auf den ganzen, relativ gut dämmenden Luftbereich.

Hinsichtlich der quantitativen Darstellungen des Wärmeflusses (sog.

„Color Heat Flux Magnitude“ - Darstellung) muss in Analogie zu den Anmerkungen zu den Isothermendarstellungen auf das jeweilige Wärmefluss-Maximum hingewiesen werden, das für das Szenario 1 bei 553 W/m², für das Szenario 2 jedoch nur bei 135 W/m² (ca. 24%) liegt.

Abb. 7.26 veranschaulicht, wie die Aluminiumrippen Energie aus einem weiten Bereich ‚abziehen‘ und im Bereich der thermischen Trennung in das Membranmaterial ‚induzieren‘, über das dann der maßgebliche Wärmefluss erfolgt; die dämmende Wirkung der trennenden Luftschicht wird klar illustriert.

	U-Wert der Lamelle ohne Verglasung	U-Wert der Lamelle mit Verglasung
	[W/(m²K)]	[W/(m²K)]
Simulationsbereich		
...Schnitt Szenario 1 (durch die Alu-Rippen)	0,81	0,56
...Schnitt Szenario 2 (zwischen den Alu-Rippen)	0,65	0,48

Abb. 7.29
Zusammenstellung der aus der Simulation resultierenden U-Werte

Abb. 7.28 macht deutlich, dass im Schnitt-Szenario 2 der maßgebliche Wärmefluss über die Membran erfolgt, auch wenn die deutlich größere Luftschicht dahinter einen nicht unerheblichen Anteil aufweist.

Hier kommt es zu deutlich sichtbaren konvektiven Effekten. Dies ist sicher ein Grund für das mit einem geringen Vorsprung von ca. 20% relativ schlechte Abschneiden dieses Szenarios.

Wenn man einen Gesamt-U-Wert für die Lamellen von ca. 0,75-0,8 W/(m²K) und von ca. 0,55 W/(m²K) für die Lamellen inklusive der Referenzverglasung annimmt, liegt man deutlich über den Werten für die abstrakteren Varianten aus Abschnitt 2.

Die Hauptursache hierfür ist in dem deutlich größeren Abstand der VIP-Kerne in geschlossenem Zustand und in der wesentlich weniger idealen Ausführung der thermischen Trennung zu sehen.

4.1.4 Prototypische Umsetzung

Die im Technischen Zentrum (TZ) der Fakultät für Architektur verfügbaren Maschinen und Einrichtungen ermöglichten die Herstellung eines Prototyps der vorgeschlagenen Lamelle.

Die Einzelteile wurden aus Aluminium und Kunststoff-Standardprofilen gefertigt und im wesentlichen durch Kleben gefügt, siehe Abb. 7.31 und 7.32.

Die Firma va-Q-tec AG (Würzburg) stellte freundlicherweise VIP mit einer maximal möglichen Länge von 100 cm zur Verfügung, die damit auch die Länge der prototypischen Lamellen bestimmten.

Abb. 7.30 zeigt neben dem Kern-VIP alle gefertigten Einzelteile (außer der Membran) vor der Verklebung, die auf einer speziellen Vorrichtung erfolgte (Abb. 7.33). In Abb. 7.34 ist eines der beiden gleichen ‚Gerippe‘-artigen Teile auf dem VIP-Kern liegend zu sehen.

Als Membranmaterial wurden verschiedene ETFE-Folien (200 µm) eingesetzt, die jeweils werkseitig durch Heiß-Verschweißung zu einem ‚Schlauch‘ präkonfektioniert wurden:

- unbedruckt
- Kreisbedr. (ø 4mm), silber, weit
- Kreisbedr. (ø 4mm), silber, eng
- Kreisbedr. (ø 4mm), weiss, eng



Abb. 7.31 Manuelle Fertigung der Rippen und anderer Aluminiumteile aus Standardteilen (Flach-, Rund- und Winkelprofile)



Abb. 7.32 Detail der Membran-Klemmung. Die Kunststoff-L-Winkel, die neben dem Halbrohr die einzelnen Rippen verbinden und das VIP auf Abstand halten und dadurch schützen, sind ebenfalls zu sehen.

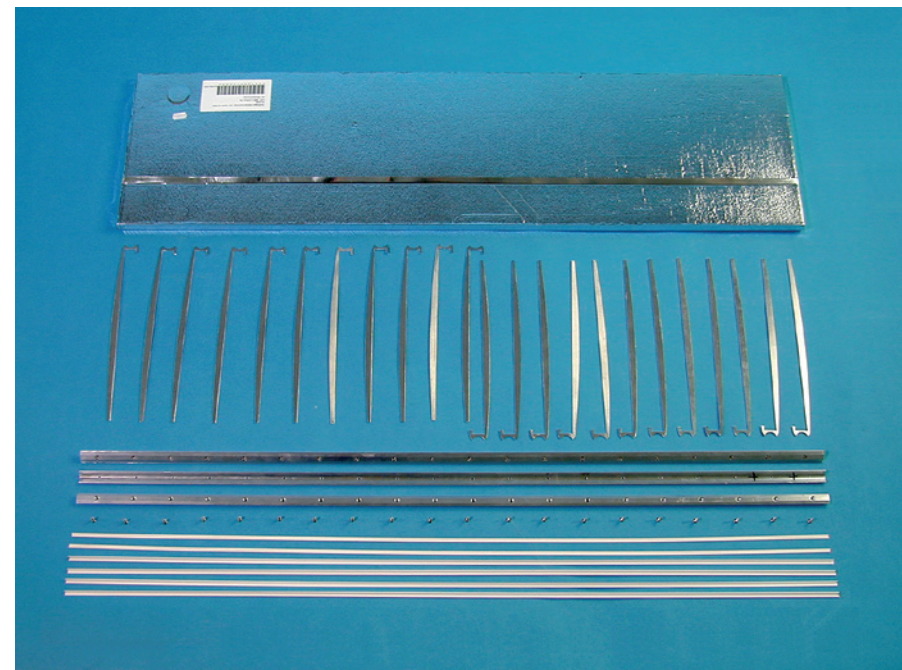


Abb. 7.30 (rechts unten)

Eines der von der Firma va-Q-tec zur Verfügung gestellten VIP und alle gefertigten Einzelteile für den Prototyp (mit Ausnahme des Membranmaterials)



Abb. 7.33 Verklebung der Einzelteile

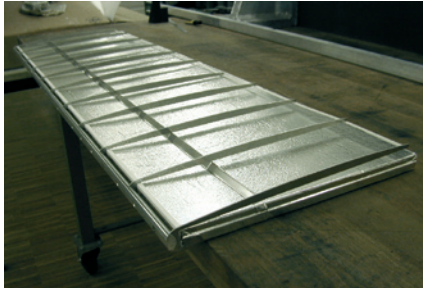


Abb. 7.34 Das Lamellen-‘Gerippe’ mit VIP

Abb. 7.35 und 7.36 zeigen die zwei letztgenannten dieser Varianten, die jeweils einen Bedruckungsgrad von 65% und einen Lichtdurchlässigkeitsgrad von ca. 60% aufweisen.

Ziel der Untersuchung mit verschiedenen Bedruckungsarten war das Ausloten der gestalterischen Balance zwischen einer klaren Außenform und der gleichzeitig intendierten Visualisierung des speziellen Dämmkerns (vergl. Absatz 4.1.2).

Die Beschäftigung mit der prototypischen Umsetzung hat folgendes Optimierungspotenzial aufgezeigt:

- Die gewählte konstruktive Umsetzung ist sehr aufwändig, hier sind jedoch für größere Stückzahlen

durch den Einsatz anderer Fertigungstechniken (z.B. Alu-Spritzguss) Verbesserungen denkbar.

- Die ausgeführte Befestigung der Membran könnte durch den Einsatz eines Keders vereinfacht werden, allerdings um den Preis komplexerer Randprofile.
- Die Formgebung der kurzen Rippenenden im Bereich der thermischen Trennung müsste weiter optimiert werden, um eine möglichst präzise und dichte Überdeckung der Lamellen zu erreichen, wenn diese zum Zwecke des Wärmeschutzes geschlossen werden. Dies ist auch im Sinne der Reduzierung der Lastspitzen in der Membranfläche, die in Abb. 7.35 gut zu erkennen sind, geboten.

Wie in Absatz 4.1.1 bereits ausgeführt, müssen für die Ausbildung eines geeigneten seitlichen Abschlusses neben der thermischen Trennung insbesondere die Art der Befestigung und Bewegungsführung und die zu bewältigenden Anforderungen von außen (u.a. Niederschlag, UV-Strahlung), die von der individuellen Einbausituation abhängen, berücksichtigt werden.

Durch den Einsatz zukünftig möglicherweise verfügbarer transluzenter VIP könnten der vorgeschlagenen Lamellenkonstruktion weitere funktionale und optische Qualitäten erschlossen werden.

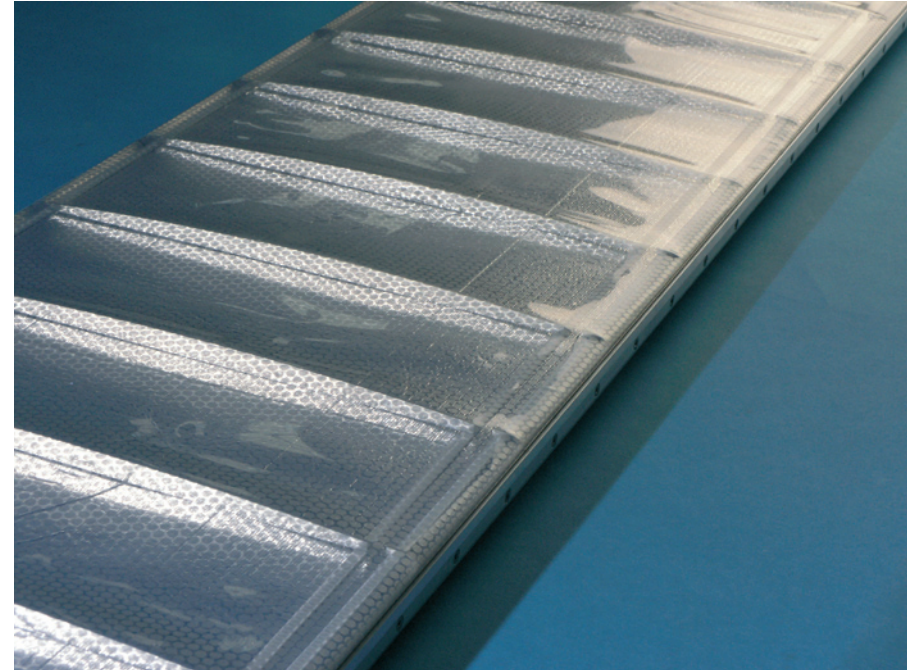
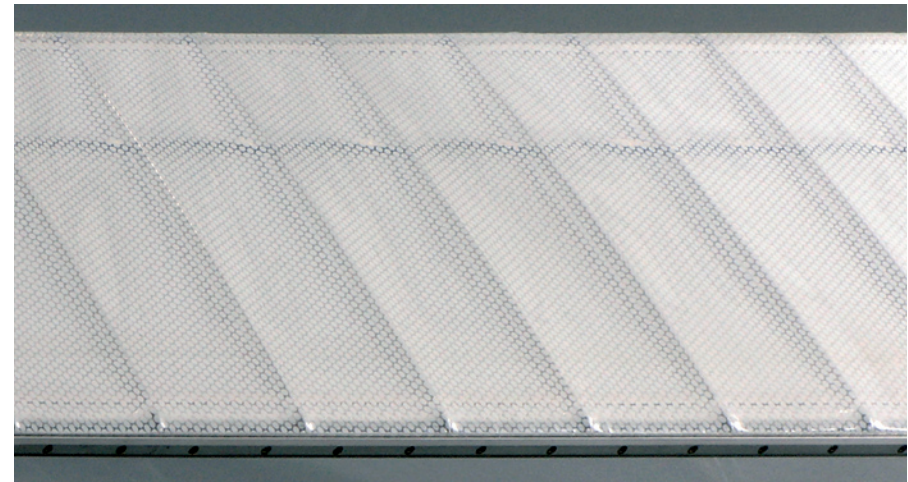


Abb. 7.35 Lamellen-Variante mit bedruckter ETFE-Folie (silberne Punkte)

Abb. 7.36 Lamellen-Variante mit bedruckter ETFE-Folie (weisse Punkte)



4.2 Polycarbonat-Lamelle mit Aerogel-Granulat-Füllung

4.2.1 Beschreibung der Konstruktion

Die Lamellen bestehen aus einem neuartigen, extrudierten Hohlkammerprofil aus durchsichtigem Kunststoff, das in einigen Aspekten konventionellen Steg-Doppelplatten vergleichbar ist.

Das entscheidende Auslegungs- und Anordnungskriterium für die inneren Stege des Profils ergibt sich aus einem speziellen Anwendungsszenario, bei dem die Lamellen - in der Gebäudehülle eingebaut - temporär durch leichte Überlappung eine geschlossene Haut bilden.

Die gewünschte Funktion des temporären Wärmeschutzes lässt sich durch einen theoretischen optimalen Isothermenverlauf charakterisieren, dem die innere Struktur der Lamellen folgt:

Die längslaufenden inneren Stege folgen genau diesen Isothermen ungebrochen (und sind somit im Hinblick auf die Wärmeübertragung nicht von Bedeutung), während die dazu quer verlaufenden Stege maximal versetzt sind (und somit den Weg des Wärmedurchgangs maximal verlängern).¹⁷

Abb. 7.37 zeigt dieses Prinzip für zwei hier näher betrachteten Varianten, die sich in ihrer Lagigkeit

Abb. 7.37

Aufbau der untersuchten Polycarbonatlamelle, M 1:2,5

- a Extrusionsprofil aus Polycarbonat
- b Aerogelgranulat-Füllung

Dargestellt sind die zwei untersuchten Varianten, die sich in der Anzahl der Kammerlagen (drei bzw. vier) und damit der Lamellenstärke unterscheiden:

- Variante 1: oben
- Variante 2: unten

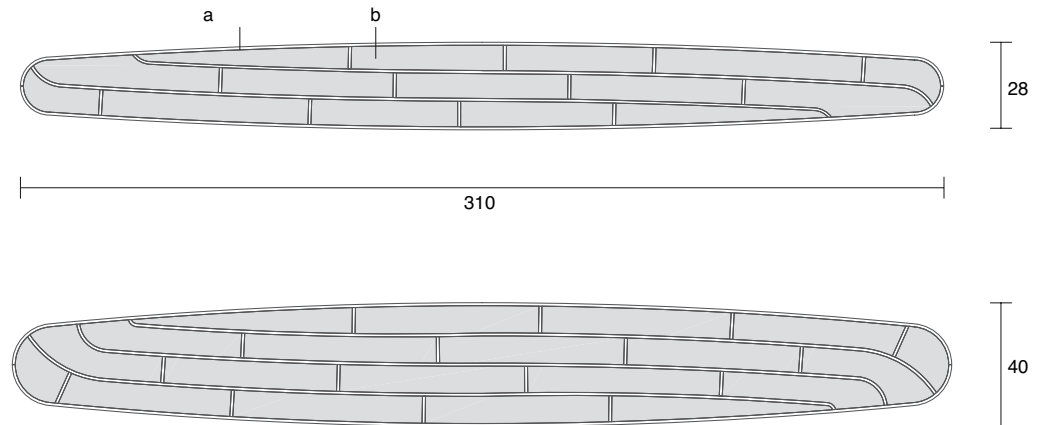
und damit auch in ihrer Gesamtdicke unterscheiden:

- Variante 1 mit drei Längslagen und einer Gesamtdicke von 28 mm und
- Variante 2 mit vier Längslagen und einer Gesamtdicke von 40 mm.

Eine computergenerierte Darstellung der beiden vorgeschlagenen (hier ungefüllten) Profilvarianten findet sich in Abb. 7.38.

Folgende Anmerkungen sind zur möglichen herstellungstechnischen Umsetzung dieses Vorschlages zu machen:

- Die Anordnung der Stege, deren Stärke und Ausbildung, insbesondere der T-Stellen im Profil müssen unter Berücksichtigung diverser Aspekte optimiert werden: Wärmefluss, Durchbiegung im Hinblick auf mögliche Spann-



weiten und insbes. Erfordernisse aus dem Fertigungsprozess.

- Die einzige mögliche Herstellung eines solchen transparenten Profils, das später im Außenbereich eingesetzt werden soll, kann durch einen Extrusionsprozess erfolgen.
- Die Fertigung eines dafür geeigneten Werkzeuges ist nach Auskunft maßgeblicher, auf die Extrusion transparenter Teile spezialisierter Firmen mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden.¹⁸
- Es ist daher zur Zeit völlig offen, ob die in Abb. 7.37 wiedergegebenen Details, wie zum Beispiel die spitzen Winkel am Übergang zwischen Außenschale und Innenlage, genau in der angegebenen Form umsetzbar sind.¹⁹ Gegebenenfalls müsste das Profil an solchen Stellen entsprechend modifiziert werden.

4.2.2 Funktionale und gestalterische Intention

Das besondere Merkmal dieser Lamellenvariante ist die Eigenschaft der Transluzenz²⁰.

Der Strahlendurchgang im Bereich des sichtbaren Lichts wird nicht vollständig verhindert, wie dies bei den vorangegangenen Beispielen der Fall war.

Wie an anderem Ort erläutert, führt dies zu einer Erweiterung des Einsatzspektrums und zu potenziellen Energieeinsparungen, da zum Beispiel die Einsatzdauer künstlicher Beleuchtung reduziert werden kann.

Die lichtstreuenden, -brechenden und -absorbierenden Eigenschaften des Füllmaterials Aerogelgranulat führen dazu, dass die innere Steganordnung und damit das für die Dämmwirkung maßgebliche Prinzip bestenfalls erahnbar sind.

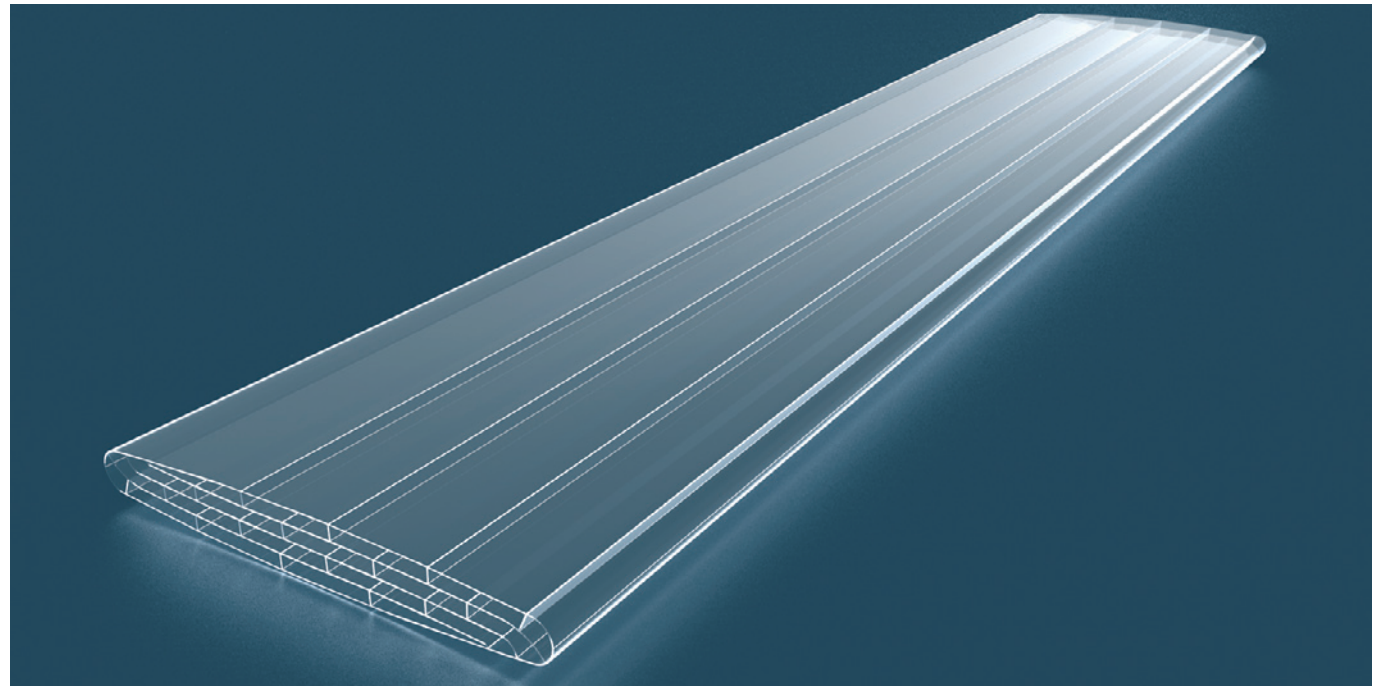
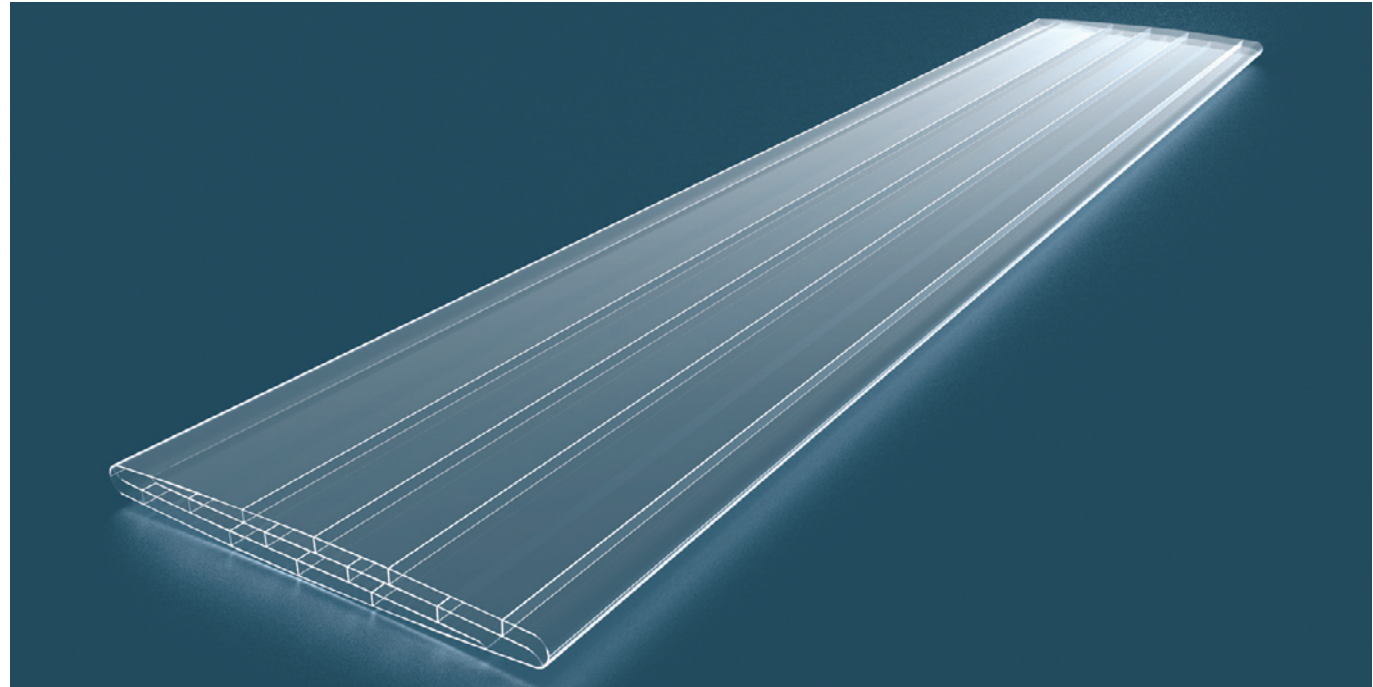
Abb. 7.38
Rechnergenerierte Visualisierung der beiden
Lamellenvarianten, oben dreilagig, unten
vierlagig (Planungsstadium)

Das transparente Polycarbonat tritt durch die Füllung in seiner optischen Wirkung sehr stark zurück, das gefüllte Profil wirkt sehr weißlich. Im Bereich der Steganschlüsse kommt es zu Glanzlichteffekten, die sich aus den Brechungseigenschaften des Materials und geometrisch bedingten Totalreflexionssituationen ergeben.

Die Granularität des Kernmaterials offenbart sich erst bei sehr geringem Betrachtungsabstand.

Durch eine zusätzlich einseitig aufgebraute, teildurchlässige (eventuell sogar selektive) verspiegelnde Beschichtung ließe sich die Lamelle auch zur Tageslichtlenkung einsetzen und die Eigenschaften für den Sonnenschutz und Blendenschutz (geringeres ‚Eigenleuchten‘ der Lamelle durch gestreutes Licht) verbessern.

Solche Schichten lassen sich inzwischen auch ohne Einschränkun-



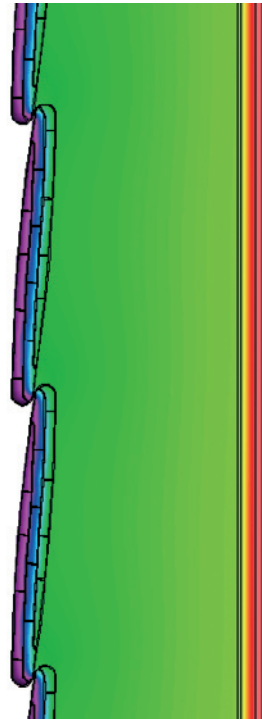
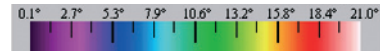


Abb. 7.39
Der Simulation zugrundeliegende Einbausituation vor einer Verglasung, hier mit überlagerter Isothermendarstellung, Legende in [°C].



gen für die Einsatzmöglichkeiten im Außenbereich auf Kunststoffe aufbringen.

Im allgemeinen erfordert dies eine zusätzliche (Verschleiß-)Schutzschicht, die zum Beispiel aus einer evtl. zusätzlichen, glasartigen Beschichtung (z.B. auf SiOx-Basis) bestehen könnte.

Die vorgeschlagene Lamelle lässt sich nach der Demontage gut in die Einzelbestandteile zerlegen. Während die Aerogelfüllung nach einer Reinigung und Trocknung (zum Beispiel auch für neue gleiche Lamellen) wiederverwendet werden könnte, kann Polycarbonat recycelt werden.

4.2.3 Abschätzung der Dämmwirkung (U-Wert und Heat-Flux)

4.2.3.1 Grundlagen

Das zugrunde liegende Simulationsszenario ist wiederum analog zu den bisher erläuterten, siehe Abb. 7.39 und Abschnitt 4.1.3.1. Die geometrischen Simulationsgrundlagen sind für die Variante 1 der Abb. 7.40 und für Variante 2 der Abb. 7.41 zu entnehmen. Folgende Annahmen, Einschränkungen und Vereinfachungen sind bei der Einschätzung der Simulationsergebnisse weiterhin zu beachten:

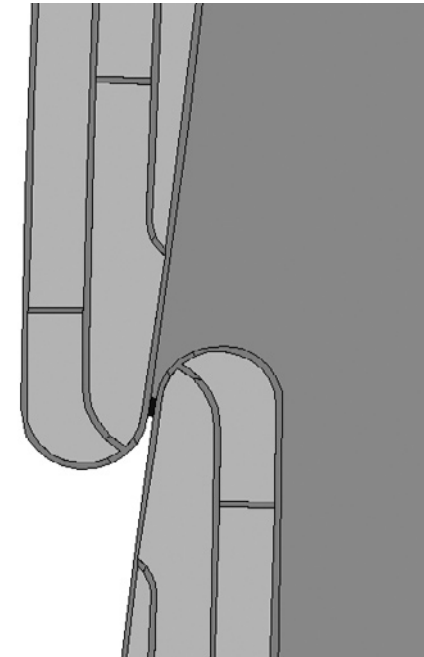


Abb. 7.40 Variante 1 (dreilagig) mit einer Dichtungslippe

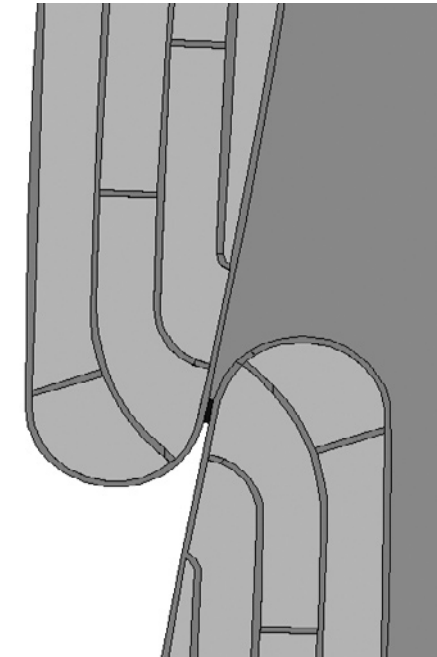


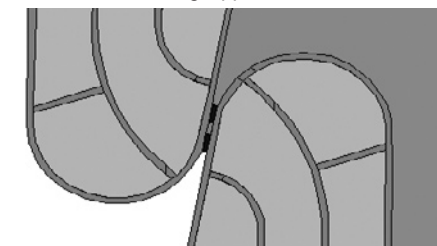
Abb. 7.41 Variante 2 (vierlagig) mit einer Dichtungslippe

- Das Polycarbonatprofil hat (in einem ersten Ansatz für die Simulation) eine mittlere Steg- und Randstärke von 1 mm. Vermutlich könnten insbesondere die inneren Stege deutlich dünner ausfallen, aber erstens trägt diese Annahme zu einem ‚Mindestergebnis‘ bei und zweitens bewegt man sich bereits mit diesem Maß an der Untergrenze der Möglichkeiten der Simulationssoftware.

- Das als Kammerfüllung angesetzte Dämmmaterial (granuläres Aerogel) wurde in zwei Varianten gerechnet, nämlich unter Atmosphärendruck mit einem Rechenwert für die Wärmeleitfähigkeit

von $\lambda = 18 \text{ mW}/(\text{mK})$ und in evakuiertem Zustand (ca. 10 mbar) mit einem Rechenwert von $\lambda = 6 \text{ mW}/(\text{mK})$. Die realistisch erzielbare Untergrenze läge hier (bei deutlich geringerem Druck) bei ca. $\lambda = 4 \text{ mW}/(\text{mK})$.

Abb. 7.42 Lamellenstoß-Variante mit zwei Dichtungslippen



- Im Bereich der Überlappung der beiden Lamellen wurden zwei Varianten für die Ausbildung des Stoßes zugrunde gelegt, einmal mit nur einer Dichtungslippe (mit einer Breite von ca. 2,5 mm) und einem mit zwei minimal (Lippe gleicher Breite mit Abstand von 2 mm) versetzten, siehe hierzu Abb. 7.41 und 7.42 beispielhaft für die Variante 2.

Aufgrund dieser vornehmlich den ‚worst-case‘ beschreibenden Grundannahmen liegen auch diese Simulationsergebnisse eher ‚auf der sicheren Seite‘.

4.2.3.2 Simulationsergebnisse

Die ermittelten U-Werte für die verschiedenen Varianten finden sich in den Abb. 7.46 und 7.47, der Temperaturverlauf innerhalb der geschlossenen Elemente in Abb. 7.43.

Die Auswirkungen der beiden Varianten für den Lamellenstoß auf den Wärmefluss durch die Struktur zeigen die Abb. 7.44 und 7.45 auf.

Hinsichtlich der Anmerkungen in Bezug auf die Interpretation der unterschiedlichen Darstellungsweisen sei auf den entsprechenden Abschnitt 4.1.3.2 zu den membranbespannten Lamellen verwiesen.

Im einzelnen lassen die Ergebnisse insbesondere folgende Rückschlüsse zu:

Abb. 7.43
Simulationsergebnisse in Isothermen-
darstellung,
links: Variante 1 (dreilagig),
rechts: Variante 2 (vierlagig),
Legende in [°C].



Abb. 7.44
Variante mit einer Dichtungslippe,
Simulationsergebnisse
(Heat-Flux-Darstellung),
links: Variante 1 (dreilagig),
rechts: Variante 2 (vierlagig),
Legende in [W/m²].

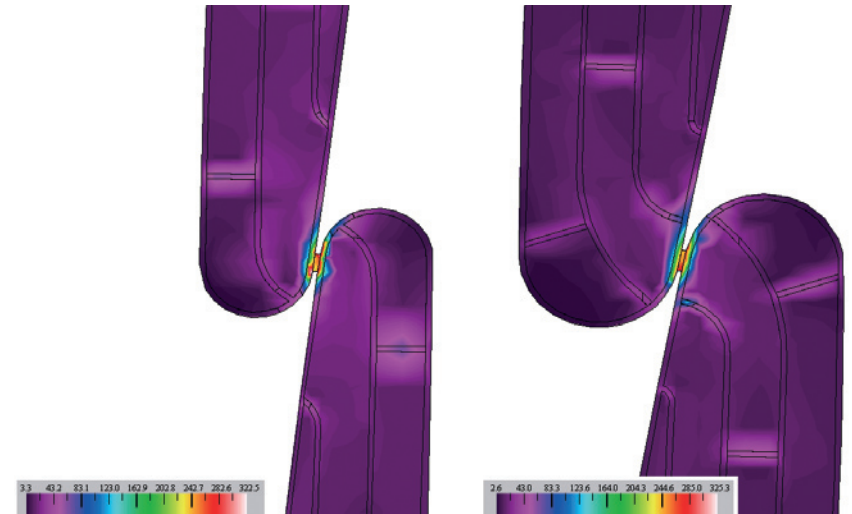
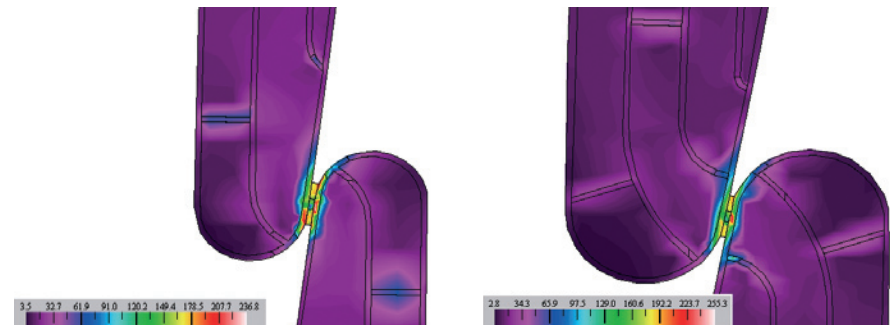


Abb. 7.45
Variante mit zwei Dichtungslippen,
Simulationsergebnisse
(Heat-Flux-Darstellung),
links: Variante 1 (dreilagig),
rechts: Variante 2 (vierlagig),
Legende in [W/m²].



	Lamelle mit 3 Kammerlagen (Variante 1)							
	Lamelle ohne Verglasung				Lamelle mit Verglasung			
Dichtung	1-fach		2-fach		1-fach		2-fach	
Aerogelgranulatfüllung evakuiert [ja/nein]	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
U-Wert [W/(m ² K)]	0,48	0,95	0,44	0,90	0,42	0,64	0,38	0,61

	Lamelle mit 4 Kammerlagen (Variante 2)							
	Lamelle ohne Verglasung				Lamelle mit Verglasung			
Dichtung	1-fach		2-fach		1-fach		2-fach	
Aerogelgranulatfüllung evakuiert [ja/nein]	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
U-Wert [W/(m ² K)]	0,38	0,73	0,35	0,69	0,34	0,54	0,31	0,51

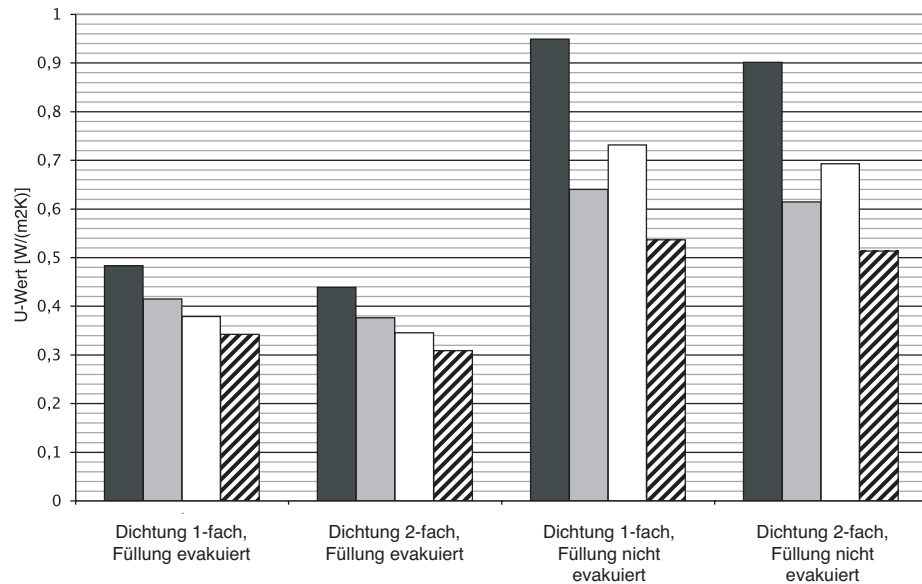


Abb. 7.46
Tabellarische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse

Abb. 7.47
Grafische Zusammenstellung der Simulationsergebnisse

- 3-lagig, ohne Verglasung
- 3-lagig, mit Verglasung
- 4-lagig, ohne Verglasung
- ▨ 4-lagig, mit Verglasung

- Die sich einstellenden Isothermen decken sich weitgehend mit der Steganordnung. Auf der Innenoberfläche kommt es vor allem im Bereich der Stöße zu Minimumtemperaturen von ca. 11 °C, was bauphysikalisch unbedenklich ist.²¹

- Die Wärmeübertragung konzentriert sich im Querschnitt erwartungsgemäß weitgehend auf die Querstege, auch auf die in den mittleren Lagen. Dies ist sehr gut zu sehen in den Abb. 7.44 und 7.45.

- Ebenso wenig überraschend ist, dass über die Stoßbereiche als den Stellen mit der geringsten Materialstärke der punktuell größte Wärmestrom fließt (von der Größenordnung ca. das dreifache gegenüber den Querstegen). Dabei führt die Ausführungsvariante mit zwei Dichtungslippen zu einer Reduzierung der Wärmeflusspitze um ca. ein Viertel (von ca. 323 auf 237 W/m² und von ca. 325 auf 255 W/m²).

Die ermittelten U-Werte lassen folgende Interpretationen zu:

- Die Ausbildung der Stoßdichtung hat in den betrachteten Varianten ein erhebliches Optimierungspotenzial von 5-10%, das umso größer ist, je besser der Dämmwert der Lamelle selbst ist.

- Der Unterschied zwischen den evakuierten und nicht evakuierten

Lamellen, also eine Verminderung der Wärmeleitfähigkeit des Füllstoffes um den Faktor 3, bedeutet eine U-Wertveränderung um den Faktor 2 für die Lamelle alleine, für die Lamelle inklusive Verglasung eine Veränderung um den Faktor 1,6.

- Die Varianten 1 und 2 liegen ca. um den Faktor 1,5 auseinander, was in grober Annäherung dem Verhältnis der Lamellenstärken entspricht. Unter Berücksichtigung der Verglasungsebene reduziert sich der Unterschied auf ungefähr den Faktor 1,2.
- Das Ergebnis verfehlt die ‚idealisierte‘ Annahme des Lamellentyps 3 in vergleichbarer Konfiguration aus Abschnitt 2 dieses Teils (Lam 3.08, Fallnummer 08 in Abb. 7.18) um ca. 10%, was durchaus akzeptabel erscheint.
- In absoluten Zahlen ausgedrückt vermag die Variante mit der besten Performance (Variante 2, vierlagig, mit zwei Dichtungslippen) in geschlossenem Zustand den U-Wert der Verglasung von 1,66 auf minimal ca. 0,31 W/(m²K) zu reduzieren, eine beachtliche Verbesserung um den Faktor 5,3. Damit liegt diese Variante noch leicht vor der für die in Abschnitt 3 beschriebenen Untersuchungen zugrunde gelegten (vergleiche Anhang 2). Der dort in Vergleich gestellte einfache Holzladen wird um den Faktor 2,3 übertroffen.

4.2.4 Prototypische Umsetzung, Modell

Die Beschäftigung mit der Umsetzung zu ersten Mustern und Prototypen machte schnell klar, dass es keine geeigneten Verfahren für eine einfache Muster- bzw. Prototypenherstellung gibt, die einen dem fertigen Produkt annähernd vergleichbaren, vollständigen Eindruck in optischen, haptischen oder gar funktionalen Aspekten ermöglichen.²²

Da aber mit dem Produkt Lexan Thermoclear® der Firma GE Advanced Materials / Bergen (NL), vergl. Abb. 4.69, bereits eine plattenförmige Polycarbonat-Stegdoppelplatte, die mit Aerogelgranulat (nanogel®/ Firma Cabot) gefüllt ist, vorliegt, anhand derer wesentliche Aspekte und Eigenschaften einschätzbar sind, erschien eine drastische geometrische Vereinfachung nicht sinnvoll.²³

Es wurde daher beschlossen, sich in einem aufwändigen, mehrstufigen Prozess der gewünschten Form unter Einsatz der weitgehendsten Möglichkeiten des Technischen Zentrums (TZ) der TUM soweit wie möglich anzunähern und so eher ein Modell zu erstellen als einen Prototyp.

Das geplante Profil wurde dazu so in Einzelteile zerlegt, dass diese mit den vorhandenen Umformtechniken herstellbar waren:

Ohne Berücksichtigung der kurzen Querstege wird die Geometrie

durch vier gebogene, rechteckige Platten bestimmt. Da für die Herstellung der Variante 1 nur zwei verschiedene Formen notwendig sind, wurde dieser der Vorzug gegeben. Zudem ist die Wahl dieser schlankeren der beiden Varianten auch sinnvoll, um sich einen Eindruck von der zu erwartenden Steifigkeit zu verschaffen.

Für die beiden verschiedenen Längsrippenteile wurden nach CAD-Vorlagen auf der CNC-Fräse des Lehrstuhls Prof. Horden Formen aus Ureol (RenShape BM 5460) gefertigt, einem Holzersatzwerkstoff, der das Erzielen der für das Vakuum-Umformen von transparentem Material benötigten besonders glatten Oberflächen ermöglicht, siehe Abb. 7.48.

Mithilfe dieser beiden Formen (Abb. 7.49) wurden in einem nächsten Schritt auf einer weiteren Maschine des Lehrstuhls Prof. Horden Kunststoffplatten thermisch Vakuumumgeformt.

Als transparentes Material wurde aufgrund der gewählten Umformtechnik kein Polycarbonat (PC), sondern Polymethylmethacrylat (PMMA, Produkt Plexiglas XT in einer Stärke von 0,75 mm) gewählt, das hierfür nach Erfahrung des Lehrstuhls Prof. Horden günstigere Eigenschaften aufzuweisen hat.

Die im TZ vorhandene Vakuumumform-Maschine²⁴ (Abb. 7.50) bedingte eine Längenbeschränkung



Abb. 7.48
Herstellung der Formen für die Vakuumumformung auf der CNC-Fräse des TZ

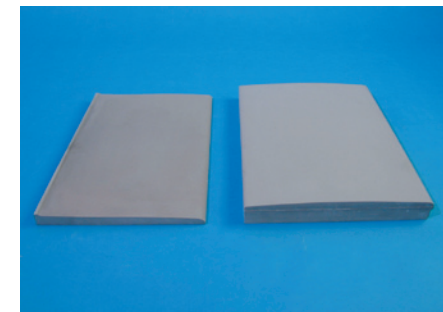


Abb. 7.49
Die beiden fertigen Formen für die Vakuumumformung für das Modell der Variante 1

der Modell-Lamelle auf ca. 40 cm. Dem Zuschnitt der Platten nach der Umformung folgte das einzelne Aufkleben der streifenförmigen Querstege mit Hilfe von Holz-Schaablonen. Die beiden fertigen Außenlagen zeigt Abb. 7.51.

In einem nächsten Schritt wurden die einzelnen Lagen untereinander zur fertigen, aber noch leeren Lamelle verklebt. Dieser Zustand wird aus Abb. 7.52 ersichtlich.

Nach einem Verschluss der einen Stirnseite wurden die Kammern von der anderen Seite einzeln mit



Abb. 7.50
Vakuum-Umform-Maschine im TZ der TUM.

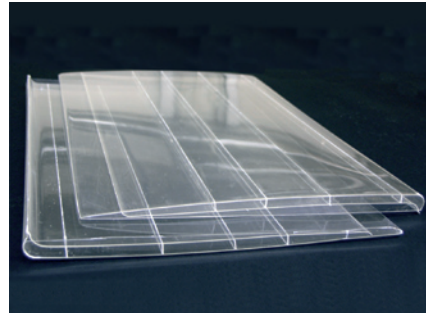


Abb. 7.51
Die zwei fertigen Außenlagen vor dem letzten Klebevorgang

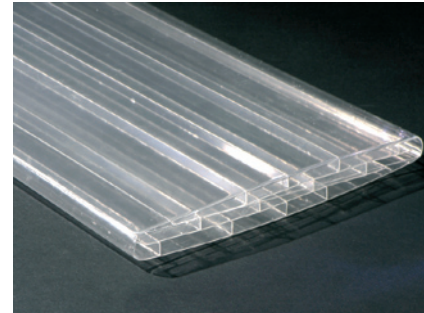


Abb. 7.52
Die fertige, aber noch ungefüllte Lamelle.



Abb. 7.55
Füllung der einzelnen Lamellenkammern mit Aerogelgranulat der Firma Cabot.

Aerogel-Granulat (nanogel® Grade TLD302 der Firma Cabot) befüllt, bevor auch diese geschlossen wurde. Den Befüllvorgang zeigen Abb. 7.55 und 7.53.

Hierbei wurde deutlich, dass dieser letzte Schritt, für den sicher ein optimierter Prozess für die Großserie denkbar wäre, durch die Notwendigkeit der Erzielung einer geeigneten Verdichtung durch ständiges Rütteln schwierig ist, sollen nachträgliche Setzungen auf ein Minimum reduziert werden.

Diese Problematik wird aus Abb. 7.54 ersichtlich, die den Zustand nach der Befüllung einer Außenlage zeigt und einen Eindruck von der Transluzenz des Füllmaterials vermittelt.

Das fertig befüllte Modell der Variante 1 gibt Abb. 7.56 wieder.

4.2.5 Erfahrungen und weiteres Vorgehen

Wie die Abbildungen zeigen, konnte durch einen sehr hohen zeitlichen

Einsatz ein einzelnes Modell hergestellt werden, das in wesentlichen Eigenschaften dem vorgeschlagenen Produkt entspricht.

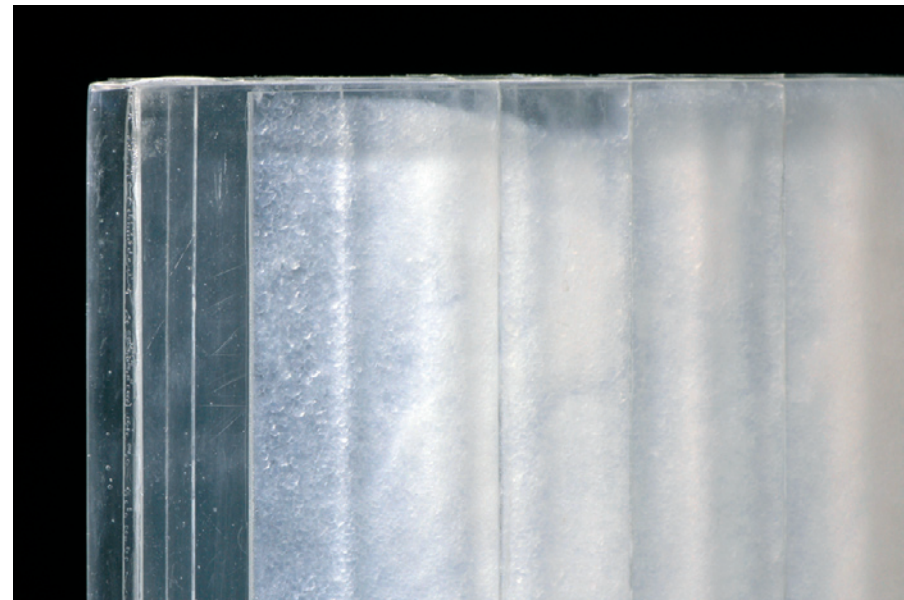
Dennoch bleiben folgende Fragen offen:

- Für den stirnseitigen Verschluss ist noch keine Lösung gefunden. Hierfür kann das gebaute Modell allerdings auch nicht herangezogen werden, da es an dieser Stelle aufgrund des eingesetzten Umformvorgangs anders beschaffen ist als das geplante Extrusionsprofil.
- Schon die Erfahrung mit der Befüllung im Rahmen der Modell-Herstellung hat gezeigt, dass die nachträgliche Setzung der Aerogels Probleme bringen könnte. Für eine geplante Evakuierung der Lamelle müsste jedoch die Füllung relativ stark verdichtet werden, um dem von außen wirkenden Atmosphärendruck entgegen wirken zu können. Dies würde in der Folge das Problem

Abb. 7.53 (rechts)
Befüllungsvorgang im Detail.



Abb. 7.54 (unten)
Die erste Außenlage ist mit Aerogel-Granulat gefüllt. Die unterschiedliche und unregelmäßige Setzung des Granulats sind gut zu sehen.



der Setzung deutlich reduzieren, wenn nicht gar eliminieren.

- Für Experimente mit einer Evakuierung des Profils ist das Modell nicht geeignet, da es durch die Klebestellen weder ausreichend gasdicht, noch ausreichend stabil ist. Für eine den Anforderungen genügende Gasdichtigkeit ist außerdem eine Beschichtung des Kunststoffes und eine in den Evakuierungsprozess integrierte Lösung für den Stirnseitenverschluss erforderlich. Dies kann im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geleistet werden.

Möglich wären Messungen der Wärmeleitfähigkeit. Allerdings gibt es bisher nur ein einzelnes Modell, so dass nur die Lamelle selbst gemessen werden könnte.

Da die Simulationsergebnisse (siehe Abschnitt 4.2.3.2) die einfache Geometrie der Lamelle sicher mit relativ hoher Genauigkeit erfasst haben und das Interesse sich auf die Vorgänge im Stoßbereich konzentriert, wären U-Wert-Messergebnisse für eine Lamelle alleine jedoch ohne große Aussagekraft.

Es ist daher beabsichtigt, weitere Muster herzustellen und dann U-Wert- und vor allem g-Wert-Messungen (auf einem kalorimetrischen Fassadenprüfstand) durchzuführen, die den Stoßbereich (in verschiedenen Varianten) einschließen.

Abb. 7.56

Das fertige Modell der Lamelle (Variante 1) Die Aerogel-Füllung verunklärt die innere Struktur in einem hohen Maße.

Man könnte aus gestalterischen Gründen bedauern, dass der in Abb. 4.69 sichtbare ‚Leuchteffekt‘ durchbindender Stege durch den thermisch günstigen Versatz nicht mehr vorhanden ist.



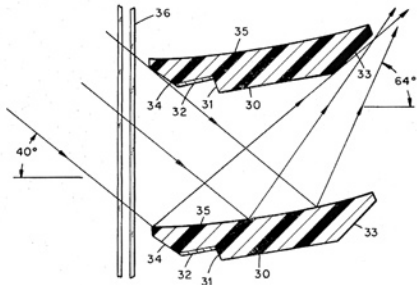


Abb. 7.57
Bewegliche, reflektierende und dämmende
Lamelle. Zeichnung aus der amerikanischen
Patentschrift 4,292,763, S.1.
Vergl. Anmerkung [1].

Anmerkungen

1. Als frühes Beispiel für eine Entwicklung, in der der Aspekt des temporären Wärmeschutzes von maßgeblicher Bedeutung war, sei hier auf folgende amerikanische Patentschrift aus dem Jahre 1981 verwiesen:

Barnes et al.: Reflective Insulating Binds for Windows and the like, United States Patent 4,292,763 vom 06.10.1981, vergl. Abb. 7.57.

2. vergl. DIN 4108-3: 2001-07, A.3 und DIN EN ISO 6946:1996-11, Abschnitt 7 sowie DIN EN ISO 7345:1996-01, 2.12.

3. Herstellerangaben. Quelle:
<http://www.vakutemp.de> <01.2005>

4. Herr C. Denk bestätigte diese Vermutung bei einem Telefongespräch mit dem Autor <21.01.2005> und erläuterte, dass man derzeit bemüht sei, dies durch eine thermische Trennung aller eingesetzten Profile zu verbessern.

5. Die hier angeführten Informationen bezüglich der kommenden EnEV 2006 stammen aus Vorträgen von Anton Maas (26.05.04) und Prof. Gerd Hauser (24.01.05) und jeweils anschließenden persönlichen Gesprächen an der TU-München.

6. siehe [5].

7. Die meisten der weiteren Aussagen gelten auch für vertikal angebrachte Lamellen, die je nach Ausrichtung der Fassade von Vorteil sein können (zum Beispiel für Ost-/ Westausrichtungen). Dies gilt auch für eine derartige Interpretation von Abb. 7.2, allerdings würde dann die Beschränkung entfallen, nach der dort nur Bewegungsarten Berücksichtigung

finden, bei denen ein außen-seitiges Abfließen von Niederschlägen gewährleistet ist.

8. Vergl. hierzu die ausführliche Argumentation von Werner Lang zu den besonderen Möglichkeiten von Lamellensystemen in Lang, Werner: Wärme- und Sonnenschutzsysteme aus Holz für Doppelfassaden, Dissertation, München: Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog, TU München, 2000, Teil 4, S. 31ff.

9. Eine detaillierte Darstellung zu möglichen Manipulatoren im Bereich der Gebäudehülle findet sich in Herzog, Krippner, Lang: Fassadenatlas (2004), Kapitel ‚Manipulatoren‘, S. 258 - 285

10. Unter einer ‚einfachen Schere‘ wird hier ein Befestigungs- und Bewegungssystem verstanden, das zwei Angriffspunkte an der Lamelle nutzt, wobei einer über einen Arm ohne weiteres Gelenk an die Unterkonstruktion anschließt.

Die jeweils möglichen Kombinationen aus Fix- und Gleitpunkt lassen jeweils kombinierte Rotations-/Translationsbewegungen oder reine Rotationsbewegungen zu und stabilisieren diese. ‚Einfach‘ werden sie genannt, da weitere Arme und/oder Gelenke die Anzahl der möglichen Varianten im untersuchten Zusammenhang deutlich erhöhen würden.

Zu verweisen ist hier beispielsweise auf die komplexe Bewegungsführung der Manipulatoren der Südfassadenkonstruktion der ZVK Wiesbaden von Herzog + Partner, München, 2001 (Projektangaben siehe Teil 4, Anmerkung [50]).

11. Die für die Simulation maßgeblichen Eigenschaften sind für beide

Materialien identisch:
Wärmeleitfähigkeit: 0,2 W/(mK)
Emissivität: 0,90

12. Aluminium-, aber insbesondere auch Holzlamellen wurden ausführlich untersucht in Lang, Werner: Wärme- und Sonnenschutzsysteme aus Holz für Doppelfassaden (2000). Dabei wurden auch die wärmetechnischen Eigenschaften diskutiert, wobei dies nicht den Schwerpunkt der Arbeit bildete.

13. Dieser Effekt kommt im Folgenden beim Vorschlag zu einer Extrusionsprofil-Lamelle aus Polycarbonat in gesteigertem Maße zum Tragen, siehe Abschnitt 4.2.

14. Die in Abschnitt 2 dieses Teiles und hier vorgestellten Prinzipien und insbesondere die hier betrachteten Umsetzungen wurden durch den Verfasser am 02. Juni 2004 beim Deutschen Patent- und Markenamt (DPMA) unter der Bezeichnung ‚Wärmedämmende, bewegliche Elemente im Bereich der Gebäudehülle‘ zum Patent angemeldet. Der Antrag wird unter dem Aktenzeichen 10 2004 026 900.9 geführt. Sie wurden außerdem durch den Verfasser im September 2005 auf der maßgeblichen internationalen Konferenz zu Vakuum-Dämmsystemen in der Schweiz vorgestellt, siehe Cremer, Jan: Typology of Applications for Opaque and Translucent VIP in the Building Envelope and their Potential for Temporary Thermal Insulation (2005), S. 194 - 196.

15. Konkret können hier darüber hinaus folgende Angaben gemacht werden:
Abstand der Lamellen untereinander: 262 mm; Abstand der Lamellen von der Verglasung: 185 mm; Lamellenneigung

84,1 °; untersuchter Ausschnitt gem. Abb. 7.22 mit einer Gesamthöhe von 787 mm.

16. Neben den in Abschnitt 2 in Teil 3 der vorliegenden Arbeit diskutierten Abhängigkeiten für die mittlere Wärmeleitfähigkeit, wie geometrische und materialspezifische Aspekte werden für die Annahme einer solchen Grundgröße für die Simulation auch Alterungsvorgänge berücksichtigt, die ihrerseits einen weiteren Abschlag bedingen.

17. Der hier vorgestellte Manipulator wurde durch den Verfasser am 23. Oktober 2004 beim Deutschen Patent- und Markenamt (DPMA) zum Patent angemeldet. Der Antrag wird dort unter dem Aktenzeichen 10 2004 051 687.1 geführt.

18. Beispielhaft ist hier ein Angebot der BWF GmbH (Offingen), der nach eigenen Angaben größten Firma für die Extrusion transparenter Teile in Europa, zu nennen, nach denen die Herstellung eines passenden Werkzeuges mit mindestens einem halben Jahr und einem Mitteleinsatz von ca. 100.000,- € zu veranschlagen sei <10.2004>. Die Hauptschwierigkeit bestünde demnach darin, dass das Werkzeug durchgängig beheizt sein müsse. Es müsse außerdem sichergestellt sein, dass sich sowohl Austrittstemperatur und -geschwindigkeit in extrem engen Grenzen bewegen, da sonst Spannungen und Schlieren auftreten könnten. Eine weitere Schwierigkeit bestünde in der Gefahr, dass das frisch extrudierte Profil kollabiert, bevor es ausreichend fest ist, hier könnte eine Lösung in einer senkrechten Extrusion bestehen. Hätte man das Werkzeug dann gefertigt, wäre die eigentliche Herstellung

des Profils mit einem grob geschätzten Kostenaufwand von ca. 0,30 €/m (Materialkosten ohne Beschichtungen) allerdings äußerst günstig.

19. Gespräche mit Mitarbeitern der BWF GmbH (Offingen) machten deutlich, dass soweit keine Fehler erkennbar wären <10.2004>. Die Entwicklungen während der Werkzeugherstellung führten aber erfahrungsgemäß stets zu Modifikationen und Optimierungen.

20. Einen umfassenden Überblick über die Bedeutung und die Möglichkeiten, die sich im Zusammenhang mit insbesondere transluzenten Materialien für den Baubereich ergeben, findet sich in Herzog, Thomas: Transluzente Bauteile - Anmerkungen zu ihrer Wirkung (1992), S.92-95

21. Selbst wenn sich punktuell derart niedere Temperaturen einstellten, dass es zu Tauwasserausfall käme, wäre dies in der vorgeschlagenen Einbausituation und im skizzierten Anwendungsfall (als Maßnahme des temporären Wärmeschutzes) unkritisch, da sich die Feuchtigkeit weder sammeln, noch ausreichend lange einwirken könnte.

22. Derzeit gibt es aus der mittlerweile großen Bandbreite der verfügbaren Rapid-Prototyping-Verfahren keines, das die Herstellung transparenter Teile zulässt, v.a. nicht in additiven Verfahren. Auch computergesteuerte Fräsmaschinen kommen nicht in Frage, da sich erstens die Form überhaupt nur sehr aufwändig (nämlich zerlegt in viele einzelne Schichten) fräsen ließe, und das abschließende Polieren der sehr dünnen Flächen und insbesondere der T-Stellen zur Erzielung der Transparenz nicht möglich ist.

Auch die Herstellung eines ‚provisorischen‘ Extrusionswerkzeuges, mit dem man vielleicht nur wenige Profilmeter herstellen könnte, ist nicht denkbar.

23. Die Firma GE Advanced Materials hat nicht zuletzt nach Gesprächen mit dem Verfasser bereits angekündigt, bald Polycarbonat-Stegdoppelplatten mit versetzten Querstegen anbieten zu wollen (Stand 02.2005).

24. Es handelt sich um eine Vacuum Forming Machine der englischen Firma Formech International Ltd. (Modell F660).

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist die Aufbereitung der relativ neuen Thematik ‚Vakuüm-Dämmsysteme‘ für den Baubereich, das Aufzeigen maßgeblicher wirksamer Prinzipien und die vertiefte Untersuchung einzelner, ausgewählter Teilaspekte.

1 Zum einführenden, ersten Teil

Die Einführung dient der Klärung der wesentlichen Begriffe und der Definition der thematisierten Fragestellungen, die diese Arbeit veranlasst haben.

Darüber hinaus wird die Bedeutung der auf die Gebäudehülle bezogenen Teilfunktion ‚Wärmeschutz‘ in knapper Weise in einen übergeordneten Zusammenhang gestellt.

2 Das Prinzip der ‚Vakuüm-dämmung‘, physikalische Grundlagen

In diesem Teil wird die physikalische Funktionsweise von Wärmedämmung im allgemeinen und von Vakuüm-Dämmsystemen im speziellen erörtert. Besondere Beachtung finden Zusammenhänge, die sich aus den Unterdruckverhältnissen und spezifischen Materialeigenschaften ergeben. Ergänzt wird dieser Grundlagenteil durch einen knappen Exkurs, der das wissenschafts-historisch bedeutsame Phänomen des Vakuüms thematisiert.

3 Im Baubereich eingesetzte Vakuüm-Dämmsysteme

Dieser Teil dient der systematischen Betrachtung der im Baubereich potenziell verwendbaren, plattenförmigen Vakuüm-Dämmsysteme und deren Bestandteile. Alle wesentlichen, bisher eingesetzten und untersuchten Materialien wurden vorgestellt und besprochen, mögliche Kombinationen und verfügbare Produkte hinsichtlich ihrer Eigenschaften verglichen.

Da sich die Entwicklung teilweise noch in einem relativ frühen Stadium befindet, wird auf zukünftiges Optimierungspotenzial und derzeit laufende Forschung hingewiesen, zum Beispiel bezüglich der Entwicklung von transluzenten und transparenten Systemen.

Gegenstand dieses Teils sind zudem allgemeine, auf Vakuüm-Dämmsysteme bezogene Aspekte, wie beispielsweise die Themenkomplexe ‚Funktionsdauer‘ und ‚Qualitätssicherung‘ sowie dazu erforderliche Messverfahren.

4 Anwendungen im Bereich der Gebäudehülle

Teil 4, der sich mit den Anwendungsmöglichkeiten von Vakuüm-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle auseinandersetzt, folgt im Aufbau im Wesentlichen der einleitenden Typologie zu den Einsatzmöglichkeiten von lichtdurch-

lässigen und lichtundurchlässigen Vakuüm-Dämmsystemen. Die Vorstellung ausgewählter Beispielanwendungen folgt dieser Ordnungsstruktur.

Weitere durch die Systematik der einführenden Typologie nicht erfasste Aspekte werden gesondert betrachtet. Hierzu zählen neben einem Hinweis auf die architektonische Bedeutung der Außenwandstärke insbesondere die Behandlung eingeschäumter Paneele, sandwichartiger Konstruktionen und von Fassadenpaneelen mit integrierten Vakuüm-Dämmsystemen.

Der Teil schließt mit einer Zusammenfassung der aus den bisherigen Darstellungen (Teile 2 bis 4) resultierenden Planungshinweise und einem Ausblick hinsichtlich der möglichen zukünftigen Entwicklung der Einsatzmöglichkeiten von Vakuüm-Dämmsystemen im Baubereich.

Da sich viele Anwendungsvarianten noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, wird auch hier auf zukünftiges Optimierungspotenzial und derzeit laufende Forschung hingewiesen.

Die thematische Auseinandersetzung in den ersten vier Teilen, die durch eine Aufbereitung und Systematisierung bestehender Technologien und Anwendungen gekennzeichnet ist, offenbart aus Sicht des Verfassers einzelne Defizite auf verschiedenen Betrachtungsebenen, die eine vertiefte Befassung lohnend erscheinen ließen

und Raum für eigene Untersuchungen und Beiträge öffneten. Diesen eigenen und neuen Ansätzen des Verfassers widmen sich die Teile 5 bis 7 und die beiden Anhänge, wobei im Bestreben auf eine angemessene Auseinandersetzung verschiedene Untersuchungswerkzeuge und -methoden zum Einsatz kamen.

5 Mattenartige Vakuüm-Dämmsysteme

In Teil 5 wird ein neuer Ansatz des Verfassers untersucht, wonach kontinuierlich hergestellte, mattenartige Vakuüm-Dämmsysteme wesentliche Nachteile von plattenförmigen Einzelsystemen kompensieren könnten.

Um das Potenzial des Vorschlags und insbesondere die Auswirkungen der ansatzbedingt hohen Anzahl linearer Wärmebrücken abzuschätzen, wurden nach grundlegenden geometrischen Klärungen zweidimensionale, thermische Simulationsreihen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten in einer Parameterstudie durchgeführt, bevor beide Betrachtungsebenen zusammengeführt wurden, um Aussagen zu den dreidimensionalen Geometrien vornehmen zu können.

Neben geometrischen Parametern wurden auch zwei mögliche Funktionszustände der Dämmstoffzellen (evakuiert und belüftet / defekt) berücksichtigt.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Wahl einer geeigneten Geometrie und eine versetzte, mehrlagige Anwendung solcher Systeme hervorragende U-Werte ermöglichen kann. Beispielsweise wäre mit einer der beschriebenen Mattendämmungen in zweilagiger Anwendung mit einer Gesamtstärke von 11 mm bereits ein Wärmedurchgangskoeffizient von ca. 0,7 W/(m²K) zu erreichen.

Möglichkeiten zur Herstellung solcher mattenartiger Systeme, die in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien transluzent bis opak wären, wurden skizzenhaft dargestellt.

6 Nichttragende Außen-Wandsysteme mit integrierten Vakuum-Dämmsystemen

Die in diesem Teil vorgestellten, aus den speziellen Eigenschaften von (weichen) Vakuum-Dämmsystemen entwickelten Wandsysteme befinden sich hinsichtlich des Verhältnisses Wandstärke zu Wärmedämmleistung in der Nähe des derzeit technischen Optimums.

Der Grund dafür liegt im verfolgten Ansatz, der darin besteht, die plattenförmigen Vakuum-Dämmsysteme unter Minimierung von Wärmebrücken nur um das konstruktiv notwendige zu ergänzen, um so zu einem den allgemeinen Anforderungen gewachsenen, nichttragenden Außenwandsystem zu gelangen.

Während die ersten vier Varianten durch Seilnetze stabilisiert sind, übernimmt dies im letzten Beispiel eine beidseitige Membranlage. Die vorgeschlagenen Systeme könnten gleichwohl auch in Verbindung mit weniger komplexen Tragsystemen (zum Beispiel mit einem einheitlichen Stützraster) eingesetzt werden.

Wärmebrücken werden in den Vorschlägen durch die zweilagige und versetzte Anordnung der Vakuum-Dämmsysteme auf ein punktförmiges Minimum reduziert.

Die resultierenden U-Werte werden nahezu ausschließlich von den verwendeten Dämmsystemstärken bestimmt. Sie sind daneben abhängig von den Randanschlüssen, die, ebenso wie die Art der statischen Integration, von den individuellen Bedingungen der jeweiligen Bauaufgabe abhängen (und hier daher nicht behandelt werden).

7 Der Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen als temporärer Wärmeschutz

In Teil 4 wurde der temporäre Wärmeschutz als wesentliche, bisher nicht untersuchte Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen identifiziert. Aus der Fülle verschiedener vorstellbarer, vakuum-gedämmter Manipulatoren wurden Lamellen als Testfall ausgewählt. Die komplexen, geometrischen Auswirkungen auf die notwendigen

seitlichen, abdichtenden Randprofile wurden anhand einer Auswahl einfacher Bewegungsarten systematisch aufgezeigt.

Eine wärmetechnische Untersuchung von drei Lamellenvarianten mit integrierten Vakuum-Dämmsystemen in verschiedenen Ausführungen zeigt die quantitative Bedeutung wesentlicher Randparameter für den Wärmedurchgang: Stoßausbildung, Art der thermischen Trennung, verwendetes Außenmaterial usw.

Neben dem Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen findet auch der Versagensfall der integrierten Vakuum-Dämmsysteme durch Belüftung Berücksichtigung.

Es zeigt sich, dass sich der U-Wert der besten untersuchten Lamelle (evakuierte Aluminiumlamelle, thermisch getrennt, mit Kieselsäurefüllung) gegenüber einer Standard-Aluminiumlamelle (nicht gedämmt, ohne thermische Trennung) um mehr als den Faktor 20 verbessert.

Veranlasst durch diese positiven Zwischenergebnisse wurden im folgenden zwei der untersuchten Varianten ausgewählt, weiterentwickelt und als Prototypen hergestellt.

Gleichzeitig wurden in weiteren detaillierteren thermischen Untersuchungen nicht nur die Prototypen selbst, sondern auch die sich zwischen den geschlossenen Lamellen

ergebenden Stoßbereiche mittels thermischer Simulationen erfasst.

7.1 Membranbespannte Lamelle mit VIP-Kern

Hergestellt wurde ein Prototyp mit einer durch das integrierte VIP beschränkten Länge von 100 cm. Als Membranmaterial kam eine Standard-ETFE-Folie mit einer punktförmigen Bedruckung zum Einsatz, die bisher noch nicht für den Verwendungszweck dieser Lamelle optimiert werden konnte.

Für diese Konstruktionsvariante wurde mittels thermischer Simulationen ein den Lamellenstoß einschließender U-Wert zwischen 0,65 und 0,81 W/(m²K) ermittelt, womit sich der U-Wert einer Verglasung mittlerer Qualität temporär von 1,7 auf ca. 0,5 - 0,6 W/(m²K) verbessern ließe.

7.2 Polycarbonat-Lamelle mit Aerogel-Granulat-Füllung

Für diese Lamelle wurde ein den Lamellenstoß einschließender U-Wert von ca. 0,35 (Variante 2, evakuiert) bzw. ca. 0,69 W/(m²K) für die nicht evakuierte Variante 2 ermittelt.

Mit einer solchen Lamelle ließe sich gemäß der Untersuchungen der U-Wert einer Verglasung mittlerer Qualität temporär von 1,7 auf 0,4 respektive 0,6 W/(m²K) verbessern.

8 Untersuchung zu linearen Wärmebrücken (Anhang 1)

Diese im Anhang platzierten Untersuchungen dienten einem differenzierteren Verständnis eines Kernproblems im Umgang mit Vakuum-Dämmsystemen.

Das Augenmerk richtete sich nicht auf die lineare Wärmebrückenwirkung der eigentlichen Systeme selbst, für die bereits zahlreiche Untersuchungen vorliegen und die in Anbetracht der heute für weiche Vakuum-Dämmsysteme verfügbaren Folienmaterialien keine allzu bedeutsame Rolle mehr spielen, sondern vielmehr den in den meisten vorstellbaren Wandaufbauten unvermeidlichen, konstruktiv bedingten, linearen Durchdringungen der Dämmebene.

Diese parametrisierte Untersuchung mittels 144 thermischer Einzelsimulationen stellt nach Kenntnis des Verfassers die erste systematische Studie zu dieser Fragestellung dar.

Die Ergebnisse geben dem Planer die Möglichkeit, die Auswirkungen linearer Wärmebrücken in vergleichbaren Wandaufbauten mit Vakuum-Dämmsystemen durch die visualisierten Effekte besser zu verstehen und unter vergleichbaren Umständen quantitativ abzuschätzen.

Sie zeigen aber auch, dass der häufigst anzutreffende Hinweis auf

die thematisierte Problematik begründet ist, da sich eine Einschätzung der Wirkung linearer Wärmebrücken im Zusammenhang mit VIP-Konstruktionen aufgrund des sehr hohen Kontrastes der nebeneinander auftretenden Wärmeleitfähigkeiten dem ‚Gefühl‘ des Planers nur allzu leicht entzieht.

9 Untersuchungen zum Potenzial temporären Wärmeschutzes (Anhang 2)

Der Untersuchung, in deren Verlauf 32 einzelne thermische Simulationen einer Heizperiode durchgeführt wurden, kommt eine hohe Bedeutung zu, da sie die Sinnhaftigkeit der in Teil 7 dargestellten Annahmen und daraus abgeleiteten Entwicklungen bestätigt:

Die Wirkung von Maßnahmen zum temporärem Wärmeschutz auf die Transmissionsverluste sind im Falle der untersuchten Grundkonfiguration einer einfachen Bürozeile beachtlich, sie lassen sich auf die Heizperiode bezogen um nahezu 50 % reduzieren.

Es wurden wesentliche Kriterien identifiziert, die für eine erfolgreiche und sinnvolle Anwendung von temporärem Wärmeschutz maßgeblich sind.

Insbesondere ergibt sich ein hohes Potenzial für Gebäude aus dem sogenannten ‚Altbestand‘ und für Nutzungen, die auch in Zeiten

ohne solares Strahlungsangebot konstant hohe Innenraumtemperaturen erfordern, wie zum Beispiel Kliniken.

Der Zusammenhang mit anderen Einflussgrößen, wie Luftwechsel, Heizstrategie, Sonnenschutz usw., und anderen Aspekten, wie beispielsweise der Behaglichkeit und den Auswirkungen auf zu erwartende Kondensaterscheinungen und deren Folgen, wurde diskutiert.

10 Ausblick

10.1 Mattenartige Vakuum-Dämmsysteme (Teil 5)

Die gemäß der Ausführungen in Teil 5 vielversprechenden Vakuum-Dämmungsmatten könnten in einem Forschungsprojekt unter Einbeziehung von Industriepartnern weiterentwickelt und optimiert werden.

Das gilt sowohl für opake Varianten als auch für transluzente, wobei hierfür vorgeschaltet zusätzliche Entwicklungsarbeit an den Basismaterialien eine Voraussetzung darstellten. Beispielhaft können hier transparente und transluzente Hochbarrierefolien genannt werden.

10.2 Nichttragende Außenwandsysteme (Teil 6)

Die vorgestellten, maßgeblich aus den Eigenschaften von Vakuum-Dämmsystemen abgeleiteten Außenwandsysteme erfordern eine

konkrete Bauaufgabe für die nächsten Entwicklungsschritte:

- Bestimmung des statischen Systems
- Bestimmung der maßlichen Ordnung und erforderlichen Formate
- Entwicklung geeigneter Randausschlüsse
- Detaillierte Entwicklung der erforderlichen Profile und Verbindungsmittel

Eine sich aus einer geeigneten Bauaufgabe ergebende Umsetzung könnte zu einer leistungsfähigen und ausdrucksstarken konkreten Lösung führen.

Das gilt aus Sicht des Verfassers besonders für Varianten mit integrierten transluzenten oder gar transparenten Vakuum-Dämmsystemen.

10.3 Hochwärmedämmende Manipulatoren (Teil 7)

Durch Übertragung der Ergebnisse dieses Teils auf die vorliegende, am Lehrstuhl von Thomas Herzog erarbeitete Dissertation ‚Wärme- und Sonnenschutzsysteme aus Holz für Doppelfassaden‘ von Werner Lang (2000) könnte der Betrachtungswinkel auf Zweite-Haut-Fassaden ausgedehnt werden.

Das gilt auch für die zahlreichen hier nur gestreiften Aspekte, die dort aufgrund einer abweichenden Schwerpunktsetzung vertieft Beachtung fanden, zum Beispiel zu

den Auswirkungen unterschiedlicher Oberflächenarten und -behandlungen.

10.3.1 Membranbespannte Lamelle mit VIP-Kern

Die bisher geleisteten theoretischen Untersuchungen sowie die Erfahrungen mit den gebauten Modellen zeigen einen Ausschnitt der Möglichkeiten dieses Lamellentyps.

Wichtige Fragen bedürfen einer konkreten Einbausituation für eine befriedigende Antwort. Dazu gehören primär

- die genaue Festlegung der Auswahlkriterien für das einzusetzende Membranmaterial und dessen Behandlung, also Art und Umfang der Beschichtung(-en) im Hinblick auf die für die jeweilige Einbausituation erforderlichen strahlungstechnischen Eigenschaften,
- die Berücksichtigung der Möglichkeit, auf Ober- und Unterseite Membranmaterialien mit verschiedenen Eigenschaften (zum Beispiel Transparenz- oder Reflexionsgrad) einzusetzen,
- die Bestimmung der Art der Befestigung und Bewegungsführung, und in engem Zusammenhang hiermit
- die Ausbildung der Stirnseiten (inklusive der Fassung des Membranrandes).

Darüber hinaus besteht für den Einbau der Membranmaterialien und die Art ihrer Fixierung ein weiteres Optimierungspotenzial, ebenso für die Ausbildung des Übergangs Rippe zu Klemmprofil bezüglich der sich einstellenden Membrankrümmung.

Die Firma Colt International GmbH (Kleve), eine der maßgeblichen internationalen Unternehmen für Spezialentwicklungen von Sonnenschutz- und Tageslichtlenksystemen, hat an diesem Lamellentyp großes Interesse und hat nach eingehender Prüfung beschlossen, die Weiterentwicklung finanziell und durch Einbringung umfangreicher eigener Erfahrung zu unterstützen. Die Kooperation hat Mitte 2005 begonnen.

10.3.2 Polycarbonat-Lamelle mit Aerogel-Granulat-Füllung

Die Erfahrungen mit dem Prototyp zeigen, dass weiterer Entwicklungsbedarf vor allem hinsichtlich folgender Aspekte besteht:

- Verfeinerung der Geometrie im Hinblick auf die Herstellung durch einen Extrusionsprozess
- Entwicklung einer geeigneten Beschichtung, die eine ausreichende Gasdichtigkeit dauerhaft gewährleistet und den weiteren Anforderungen (zum Beispiel Witterungseinflüssen) widersteht

- Entwicklung einer geeigneten Methode der Befüllung, durch die eine ausreichende und gleichmäßige Verdichtung gewährleistet wird
- Entwicklung eines geeigneten, ausreichend dichten, seitlichen Randabschlusses, als Voraussetzung für die geplante Evakuierung
- Untersuchung verschiedener Beschichtungsvarianten im Hinblick auf eine Modifikation der gestalterischen und optischen Eigenschaften (zum Beispiel Verringerung der Blendungswirkung, gegebenenfalls Optimierung der Lichtlenk- und Sonnenschutz-Eigenschaften)

Auch an diesem Lamellentyp besteht großes Interesse seitens der Industrie, namentlich der Firmen Cabot Nanogel GmbH (Frankfurt am Main) und GE Advanced Materials (Bergen/ NL). Daher ist auch hier geplant, die Lamelle im Rahmen einer Kooperation weiterzuentwickeln.

10.3.3 Weitere Aspekte

Folgende Aspekte sollten darüber hinaus hinsichtlich der Weiterentwicklung der vorgeschlagenen Lamellen zu marktreifen Produkten Berücksichtigung finden:

- Sicherstellung ausreichender Eigenstabilität für verschiedene Spannweiten

- Entwicklung thermisch geeigneter Randanschlüsse und passender Bewegungs- und Antriebssysteme
- Langzeitversuche unter realen Witterungsbedingungen in voller Exposition und in Zweite-Haut-Fassaden

10.4 Zum Potenzial temporären Wärmeschutzes (Anhang 2)

Ein wesentlicher Aspekt, der Einfluss der sogenannten Sekundärstrahlung von Sonnenschutz-einrichtungen, konnte während der erfolgten Untersuchung durch die eingesetzte Simulationstechnik nicht erfasst werden.

Hier jedoch ist ein wesentlicher, positiver Effekt von derart eingesetzten, hochgedämmten Manipulatoren zu vermuten, dem aber derzeit empirisch nachgegangen werden müsste.

Nach Kenntnis des Verfassers sind systematische Untersuchungen zu dieser Fragestellung am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik der TUM, Prof. Gerhard Hausladen, derzeit in Vorbereitung.

Literaturverzeichnis

1 Allgemein

Akita, J. u.a.: Optimization of vacuum sealing process for VIPs, NPC America Corporation, Mailand (IT): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1998

Akita, Jun: Optimization of Vacuum Sealing Process for VIPs, Baltimore (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1999

Arnold, Bruno: Einsatz von Vakuum-Dämmplatten als Hochleistungswärmedämmstoff im Hochbau, Information der Firma ZZ Wancor, Regensdorf (CH), 2001

Asano, Osamu: Vacuum Glazing for Transparent Thermal Insulating Material, Nippon Sheet Glass (NSG) Co.Ltd, Japan, Tampere (FIN): Glass Processing Days, 2003

Binz, A. u.a.: Vakuum-Dämmsysteme im Baubereich: Basisprojekt Systeme und Applikationen, Jahresberichte 2001 und 2002, Institut für Energie Fachhochschule beider Basel, Muttenz (CH), 2001 / 2002

Bobran-Wittfoht, Ingrid; Schlauch, Dirk: Dämmstoffe für den baulichen Wärmeschutz - (k)einer für alle Fälle, DETAIL, Zeitschrift für Architektur und Baudetail, Serie 2001-7, 10/2001 (2001), S. 1290 –1300

Böhme, Hartmut: Das Volle und das Leere. Zur Geschichte des Vakuums, in Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik (Hg.): Luft; Köln 2003, S. 42-67

Bonk, Michael; Anders, Frank: Reihe Schadenfreies Bauen, Band 32, Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz. Günter Zimmermann, Ralf Ruhnau (Hrsg.). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2004

Brachner, Alto (Hrsg.); Schneider, Ditmar; Weber, Otto; Unzeitig, Harriet: Geschichte der Vakuumpumpen. Zum 400. Geburtstag Otto von Guericke. München: Deutsches Museum, 2002

Brzezinski, Andrzej; Tleoubaev, Akhan: Transient Heat Flow Probe for Quick Tests of Vacuum Panels - Using Finite - Using Finite-Difference Method, LaserComp, Inc., Washington: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2003

Brunner, Samuel; Bundi, Reto: VIP, Service Lifetime Prediction, Edge Effect, Building Application, EMPA, Schweiz, Washington: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2003

Bundi, Reto: Vakuumisolierte Paneele, Zeitschrift Fassade (CH) 3/2003, S. 19-22

Bundi, R; Nussbauer, T.; Tanner, Ch.; Mühlebach, H.: Meßtechnische und rechnerische Untersuchungen an einer mit Vakuum-Isolations-Paneelen gedämmten Holztür. Berlin: Bauphysik 27 (2005), Heft 1, S. 21 - 27

Cammerer, Walter F.: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. Berlin: Springer, 1995

Caps, R.; Heinemann, U.; Ehrmanntraut M.; Fricke J.: Evacuated Insulation Panels Filled with Pyrogenic Silica Powders: Properties and Applications, High Temp.- High Press. 33 (2001), S. 151-156; auch: 15th European Conference on Thermophysical Properties (ECTP), Würzburg, 1999, Proceedings, S. 815-820

Caps, R.; Fricke, J.: Konzepte für den Einsatz von evakuierten Dämmungen bei Passivhäusern, Tagungsband 4. Passivhaus-Tagung, Kassel (2000)

Caps, R.; Fricke, J.: Thermal Conductivity of Opacified Powder Filler Materials for Vacuum Insulations, J. Thermophysics 21 (2000), S. 445–452

Caps, Roland: Renovation of a Gable Facade with Vacuum Panels, Va-Q-Tec AG, Rom: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2001

Caps, R.; Ehrmanntraut, M.: Vakuumisolationspaneelle - Anwendungen für Kälte- und Wärmespeicher, Vortrag AA.II.1.7, Ulm: Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2001

Caps, Roland: Maßnahmen zur Qualitätssicherung von Vakuumdämmplatten, Firma va-Q-tec AG, Würzburg, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003; unter gleichem Titel und Quellangaben findet sich unter <http://www.va-Q-tec.com> <03.2004> ein Beitrag mit leicht verändertem (textlich und bildlich erweitertem) Inhalt, hier als Vers.2 bezeichnet

Caps, Roland: Kann der langfristige Anstieg der Wärmeleitfähigkeit in VIPs wesentlich verringert werden?, va-Q-tec AG, Wismar: 2. Fachtagung Evakuierte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2005, S. C1-C8

Caps, R.: Monitoring Gas Pressure in Vacuum Insulation Panels, Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 57-66

Carmi, Yoash: Ultra High Barrier Films for Long Term VIP Applications: The Next Generation, Hanita Coatings, Atlanta (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2002

Cziesielski, Erich (Hrsg.): Bauphysik Kalender, 4. Jahrgang. Berlin: Ernst & Sohn, 2004. Hierin insbesondere: Willems, Wolfgang M.: Kapitel B2 Vakuumdämmung, S. 83-124

Damani, M.: Herstellung hochisolierender Keramik-Dämmstoffe, Schlussbericht Vorstudie, EMPA-Bericht 201.989/II, Dübendorf (CH): EMPA Hochleistungskeramik, 2001

Deimling, Axel: Wärmedämmung von Vakuum-Stahlmantel-Fernheizrohren, Dissertation an der Universität Dortmund, 1983

Duffie, John A.; Beckmann, W. A.: Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Edition. New York, USA: John Wiley & Sons, Wiley-Interscience, 1991

Eberhardt, Hans-Frieder: Custom Aerogels Designed for Vacuum Insulation Panels, Cabot Corporation, Rom: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2001

Ebert, Andree: VIP in der Anwendung mit beheizten Innenflächen, Fa. Metallbau Ralf Boetker GmbH, Bremen, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Erb, Markus; Eicher, Hanspeter; Binz, A.: Hochleistungswärmedämmung HLWD, Schlussbericht Dezember 2000, Dr. Eicher + Pauli AG und Institut für Energie Fachhochschule beider Basel, Liestal und Muttenz (CH), 2000

Erb, Markus; Eicher, Hanspeter: Hochleistungswärmedämmstoffe, Dr. Eicher + Pauli AG, Liestal (CH), 2001

Erb, Markus; Eicher, Hanspeter: Vakuum-Dämmung, Dr. Eicher + Pauli AG, Liestal, Schweiz, in EnergieEffizientes Bauen 3/2001, S. 39f

Erbenich, Gregor: Vacuum Insulation Panels in Building and Construction Applications, Fa. Porextherm-Dämmstoffe GmbH, Kempten, Washington: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2003

Erbenich, Gregor: Anwendungen von VIP im Bauwesen, Fa. Porextherm-Dämmstoffe GmbH, Kempten, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Ehrmanntraut, Michael: PUR based Vacuum Insulation Panels, Elastogran (BASF Group), va-Q-tec, Washington: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2003

Flagge, Ingeborg; Herzog-Loibl, Verena; Meseure, Anna (Hrsg.): Thomas Herzog, Architektur + Technologie. München, London, New York: Prestel Verlag, 2001

Fricke, Jochen: Materials Research for the Optimization of Thermal Insulations, High Temp.- High Press. 25 (1993), S. 379-390; auch: 13th European Conference on Thermophysical Properties (ECTP), Lisabon, 1993, Proceedings, S. 207-218

Fricke, Jochen: From Dewars to VIPs - One Century of Progress in Vacuum Insulation Technology, ZAE-Bayern, Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 5-14

Gellert, Roland: Bauaufsichtliche Anforderungen an Dämmstoffe am Beispiel von Vakuumdämmplatten, FIW München, Gräfelfing, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Gellert, Roland: Einflussfaktoren auf die bauphysikalischen Eigenschaften von VIPs: vom Labormesswert zum anwendungsbezogenen Bemessungswert, FIW München e.V., Wismar: 2. Fachtagung Evakuierte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2005, S. T1-T8

Ghazi Wakili, K.; Bundi, R.: Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels (VIP) used in building constructions. Building Research and Information 32 (4), 2004, S. 293-299

Ghazi Wakili, K.: Thermal Performance of VIP Assemblies in Building Constructions, EMPA, Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 131-138

Gossauer, Elke: Entwicklungsstand und Einsatz von Vakuum-Dämmpaneelen im Baubereich, Diplomarbeit, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, Prof. Andreas Wagner, Fakultät Architektur, Universität Karlsruhe, 2001

Hangleiter, Matthias: Entwicklung von vakuumedämmten Betonfertigteilen (VIPBON), Folienpräsentation. Ravensburg: Hangleiter GmbH & Co. KG, 2004

Hausladen, Gerhard u.a.: ClimaDesign, München: Callwey, 2005

Heinemann, U. u.a.: Characterization and Optimization of Filler Materials for Vacuum Insulations, Bavarian Center for Applied Energy Research (ZAE Bayern), Mailand (IT): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proc., 1998

Heinemann, Ulrich: Application of Vacuum Insulation in Buildings, ZAE-Bayern, Vancouver (CA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2000

Heinemann, Ulrich: Evakuierte Isolationen im Überblick, ZAE Bayern, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Heinemann, Ulrich: Influence of Water on the Total Heat Transfer in 'Evacuated' Insulations, ZAE-Bayern, Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 23-34

Herzog, Thomas; Natterer, Julius: Gebäudehüllen aus Glas und Holz. Maßnahmen zur energiebewußten Erweiterung von Wohnhäusern. Lausanne: Presses Polytechniques Romandes, 1986

Herzog, Thomas: Transluzente Bauteile - Anmerkungen zu ihrer Wirkung in Almanach 90/92, Fachbereich Architektur der TH Darmstadt, S.92-95, Darmstadt: Verlag Das Beispiel, 1992

Herzog, Thomas: Wohltemperierte Bunker, Über Ökologisches Bauen und intelligente Gebäude. in: Deutsches Architektenblatt 5/98, S. 592-594

Herzog, Thomas; Krippner, Roland: Synoptical Description of Decisive Subsystems of the Building Skin. In: Pontenagel, Irm; Eurosolar (Hg.): Building a new Century. 5th Conference Solar Energy in Architecture and Urban Planning. Proceedings. Bonn: Eurosolar-Verlag, 1999, S. 306-310

Herzog, Thomas; Krippner, Roland: Gebäudehülle. Synoptische Darstellung maßgeblicher baulicher Subsysteme der Gebäudehülle mit Schutz- und Steuerungsfunktionen als Voraussetzung für die experimentelle Arbeit an ihrer energetischen und baukonstruktiven Optimierung. Abschlußbericht (unveröffentlicht). München: Technische Universität München, 2000

Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner: Fassadenatlas, München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2004

Hunter, Rick: A New Class of High Performance Vacuum Insulation Panels, Oceaneering Space Systems, Baltimore (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1999

Jacobsen, Sven: Hochbarrierefolien für Vakuum-Isolationspaneele - eine Übersicht, Wipak Walsrode GmbH, Walsrode, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierter Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Jensen, K.I.; Schultz, J.M.: Highly Insulating and Light Transmitting Aerogel Glazing for Window (HILIT Aerogel Window). Publishable Report (Abschlussbericht, unveröffentlicht), EU-Research Project HILIT1 (Contract JOR3-CT97-0187). Department of Civil Engineering (BYG • DTU), Technical University of Denmark, 2001

Jensen, K.I.; Schultz, J.M.; Kristiansen, F.H.: Development of windows based on highly insulating aerogel glazings. In Journal of Non-Crystalline Solids 350 (2004), S. 351-357

Kendrick, Christopher: Thermal Analysis of Prototype VIP Building Cladding Systems, Oxford Centre for Sustainable Development, Oxford Brookes University UK, Washington: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2003

Keur, Arij: The Intelligent Machinery Choice, The Vac Company, Vancouver (CA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2000

Koschade, Rolf: Die Sandwichbauweise. Berlin: Ernst & Sohn, 2000

Küçükpinar, Esra u.a.: Characterization of Open Cell Filler Materials for Vacuum Insulation, Arçelik A.S., Mailand (IT): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1998

Küçükpinar, Esra: Experimental and Theoretical Evaluation Methods of Vacuum Level Change Inside Various Types of Vacuum Insulation Panels, ARCELİK A.S., Rom: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2001

Lamb, W.; Zeiler, R.: Designing Non-Foil Containing Skins for Vacuum Insulated Panels (VIP) Applications, Dupont Company, Packaging & Industrial, Polimers, Mailand (IT): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1998

Lang, Werner: Wärme- und Sonnenschutzsysteme aus Holz für Doppelfassaden, Dissertation, München: Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog, TU München, 2000

Mainka, G.-W.; Paschen, Heinrich: Wärmebrückenatlas, B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden: 1986

Malone, B.; Weir, Kevin: State of the Art for VIP Usage in Refrigeration Applications, 2001, Quelle: <http://www.dupontteijinfilms.com/datasheets/markets/Reprint-IAM-2001-VIP-usage-in-refig.pdf> <05.2003>

Manini, P.: Vacuum Issues in Vacuum Insulated Panel Technology and the role of the Getter, SAES Getters SpA, Mailand (IT): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1998

Mathis, Nancy: Implementation of Rapide Nondestructive Thermal QC Test for Vacuum Insulation Panels for Appliance Manufacturing, Mathis Instruments Ltd., Rom: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2001

Mincks, William: Implementing VIP into Building Construction, NAHB Research Center, Rom: Vacuum Insulation Association (VIA) Symp., Proceedings, 2001

Mukhopadhyaya, Phalguni; Kumaran, Kumar; Lackey, John; Normandin, Nicole: Long-term Thermal Performance of VIPs, National Research Council Canada, Washington: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2003

Nakatou, Nobuyuki: High Barrier Film for VIPs, Toyo Aluminium K.K., Atlanta (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2002

Nelson, Bryan; Olson, Eric: Permeation Issues in Vacuum Panel Manufacturing and Design, Advantek, Inc., Vancouver (CA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2000

Ng, Nelson: Single-Step Manufacture of Vacuum Glazing, School of Physics University of Sydney, Australia, Tampere (FIN): Glass Processing Days, 2003

Nowara, Ekkehard: tempsave® elements – VakuumWärmedämmelemente mit Stahldeckschichten, lambdasave GmbH, Wismar: 2. Fachtagung Evakuierete Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2005, S. F1-F15

Oesterlein, A.: Special Machines for Production of large VIP, VacuMIT Maschinenbau GmbH, Mailand (IT): Vacuum Insulation Ass. (VIA) Symp., Proceedings, 1998

Ogden, Ray: Vacuum Insulation Based Building Cladding systems for UK and European Markets, Oxford Centre for Sustainable Development, Oxford Brookes University UK, Washington: Vacuum Insulation Ass. (VIA) Symp., Proceedings, 2003

Olgay & Olgay: Solar Control and shading Devices. Princeton (USA), Princeton University Press, 1957

Phillip, Brad L.; Shepodd, Timothy J.: Versatile New Polymer Based Getters, Vacuum Energy, Inc.; Sandia National Laboratories, Vancouver (CA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2000

Pringle, Thomas: Development of a Reusable VIP Shipping Container with Built-In Vacuum Indicator Device, ISC Inc., Rom: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2001

Pringle, Tom; Grogan, Kevin: The Commercialization of VIP Based Shipping Containers, Tuscarora ISC Group; Tuscarora Polyfoam Packers Group, Atlanta (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2002

Raicu, Alexandra; Noller, Klaus: Entwicklung innovativer Wärmedämmsysteme mit VIP für Anwendungen im Bauwesen, Fa. PSE GmbH, Freiburg, und Fraunhofer IVV, Freiburg, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierete Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Randel, Peter: Application of VIPs in Industrial Insulation, Wacker Chemie GmbH, Rom: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2001

Randel, Peter: New Applications of Vacuum Insulation in the Construction Industry, Wacker Chemie GmbH, Atlanta (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2002

Randel, Peter: Nanoporöse Dämmstoffe auf Basis Fumed Silica, Fa. Wacker-Chemie GmbH, Kempten, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierete Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Reim, M.: Highly Insulating Aerogel Glazing for Solar Energy Usage, Proc. 6th ISA, Albuquerque, 2000

Reisacher, Hannes: VIP - Stand der Technik, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierete Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Reyer, E.; Schild, K.; Völkner, S.: Kompendium der Dämmstoffe, (3. Aufl.). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2002

(Georg) Rimmele KG, Ehingen; Woschko Winlite GmbH, Weinsberg: FuE-Verbundprojekt: Solaroptimiertes Bauen; Entwicklung vakuumisolierter Paneele als wärmedämmende Elemente in Ziegel-Verbundsteinen, Freiburg: Status Seminar Energieoptimiertes Bauen ENOB, Proceedings, 2004

Roland, Conrad: Frei Otto - Spannweiten. Ideen und Versuche zum Leichtbau. Berlin, Frankfurt/Main, Wien: Verlag Ullstein, 1965

Schild, Kai; Weyers, Michael: Handbuch Fassadendämmsysteme. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003

Schittich, C.; Staib, G.; Balkow, D.; Schuler, M.; Sobek, W.: Glasbau Atlas. Edition Detail. München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation GmbH, 1998

Schlaich, Jörg; Schober, Hans: Verglaste Netzkuppeln. Bautechnik 69 (1992), H. 1, S. 3-10, Berlin: Ernst & Sohn, 1992

Schonhardt, U.; Binz, A, u.a.: Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP), Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Schweiz, Ittingen (CH), 2003

Schupp, H.B.: VIP im Mauerwerksbau, Fa. Georg Rimmele KG, Ehingen/ Donau, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierete Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Schwab, H.; Heinemann, U.; Fricke, J.: Vakuumisolationspaneele – ein hoch-effizientes Dämmsystem für die Zukunft, DETAIL, Zeitschrift für Architektur und Baudetail, Serie 2001-7, 10/2001 (2001), S. 1301–1304

Schwab, Hubert u.a.: Vakuumdämmung für Gebäude, Beitrag zur ZAE 10-Jahresfeier, Würzburg: ZAE-Bayern, 2001

Schwab, Hubert u.a.: Entwicklung und Anwendung von evakuierten höchsteffizienten Dämmungen für Gebäude (Vakuumdämmung für Gebäude), Abschlussbericht ZAE 2 - 1203 - 21, Würzburg: ZAE-Bayern, 2003

Schwab, Hubert: VIP unter baupraktischen Bedingungen. Erfahrungen aus dem Projekt: Vakuumdämmungen für Gebäude, ZAE Bayern, Würzburg, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuierete Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003

Schwab, H; Heinemann, U.; Beck, A.; Ebert, H.-P.; Fricke, J.: Permeation of Different Gases Through Foils used as Envelopes for Vacuum Insulation Panels, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 28, No. 4, 2005, S. 293-317

- Schwab, H; Heinemann, U.; Beck, A.; Ebert, H.-P.; Fricke, J.: Dependence of Thermal Conductivity on Water Content in Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernels, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 28, No. 4, 2005, S. 319-326
- Schwab, H; Heinemann, U.; Beck, A.; Ebert, H.-P.; Fricke, J.: Predictions for the Increase in Pressure and Water Content of Vacuum Insulation Panels (VIPs) Integrated into Building Constructions using Model Calculations, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 28, No. 4, 2005, S. 327-344
- Schwab, H; Heinemann, U.; Beck, A.; Ebert, H.-P.; Fricke, J.: Thermal Bridges in Vacuum-insulated Building Façades, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 28, No. 4, 2005, S. 345-355
- Schwab, H; Heinemann, U.; Beck, A.; Ebert, H.-P.; Fricke, J.: Prediction of Service Life for Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernel and Foil Cover, Journal of Thermal Envelope and Building Science, Vol. 28, No. 4, 2005, S. 357-374
- Sedlbauer, K.; Gabrio, T.; Krus, M.: Schimmelpilze - Gesundheitsgefährdung und Vorhersage. gi-Gesundheitsingenieur 123 (2002), Heft 6, S. 285-295
- Sedlbauer, K.; Lenz, K.; Leistner, Ph.; König, N.: Vakuumisolationspaneele aus hygrothermischer und akustischer Sicht, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Wismar: 2. Fachtagung Evakuerte Dämmungen im Bauw. (VIP-Bau), 2005, S. E1-E13
- Simmler, Hans: Vakuumdämmung - Qualitätssicherung und bauphysikalische Grundlagen, Jahresbericht 2002, EMPA Bauphysik, Dübendorf (CH), 2002
- Simmler, H.; Brunner, S.: Kann die Lebensdauer von Vakuumisolationssystemen vorausgesagt werden? Status-Seminar der EMPA 2004, Dübendorf (CH): Eidgenössische Materialprüfungsanstalt EMPA, 2004
- Smith, Douglas: Vacuum Panels Based on Nanoporous Fillers, Nanopore, Baltimore (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1999
- Smith, Douglas: The Use of Vacuum Insulation Panels at Temperatures far Removed from Ambient, NanoPore Inc., Vancouver (CA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2000
- Smith, Douglas; Roderick, Kevin; Braun, Robert; Glover, Brian: Novel Physical Forms and Applications of Vacuum Insulation, NanoPore Inc., Alamo, Washington: Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2003
- Smith, S.E.; Urso, C.: Analytical and Modeling Techniques for Rapid Determination of VIP Thermal Resistance, Holometrix, Mailand (IT): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1998
- Stölzel, Christof: VIP-gedämmte Außen-, Spezial- und Funktionstüren sowie Sandwichelemente für den Holzhausbau, Firma Variotec GmbH, Neumarkt, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuerte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003
- Stölzel, Christof: Vakuumgedämmte Verbundfertigteile im Passivhausstandard, Firma Variotec GmbH, Neumarkt, Freiburg: Status Seminar Energieoptimiertes Bauen ENOB, Proceedings, 2004
- Stovall, Therese K.: An Introduction to VIP Technology, Oak Ridge National Laboratory, Baltimore (USA): Vacuum Insulation Ass. (VIA) Symp., Proceedings, 1999
- Stovall, Therese K.: Vacuum Panel Performance, the Role of Standards and Test Procedures, Oak Ridge National Laboratory, Vancouver (CA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2000
- Tada, H.: Gas permeation through the pinholes of plastic film laminated with aluminium foil, Toyo Aluminium K.K., Mailand (IT): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1998
- Veltkamp, B.; Hoogendoorn, P.: Life expectancy of vacuum insulation panels with metal envelope, LEVEL energy technology, Mailand (IT): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1998
- Wachsmann, Konrad: Wendepunkt im Bauen. (Neuaufgabe der 1959 bei Krauskopf, Wiesbaden, erschienene Ausgabe), Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1989
- Weinläder, H.; Ebert, H. u.a.: VIG - Vacuum Insulation Glass, ZAE-Bayern, Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 197-204
- Westenberger, Daniel: Untersuchungen zu Vertikalschiebefenstern, Dissertation, München: Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog, TU München, 2005
- Willems, W.; Nowara E.; Keitzl, Ch.: Vakuüm: Hocheffiziente Wärmedämmung der Gebäudehülle. München: BDB-Nachrichten, Heft 4/2002, S. 49-50
- Willems, Wolfgang M.: Zur Dauerhaftigkeit ausgewählter Vakuüm-Dämmssysteme, Ruhr-Universität Bochum, Rostock-Warnemünde: 1. Fachtagung Evakuerte Dämmungen im Bauwesen (VIP-Bau), 2003
- Wong, Chang-Ming; Liaug, Wen-Chung; Hung, Ming-Lang; Chang, Chih-Chen: Porous Polystyrene Foam Produced by Carbon Dioxide and Nitrogen, Union Chemical Laboratories/ Industrial Technology Research Institute, Atlanta (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 2002

Wynne, Nick: Vacuum Panel Quality Control Measures for Manufacturing (Practical Quality Assurance for Vacuum Insulation), VacuPanel, Inc., Baltimore (USA): Vacuum Insulation Association (VIA) Symposium, Proceedings, 1999

Yamada, Muneto: Development on New Vacuum Insulation Panel, „Chip-Vacua“, Matsushita (Panasonic), Dübendorf (CH): 7th International Vacuum Insulation Symposium, 2005, Proceedings, S. 181-188

Zimmermann, Mark; Bertschinger, Hans (Ed.): Konferenzbericht „High Performance Thermal Insulation - Vacuum Insulated Products“, EMPA, Dübendorf (CH), 2001

Zürcher, Christoph; Frank, Thomas: Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis. Stuttgart: B.G. Teubner, 1998

1.1 Abschlussberichte IEA-Verbundprojekt: HiPTI - High Performance Thermal Insulation, IEA/ECBCS Annex 39

Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-Components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), beteiligte Firmen und Institutionen: EMPA - Switzerland, ZAE-Bayern - Germany, NRC - Canada, CSTB - France, Fraunhofer IVV - Germany, TU Delft - Netherlands, Dr. Eicher+Pauli AG - Switzerland, Online-Veröffentlichung auf www.vip-bau.ch <09.2005>

Vacuum Insulation in the Building Sector (Subtask B), beteiligte Firmen und Institutionen: FHBB - Switzerland, EMPA - Switzerland, ZAE-Bayern - Germany, TU Delft - Netherlands, KTH Stockholm - Sweden, Dr. Eicher+Pauli AG - Switzerland, Online-Veröffentlichung auf www.vip-bau.ch <09.2005>

2 Hilfsmittel

Duden - Die Chemie, Ein Sachlexikon der gesamten Schulchemie. (2. Auflage) Mannheim / Wien / Zürich: Dudenverlag, 1988

Edelmann, Christian: Vakuumtechnik, Grundlagen und Anwendungen. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig Verlag, 1985

Franke, Hans: Einführung in die Gasgesetze, Quelle: <http://www.lecksuchtechnik.de/> <05.2003>

Jousten, Karl (Hrsg.): Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Theorie und Praxis. 8. Auflage (Erstautor Max Wutz 1965). Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2004

Pupp, Wolfgang; Hartmann, Heinz K.: Vakuumtechnik, Grundlagen und Anwendungen. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1991

3 Gesetze, Regeln, Normen

DIN EN 832: 1998-12, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Berechnung des Heizenergiebedarfs, Wohngebäude, Berlin: Beuth Verlag

DIN 4108 Teil 1: 1981-08, Wärmeschutz im Hochbau, Größen und Einheiten, Berlin: Beuth Verlag

DIN 4108 Teil 2: 2003-07, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Berlin: Beuth Verlag

DIN 4108 Teil 3: 2001-07, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, Berlin: Beuth Verlag, - offiz. Berichtig. vom April 2002

DIN V 4108 Teil 4: 2002-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. (Vornorm). Berlin: Beuth Verlag

DIN V 4108 Teil 6: 2003-06, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. (Vornorm). Berlin: Beuth Verlag

DIN 4108 Teil 7: 2001-08, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Luftdichtheit von Gebäuden, Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele, Berlin: Beuth Verlag

DIN V 4108 Teil 10: 2002-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe, Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe. (Vornorm). Berlin: Beuth Verlag

Beiblatt 2 zu DIN 4108: 2004-01, Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele, Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 6946: 1996-11, Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Berechnungsverfahren, Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 7345: 1996-01, Wärmeschutz, Physikalische Größen und Definitionen, Berlin: Beuth Verlag

E DIN EN ISO 9229: 1997-06, Wärmedämmung, Begriffsbestimmungen, Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 9251: 1996-01, Wärmeschutz, Zustände der Wärmeübertragung und Stoffeigenschaften, Begriffe, Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 9288: 1996-08, Wärmeschutz, Wärmeübertragung durch Strahlung, Physikalische Größen und Definitionen. Berlin: Beuth Verlag

DIN EN ISO 9346: 1996-08, Wärmeschutz, Stofftransport, Physikalische Größen und Definitionen. Berlin: Beuth Verlag

Energieeinsparungsgesetz - EnEG, Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden, letzte Änderung vom 07.09.2005 nach dem zweiten Änderungsgesetz zum EnEG, Bundesgesetzblatt 2005 Teil I Nr. 56, S. 2682

Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV) vom 16. November 2001; sowie:

Neufassung der Energieeinsparverordnung (EnEV) vom 2. Dezember 2004;

Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16.12.2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD - Energy Performance of Buildings Directive), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, Nr. L 1 S. 65

DIN V 18599, Energetische Bewertung von Gebäuden, Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung. (Vornorm). Berlin: Beuth Verlag

4 Eigene Veröffentlichungen und Beiträge

Mitarbeit am Kapitel A1 ‚Grundlagen: Außen- und Innenbedingungen‘ (S. 18-25), und am Kapitel B1.5 ‚Metall‘ (S. 154-181) in Herzog, Thomas; Krippner, Roland; Lang, Werner: Fassadenatlas, München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation, 2004, als Übersetzungen in:

Part A1 ‚Fundamentals: Internal and external conditions‘ (S. 18-25), Part B1.5 ‚Metal‘ (S. 154-181) in Herzog, T.; Krippner, R.; Lang, W.: Facade Construction Manual, Basel / Boston / Berlin: Birkhäuser, 2004 (eigene englische Ausgabe),

Parte A1 ‚Fattori esterni e interni‘ (S. 17-25), Parte B1.5 ‚Metallo‘ (S. 154-181) in Herzog, T.; Krippner, R.; Lang, W.: Atlante delle Facciate, Torino (I): UTET Professionale s.r.l., 2005 (eigene italienische Ausgabe)

Cremers, Jan: Vakuum-Dämmsysteme, Systematisierung der Anwendungsmöglichkeiten und Vakuum-Dämmsysteme, Temporärer Wärmeschutz, Vortrag und 2 DIN-A0-Poster für Rahmenprogramm ‚Climadesign‘ im Bereich ‚Innovative Bauprodukte‘, Lehrstuhl Prof. Hausladen, TUM, auf der Messe BAU2005 (Jan. 2005) in München

Cremers, Jan: Vakuum-Dämmsysteme - Einsatzmöglichkeiten und planerische Hinweise (inkl. englischer Zusammenfassung) in DETAIL, Zeitschrift für Architektur + Baudetail, Serie 2005, 5, S. 522- 525

auch veröffentlicht im BAUNETZ in der Rubrik ‚Dämmstoffe/Publikationen‘ (seit 7-2005), sowie als Übersetzungen in:

Vacuum Insulation Systems - Possible Applications and Design Considerations in DETAIL (English Edition) 4-2005, S. 438-440

Sistemas aislantes al vacío Aplicaciones e indicaciones para su puesta en obra in DETAIL (Edición española) Año 2005 · 3, S. 346-348

真空断熱システム — 応用の可能性とデザインの要件

in DETAIL Japan 10-2005, S. 76-78

真空隔热系统

—可能的应用领域及其设计要点

Vacuum Insulation Systems - Possible Applications and Design Considerations in DETAIL China 5-2005, S. 102-107

Cremers, Jan: Wirkungsprinzip von Vakuum-Dämmsystemen in Fassade · Façade, Schweizerische Fachzeitschrift für Fenster und Fassadenbau, Heft 2-2005, S. 11-15

Cremers, Jan: Building in a Vacuum / Vacuum packed: insulation systems assessed in The Architects' Journal (AJ), London (UK), Issue 26/05/05, 2005, S. 38-41

Cremers, Jan: Systematisierung architektonischer Anwendungsmöglichkeiten von Vakuum-Dämmsystemen im Bereich der Gebäudehülle, Konferenz VIP-Bau: 2. Fachtagung ‚Erfahrungen aus der Praxis‘ am 16./17.06.2005 in Wismar, Tagungsband, S. P1-P11

Cremers, Jan: Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen - Lineare Wärmebrücken in Wandaufbauten in Fassade · Façade, Schweizerische Fachzeitschrift für Fenster und Fassadenbau, Heft 3-2005, S. 21-25

Cremers, Jan: Typology of Applications for Opaque and Translucent VIP in the Building Envelope and their Potential for Temporary Thermal Insulation, Proceedings, 7th International Vacuum Insulation Symposium 2005, September 28-29, 2005, Zürich-Dübendorf, Schweiz, Proceedings, S. 189-196

Cremers, Jan: Vacuum Insulating Systems, Poster A0 (Englisch) für IBME Intelligent Building Middle East 2005 vom 5.-7.12.2005 im Königreich Bahrain

Cremers, Jan: Haut und Hülle - Lernen von der ersten und zweiten Haut für die dritte? in XIA intelligente architektur, Zeitschrift für Architektur und Technik, Ausgabe 10-12/2005, S. 40-43

Inhaltsverzeichnis

Anhang 1

Lineare Wärmebrücken bei VIP-Konstruktionen

Abschnitt		Seite
1	Anlass für die Untersuchungen	206
2	Untersuchungsaufbau	206
2.1	Geometrische Szenarien	206
2.2	Simulationstechnik	207
2.3	Hinweise zu den Isothermen- und Heat-Flux-Darstellungen	207
2.4	Angesetzte Materialkennwerte	207
3	Ergebnisse	216
3.1	Ermittelte Werte	216
3.2	Interpretation der Ergebnisse	217
3.2.1	...im Vergleich zur jeweiligen Referenzvariante	217
3.2.2	...im Vergleich funktionsfähiger / nicht funktionsfähiger Vakuum-Dämmsysteme	217
3.2.3	Rückschlüsse aus den Isothermen- und Wärmefluss- Darstellungen	217
4	Weitere Verwendung der Ergebnisse	217
	Anmerkungen	219

Anhang 1

Untersuchungen zu den Auswirkungen linearer Wärmebrücken in Außenwandaufbauten mit Vakuum-Dämmsystemen

1 Anlass für die Untersuchungen

Offensichtlich sind die Auswirkungen von Wärmebrücken in Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen gravierender im Vergleich zum Einsatz konventioneller Dämmstoffe. Dies hat zwei Gründe, die in engem Zusammenhang stehen:

- erstens die erheblich geringere Wärmeleitung von Vakuum-Dämmsystemen und
- zweitens - und dies wirkt im Hinblick auf Wärmebrücken verstärkend - die deutlich geringeren Dämmschichtstärken.

Die daher auftretenden größeren Oberflächen-Temperaturunterschiede im Bereich von Wärmebrücken stellen eine potenziell große Gefahr für Tauwasserausfall dar und führen damit in der Folge zu möglichem Schaden für Konstruktion und Gesundheit.

Von vielen Seiten wird daher ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im Zusammenhang mit Vakuum-Dämmsystemen erhöhtes Augenmerk auf die Konstruktion und die damit verbundenen Wärmebrücken zu richten sei.¹

Auch sei eine genaue Abschätzung dieser Aspekte in der Planungsphase durch thermische und hygrische Simulationen in vielen Fällen unumgänglich.²

Die Ursache dafür liegt vermutlich auch darin, dass die quantitativen Folgen von Wärmebrücken schwer abschätzbar sind, da die resultierenden wirksamen Effekte ungleich komplexer sind als beispielsweise bei ungestörten, schichtenartigen Wandaufbauten.³

Die im folgenden vorgestellte Untersuchung hatte daher zum Ziel, im Zusammenhang mit Vakuum-Dämmsystemen auftretende lineare Wärmebrücken an variierten Beispielfällen zu quantifizieren und daraus allgemeinere Aussagen abzuleiten (und letztendlich dem Planer fundiertere Abschätzungen solcher Konstruktionen zu ermöglichen).⁴

Insbesondere standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Welche Abhängigkeit besteht zwischen der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung und der Signifikanz der Wärmebrücke?
- Wie wirken sich Variationen von Dämmstärke und Wärmebrückenbreite aus?
- Wie machen sich zusätzliche Schichten, die ihrerseits wieder wärmedämmend und -verteilend und hinter bzw. hinter und vor der

Dämmschicht angebracht sind, bemerkbar?

- Wie weit ‚streut‘ die Wärmebrücke in Richtung Feldrand?
- Wie sind die Auswirkungen auf den Gesamt-U-Wert?
- Wie ändern sich die Oberflächentemperaturen innen auf der ungestörten Fläche und im Bereich der Wärmebrücken?

Punktförmige Wärmebrücken, die natürlich auch Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen betreffen können, wurden hier aus mehreren Gründen nicht untersucht:

- Wegen der üblichen plattenförmigen Gestalt von Vakuum-Dämmsystemen dürften sie in der Praxis bis auf weiteres deutlich weniger oft anzutreffen sein.
- Die Simulation bedeutet einen ungleich höheren und vermutlich unverhältnismäßigen Aufwand.

- Es sind kaum parametrisierbare Szenarien vorstellbar, die darauf basierend allgemein verwertbare Aussagen zulassen würden.

Lineare Wärmebrücken ergeben sich bei der Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen, deren wesentliches Charakteristikum darin besteht, dass sie nicht durchdrungen werden können, insbesondere dann, wenn Schienensysteme eingesetzt werden, wie sie im all-

gemeinen zur Befestigung außenliegender Schalen oder Schichten benötigt werden, wenn diese nicht vollständig selbsttragend und stabilisiert sind.

Zu linearen Wärmebrücken kommt es darüber hinaus grundsätzlich auch im Randbereich von Vakuum-Dämmsystemen, da alle bekannten Hüllmaterialien über eine höhere Wärmeleitfähigkeit verfügen als die des evakuierten Dämmstoffs.

Bei einigen Anwendungsbeispielen ist dieser Effekt signifikant, wie zum Beispiel bei Paneelen mit Edelstahlblech als Hüllmaterial, bei VIP der aktuellen Generation in der Regel jedoch vor allem aufgrund der starken Reduzierung der Metallschichtstärken im Folienaufbau von untergeordneter Bedeutung.⁵

2 Untersuchungsaufbau

2.1 Geometrische Szenarien

Folgende Wandaufbauten liegen der Untersuchung zugrunde: Ein Massivholzelement von 1 m x 1 m und 60 mm Stärke ist außenseitig mit einem Vakuum-Dämmsystem versehen, das von einer horizontalen, linearen Wärmebrücke unterbrochen ist.

Vor der Dämmebene befindet sich in direktem Anschluss eine weitere Holzplatte von 15 mm (Fall 1). Für den zweiten Fall kommt der gleiche Aufbau, allerdings ohne

äußere Holzplatte, zum Einsatz - eine einer hinterlüfteten Fassade vergleichbare Situation.

Der dritte Fall hat nur noch das Vakuum-Dämmsystem und die Wärmebrücke im Blick, die dann - ohne die innenliegende Massivholzplatte - voll zur Wirkung kommt.

Jeder dieser Fälle wird einmal mit funktionstüchtigem, voll evakuiertem sowie mit schadhaftem, belüftetem Vakuum-Dämmsystem der Simulation zugrunde gelegt. Der Aufbau aller untersuchten Fälle ist in den Abb. A1.1 und A1.2 oben grafisch veranschaulicht.

Um zu quantitativen Aussagen über die Einzelsituation hinaus zu gelangen, werden sowohl die Abmessungen der Wärmebrückenbreite zwischen den Maßen 10 (entsprechend 1% der Gesamtfläche) und 50 mm (5% der Gesamtfläche) sowie die Stärke des Dämmsystems zwischen 10 und 40 mm (jeweils in Schritten von 10 mm) variiert.

Um verschiedene Wärmebrückenbreiten überhaupt sinnvoll untersuchen zu können, ist es erforderlich, dass die Wärmeleitfähigkeit des Wärmebrückenmaterials nicht zu hoch ist.⁶

Die Festlegung der Größe des betrachteten Ausschnitts von einem Quadratmeter hat den Vorteil, dass die flächenabhängigen Ergebnisgrößen (U-Wert und Wärmefluss) im Sinne der Veranschaulichung

leicht in absolute Größen umgedeutet werden können. Außerdem stellt dieses Maß sicher, dass sich der Einfluss der Wärmebrücke in allen betrachteten Varianten nicht bis zum Rand erstreckt, die Minderung des U-Wertes durch die Wärmebrücke also vollumfänglich erfasst ist.

Insgesamt ergeben sich sechs betrachtete Fälle, die ihrerseits jeweils in insgesamt 20 (= 4 x 5) Varianten nebeneinander gestellt sind. Für jede der sich daraus ergebenden 120 Fallvarianten ist eine eigene Geometrieerstellung und ein eigener Simulationsdurchlauf notwendig, da aus den oben angeführten Gründen eine ausreichend genaue Abschätzung nicht möglich ist.

2.2 Simulationstechnik

Um zu präzisen Aussagen über den Temperaturverlauf im Bauteil, die sich einstellenden Oberflächentemperaturen und die entsprechenden U-Werte zu gelangen, ist es erforderlich, ein FEM-basiertes Simulationswerkzeug heranzuziehen, da vereinfachende Verfahren die seitlichen Rand- und Streueffekte solcher Wärmebrücken nicht oder nur unzureichend erfassen können.⁷

Die Simulationen wurden mit den Programmen WINDOWS 5 und THERM 5.2 durchgeführt, die am Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL, San Francisco, USA) entwickelt wurden.

Weitere Angaben zu dieser Computersoftware finden sich in Teil 5, Abschnitt 4.1.

Die ermittelten Temperaturverläufe beziehen sich auf folgende, der Simulation zugrunde gelegten Randtemperaturen:

Außen 0°C und innen 20 °C.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die ermittelten Werte ohne empirische Validierung nicht als abgesichert gelten können.

Die vergleichsweise simple geometrische Ausgangssituation lässt allerdings eine hohe Genauigkeit der absoluten Werte und insbesondere der relativen Verhältnisse der einzelnen Varianten untereinander erwarten.

2.3 Hinweise zu den Isothermen- und Heat-Flux-Darstellungen

Neben dem U-Wert, der von einer kontinuierlichen Ausdehnung des gezeichneten Schnittbildes in z-Richtung und einer senkrechten Projektion in y-Richtung (also nicht kantenlängenbezogen) ausgeht, liefert die Simulationssoftware als weiteres Ergebnis den Verlauf der Isothermen und des Wärmeflusses (Heat-Flux) durch das Bauteil.

Für die grafische Darstellung wird das jeweils auftretende Temperaturspektrum (zwischen Minimum und Maximum auf den Oberflächen)

auf die verfügbaren Farben aufgespreizt. Daher ist für die Interpretation die individuell beigefügte Farblegende elementarer Bestandteil. Die Größenordnung der einzelnen Farben ist somit in jeder Darstellung unterschiedlich.

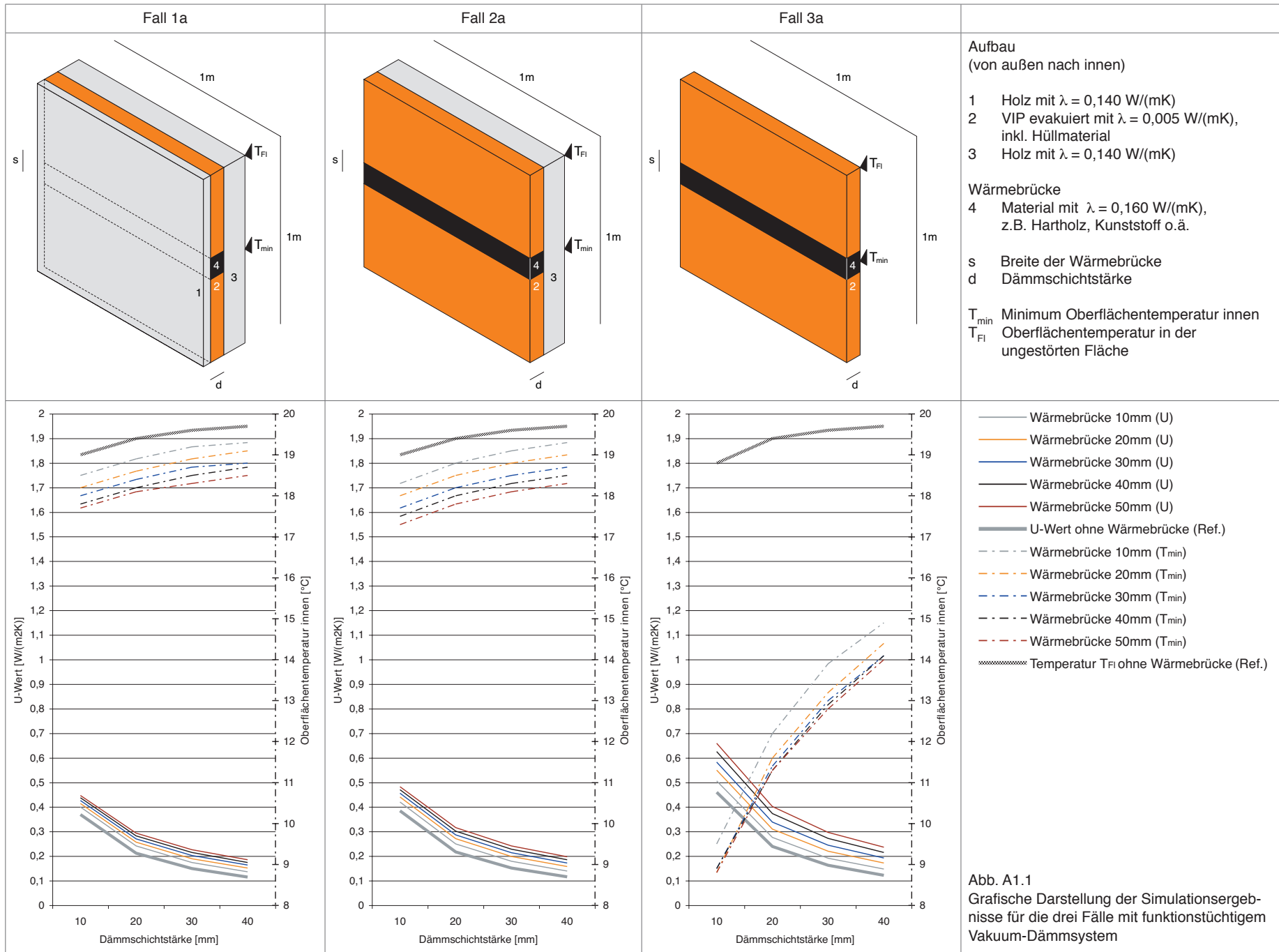
Die Isothermendarstellung gibt Auskunft über die zu erwartenden Oberflächentemperaturen. Zusammen mit einer entsprechenden Annahme von jeweils anzusetzender Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit ließe dies Aussagen über einen zu erwartenden Tauwasserausfall zu.

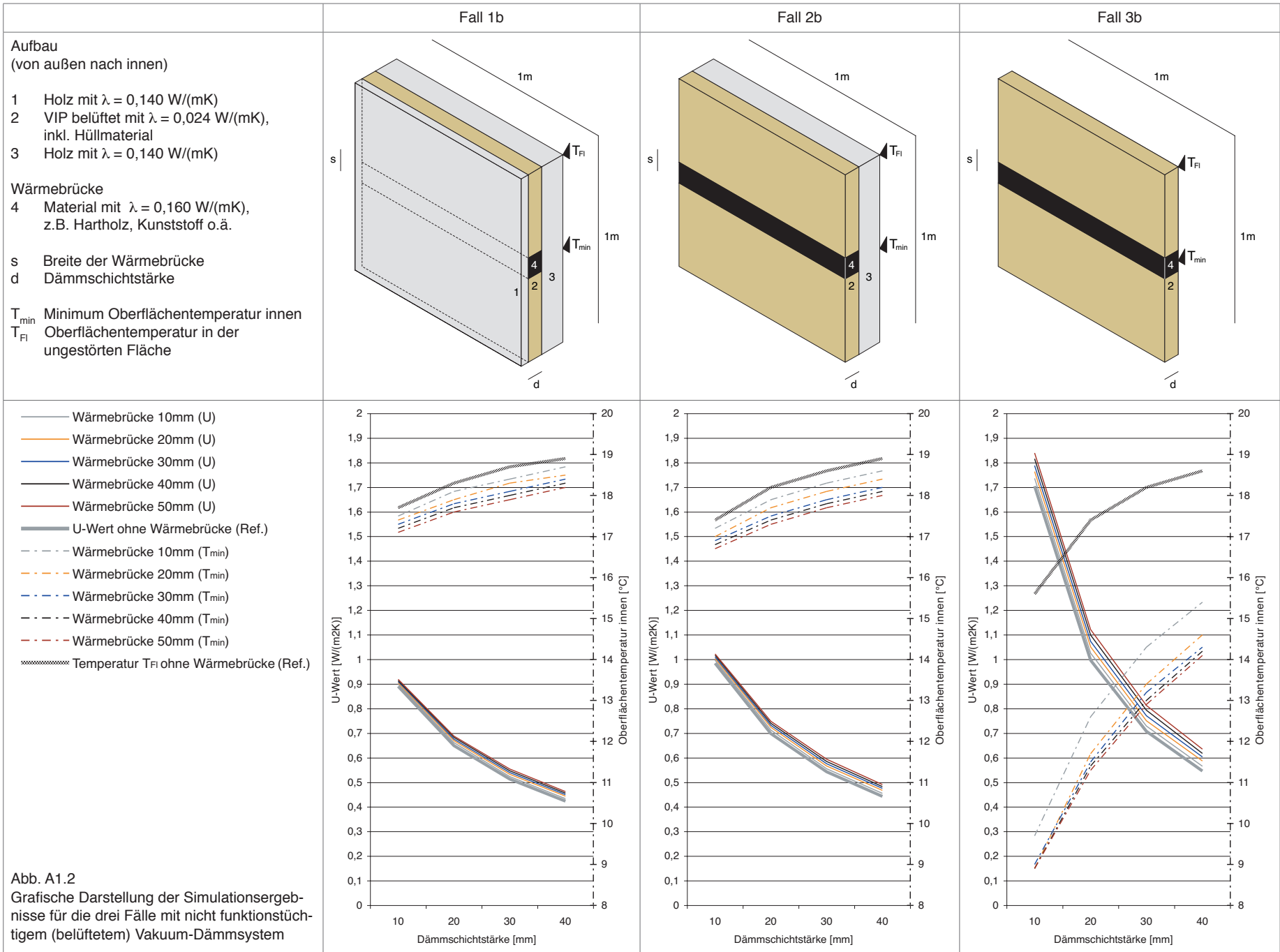
2.4 Angesetzte Materialkennwerte

Diese Untersuchung bemüht sich auf der einen Seite um möglichst allgemeingültige Aussagen, auf der anderen Seite ist es unumgänglich, ein ausreichend spezifisches Szenario zugrunde zu legen, um überhaupt quantitative und damit vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können.

Dies stellt in gewisser Weise einen unlösbaren Konflikt dar, dem hier vor allem in der parallel angelegten Betrachtung verschiedener Varianten begegnet werden soll.

Ähnliches gilt für die Festlegung der einzelnen Materialkennwerte, insbesondere der angesetzten Werte für die Wärmeleitfähigkeit, die den Darstellungen in Abb. A1.1 und A1.2 zu entnehmen sind.⁸





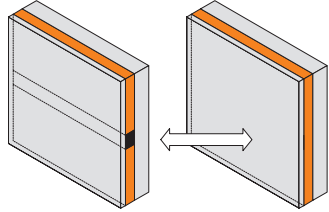
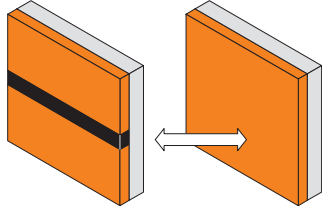
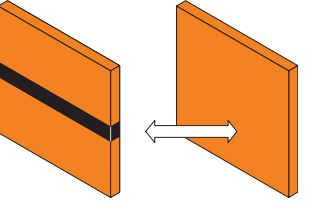
		Fall 1a					Fall 2a					Fall 3a				
																
		Referenzvergleich					Referenzvergleich					Referenzvergleich				
s	d	U-Wert	T _{min}	T _{Fl}	Zunahme U-Wert	T _{Fl} - T _{min}	U-Wert	T _{min}	T _{Fl}	Zunahme U-Wert	T _{Fl} - T _{min}	U-Wert	T _{min}	T _{Fl}	Zunahme U-Wert	T _{Fl} - T _{min}
[mm]	[mm]	[W/(m²K)]	[°C]	[°C]	[%]	[K]	[W/(m²K)]	[°C]	[°C]	[%]	[K]	[W/(m²K)]	[°C]	[°C]	[%]	[K]
10 (≅ 1% der Gesamtfläche)	10	0,4005	18,5	19,0	8,4%	-0,5	0,4209	18,3	19,0	9,4%	-0,7	0,5070	9,5	18,8	10,0%	-9,3
	20	0,2416	18,9	19,4	13,7%	-0,5	0,2501	18,8	19,4	15,0%	-0,6	0,2766	12,2	19,4	15,3%	-7,2
	30	0,1745	19,2	19,6	16,3%	-0,4	0,1793	19,1	19,6	17,7%	-0,5	0,1922	13,9	19,6	17,8%	-5,7
	40	0,1373	19,3	19,7	19,0%	-0,4	0,1404	19,3	19,7	20,2%	-0,4	0,1481	14,9	19,7	20,4%	-4,8
20 (≅ 2% der Gesamtfläche)	10	0,4151	18,2	19,0	12,3%	-0,8	0,4415	18,0	19,0	14,7%	-1,0	0,5501	8,8	18,8	19,4%	-10,0
	20	0,2579	18,6	19,4	21,4%	-0,8	0,2712	18,5	19,4	24,7%	-0,9	0,3110	11,6	19,4	29,7%	-7,8
	30	0,1904	18,9	19,6	26,9%	-0,7	0,1989	18,8	19,6	30,5%	-0,8	0,2205	13,2	19,6	35,2%	-6,4
	40	0,1525	19,1	19,7	32,2%	-0,6	0,1585	19,0	19,7	35,7%	-0,7	0,1724	14,4	19,7	40,2%	-5,3
30 (≅ 3% der Gesamtfläche)	10	0,4265	18,0	19,0	15,4%	-1,0	0,4563	17,7	19,0	18,6%	-1,3	0,5833	8,9	18,8	26,6%	-9,9
	20	0,2707	18,4	19,4	27,4%	-1,0	0,2873	18,2	19,4	32,1%	-1,2	0,3396	11,4	19,4	41,6%	-8,0
	30	0,2032	18,7	19,6	35,5%	-0,9	0,2145	18,5	19,6	40,7%	-1,1	0,2450	13,0	19,6	50,2%	-6,6
	40	0,1644	18,8	19,7	42,5%	-0,9	0,1727	18,7	19,7	47,9%	-1,0	0,1931	14,1	19,7	57,0%	-5,6
40 (≅ 4% der Gesamtfläche)	10	0,4378	17,8	19,0	18,5%	-1,2	0,4712	17,5	19,0	22,5%	-1,5	0,6264	8,9	18,8	35,9%	-9,9
	20	0,2830	18,2	19,4	33,2%	-1,2	0,3028	18,0	19,4	39,2%	-1,4	0,3738	11,3	19,4	55,9%	-8,1
	30	0,2153	18,5	19,6	43,5%	-1,1	0,2293	18,3	19,6	50,5%	-1,3	0,2731	12,9	19,6	67,4%	-6,7
	40	0,1751	18,7	19,7	51,7%	-1,0	0,1856	18,5	19,7	58,9%	-1,2	0,2158	14,1	19,7	75,4%	-5,6
50 (≅ 5% der Gesamtfläche)	10	0,4479	17,7	19,0	21,2%	-1,3	0,4835	17,3	19,0	25,7%	-1,7	0,6596	8,8	18,8	43,1%	-10,0
	20	0,2941	18,1	19,4	38,4%	-1,3	0,3162	17,8	19,4	45,4%	-1,6	0,4023	11,3	19,4	67,8%	-8,1
	30	0,2263	18,3	19,6	50,9%	-1,3	0,2425	18,1	19,6	59,1%	-1,5	0,2975	12,8	19,6	82,4%	-6,8
	40	0,1856	18,5	19,7	60,8%	-1,2	0,1980	18,3	19,7	69,5%	-1,4	0,2367	14,0	19,7	92,4%	-5,7
-	10	0,3696	-	19,0	-	-	0,3848	-	19,0	-	-	0,4608	-	18,8	-	-
	20	0,2125	-	19,4	-	-	0,2175	-	19,4	-	-	0,2398	-	19,4	-	-
	30	0,1500	-	19,6	-	-	0,1524	-	19,6	-	-	0,1631	-	19,6	-	-
	40	0,1154	-	19,7	-	-	0,1168	-	19,7	-	-	0,1230	-	19,7	-	-

Abb. A1.3 Tabellarische Zusammenstellung der numerischen⁹ Ergebnisse der Einzelsimulationen (Fälle mit funktionstüchtigem Vakuum-Dämmsystem)

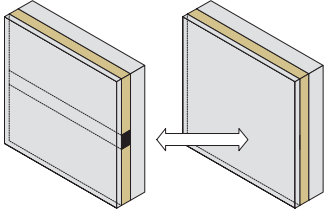
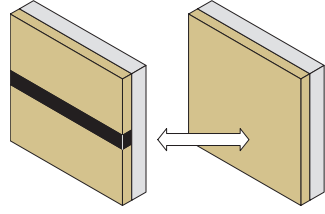
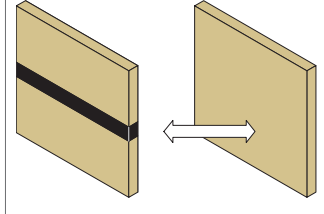
		Fall 1b					Fall 2b					Fall 3b				
																
		Referenzvergleich					Referenzvergleich					Referenzvergleich				
s	d	U-Wert	T _{min}	T _{Fl}	Zunahme U-Wert	T _{Fl} - T _{min}	U-Wert	T _{min}	T _{Fl}	Zunahme U-Wert	T _{Fl} - T _{min}	U-Wert	T _{min}	T _{Fl}	Zunahme U-Wert	T _{Fl} - T _{min}
[mm]	[mm]	[W/(m²K)]	[°C]	[°C]	[%]	[K]	[W/(m²K)]	[°C]	[°C]	[%]	[K]	[W/(m²K)]	[°C]	[°C]	[%]	[K]
10 (≅ 1% der Gesamtfläche)	10	0,9000	17,5	17,7	1,0%	-0,2	0,9965	17,2	17,4	1,2%	-0,2	1,7363	9,7	15,6	1,9%	-5,9
	20	0,6619	18,1	18,3	1,9%	-0,2	0,7131	17,9	18,2	2,1%	-0,3	1,0256	12,6	17,4	2,9%	-4,8
	30	0,5240	18,4	18,7	1,9%	-0,3	0,5558	18,3	18,6	2,3%	-0,3	0,7290	14,3	18,2	2,9%	-3,9
	40	0,4342	18,7	18,9	2,6%	-0,2	0,4558	18,6	18,9	2,9%	-0,3	0,5662	15,4	18,6	3,5%	-3,2
20 (≅ 2% der Gesamtfläche)	10	0,9055	17,4	17,7	1,6%	-0,3	1,0043	17,0	17,4	2,0%	-0,4	1,7645	8,9	15,6	3,5%	-6,7
	20	0,6699	17,9	18,3	3,1%	-0,4	0,7237	17,7	18,2	3,6%	-0,5	1,0511	11,7	17,4	5,5%	-5,7
	30	0,5329	18,3	18,7	3,7%	-0,4	0,5671	18,1	18,6	4,4%	-0,5	0,7512	13,4	18,2	6,1%	-4,8
	40	0,4443	18,5	18,9	4,9%	-0,4	0,4681	18,4	18,9	5,7%	-0,5	0,5874	14,6	18,6	7,4%	-4,0
30 (≅ 3% der Gesamtfläche)	10	0,9101	17,3	17,7	2,2%	-0,4	1,0105	16,9	17,4	2,6%	-0,5	1,7883	9,0	15,6	4,9%	-6,6
	20	0,6765	17,8	18,3	4,1%	-0,5	0,7324	17,5	18,2	4,9%	-0,7	1,0739	11,5	17,4	7,7%	-5,9
	30	0,5404	18,1	18,7	5,1%	-0,6	0,5766	17,9	18,6	6,1%	-0,7	0,7715	13,2	18,2	8,9%	-5,0
	40	0,4509	18,4	18,9	6,5%	-0,5	0,4763	18,2	18,9	7,5%	-0,7	0,6032	14,3	18,6	10,3%	-4,3
40 (≅ 4% der Gesamtfläche)	10	0,9147	17,2	17,7	2,7%	-0,5	1,0169	16,8	17,4	3,2%	-0,6	1,8163	8,9	15,6	6,6%	-6,7
	20	0,6829	17,7	18,3	5,1%	-0,6	0,7408	17,4	18,2	6,1%	-0,8	1,0990	11,4	17,4	10,3%	-6,0
	30	0,5476	18,0	18,7	6,5%	-0,7	0,5856	17,8	18,6	7,8%	-0,8	0,7932	13,0	18,2	12,0%	-5,2
	40	0,4562	18,3	18,9	7,7%	-0,6	0,4832	18,1	18,9	9,1%	-0,8	0,6184	14,2	18,6	13,1%	-4,4
50 (≅ 5% der Gesamtfläche)	10	0,9190	17,1	17,7	3,2%	-0,6	1,0224	16,7	17,4	3,8%	-0,7	1,8401	8,9	15,6	8,0%	-6,7
	20	0,6889	17,6	18,3	6,0%	-0,7	0,7483	17,3	18,2	7,2%	-0,9	1,1218	11,3	17,4	12,6%	-6,1
	30	0,5543	17,9	18,7	7,8%	-0,8	0,5940	17,7	18,6	9,3%	-0,9	0,8134	12,9	18,2	14,9%	-5,3
	40	0,4629	18,2	18,9	9,3%	-0,7	0,4913	18,0	18,9	10,9%	-0,9	0,6357	14,1	18,6	16,3%	-4,5
-	10	0,8909	-	17,7	-	-	0,9850	-	17,4	-	-	1,7045	-	15,6	-	-
	20	0,6497	-	18,3	-	-	0,6983	-	18,2	-	-	0,9967	-	17,4	-	-
	30	0,5141	-	18,7	-	-	0,5433	-	18,6	-	-	0,7082	-	18,2	-	-
	40	0,4234	-	18,9	-	-	0,4430	-	18,9	-	-	0,5468	-	18,6	-	-

Abb. A1.4 Tabella (akuum-Dämmsystem)

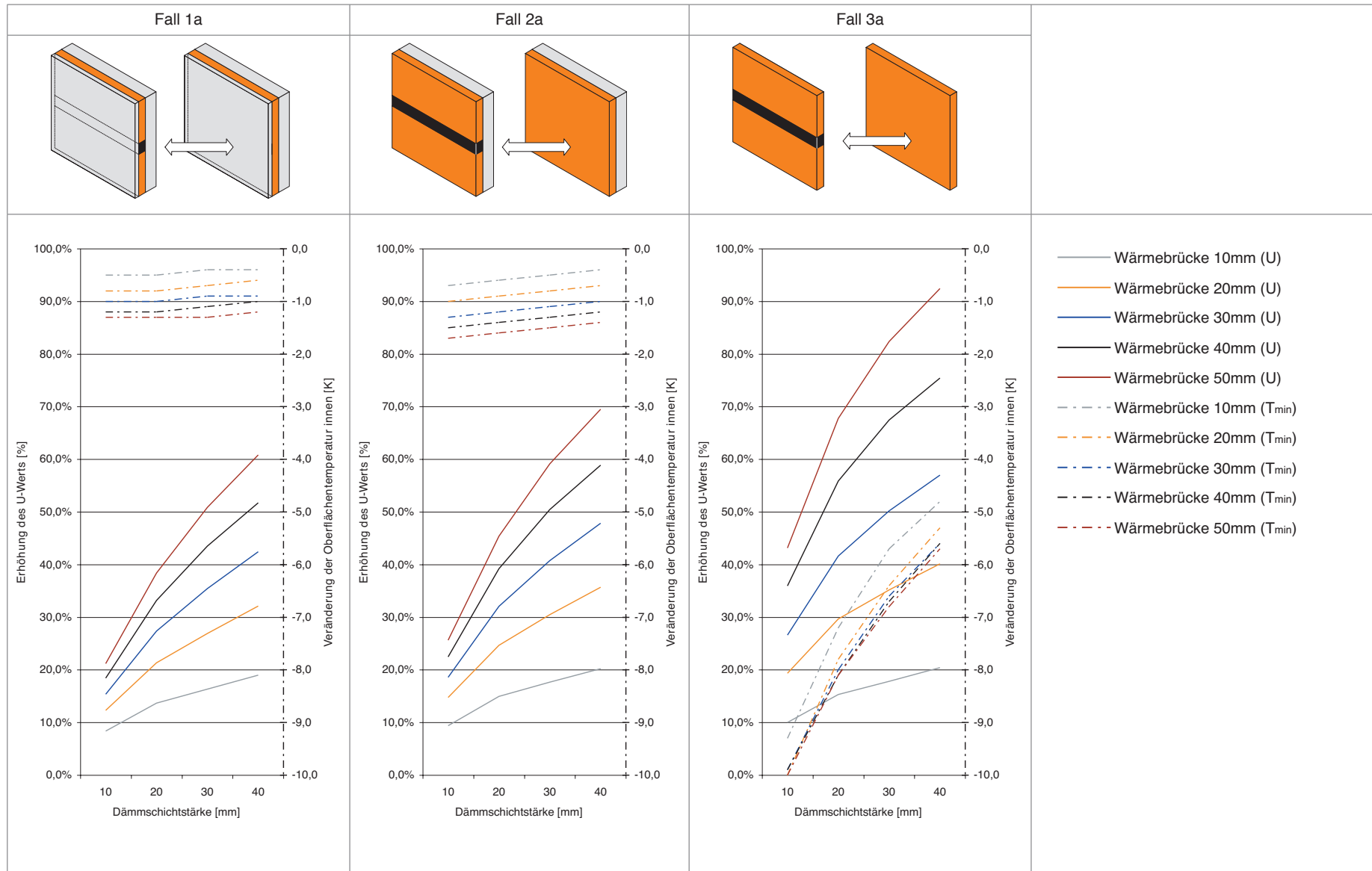


Abb. A1.5
 Vergleich der drei Fälle mit funktionstüchtigem Vakuum-Dämmsystem zu den entsprechenden Referenzsituationen in grafischer Darstellung

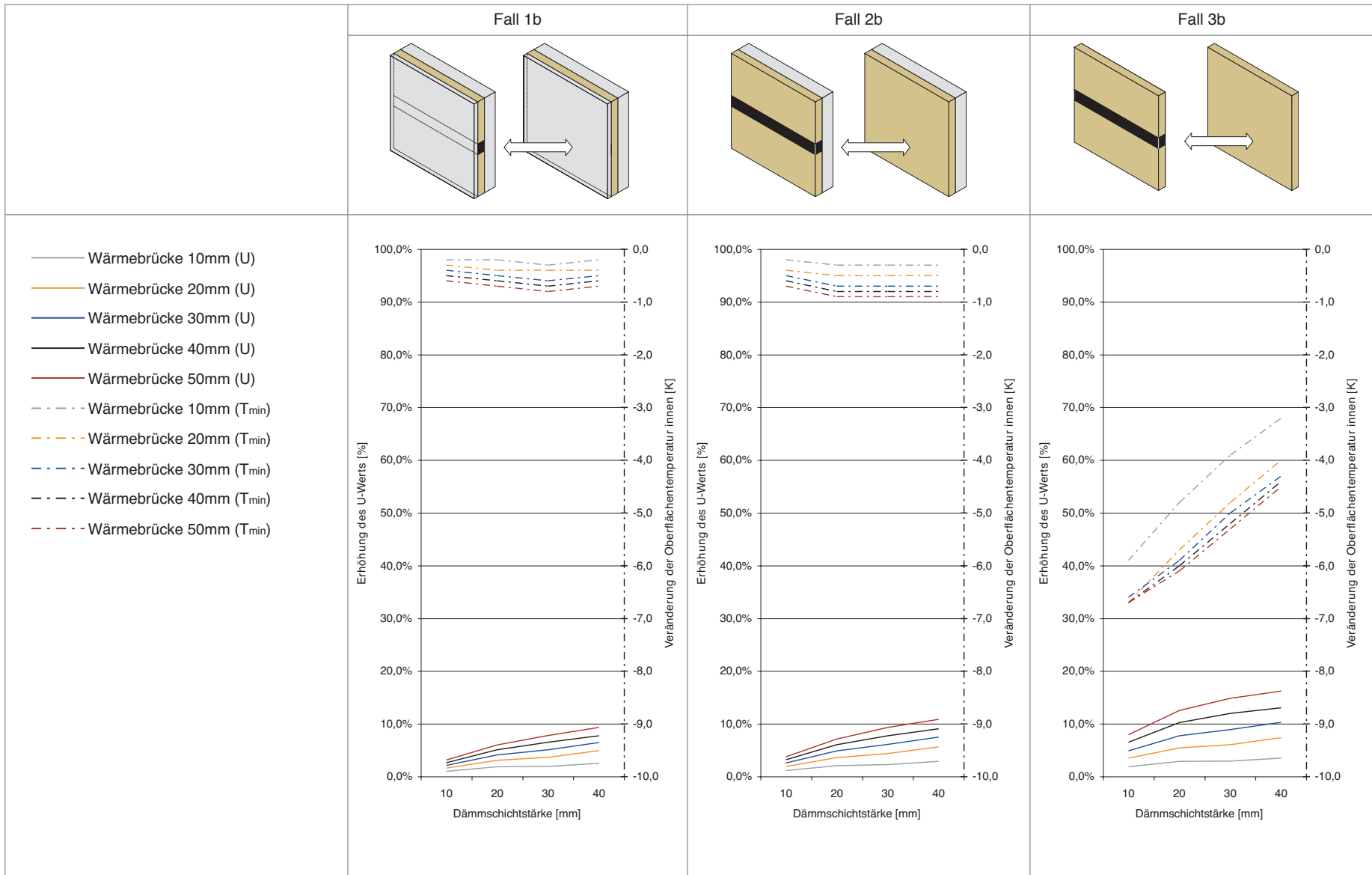


Abb. A1.6 Vergleich der drei Fälle mit nicht funktionstüchtigem (belüftetem) Vakuum-Dämmsystem zu den entsprechenden Referenzsituationen in grafischer Darstellung

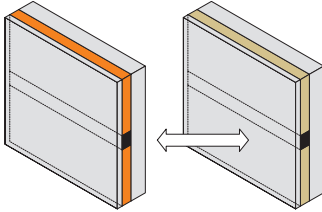
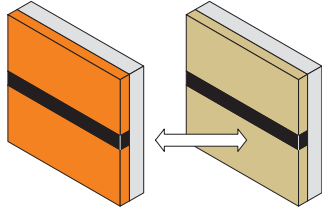
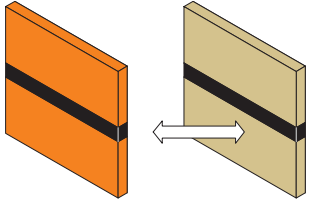
		Verhältnis Fall 1b zu 1a			Verhältnis Fall 2b zu 2a			Verhältnis Fall 3b zu 3a		
										
s	d	Veränderung			Veränderung			Veränderung		
		Zunahme U-Wert	ΔT_{\min}		Zunahme U-Wert	ΔT_{\min}		Zunahme U-Wert	ΔT_{\min}	
[mm]	[mm]	[W/(m²K)]	[%]	[K]	[W/(m²K)]	[%]	[K]	[W/(m²K)]	[%]	[K]
10 (≅ 1% der Gesamtfläche)	10	124,7%	-5,4%	-1,0	136,8%	-6,0%	-1,1	242,5%	2,1%	0,2
	20	174,0%	-4,2%	-0,8	185,1%	-4,8%	-0,9	270,8%	3,3%	0,4
	30	200,3%	-4,2%	-0,8	210,0%	-4,2%	-0,8	279,3%	2,9%	0,4
	40	216,2%	-3,1%	-0,6	224,6%	-3,6%	-0,7	282,3%	3,4%	0,5
20 (≅ 2% der Gesamtfläche)	10	118,1%	-4,4%	-0,8	127,5%	-5,6%	-1,0	220,8%	1,1%	0,1
	20	159,8%	-3,8%	-0,7	166,9%	-4,3%	-0,8	238,0%	0,9%	0,1
	30	179,9%	-3,2%	-0,6	185,1%	-3,7%	-0,7	240,7%	1,5%	0,2
	40	191,3%	-3,1%	-0,6	195,3%	-3,2%	-0,6	240,7%	1,4%	0,2
30 (≅ 3% der Gesamtfläche)	10	113,4%	-3,9%	-0,7	121,5%	-4,5%	-0,8	206,6%	1,1%	0,1
	20	149,9%	-3,3%	-0,6	154,9%	-3,8%	-0,7	216,2%	0,9%	0,1
	30	165,9%	-3,2%	-0,6	168,8%	-3,2%	-0,6	214,9%	1,5%	0,2
	40	174,3%	-2,1%	-0,4	175,8%	-2,7%	-0,5	212,4%	1,4%	0,2
40 (≅ 4% der Gesamtfläche)	10	108,9%	-3,4%	-0,6	115,8%	-4,0%	-0,7	190,0%	0,0%	0,0
	20	141,3%	-2,7%	-0,5	144,7%	-3,3%	-0,6	194,0%	0,9%	0,1
	30	154,3%	-2,7%	-0,5	155,4%	-2,7%	-0,5	190,4%	0,8%	0,1
	40	160,5%	-2,1%	-0,4	160,3%	-2,2%	-0,4	186,6%	0,7%	0,1
50 (≅ 5% der Gesamtfläche)	10	105,2%	-3,4%	-0,6	111,5%	-3,5%	-0,6	179,0%	1,1%	0,1
	20	134,2%	-2,8%	-0,5	136,7%	-2,8%	-0,5	178,8%	0,0%	0,0
	30	144,9%	-2,2%	-0,4	144,9%	-2,2%	-0,4	173,4%	0,8%	0,1
	40	149,4%	-1,6%	-0,3	148,1%	-1,6%	-0,3	168,6%	0,7%	0,1

Abb. A1.7
Numerischer Vergleich der Fälle mit evakuiertem und belüftetem Vakuum-Dämmsystem untereinander

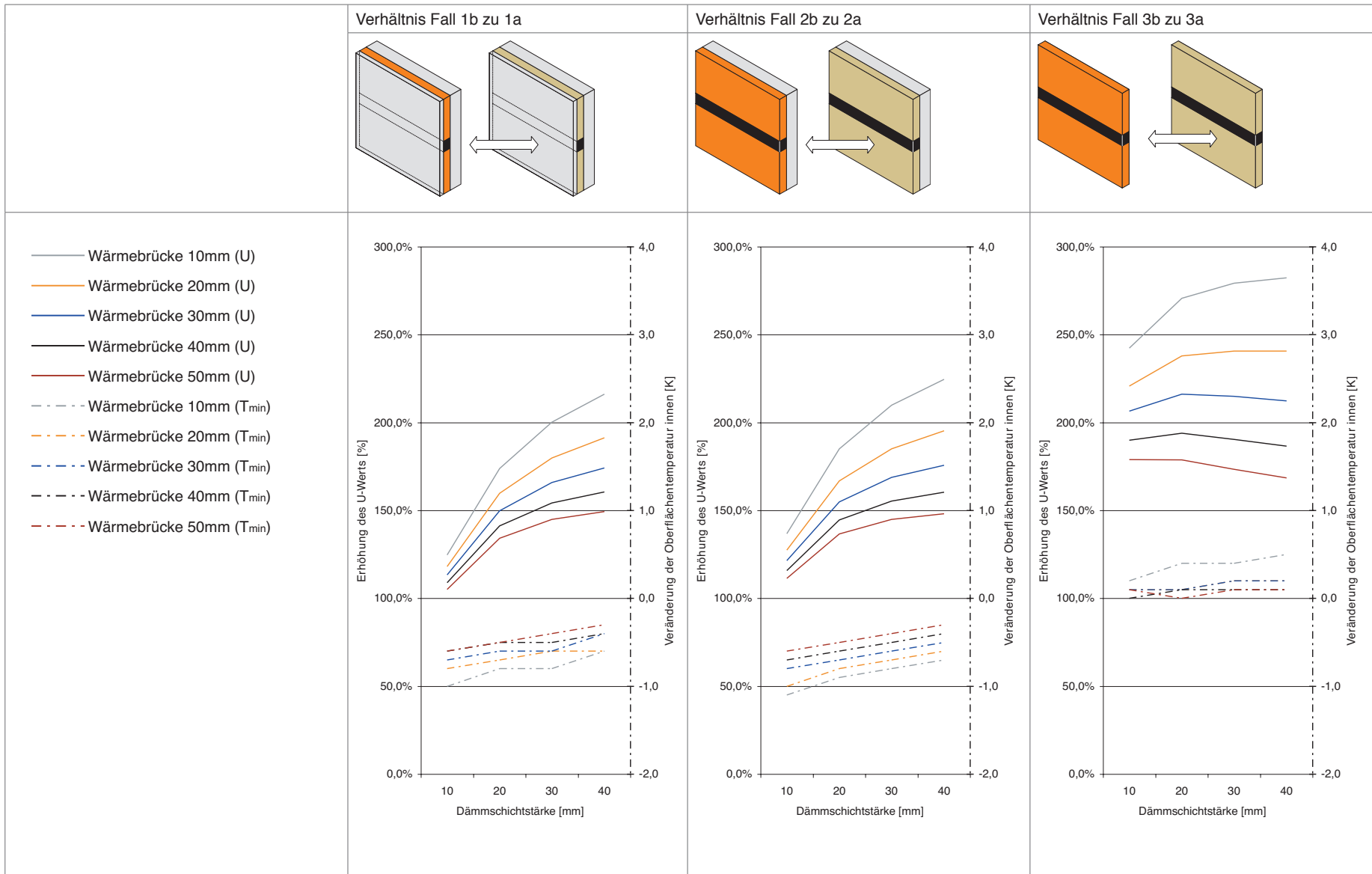


Abb. A1.8
Vergleich der Fälle mit evakuiertem und belüftetem Vakuum-Dämmsystem untereinander, in grafischer Darstellung

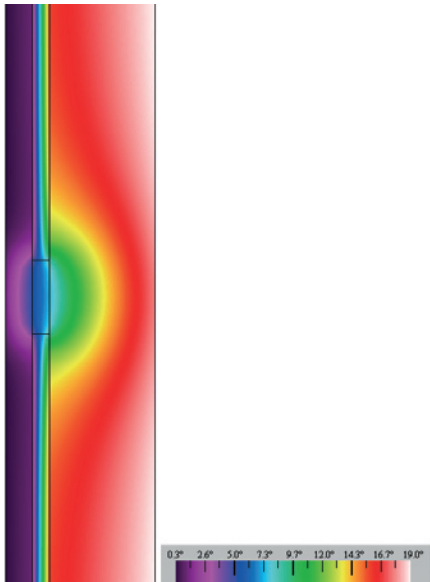


Abb. A1.9 Fall 1a, $s = 50\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$
Isothermische Darstellung, Legende in $^{\circ}\text{C}$

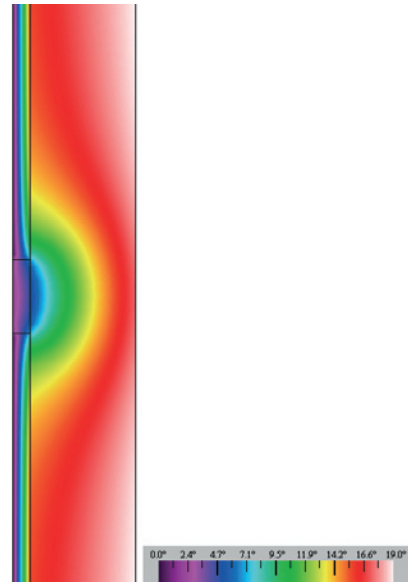


Abb. A1.11 Fall 2a, $s = 50\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$
Isothermische Darstellung, Legende in $^{\circ}\text{C}$

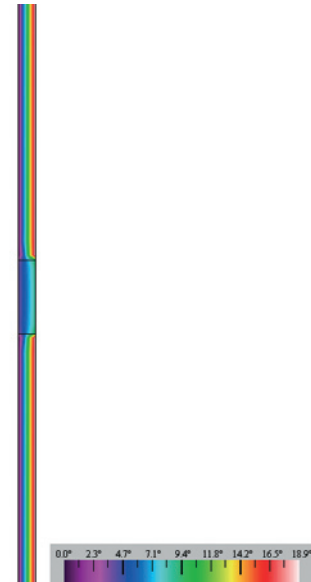


Abb. A1.13 Fall 3a, $s = 50\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$
Isothermische Darstellung, Legende in $^{\circ}\text{C}$

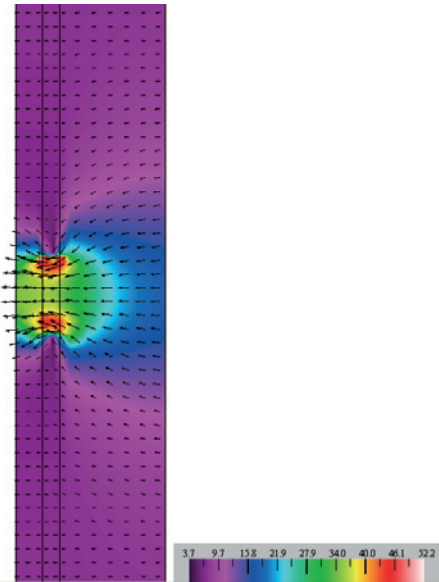


Abb. A1.10 Fall 1a, $s = 50\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$
Heat-Flux-Darstellung, Legende in $[\text{W}/\text{m}^2]$

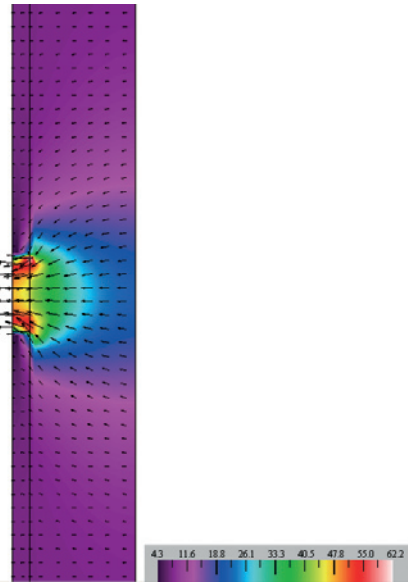


Abb. A1.12 Fall 2a, $s = 50\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$
Heat-Flux-Darstellung, Legende in $[\text{W}/\text{m}^2]$

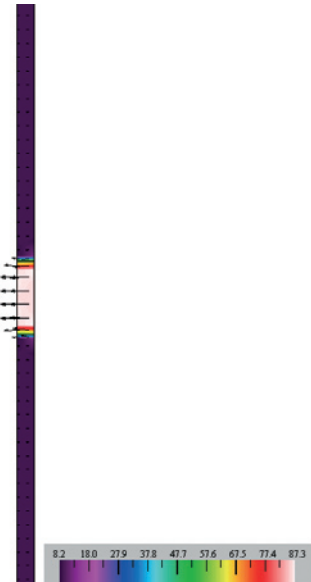


Abb. A1.14 Fall 3a, $s = 50\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$
Heat-Flux-Darstellung, Legende in $[\text{W}/\text{m}^2]$

3 Ergebnisse

3.1 Ermittelte Werte

Für jede gerechnete Variante liefert das Simulationsprogramm neben der genauen Temperatur- und Wärmeflussverteilung im Bauteil insbesondere folgende Resultate:

- U-Wert des betrachteten Ausschnitts
- Oberflächentemperatur auf der Innenseite im Bereich der Wärmebrücke (T_{min})
- Oberflächentemperatur auf der Innenseite im Bereich der ungestörten Fläche (T_{FI})

Neben der numerischen Zusammenfassung der Werte in den Abb. A1.3 und A1.4 finden sich diese grafisch aufbereitet in den Abb. A1.1 und A1.2 unten.

Um die Ergebnisse besser interpretieren zu können, wurde für jede Fallvariante und jede untersuchte Dämmschichtstärke eine entsprechende Referenzvariante ohne Wärmebrücke untersucht, jeweils aufgelistet und grafisch dargestellt. Auf diese Weise wird die jeweilige absolute Wirkung der Wärmebrücke zusätzlich optisch deutlich.

Die prozentuale U-Wert- und absolute Oberflächentemperatur-Veränderung ist grafisch in den Abb. A1.5 und A1.6 visualisiert.

Im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit wurden jeweils die

Ergebnisse für den U-Wert und für die innere Oberflächentemperatur über der Wärmebrücke T_{\min} in ein Schaubild zusammengefasst.¹⁰

Alle Kurvendarstellungen eines Untersuchungszusammenhangs haben analoge Achsenskalierungen, um ein vergleichendes Interpretieren der Ergebnisse zu erleichtern, auch wenn dies in einzelnen Fällen zu sehr engen Kurvenabständen führt.

In Abb. A1.7 und A1.8 ist der Vergleich zwischen den beiden untersuchten Vakuum-Dämmsystem-Varianten (evakuiert / belüftet) numerisch und grafisch veranschaulicht. Die Abb. A1.9, A1.11 und A1.13 zeigen die in der Simulation jeder Variante ermittelte Temperaturverteilung in Isothermendarstellung am Beispiel einer Variante ($s=50$ mm, $d=10$ mm, funktionstüchtiges Vakuum-Dämmsystem) auf, die Abb. A1.10, A1.12 und A1.14 analog die entsprechende Wärmeflussverteilung.

3.2 Interpretation der Ergebnisse

3.2.1 ...im Vergleich zur jeweiligen Referenzvariante

Alle im Folgenden vorgenommenen Interpretationen beschränken sich auf das hier untersuchte Szenario.¹¹ Die Schaubilder in Abb. A1.5 und A1.6 veranschaulichen, dass die Veränderung (Erhöhung) des

U-Wertes sich umso mehr bemerkbar macht, je stärker die Dämmschicht angesetzt wird und vor allem, je geringer die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes ist. Dieser Effekt wird durch eine zunehmende Wärmebrückenbreite s nochmals deutlich gesteigert.

Innerhalb der hier untersuchten Szenarien bildet der Fall 3a mit $s=50$ mm und $d=40$ mm das Maximum: Hier verdoppelt sich der U-Wert durch die Wärmebrücke nahezu.

Die relative Veränderung von T_{\min} ist weitgehend unabhängig von der Dämmschichtstärke d und jeweils von geringer Abweichung zwischen den betrachteten Wärmebrückenbreiten s , sobald mindestens eine weitere (dämmende) Schicht vorhanden ist (Fälle 1 und 2), gut zu sehen in Abb. A1.5 und A1.6.

Sie ist dann zudem ungefähr proportional zur Wärmebrückenbreite.

Bei durchgehender Wärmebrücke (Fall 3) macht sich die Dämmschichtstärke d jedoch massiv bemerkbar. Für diesen Fall gilt außerdem, dass die Temperatur T_{\min} bereits ab einer relativ geringen Wärmebrückenbreite nahezu ausschließlich durch die Wärmeleitfähigkeit des Wärmebrückenmaterials bestimmt wird.

Die Grenze liegt für das hier untersuchte Szenario in der Nähe von $s=20$ mm.

3.2.2 ...im Vergleich funktionsfähiger / nicht funktionsfähiger Vakuum-Dämmsysteme

Neben den schon beschriebenen Effekten ist hier vor allem auffällig, dass die Oberflächentemperaturen im Bereich der Wärmebrücken (T_{\min}) bei geringen Dämmschichtstärken in den Fällen mit evakuierten Vakuum-Dämmsystemen relativ gesehen niedriger ausfallen, als bei den schlechter gedämmten Fällen mit belüfteten VIP.

Im Bereich durchgehenden Wärmebrücken (Fälle 3a und 3b) liegt T_{\min} für Fälle mit funktionstüchtigem Vakuum-Dämmsystem immer (leicht) unter den Vergleichswerten für defekte Systeme.

In den untersuchten Szenarien nimmt T_{\min} im Versagensfall der Vakuum-Dämmung niemals um mehr als 0,8 K ab. Dieser Maximalunterschied tritt im Fall 2 bei minimaler Wärmebrückenbreite s (10 mm) und Dämmschichtstärke d (10 mm) auf.

Erwartungsgemäß verschlechtert sich allerdings der U-Wert sehr deutlich. Die maximale Zunahme um ca. 280% ist hier im Fall 3 bei minimaler Wärmebrückenbreite s (10 mm) und maximaler Dämmschichtstärke (40 mm) zu beobachten.

Durch die ‚Abmilderung‘ des Effekts aufgrund zusätzlicher Schichten

stellt der Fall 1 in der konträren Situation, also bei maximaler Wärmebrückenbreite s (50 mm) und minimaler Dämmschichtstärke (10 mm) mit ca. 105% das Minimum an Zunahme dar, was allerdings immer noch signifikant ist.

3.2.3 Rückschlüsse aus den Isothermen- und Wärmefluss-Darstellungen

Die Isothermendarstellungen (Abb. A1.9, A1.11 und A1.13) veranschaulichen den ‚Energie-Einzugsbereich‘ der Wärmebrücken, der die Wärmestromdichte-Maxima an den Wärmebrückenrändern (in den Heat-Flux-Darstellungen in den Abb. A1.10, A1.12 und A1.14 farblich als auch in der Ballung der Pfeile sichtbar) zur Folge hat.

Insbesondere die Heat-Flux-Darstellungen verdeutlichen nach Ansicht des Verfassers, dass vereinfachende, abschätzende Verfahren ihre Grenzen haben müssen und bestätigen so die einleitend ausgeführte Argumentation.

4 Weitere Verwendung der Ergebnisse

Neben einer rein thermischen Betrachtung sind hygrische Aspekte für die Beurteilung eines Wandaufbaus, vor allem im Hinblick auf potenzielle Schäden von großer Bedeutung. Dies bezieht sich in besonderem Maße auf mögliches Kondensat an der inneren Oberfläche und im Inneren des

Wandaufbau (unter Umständen noch kritischer, da unsichtbar); beide möglichen Auswirkungen werden unter anderem durch die Eigenschaften des Wandaufbaus bestimmt und stehen in Zusammenhang mit der außen und innen anliegenden relativen Luftfeuchtigkeit (die auf der Innenseite nicht zuletzt durch die Art der Nutzung bestimmt wird), dem Luftdruck und der Höhenlage des Objekts.

Daher sind hier auch keine verallgemeinerten Aussagen möglich. Zum Beispiel bildet für einen Luftdruck von 950 mbar, einer Höhenlage von 540 m ü.d.M., einer Raumtemperatur von 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit innen von 65% eine Innenoberflächentemperatur von 16 °C die Grenze, ab der mit Tauwasserausfall zu rechnen ist.

Dieser Zusammenhang ist einem h,x -Diagramm nach Mollier zu entnehmen, siehe hierzu Abb. A1.15.

Wichtig scheint der Hinweis, dass nicht erst mit akutem Tauwasserausfall mit Beeinträchtigungen zu rechnen ist, sondern schon, je nach baulicher und räumlicher Situation¹², bei darüber liegenden Temperaturen ein die Schimmelpilzbildung begünstigendes Millieu entstehen kann mit entsprechenden ästhetischen und vor allem gesundheitlichen Folgen.¹³

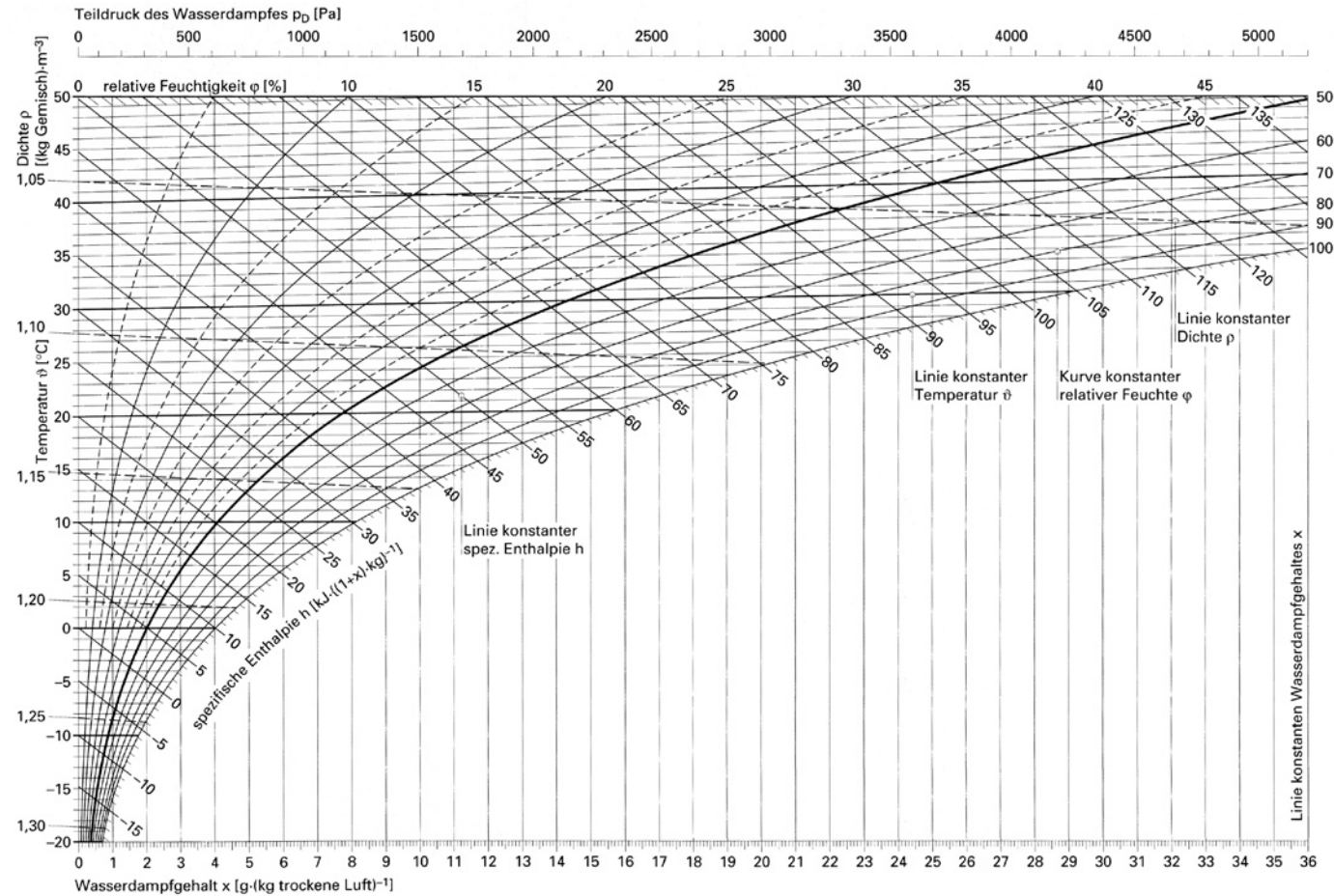


Abb. A1.15 h,x -Diagramm nach Mollier¹⁴ für $p= 950 \text{ mbar}$ und $H= 540 \text{ m}$ ü.d.M.

Anmerkungen

1. vergl. Bundi, Reto: Vakuumisolierte Paneele, Fassade · Fassade 3/2003, S. 19-22. Die Thematik der Wärmebrücken bei VIP bildet den Schwerpunkt dieses Beitrags der EMPA, wobei insbesondere in Fassadenpaneelen integrierte VIP (vergl. Teil 4 Abschnitt 1.6) diskutiert werden.

Auch das ZAE-Bayern hat sich an konkreten Anwendungsfällen intensiv mit dieser Thematik beschäftigt, vergl.: Schwab, H. u.a.: Thermal Bridges in Vacuum-insulated Building Façades (2005), S. 345-355

2. vergl. Ausführungen des ZAE-Bayern auf www.vip-bau.de, der offiziellen Webseite des deutschen Beitrags zum internationalen IEA-Verbundprojekt Vakuumdämmung, sowie entsprechenden Hinweisen auf der Schweizer Webseite <http://www.vip-bau.ch>

3. Hier kann eine einfache und sichere Abschätzung nach dem sogenannten Glaser-Verfahren erfolgen, das Aussagen über U-Werte, Temperaturverlauf und damit indirekt auch über die Lage eines potenziellen Taupunktes ermöglicht, vergl. Teil 2, Abschnitt 1.3.2, Abb. 2.9 und DIN 4108-3:2001-07, S. 21

4. Eine Zusammenfassung der in diesem Anhang dargestellten Untersuchung wurde veröffentlicht in Cremers, Jan: Konstruktionen mit Vakuum-Dämmsystemen - Lineare Wärmebrücken in Wandaufbauten (2005), S. 21-25

5. Dennoch stellen diese nach wie vor bestehende Uneinheitlichkeit sowie die sich aus dem Randeffect ergebende Abhängigkeit von der Formatwahl ein

großes Problem bei der Festlegung eines einheitlichen, genormten Rechenwerts für die Wärmeleitfähigkeit dar, wie er beispielsweise für eine bauaufsichtliche Zulassung benötigt wird, vergl. Teil 3, Abschnitt 2.9.3.

6. Dies ist der Hauptgrund für den Ansatz der Wärmeleitfähigkeit von 0,160 W/mK für das Wärmebrückenmaterial (also zum Beispiel Hartholz, bestimmte Kunststoffe o.ä.).

Wollte man eine entsprechende Untersuchung beispielsweise mit Wärmebrücken aus Aluminium durchführen, so wäre eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 221 W/mK (ca. das 1400-fache!) zugrunde zu legen. Eine Varianz der Wärmebrückenbreite wäre dann sinnvoll im Mikrometerbereich anzusetzen, um die wirksamen Effekte aufzeigen zu können.

7. vergl. hierzu Zürcher, Ch. u.a.: Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis (1998), S. 46-49. Hier wird ein vereinfachendes Verfahren dargestellt, bei dem der betroffene Wandaufbau in vertikale bzw. horizontale Abschnitte untergliedert wird, um einen oberen und einen unteren Grenzwert für den (dann immer noch sehr ungenauen) Wärmedurchgangswiderstand zu ermitteln.

8. Obwohl die angegebenen absoluten Werte für den Aussageschwerpunkt der Untersuchungen von untergeordneter Bedeutung sind, wird darauf hingewiesen, dass sich die für die Vakuum-Dämmsysteme angegebenen Werte inklusive Hüllmaterial und möglichen Stoßfugen innerhalb des Systems verstehen. Sie können unter günstigen Voraussetzungen in Einzelfällen noch etwas darunter liegen (λ bis minimal ca. 4 mW/mK).

9. In der Zusammenstellung sind alle Werte in der Genauigkeit wiedergegeben, die das Programm als Ergebnis liefert, die aber sicher keinesfalls in dieser Schärfe als Ergebnis ernst genommen werden sollten. Rundungen wurden an dieser Stelle aber deshalb nicht vorgenommen, da die Werte in dieser Form in die vergleichenden Betrachtungen eingeflossen sind. Bei den Temperaturwerten nimmt das Simulationsprogramm allerdings bereits interne Rundungen auf die erste Stelle nach dem Komma vor, was sich in den relativen Darstellungen in den Abb. A1.5 und A1.6 aufgrund der Skalenspreizung deutlich in Form von leichten ‚Knicken‘ bemerkbar macht.

10. Da diese beiden Werte keine gemeinsame Einheit aufweisen, wurden die beiden links und rechts befindlichen y-Achsen unterschiedlich skaliert und benannt. Ihre grafische Darstellung entspricht zur besseren Lesbarkeit immer den zugehörigen Kurven (durchgezogen / strich-punktiert).

11. In gewissem Umfang scheinen die Kurven Trends und Zusammenhänge anzudeuten und damit Prognosen zuzulassen. Doch schon die wenigen vorhandenen ‚Ausreißer‘ (zum Beispiel Wärmebrücke 10 mm, Temperatur, Fall 3b in Abb. A1.6) machen deutlich, dass die verhältnismäßig geringe Anzahl von simulierten Fällen und die Entscheidung, die erzielten Werte ‚neutral‘ durch Linien zu verbinden (und nicht durch hypothetische Kurven), nicht vor Fehlinterpretationen schützen kann, und eine rein auf der optischen Wirkung einer Kurve basierende Extrapolation leicht in die Irre führen kann.

12. Hierunter ist vor allem die Raumluftströmungssituation gemeint, die zum Beispiel dazu führen kann, dass Nischen oder Bereiche hinter Vorsprüngen deutlich geringeren konvektiven Effekten ausgesetzt sind, also größere freie Wandbereiche. Wärmebrücken im Bereich von solchen Stellen sind also besonders kritisch.

13. vergl. Sedlbauer, K.; Gabrio, T.; Krus, M.: Schimmelpilze - Gesundheitsgefährdung und Vorhersage. gi-Gesundheitsingenieur 123 (2002), Heft 6, S. 285-295.

Kern der vorgestellten Arbeit ist ein Vorhersagemodell für die Schimmelpilzbildung, das auf einem sogenannten ‚Isoplethenmodell‘ beruht: Mit dessen Hilfe „soll ein Vergleich der hygrothermischen Bedingungen mit den Wachstumsvooraussetzungen für Sporeneimung und Myzelwachstum ermöglicht werden.“ (Abschnitt 4.2). Weiter heißt es dort: „Mithilfe des neuentwickelten Vorhersagemodells können für reale instationäre Randbedingungen baulich und nutzungsbedingte Wachstums-wahrscheinlichkeiten ermittelt werden.“ (Abschnitt 5).

14. Grafik des Verfassers unter Verwendung eines Diagramms aus Zürcher, Ch. u.a.: Bauphysik. Bau und Energie. Leitfaden für Planung und Praxis (1998), S. 185. Genaue Ausführungen zur Deutung und Verwendung der Grafik finden sich im selben Werk, S. 55-57.

Inhaltsverzeichnis

Anhang 2

Untersuchungen zur Wirkung von Maßnahmen zum temporären Wärmeschutz

Abschnitt	Seite	
1	Basis-Szenario	222
1.1	Verwendete Simulationsumgebung	222
1.2	Beschreibung der baulichen Grundkonfiguration	222
1.2.1	Räumliche Vorgaben	222
1.2.2	Kennwerte der Bauteile	222
1.2.3	Angesetzte Möblierung	223
1.2.4	Ausrichtung der Bürozelle	223
1.2.5	Standort und Wetterdaten	223
1.3	Sonstige Simulationsvorgaben	223
1.3.1	Luftwechsel	223
1.3.2	Heizen und Kühlen / Regelstrategie	223
1.3.3	Interne Lasten	224
1.3.4	Sonnenschutz	224
1.3.5	Temporärer Wärmeschutz	224
1.3.5.1	Untersuchte Varianten	224
1.3.5.2	Werte für den zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstand R_{Nacht}	225
1.4	Zusammenfassung der angesetzten Vereinfachungen	225
1.4.1	Vereinfachungen durch Grundannahmen	225
1.4.2	Beschränkungen durch die Simulationstechnik	225
2	Simulationsergebnisse	225
2.1	Heizperioden- und monatsbezogene Betrachtung	228
2.1.1	Transmissionswärmeverluste	228
2.1.2	Heiz- und Kühlenergiebedarf	232
2.2	Tages- und stundenbezogene Betrachtung	233
2.2.1	Allgemeine Hinweise zu den Ergebnissen	234
2.2.2	Interpretation einzelner Ergebnisse	235
2.2.2.1	Ausrichtung Nord	235
2.2.2.2	Ausrichtung Ost und West	239
2.2.2.3	Ausrichtung Süd	239
3	Schlussbetrachtungen zu diesem Teil	245
Anmerkungen		245

Anhang 2

Untersuchungen zur Wirkung von Maßnahmen zum temporären Wärmeschutz durch rechnergestützte thermische Simulationen

In den Teilen 4, 5 und 7 der vorliegenden Arbeit wurden Maßnahmen zum temporären Wärmeschutz als ein mögliches neues Einsatzgebiet von Vakuum-Dämmsystemen identifiziert.

In diesem Anhang sollen mittels thermischer Simulationen Antworten auf die Frage gesucht werden, wie groß der Einfluss solcher Maßnahmen auf verschiedene Messgrößen eines Gebäudes sein kann:¹

Welche Kenngrößen werden beeinflusst, welche Effekte sind zu erwarten?

Welche Rolle spielt dabei die Ausrichtung des Gebäudes?

Wie groß ist der Einfluss des zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstandes der zusätzlichen, temporär genutzten Dämm-Maßnahme?

Hinsichtlich weiterer grundlegender Aspekte zum Thema ‚Temporärer Wärmeschutz‘ wird auf die Einleitung zu Teil 7 verwiesen.

1 Basis-Szenario

Als Grundlage der thermischen Untersuchungen wurde eine typische Bürozeile von 3 x 4 m zugrunde gelegt.

1.1 Verwendete Simulationsumgebung

Für die hier diskutierte Thematik stellt aus Sicht des Verfassers das von der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt EMPA in Dübendorf (CH) seit 1982 entwickelte Computerprogramm HELIOS ein sehr gut geeignetes Werkzeug dar.²

Es handelt es sich dabei um ein dynamisches 1-Zonen Simulationsmodell zur Erfassung des thermischen Verhaltens von Gebäuden unter Berücksichtigung der kurz- und langwelligen Strahlungsvorgänge.

Das Rechenmodell verwendet eine Energiebilanz-Methode, die in jedem Rechenschritt eine Bilanzmatrix der Wärmeströme aufstellt und als Gleichungssystem löst.

Instationäre (das heißt von der Zeit abhängige) Speichervorgänge werden nach der Response-Faktoren-Methode gelöst, ein rechnerisches Verfahren, welches die Reaktion eines Bauteils auf eine äußere oder innere Temperaturstörung berechnet.

Der Wetterverlauf wird als Superposition solcher Störungen betrachtet.

Die Simulationen der Jahres- bzw. Heizperiode werden im Stundensschritt durchgeführt.

Dies bedeutet, dass stündliche Wetterdaten vorliegen müssen, welche schrittweise mit dem thermischen Zustand des Gebäudes verknüpft werden, um daraus die Entwicklung über die nächste Stunde zu bestimmen.

Die Resultate liegen somit ebenfalls pro Stunde vor.

Das Programm kann u.a. folgende Problemstellungen behandeln:

- Direkter Sonnenenergiegewinn durch Fensterflächen und indirekter Sonnenenergiegewinn durch opake Bauteile
- Lüftungsstrategien (passives Kühlen) und Überhitzungsprobleme durch solare oder interne Wärmequellen (Bestimmung von Raumluft- und Oberflächentemperaturen)
- Heiz- und Kühllast- sowie Temperaturberechnungen unter Berücksichtigung der Speichermasse des Gebäudes, thermischer Komfort, Analyse der Raumlufttemperaturen (allerdings gemäß SIA 382/3)

1.2 Beschreibung der baulichen Grundkonfiguration

1.2.1 Räumliche Vorgaben

Abb. A2.1 zeigt die Abmessungen der simulierten Standardbürozeile. Es wird angenommen, dass nur die Fassade dem Außenklima ausgesetzt ist.

1.2.2 Kennwerte der Bauteile

Für den Wandaufbau im Brüstungsbereich wurde ein sehr guter U-Wert von 0,17 W/(m²K) angenommen.

Für die Verglasung wird in einem ersten Schritt eine mittlere Zweifach-Isolierglasqualität mit einem U_g-Wert von 1,64 W/(m²K) und einem g-Wert von 0,73 angesetzt. Der einfache Holz-/Alurahmen hat einen mäßigen U_f-Wert von 2,1 W/(m²K).

In einem zweiten Schritt wird eine deutlich verbesserte Argon-befüllte 3-fach-Isolierglasqualität mit einem U_g-Wert von 0,95 W/(m²K) und einem g-Wert von 0,60 im gleichen Rahmen (nur für die Ausrichtung Nord) in Vergleich gebracht.

Hinsichtlich der ‚neutralen‘ (adiabatischen) Innenbauteile wurden verputzte Mauerwerkswände, Holzinneputz, Betondecke und ein Bodenaufbau, der mit einem Teppichboden abschließt, angenommen.

Diese Bauteile wirken in der Simulation hinsichtlich der betrachteten Wärmeströme nur durch ihr Speichervermögen. ‚Neutral‘ meint hier, dass Wärmewechselwirkungen mit einem angrenzenden Klima keine Berücksichtigung finden.

1.2.3 Angesetzte Möblierung

Der Möblierungsgrad wird hinsichtlich der zusätzlich zur baulichen Situation vorhandenen Speicher-masse als gering angenommen.

1.2.4 Ausrichtung der Büro-zelle

Für jede Variante wurden Ausrichtungen der Fassade nach Norden, Osten, Süden und Westen gerechnet.³

1.2.5 Standort und Wetterdaten

Die Simulation wurde mit DRY-Wetterdaten⁴ für den Standort Stuttgart durchgeführt. Die Berechnung erfolgte für eine vollständige Heizperiode (hier jeweils 01. Oktober bis 30. April) in Stundenschritten.

Der Sommerfall fand keine Berücksichtigung, da die je nach Ausbildung der Maßnahme des temporären Wärmeschutzes ggf. zu erwartenden reduzierten Sekundärstrahlungseffekte durch die eingesetzte Simulationstechnik nicht erfasst werden können (siehe 1.4.2).

1.3 Sonstige Simulationsvorgaben

1.3.1 Luftwechsel

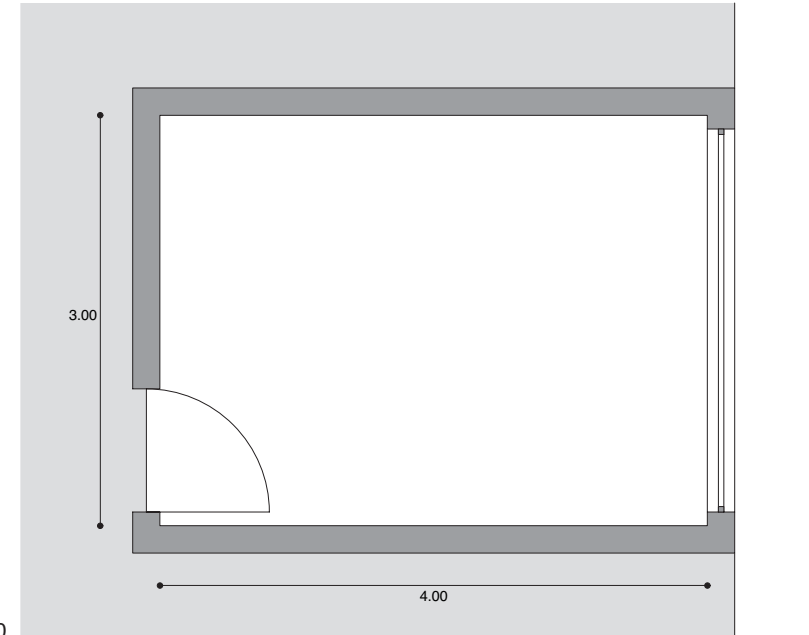
Die gewählte Luftwechselstrategie hat einen wesentlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. In der Realität wird sie außer durch die baulichen Gegebenheiten (Dichtigkeit des Gebäudes) maßgeblich durch die Lüftungsanlage und das Nutzerverhalten bestimmt.⁵

Obwohl das Simulationswerkzeug hier eine große Bandbreite an Vorgabemöglichkeiten bietet (Stundenprofile, Benutzer-abhängiger Luftwechsel in Abhängigkeit von Einstrahlungswerten usw.), wurde für die hier durchgeführten Berechnungen ein konstanter, benutzer-unabhängiger Luftwechsel von 0,7 / h angesetzt, was den Vorgaben der EnEV für ein hinsichtlich der Dichtigkeit nicht genauer geprüf-tes Gebäude entspricht.

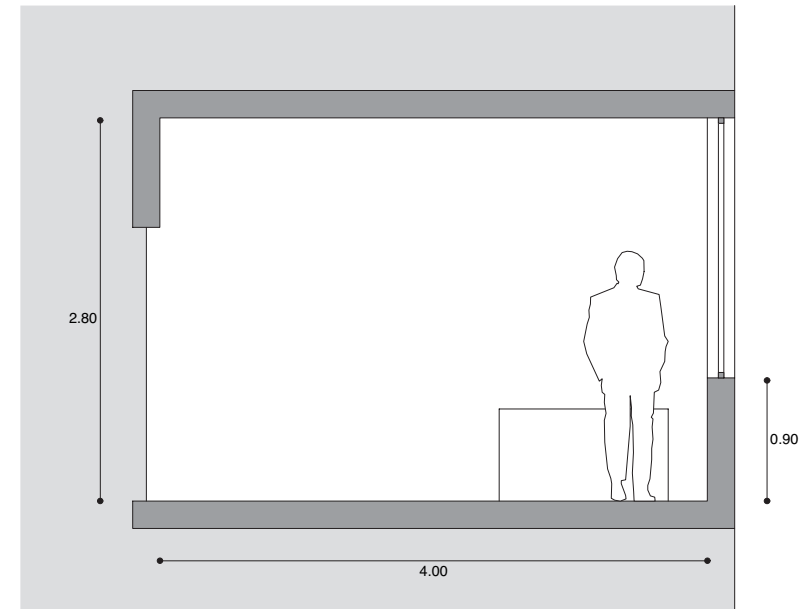
Ein anderer Grund für diesen Ansatz war, dass der konstante Luftwechsel im Hinblick auf die Ergebniskurven nicht zu Verzerrungen (und damit in der Folge zu potenziellen Fehlinterpretationen) führt.

1.3.2 Heizen und Kühlen / Regelstrategie

Da eine der gewünschten Kern-aussagen das mögliche Energie-Einsparpotenzial durch temporäre Wärmeschutzmaßnahmen be-



Grundriss M 1:50



Schnitt M 1:50

Abb. A2.1

Räumliche Ausgangssituation der thermischen Simulation. Die Fassade ist dem Außenklima ausgesetzt. Die grauen Flächen stellen einen angenommenen ‚neutralen‘ Temperaturbereich dar.

treffen, wurde folgende Strategie angenommen:

Fällt die Innenraumtemperatur unter 20° C, so wird Wärmeenergie zugeführt, bis wieder 20° C erreicht werden. Analog wird ab 27° C gekühlt.

Diese Regelung läuft kontinuierlich während der ganzen Heizperiode, unabhängig von Tages- und Jahreszeit oder Nutzungsaspekten. Obwohl es für viele denkbare Nutzungen sicher sinnvoll wäre, wird weder für die Nacht eine Abschaltung noch eine Absenkung angenommen, ebensowenig für das Wochenende. Durch diese simple Regelstrategie wird jedoch sichergestellt, dass auch kleine Unterschiede am Verlauf der Heizenergiebedarfskurve sichtbar werden.

Jede andere Strategie unter Einbeziehung von Heizleistung würde die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Hinblick auf die untersuchte Fragestellung erschweren.

1.3.3 Interne Lasten

Interne Lasten, die sich zum Beispiel durch die Wärmeabstrahlung anwesender Personen sowie Beleuchtung, Computeranlagen o.ä. ergeben, sind in der Regel über den Zeitraum eines Jahres gesehen stark schwankend und zudem vom Einzelfall abhängig.

Für die hier gewünschten Aussagen haben sie jedoch keine signifikante

Aussagekraft, vielmehr würden sie (vor allem im Zusammenhang mit der gewählten Heizungsstrategie) eine Interpretation der Ergebnisse deutlich erschweren, da immer zu prüfen wäre, ob wegen solcher innerer Lasten oder doch wegen äußerer Einflüsse zu heizen respektive zu kühlen wäre.

Aus diesem Grund wurden keine internen Lasten in Ansatz gebracht.

1.3.4 Sonnenschutz

Die Möglichkeiten der Implementierung einer sinnvollen Sonnenschutz-Strategie werden durch die Simulationssoftware beschränkt: Die einzige Möglichkeit stellt die pauschale, prozentuale Absenkung des effektiven g-Wertes der Verglasung ab einem Grenzwert für die Globalstrahlung auf die betroffene Fassade (GLARE-Wert) dar.

Erste Versuche hatten die Vermutung bestätigt, dass die Wahl dieser Simulationsgrundlage erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse vor allem in den Übergangszeiten hat.

Da eine differenziertere Einstellung nicht möglich ist, wurde entschieden, für alle Ausrichtungen (außer Nord, wo Sonnenschutz natürlich nicht erforderlich ist) Simulationsrechnungen ohne und mit folgender Sonnenschutz-Strategie durchzuführen:

Steigt die Globalstrahlung auf die betroffene Fassade über 400 W/m²,

so wird der g-Wert der Verglasung durch die Sonnenschutzmaßnahme auf 20% reduziert. Dieser Abschlag wird (analog zur Heizungsstrategie) ohne Rücksicht auf die Tages- und Jahreszeit und die Außentemperatur angesetzt.⁶

1.3.5 Temporärer Wärmeschutz

Diese Festlegung betrifft den Kern der vorliegenden Untersuchung. Auch hier wurde eine relativ simple Regelstrategie zugrunde gelegt:

Immer, wenn der Globalstrahlungseintrag auf die betreffende Fassade auf 0 W/m² fällt (es also ganz ‚dunkel‘ draußen ist), so wird der U_g-Wert der Verglasung für diese Zeit durch einen durch die Maßnahme des temporären Wärmeschutzes bestimmten zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstand reduziert.⁷

Diese Strategie wird als einen ersten Ansatz für opaken temporären Wärmeschutz für sinnvoll erachtet, weil er eine gewisse Mindesteinsatzmöglichkeit in Ansatz bringt, da das Szenario einer üblichen Nutzung für diesen Fall (innen hell, außen dunkel) ohnedies keine Durchsicht ermöglichen würde, die Fensteröffnung also auch verschlossen werden kann.

Es wird angenommen, dass der Luftwechsel in dieser Zeit auf andere Weise (nicht über das Fenster) erreicht wird.

1.3.5.1 Untersuchte Varianten

Folgende Varianten für einen temporären Wärmeschutz wurden untersucht:

1. Kein zusätzlicher temporärer Wärmedurchlasswiderstand
2. Ein zusätzlicher temporärer Wärmedurchlasswiderstand R_{Nacht} von 0,75 m²K/W.
Dies entspricht beispielsweise der Wirkung eines einfachen, durchgehenden Holzladens von ca. 5 mm Stärke.
3. Ein zusätzlicher temporärer Wärmedurchlasswiderstand R_{Nacht} von 2,0 m²K/W.
Ein solcher Wert lässt sich beispielsweise mit den Wärmeschutzlamellen gemäß den Vorschlägen und Untersuchungen aus Teil 7 erreichen.
4. Ein zusätzlicher temporärer Wärmedurchlasswiderstand R_{Nacht} von 4,0 m²K/W.
Eine solche Maßnahme ließe sich beispielsweise mit einem vakuumgedämmten Laden (5 mm Holz, 15 mm VIP, 5 mm Holz) realisieren.

Für die vorliegende Untersuchung bleibt zudem die Frage unberücksichtigt, ob und wie der Sonnenschutz mit dem temporären Wärmeschutz konstruktiv ‚zusammengefasst‘ werden kann, wie dies durch den Einsatz der Wärmeschutzlamellen aus Teil 7 offensichtlich möglich wäre.

Jeder untersuchten Variante wurde gemäß der Zusammenstellung in Abb. A2.2 eine Varianten-Nummer zugeordnet, die im folgenden der Kennzeichnung dient.

1.3.5.2 Werte für den zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstand R_{Nacht}

In Anlehnung an die Ergebnisse aus Teil 7 für die dort vorgeschlagenen und untersuchten Wärmeschutzlamellen wurden in analoger Weise U-Werte für weitere Varianten für temporären Wärmeschutz ermittelt.

Allen untersuchten Varianten liegen die gleiche Verglasung und der gleiche Abstand von der Fensterebene (20 cm) zugrunde. Bei der Berechnung mit THERM, einem Programm zur zweidimensionalen Simulation von Wärmedurchgangsvorgängen (siehe Teil 7), werden - wie bei der Verglasung selbst - Sekundärstrahlungseffekte des Aufbaus während der Ermittlung des U-Wertes erfasst und berücksichtigt.

Nur dieses sehr aufwändige Verfahren stellt sicher, dass während der Ermittlung der U-Werte die sich zwischen Scheibe und Manipulator befindliche Luftschicht und die jeweiligen Wärmeübergangswiderstände Berücksichtigung finden.

Wie schon in Teil 7 gezeigt, würde die rein rechnerische Zusammenfassung der einzelnen U-Werte (Glas und Manipulator) deutlich zu kurz greifen.⁸

Die Ergebnisse liefern jeweils einen U-Wert, der sich auf die Aufbau-mitte bezieht, Undichtigkeiten im seitlichen Randbereich also nicht abbildet.

Dies fand für die folgende Simulationsrechnung dadurch Berücksichtigung, dass der Wärmeschutz nur auf die eigentliche Verglasungsfläche angesetzt wurde, der U_F -Wert des Fensterrahmens also durch den temporären Wärmeschutz nicht erfasst und verbessert wird.⁹

1.4 Zusammenfassung der angesetzten Vereinfachungen

Aus den oben dargelegten Simulationsgrundlagen ergeben sich im Vergleich zu einer realen Situation eine Reihe von Vereinfachungen, die hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen sein werden.

Darüber hinaus gibt es Effekte, die durch das gewählte Simulationsverfahren grundsätzlich nicht erfasst werden können.

1.4.1 Vereinfachungen durch Grundannahmen

Hier sind v.a. folgende Festsetzungen zu nennen:

- Begrenzung der Betrachtung auf ein sehr kleines und wenig komplexes Volumen ohne Wechselwirkung mit anderen Raumzonen
- Vereinfachter Luftwechsel (konstant)

- Vereinfachte interne Lastsituation (konstant 0 W)

- Simple, wenig komplexe Regelstrategie für Heizen/ Kühlen, insbesondere ohne Zusammenhang mit der Luftwechselstrategie

- Primitiver Sonnenschutz-Regelmechanismus

- Vereinfachte Regelstrategie für den temporären Wärmeschutz

- Keine Berücksichtigung der Möglichkeiten von transluzentem temporären Wärmeschutz, der zum Beispiel schon im Falle geringer Reststrahlung oder ausreichend hoher Globalstrahlung einsetzbar wäre, wenn auf die Sichtverbindung nach außen verzichtet werden kann, der vor allem aber auch im Falle hoher Außentemperaturen sinnvoll sein könnte

- Keine differenzierte Berücksichtigung von Wärmebrückeneffekten des temporären Wärmeschutzes an den seitlichen Anschlüssen, sondern pauschaler Abschlag über den Rahmen

1.4.2 Beschränkungen durch die Simulationstechnik

Insbesondere im Hinblick auf die hier behandelte Fragestellung kann durch die gewählte Simulationstechnik ein wesentlicher Effekt nur ungenügend erfasst werden. Dabei handelt es sich um die dynamische Erfassung der Sekun-

därstrahlung durch den jeweiligen Sonnenschutz.

Dieser wird zwar für eine statische Situation während der Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten (und damit der zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstände) der einzelnen temporären Wärmeschutzmaßnahmen durch die Ermittlung mit dem Programm THERM erfasst, geht dann aber als statischer Wert in die Simulation mit HELIOS ein.

Geometrie - und sonnenstandsabhängige Effekte der einzelnen Varianten und deren Auswirkungen auf das Innenklima durch Sekundär-IR-Strahlungseintrag bleiben technisch bedingt unberücksichtigt.¹⁰

Desweiteren können durch die Software die komplexen Zusammenhänge beim Einsatz von temporären *und* transluzenten Wärmeschutzmaßnahmen (mit einem spezifischen Filterprofil bezogen auf Strahlungsdurchlässigkeit) nicht abgebildet werden, wie sie in Teil 7 beschrieben werden.

2 Simulationsergebnisse

Im folgenden sollen die Ergebnisse unter Berücksichtigung der beschriebenen Randbedingungen dargestellt, interpretiert und diskutiert werden.

Daher beziehen sich die getroffenen Aussagen explizit nur auf diese Situation. Inwieweit die Ergebnisse eine darüber hinausgehende Gültigkeit haben, soll im Abschnitt 3 dieses Teiles abgeschätzt werden.

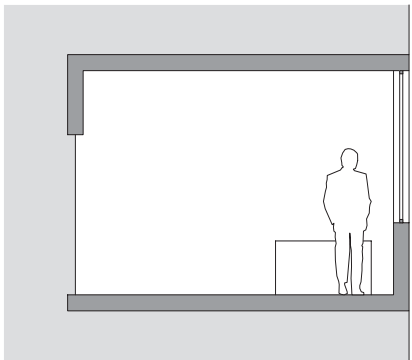
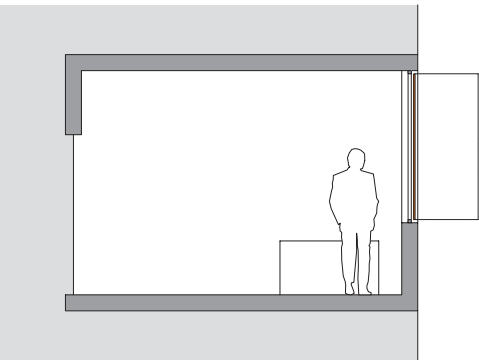
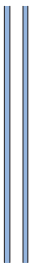
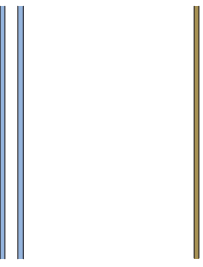
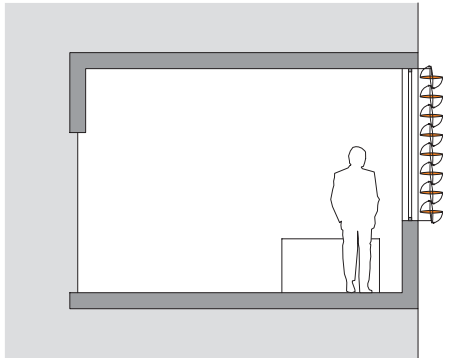
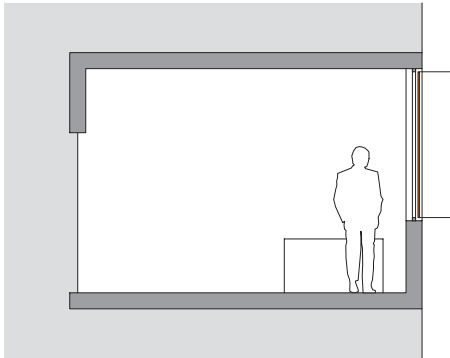
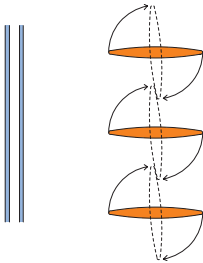
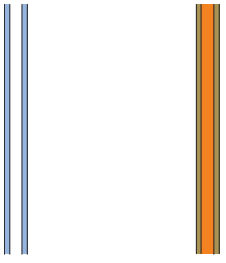
										
Betrachtete beispielhafte Ausbildung des temporären Wärmeschutzes	kein temporärer Wärmeschutz				einfacher Holzladen ⁽¹⁾ (5 mm)					
										
U _g -Wert der Fensterverglasung (V1 oder V2)	1,64 W/(m ² K)				0,95 W/(m ² K)	1,64 W/(m ² K)				0,95 W/(m ² K)
zusätzlicher Nacht-Wärmedurchlasswiderstand R _{Nacht} ⁽¹⁾	n.v. (0 m ² K/W)				0,75 m ² K/W					
U _g -Wert des Fensters inkl. der Maßnahme des temporären Wärmeschutzes	1,64 W/(m ² K)				0,95 W/(m ² K)	0,73 W/(m ² K), 44% von V1-0				0,56 W/(m ² K), 59% von V2
Ausrichtung der Bürozellenfassade	Nord	Ost	Süd	West	Nord	Nord	Ost	Süd	West	Nord
Kurzbezeichnung der Variante	V1-0 Nord	V1-0 Ost	V1-0 Süd	V1-0 West	V2-0 Nord	V1-0,75 Nord	V1-0,75 Ost	V1-0,75 Süd	V1-0,75 West	V2-0,75 Nord
Kurzbezeichnung der Variante mit Sonnenschutz-Strategie ⁽²⁾ (SS)	-	-	-	-	-	V1-0,75-SS Nord	V1-0,75-SS Ost	V1-0,75-SS Süd	V1-0,75-SS West	-

Abb. A2.2 Zusammenstellung der verschiedenen Varianten zur Untersuchungen des Effektes eines temporären Wärmeschutzes (mittels thermischer Simulation) anhand einer Standard-Bürozelle (Fortsetzung nächste Seite).

											
Betrachtete beispielhafte Ausbildung des temporären Wärmeschutzes	Lamellen mit Vakuum-Dämmsystem ⁽¹⁾ (gemäß Teil 7)				VIP-gedämmter Laden ⁽¹⁾ (5 Holz + 15 VIP + 5 Holz)						
											
U _g -Wert der Fensterverglasung (V1 oder V2)	1,64 W/(m²K)				0,95 W/(m²K)		1,64 W/(m²K)			0,95 W/(m²K)	
zusätzlicher Nacht-Wärmedurchlasswiderstand R _{Nacht} ⁽¹⁾	2,0 m²K/W				4,0 m²K/W						
U _g -Wert des Fensters inkl. der Maßnahme des temporären Wärmeschutzes	0,38 W/(m²K), 23% von V1-0				0,33 W/(m²K), 35% von V2		0,22 W/(m²K), 13% von V1-0			0,20 W/(m²K), 21% von V2	
Ausrichtung der Bürozellenfassade	Nord	Ost	Süd	West	Nord	Nord	Ost	Süd	West	Nord	
Kurzbezeichnung der Variante	V1-2 Nord	V1-2 Ost	V1-2 Süd	V1-2 West	V2-2 Nord	V1-4 Nord	V1-4 Ost	V1-4 Süd	V1-4 West	V2-4 Nord	
Kurzbezeichnung der Variante mit Sonnenschutz-Strategie ⁽²⁾ (SS)	V1-2-SS Nord	V1-2-SS Ost	V1-2-SS Süd	V1-2-SS West	-	V1-4-SS Nord	V1-4-SS Ost	V1-4-SS Süd	V1-4-SS West	-	

- Tabellenbezogene Anmerkungen: (1) Temporärer Wärmeschutz: Ganzjährig wird der U-Wert der Verglasung bei 0 W/m² Globalstrahlung auf die betroffene Fassade durch einen speziellen zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstand R_{Nacht} abgemindert.
(2) Sonnenschutz: Ganzjährig wird der g-Wert ab einem GLARE-Wert von 400 W/m² (Globalstrahlung auf betroffene Fassade) auf 20% reduziert.

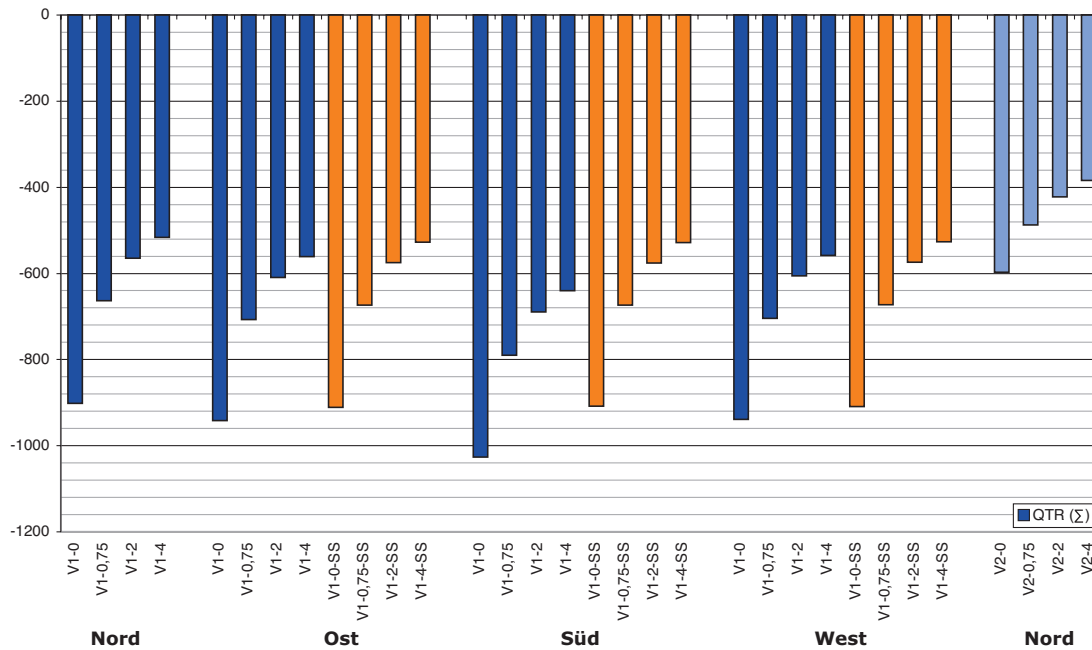
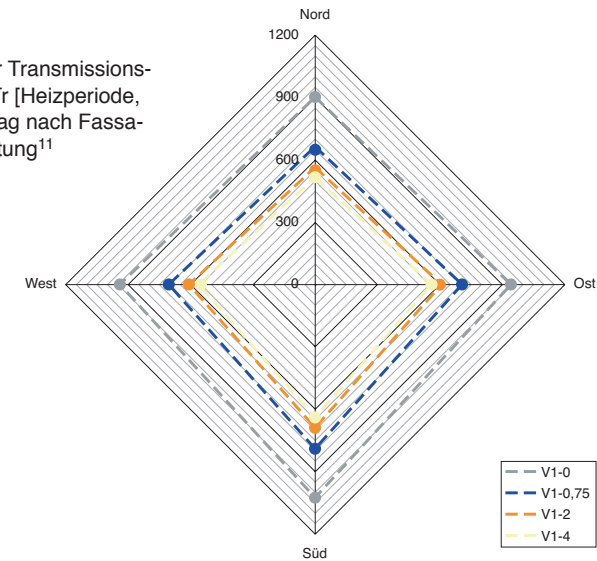


Abb. A2.3 Summe der Transmissionsverluste QTr [kWh] durch die Gesamtfassade bezogen auf die Heizperiode aller untersuchten Ausrichtungen und Varianten

1	U_g -Wert der Verglasung [W/(m ² K)]	1,64								0,95	
2	Kurzbezeichnung der Variante	Nord		Ost			Süd		West		Nord
3	Sonnenschutz-Strategie wirksam	nein	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
4	$R_{\text{Nacht}} = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$	QTr Fenster [kWh]	-751	-792	-766	-875	-775	-790	-765	-447	
		Verhältnis der Ausrichtungen zu N (V1)	100%	105%	102%	117%	103%	105%	102%	59%	
5	$R_{\text{Nacht}} = 0,75 \text{ m}^2\text{K/W}$	QTr Fenster [kWh]	-512	-555	-528	-633	-538	-552	-527	-337	
		Verhältnis zu Zeile 4 (gleiche Ausrichtung)	68%	70%	69%	72%	69%	70%	69%	75%	
6	$R_{\text{Nacht}} = 2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$	QTr Fenster [kWh]	-413	-456	-429	-530	-439	-453	-428	-271	
		Verhältnis zu Zeile 4 (gleiche Ausrichtung)	55%	58%	56%	60%	57%	57%	56%	61%	
7	$R_{\text{Nacht}} = 4,0 \text{ m}^2\text{K/W}$	QTr Fenster [kWh]	-365	-407	-381	-478	-391	-405	-380	-234	
		Verhältnis zu Zeile 4 (gleiche Ausrichtung)	49%	51%	50%	55%	51%	51%	50%	52%	

Abb. A2.4 Zusammenstellung der Transmissionsverluste QTr [kWh] durch den Fensterbereich bezogen auf die Heizperiode, prozentualer Vergleich

Abb. A2.5 Summe der Transmissionsverluste QTr [Heizperiode, kWh], Auftrag nach Fassadenausrichtung¹¹

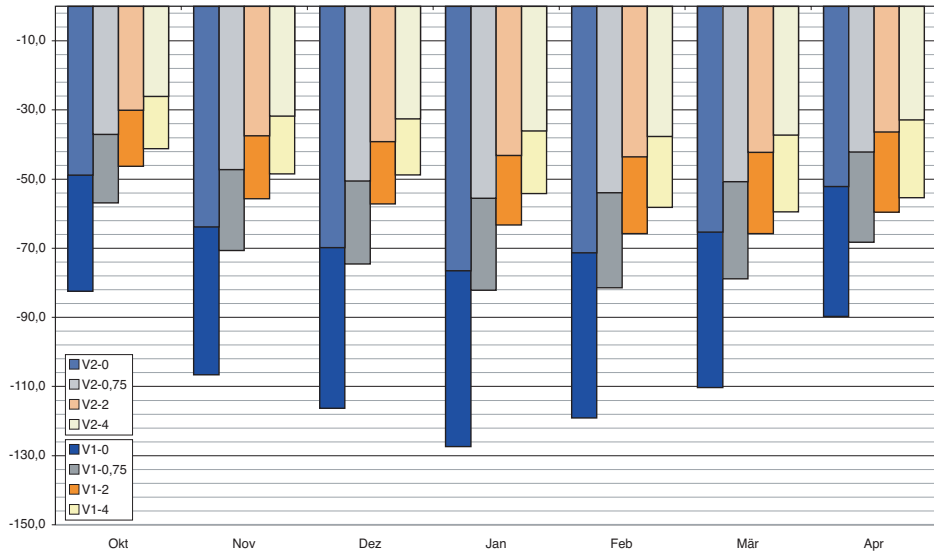


2.1 Heizperioden- und monatsbezogene Betrachtung

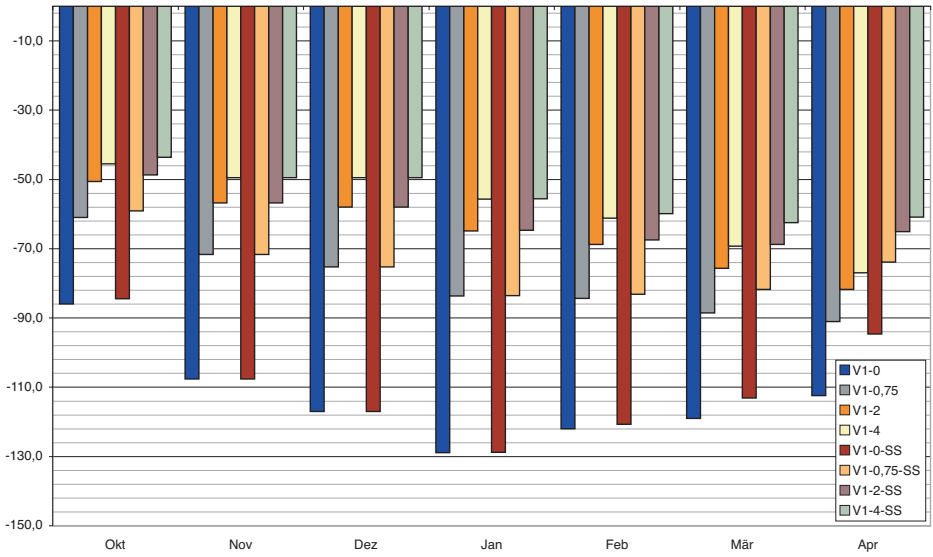
2.1.1 Transmissionswärmeverluste

Das Program weist in seiner Bilanz Transmissionswärmeverluste (QTr) stundenweise und bauteilbezogen aus, wobei es die Richtung des Wärmestroms über das Vorzeichen berücksichtigt: Negative Werte bezeichnen einen Wärmefluss nach außen.

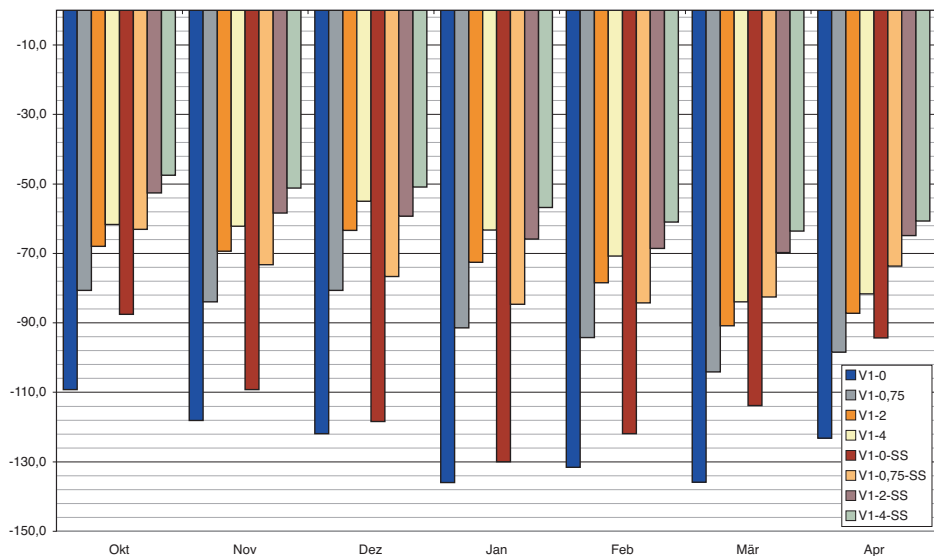
Im hier untersuchten Szenario setzen sich die Gesamtwärmeverluste aus den Anteilen für die Verglasung, den Fensterrahmen und dem Brüstungsbereich zusammen. Die aus den Lade- und Speichervor-



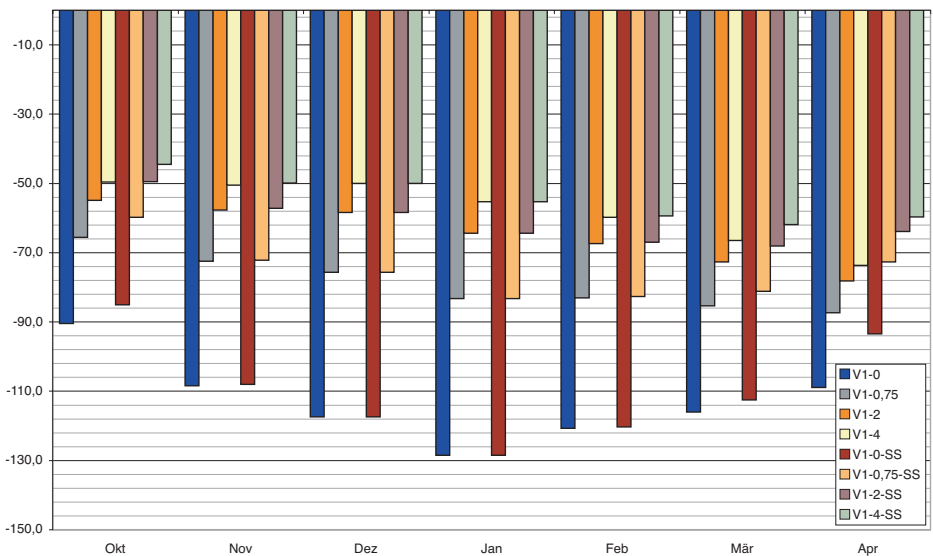
Ausrichtung: Nord



Ausrichtung: Ost



Ausrichtung: Süd



Ausrichtung: West

Abb. A2.6 Monatsweise aufgetragene Transmissionsverluste QTr über die Fensteröffnung für alle untersuchten Ausrichtungen und Varianten in [kWh].

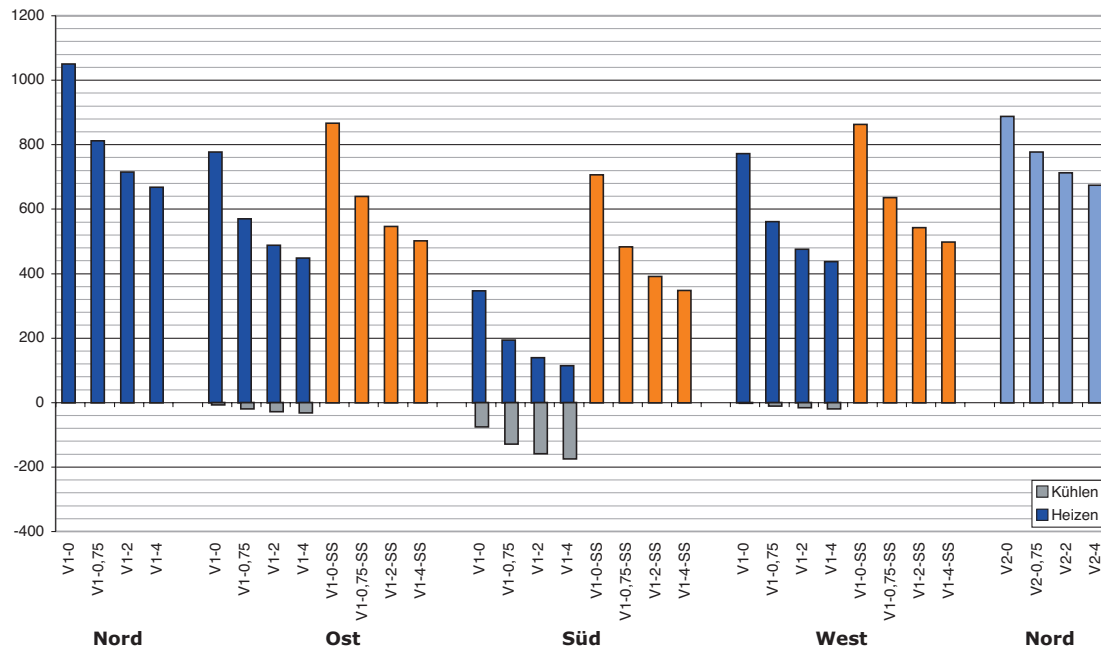


Abb. A2.7
Heizenergiebedarf H
[Heizperiode, kWh], ohne
Sonnenschutz-Strategie,
Auftrag nach Fassaden-
ausrichtung¹²

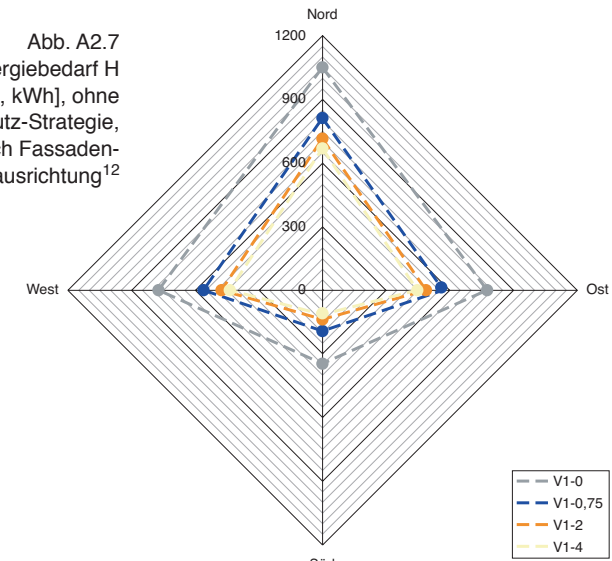


Abb. A2.8
Aufsummierter Heiz- und Kühlenergie-
bedarf H bezogen auf die Heizperiode
aller untersuchten Ausrichtungen
und Varianten [kWh]

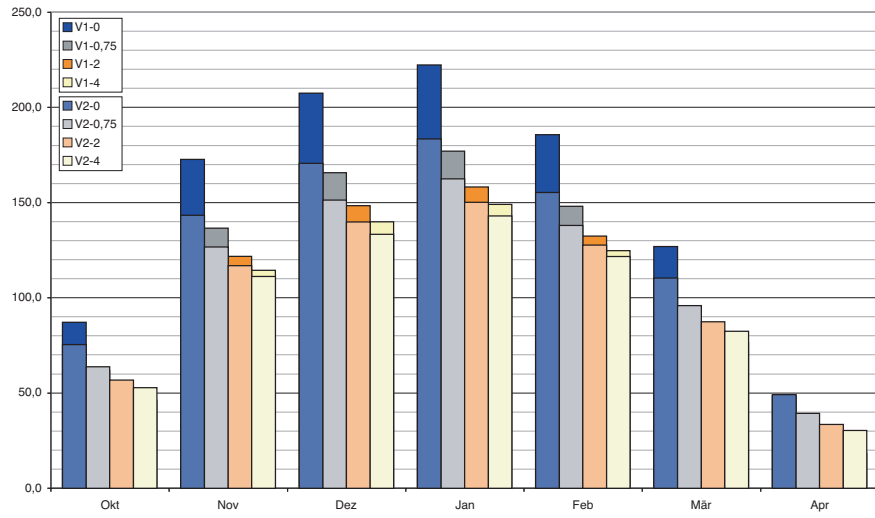
1	U _g -Wert der Verglasung [W/(m ² K)]		1,64						0,95	
2	Kurzbezeichnung der Variante		Nord		Ost		Süd		West	
3	Sonnenschutz-Strategie wirksam		nein	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
4	R _{Nacht} = 0 m ² K/W	H+ (Heizen)	1050	777	867	346	706	772	864	887
		H- (Kühlen) [kWh]		7		77		3		
		Verhältnis der Ausrichtungen zu N (V1)	100%	74%	82%	33%	67%	74%	82%	84%
5	R _{Nacht} = 0,75 m ² K/W	H+ (Heizen)	812	570	640	193	483	561	636	777
		H- (Kühlen) [kWh]		20		129		11		
		Verhältnis zu H+ Zeile 4 (gl. Ausricht.)	77%	73%	74%	56%	68%	73%	74%	88%
6	R _{Nacht} = 2,0 m ² K/W	H+ (Heizen)	715	488	546	139	392	476	543	712
		H- (Kühlen) [kWh]		28		159		17		
		Verhältnis zu H+ Zeile 4 (gl. Ausricht.)	68%	63%	63%	40%	55%	62%	63%	80%
7	R _{Nacht} = 4,0 m ² K/W	H+ (Heizen)	665	448	502	114	348	437	498	675
		H- (Kühlen) [kWh]		33		176		20		
		Verhältnis zu H+ Zeile 4 (gl. Ausricht.)	64%	58%	58%	33%	49%	57%	58%	76%

Abb. A2.9 Zusammenstellung der Heizperioden-bezogenen Simulationsergebnisse, prozentualer Vergleich

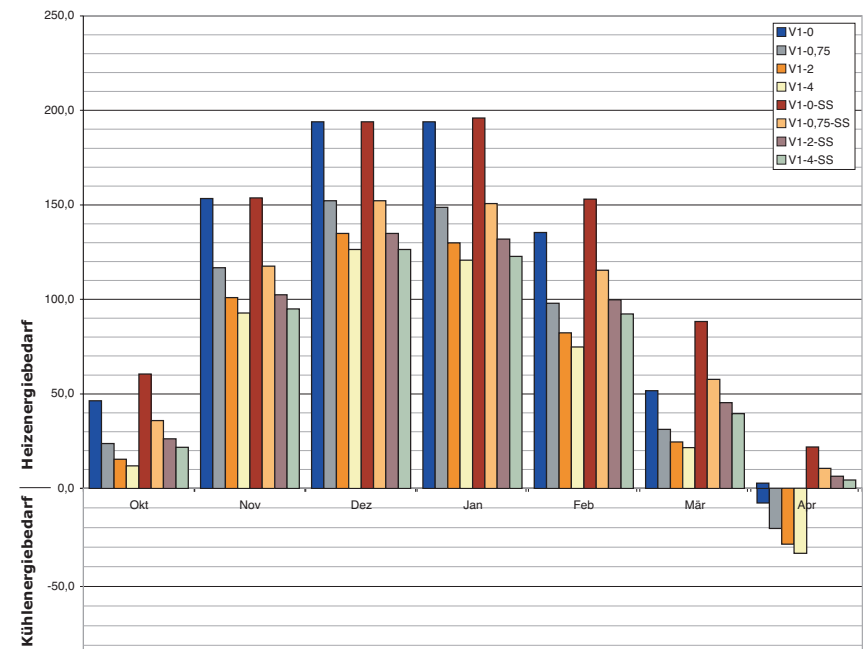
gängen der ‚Innenbauteile‘ resultierenden Verluste (und zeitversetzten Gewinne) spielen hier quantitativ eine sehr untergeordnete Rolle.¹³

Die über die Heizperiode addierten Summen der Gesamttransmissionsverluste für die betrachtete Fassade finden sich in Abb. A2.3 (Gegenüberstellung aller Varianten und Ausrichtungen) und A2.5 (nach der Fassadenausrichtung aufgetragen).

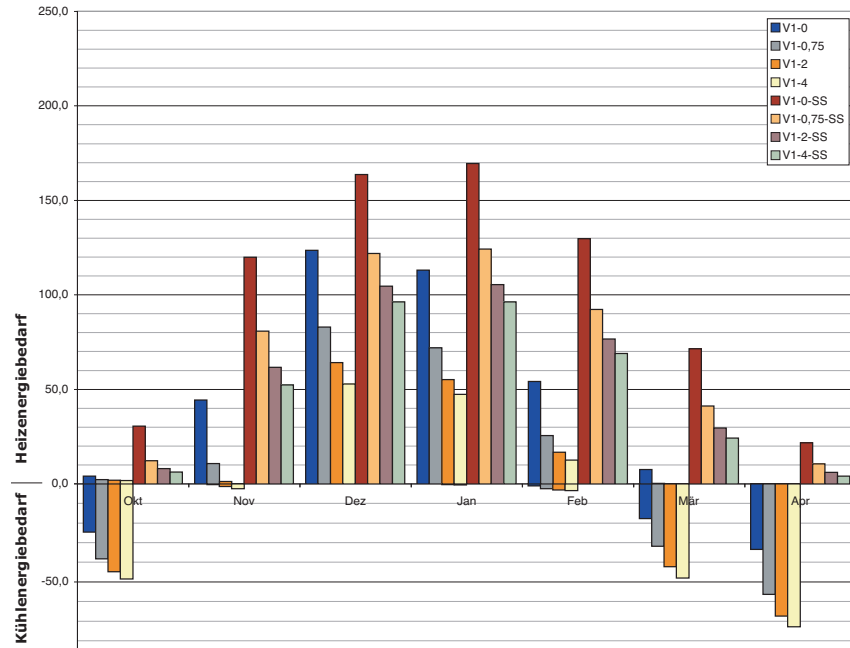
In den Übergangsmonaten und im Süden auch in den Wintermonaten erwärmt sich der Innenraum ohne wirksamen Sonnenschutz stärker und die erhöhte Innenraumtemperatur führt zu einer Zunahme der absoluten Transmissionsverluste (vergl. Ausrichtung Süd in Abb. A2.6). Im Detail ist dieser Effekt



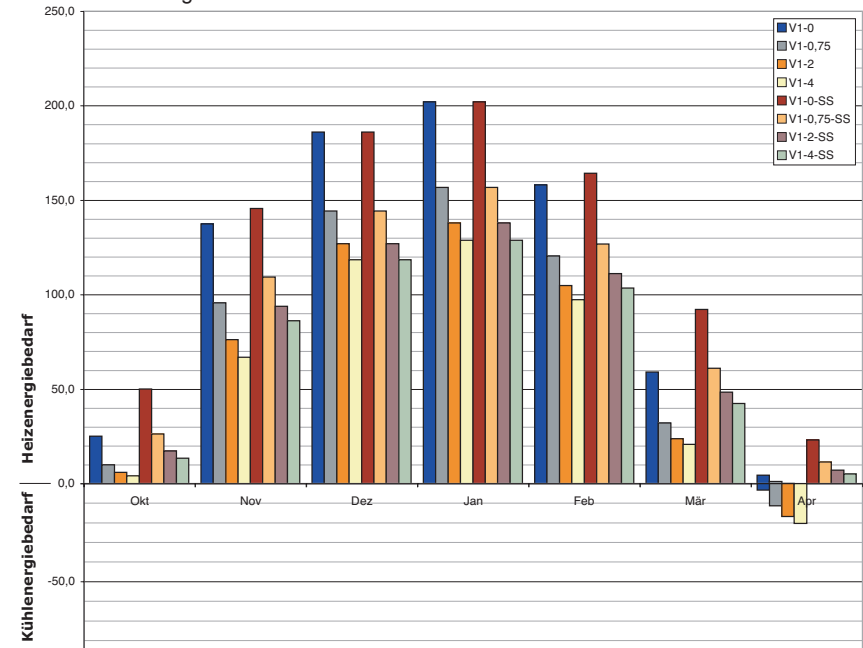
Ausrichtung: Nord



Ausrichtung: Ost



Ausrichtung: Süd



Ausrichtung: West

Abb. A2.10 Monatsweise aufgetragener Heiz- und Kühlenergiebedarf H+ bzw. H- für alle untersuchten Ausrichtungen und Varianten in [kWh].

beispielhaft für die Ausrichtung Ost im Oktober aus dem Vergleich der Abb. A2.22 (rechte Spalte) und A2.23 (jeweils am zweiten Tag), oder für die Ausrichtung Süd aus der analogen Darstellung in Abb. A2.26 nachzuvollziehen.

Auf der West- und Ostseite wird der Sonnenschutz im Winter nie aktiviert, da das Regelkriterium von mindestens 400 W/m² nicht erreicht wird. Das gilt natürlich generell auch für den Norden.

In Abb. A2.4 sind die rein auf die Fensterfläche bezogenen resultierenden Transmissionsverluste für alle Varianten und Ausrichtungen wiedergegeben und jeweils zur Referenzsituation in ein prozentuales Verhältnis gesetzt.

Ein weiterer Effekt, allerdings deutlich geringer in der Wirkung, begründet sich darin, dass HELIOS durch die Verglasung verursachte Sekundärstrahlungseffekte von den Transmissionsverlusten abzieht.

Hierdurch geht auch die Wirkung des Sonnenschutzes auf das Sekundärstrahlungsverhalten der Verglasung in die Gesamtbilanz ein.

In den Übergangsmonaten (höhere Strahlungsmengen, noch geringe Außenlufttemperatur) führt der aufgrund der Strahlungsmenge angesetzte Sonnenschutz zu einer geringeren Erwärmung der Scheiben. Somit nimmt der Wärmeabfluss

über die Verglasung geringfügig zu.

Die Ergebnisse lassen folgende Aussagen zu:

- Schon ein einfacher temporärer Wärmeschutz (Holzläden: V1-0,75) vermindert die Transmissionsverluste um ca. ein Drittel.
- Durch den Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen und die damit verbundene Optimierung des temporären Wärmeschutzes (VIP-Klappläden, V1-4) lassen sich die Transmissionsverluste um ca. die Hälfte reduzieren.
- Dieser relative Reduktionseffekt scheint sich durch den Einsatz einer höherwertigen Verglasung kaum zu verschieben (Vergleich V2 zu V1).
- Das Verhältnis unter den Ausrichtungen bleibt im Vergleich zur jeweiligen Referenzsituation weitgehend gleich (Abweichung max. 5%), zu sehen auch an den parallelen Linien in Abb. A2.5. Dies gilt auch für die Varianten mit implementierter Sonnenschutz-Strategie.

In Abb. A2.6 sind für jede der vier untersuchten Ausrichtungen die nur auf die Verglasung zurückzuführenden monatlichen Transmissionsverluste für jede Variante aufgetragen.

Während auch in der monatlichen Betrachtung die Ergebnisse für

die vier Ausrichtungen sehr ähnlich sind, werden die Verhältnisse unter den untersuchten Varianten deutlich: So fällt der Unterschied zwischen Varianten mit und ohne temporärem Wärmeschutz in der kalten Jahreszeit deutlich größer aus als in den Übergangsmonaten.

Bedeutsam erscheint aber, dass selbst zu einer Zeit mit deutlich geringeren Temperaturunterschieden zwischen innen und außen die durch die temporäre Wärmeschutz-Maßnahme verursachte Differenz der Transmissionsverluste immer noch signifikant ist.

2.1.2 Heiz- und Kühlenergiebedarf

Die gewählte Regelstrategie erzwingt einen Energieeinsatz, um das Innentemperaturfenster von 20-27°C zu halten, der in Heiz- und Kühlenergiebedarf differenziert wird.¹⁴ Aufgrund der vorgegebenen Parameter (vor allem wegen nicht vorhandener interner Lasten) kommt es nur in den Varianten ohne angesetzte Sonnenschutz-Strategie zu einem gewissen Kühlenergiebedarf. Gleichzeitig führt die simple Sonnenschutz-Strategie in den SS-Varianten zu einem deutlich erhöhten Heizenergiebedarf.

An dieser Stelle werden die Grenzen der eingesetzten Simulationstechnik deutlich, die keine komplexeren Regelstrategien

zulässt. Die Eingangs ausgeführte Begründung für die Notwendigkeit der parallelen Simulation von Szenarien mit und ohne Sonnenschutz findet hier (vor allem in den Übergangsmonaten) ihre Bestätigung.

Es kann davon ausgegangen werden, dass durch eine komplexere Regelstrategie für Sonnenschutz, temporären Wärmeschutz und insbesondere auch Luftwechsel die positiven Effekte aus beiden Simulationsreihen zusammengeführt werden können, wenn es gelingt, das Zusammenspiel der Regelkreise zu optimieren.

Der über das Jahr summierte Heiz- und Kühlenergiebedarf findet sich in Abb. A2.8 (Gegenüberstellung aller Varianten und Ausrichtungen) und A2.7 (nach der Fassadenausrichtung aufgetragen).

In Abb. A2.9 sind die absoluten Ergebnisse der Simulation für alle Varianten und Ausrichtungen wiedergegeben und in ein prozentuales Verhältnis zur Referenzsituation gesetzt.

Da die Transmissionsverluste unter den verschiedenen Ausrichtungen einer Variante sehr ähnlich sind, spiegeln die Unterschiede im Heizenergiebedarf innerhalb einer Variante nahezu ausschließlich das verschiedene solare Gewinnpotenzial wider.

In Abb. A2.10 ist der monatsbezogene Heiz- und Kühlenergiebedarf für jede der vier untersuchten Ausrichtungen und jede Variante aufgetragen.

Die Resultate können folgendermaßen interpretiert werden (jeweils bezogen auf die Referenzvariante):

- Die gewählte Sonnenschutzstrategie eliminiert zwar einen evtl. vorhandenen Kühlenergiebedarf, führt aber zu einem Heizenergie-mehrbedarf von mehr als 30% (Süd) bzw. ca. 8% für West und Ost.¹⁵ In der Realität wird man allerdings nicht auf Sonnenschutz verzichten können, vor allem auch wegen des Verhältnisses des Primärenergiebedarfes für Kühlen und Heizen.
 - Schon ein einfacher temporärer Wärmeschutz (Holzladen: V1-0,75) reduziert den Heizenergiebedarf um mehr als 20%.
 - Durch den Einsatz von Vakuum-Dämmsystemen und die damit verbundene Optimierung des temporären Wärmeschutzes (V1-4) lässt sich der Heizenergiebedarf um ca. 35% (Nord), ca. 40% (Ost und West) und sogar bis zu mehr als 60% (Süd) vermindern (wenn die solaren Gewinne teilweise genutzt werden können).
 - Das Verhältnis unter den Ausrichtungen (außer Süd) bleibt im Vergleich zur jeweiligen Referenzsituation ungefähr gleich (Abweichung max. 6%), zu sehen auch an den parallelen Linien in Abb. A2.7.
- In den Übergangsmontaten kompensiert der temporäre Wärmeschutz für alle Ausrichtungen weitgehend den tagsüber durch den Sonnenschutz entgangenen solaren Eintrag (siehe Abb.A2.10 Ost, Süd und West)
 - Obwohl der zusätzliche Widerstand der Variante V1-4 doppelt so hoch wie V1-2 und mehr als fünfmal so hoch ist wie bei V1-0,75, zeigt sich der Einsparungseffekt an Heizenergie im Verhältnis deutlich geringer.
 - Eine Verbesserung der eingesetzten Verglasung (V2) führt zu deutlich geringeren Reduktionseffekten für den Heizwärmebedarf. Aber selbst bei der hier angesetzten nahezu optimalen 3-fach-Verglasung beträgt das Einsparpotenzial noch nahezu 25%.

Da es sich bei der Frage des Reduktionspotenzials für den Heizenergiebedarf um den Kern dieser Untersuchung handelt, finden sich die Ergebnisse hierzu in einer jeweils auf die Ausrichtung bezogenen, zusammenfassenden Darstellung in den Abb. A2.11 (Nord, V1), A2.12 (Nord, V2), A2.13 (Ost), A2.14 (Süd) und A2.15 (West).

2.2 Tages- und stundenbezogene Betrachtung

Um die Wirkungsweise der untersuchten temporären Wärmeschutzmaßnahmen besser nachvollziehen zu können, erscheint eine Betrachtung des stundenweisen Verlaufes der relevanten Parameter im Zusammenhang geboten.

Dabei wurden die beiden wesentlichen durch die Außenbedingungen gegebenen Parameter, Außenlufttemperatur (TL) und Sonneneinstrahlung auf die Fensterebene (QS), im Zusammenhang mit den ermittelten Heizleistungen (H), Luftwechsel (QAirC)- und Transmissionsverlusten (QTr) und der Raumlufttemperatur (TI) dargestellt.¹⁶

Als zusätzliche Größe wurde die jeweils an der Innenoberfläche der Verglasung auftretende Temperatur (TIF) in die Darstellungen aufgenommen. Diese stellt als Teil der raumumschließenden, passiven Flächen ein wesentliches Kriterium für die Behaglichkeit¹⁷ dar. Dabei ist für diese Größe im Winter ein möglichst minimaler Unterschied zur Raumlufttemperatur wünschenswert.

Bedenkt man, dass gerade im Winter ein beträchtlicher Teil eines 8-Stunden-Arbeitstages mit einer Zeit nahezu ohne Solarstrahlungsangebot von außen zusammenfällt, in der die oben genannte Oberflächentemperatur leicht um 6 Kelvin und mehr unter der Raumlufttemperatur liegen kann, so wird

deutlich, dass hier ein wirkungsvoller temporärer Wärmeschutz eine deutliche Komfortverbesserung darstellen kann (siehe beispielsweise Abb. A2.16).

Im folgenden werden nun die genannten Parameter für jede Ausrichtung nacheinander jeweils für alle Varianten für den Zeitraum von vier Tagen im Januar aufgetragen: Abb. A2.16 (Nord), A2.22 (Ost, linke Spalte), A2.25 (Süd) und A2.29 (West, linke Spalte).

Zum Vergleich hierzu finden sich analoge Daten für vier Tage im Oktober als Beispiel für einen Übergangsmonat: Abb. A2.17 (Nord), A2.22 (Ost, rechte Spalte), A2.26 (Süd) und A2.29 (West, rechte Spalte).

Die Effekte der implementierten Sonnenschutz-Strategie im Oktober lassen sich entsprechend in den Abb. A2.23 (Ost), A2.26 (Süd, rechte Spalte), A2.30 (West) studieren, für den Januar am Beispiel der Ausrichtung Süd in Abb. A2.25 (rechte Spalte).

Desweiteren finden sich die Oberflächentemperaturen an der Verglasunginnenseite im Vergleich zu der Raumlufttemperatur für alle betrachteten Varianten in je einem Diagramm für sieben Tage im Januar: Abb. A2.21 (Nord), A2.24 (Ost), A2.28 (Süd) und A2.31 (West), jeweils obere Darstellung.

Die jeweils untere Darstellung derselben Abbildungsnummer zeigt

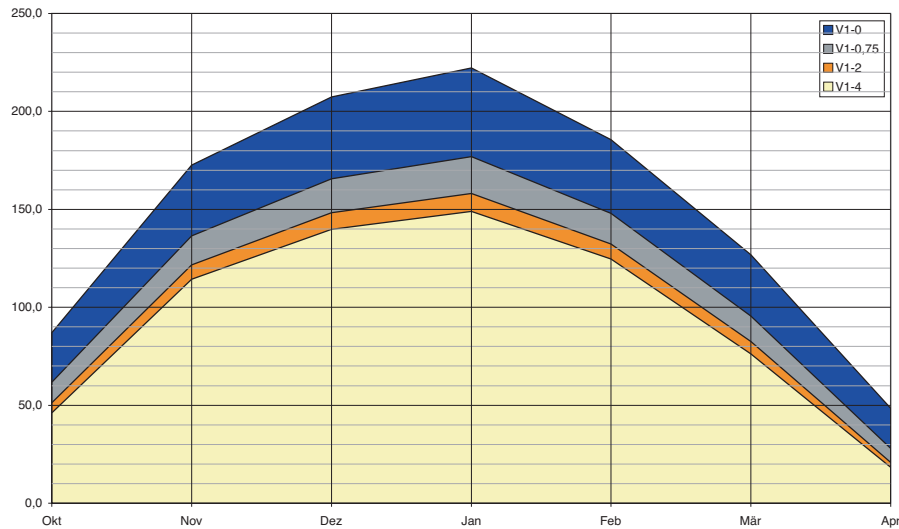


Abb. A2.11
Heizenergiebedarf, Ausrichtung Nord (zu V1), ohne Sonnenschutz-Strategie [kWh]

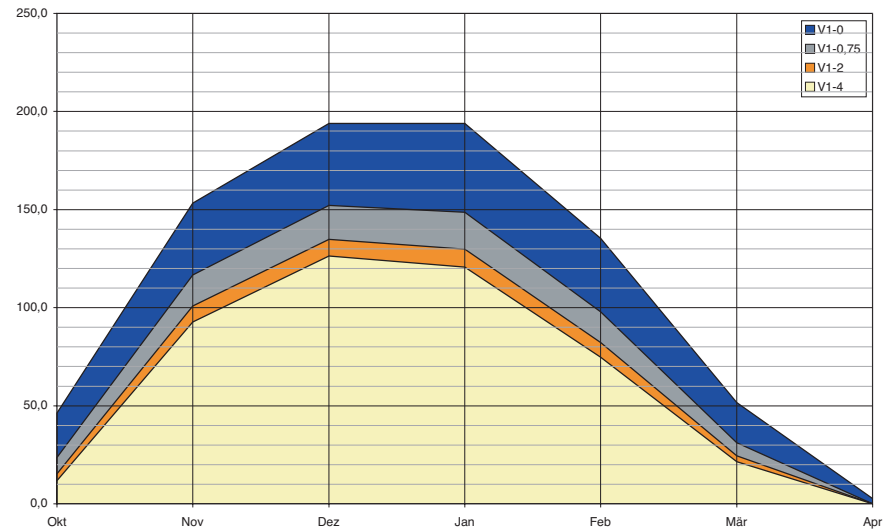


Abb. A2.13
Heizenergiebedarf, Ausrichtung Ost (zu V1), ohne Sonnenschutz-Strategie [kWh]

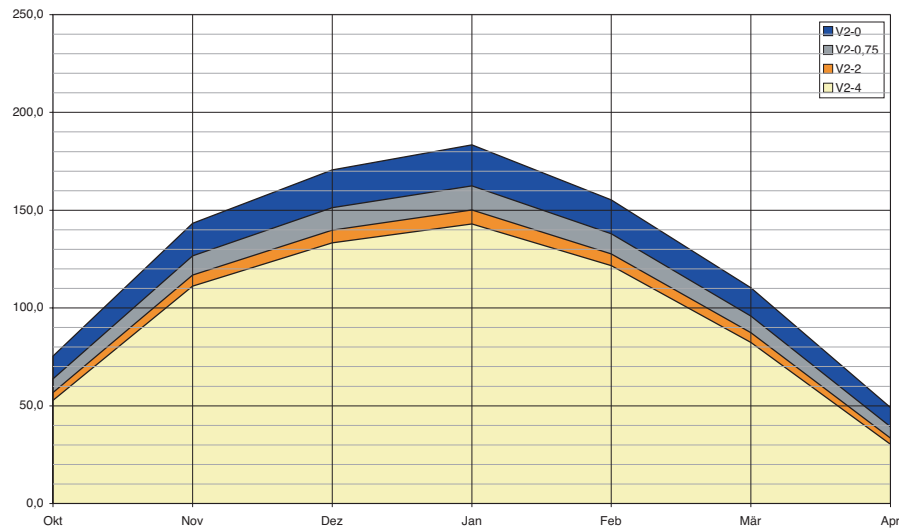


Abb. A2.12
Heizenergiebedarf, Ausrichtung Nord (zu V2), ohne Sonnenschutz-Strategie [kWh]

für alle Ausrichtungen und Varianten den Heizenergiebedarf für den Zeitraum von Mitte Dezember bis Mitte Januar, überlagert von der Außentemperatur. Die Grafiken machen das Potenzial der Maßnahmen zum temporären Wärmeschutz in diesem Zeitraum grafisch deutlich.

Abb. A2.18 gibt Aufschluss über die variantenbezogenen Transmissionsverluste, hier am Beispiel der Ausrichtung Nord im Januar im Vergleich der beiden verglichenen Verglasungsqualitäten (V1 und V2).

Der Verlauf des Heizenergiebedarfs lässt sich für die Ausrichtung Nord in Abb. A2.19 (Januar) und A2.20 (Oktober) für beide Verglasungsvarianten jeweils im Detail verfolgen.

2.2.1 Allgemeine Hinweise zu den Ergebnissen

Für die Varianten mit der Ausrichtung Nord und für alle Varianten mit dem Untersuchungszeitraum Januar mit Ausnahme der Ausrichtung Süd kommt die solare Einstrahlung nie über 400 W/m^2 , so dass der Sonnenschutz hier nicht zum Einsatz kommt. Für diese Fälle sind also die Varianten V1 und V1-SS bezogen auf die Ergebnisse identisch.

Aufgrund der gewählten Lüftungsstrategie (konstant $0,7/h$) sind die Luftwechselverluste nur von der Außenlufttemperatur abhängig. Sie sind daher in allen Diagrammen mit analogem Betrachtungszeitraum identisch.

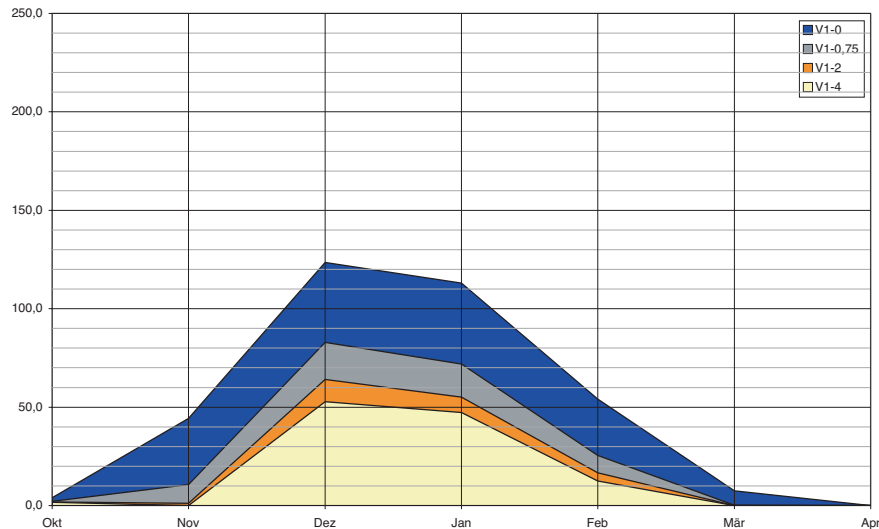


Abb. A2.14
Heizenergiebedarf, Ausrichtung Süd (zu V1), ohne Sonnenschutz-Strategie [kWh]

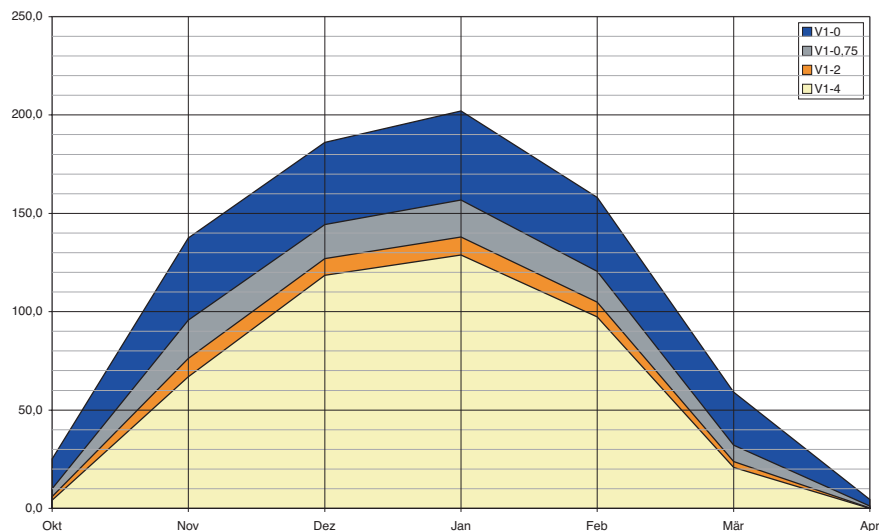


Abb. A2.15
Heizenergiebedarf, Ausrichtung West (zu V1), ohne Sonnenschutz-Strategie [kWh]

Die Januar-Darstellungen zeigen deutlich die eingesetzte Heizungsregelstrategie: Der Heizlastverlauf stellt sich ziemlich genau als Spiegelung des Transmissionsverlustverlaufes dar.

2.2.2 Interpretation einzelner Ergebnisse

2.2.2.1 Ausrichtung Nord

Besonders im Norden ist die Korrelation zwischen Außentemperatur, Transmissionsverlusten und der durch die jeweils nur kurz einwirkenden solaren Einträge reduzierten Heizlast anschaulich nachzuvollziehen (Abb. A2.16 und A2.17).

In den Januar-Betrachtungen ist der treppenartige Einbruch des Heizenergiebedarfs und der Rückgang der Transmissionsverluste während der Nachtzeiten mit aktivem zusätzlichem Wärmeschutz deutlich zu sehen (Abb. A2.16).

Die Darstellung veranschaulicht auch, wie sich während der Nachtzeiten die Innenscheibentemperatur an die Raumtemperatur annähert, siehe Abb. A2.21 (oben). Dieser Zusammenhang zeigt sich in der Größenordnung analog für andere Ausrichtungen, siehe Abb. A2.24 (Ost), A2.28 (Süd) und A2.31 (West), jeweils obere Darstellung.

Durch den temporären Wärmeschutz wird diese für die Bahaglichkeit maßgebliche Größe von ca. 14° C um ca. 5 Kelvin in unmittelbare Nähe der Rauminnentempera-

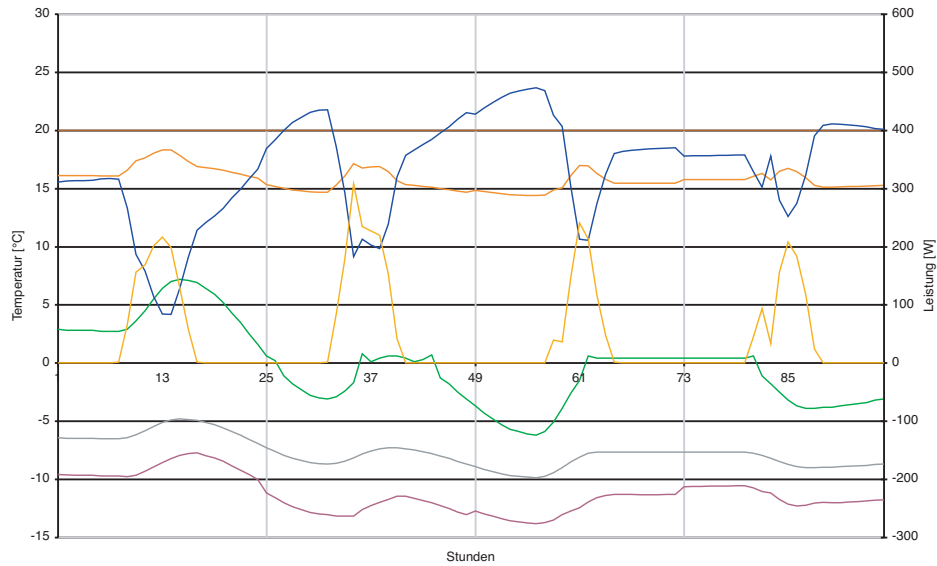
tur von 20° C angehoben und damit potenziell Kondensat verhindert.

Der Einsatz einer verbesserten Verglasung zeigt den Effekt immer noch deutlich, hier liegt der Unterschied bei 2-3 Kelvin. Der Verlauf des Heizenergiebedarfs zeigt im Detail jeweils am Ende der Nacht immer wiederkehrende markante Spitzen für die Varianten mit temporärem Wärmeschutz (vergleiche Abb. A2.19 und A2.20).

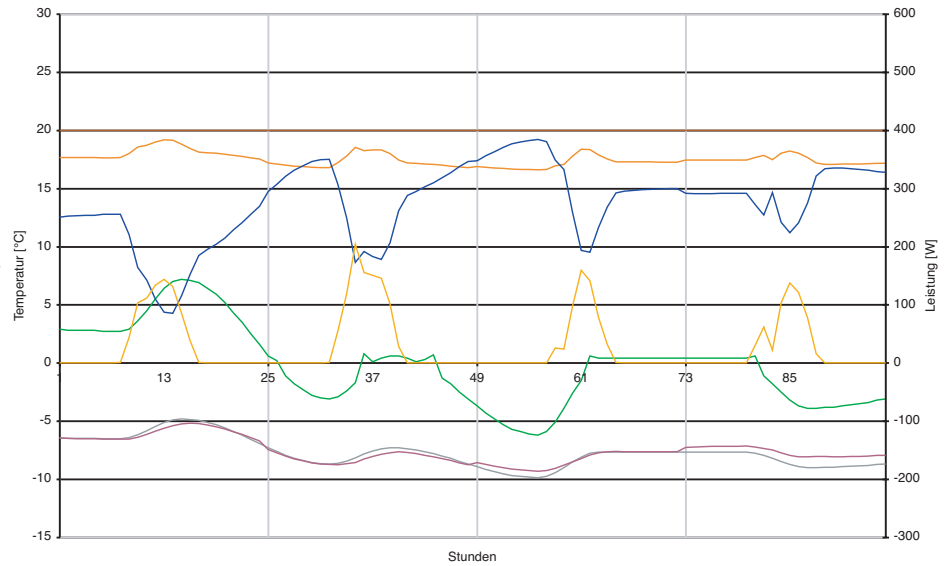
Die Ursache dafür liegt in der Festlegung der auslösenden Größe von 0 W/m² Strahlungsangebot für den temporären Wärmeschutz, dessen Wirkung somit regelmäßig aussetzt, bevor ein ausreichendes solares Angebot vorhanden ist. Die sich ergebende ‚Lücke‘ muss von der Heizung überbrückt werden, wenn die Innentemperatur zwingend gehalten werden muss.

Hier sind somit zwei weitere, alternative Optimierungsszenarien ablesbar:

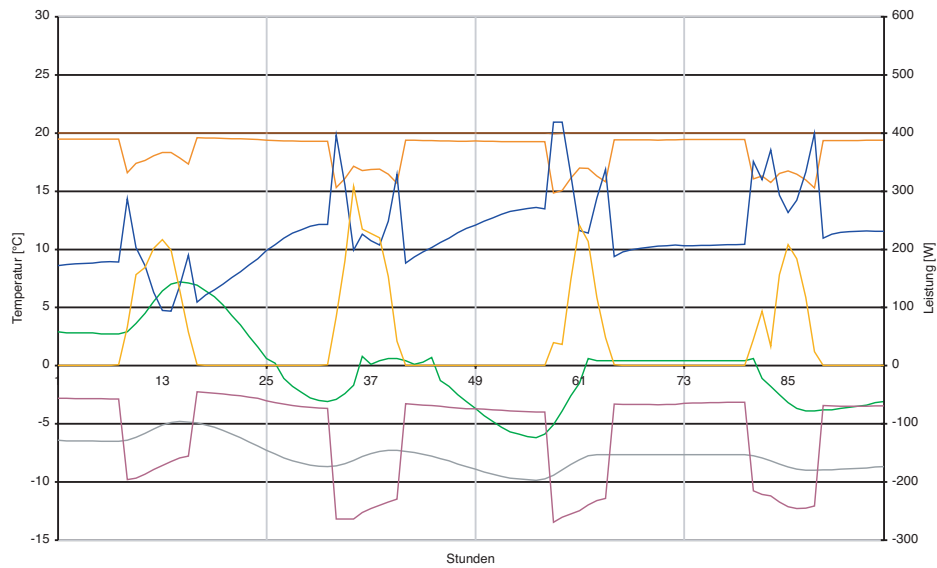
1. Durch eine geringfügige Verlängerung der Einsatzdauer des temporären Wärmeschutzes morgens und abends könnte der Heizenergiebedarf vermutlich nochmals deutlich gesenkt werden.
2. Durch ein Akzeptieren von geringfügig niedrigeren, morgentlichen Raumtemperaturen könnte Heizenergie in deutlichem Umfang eingespart werden.



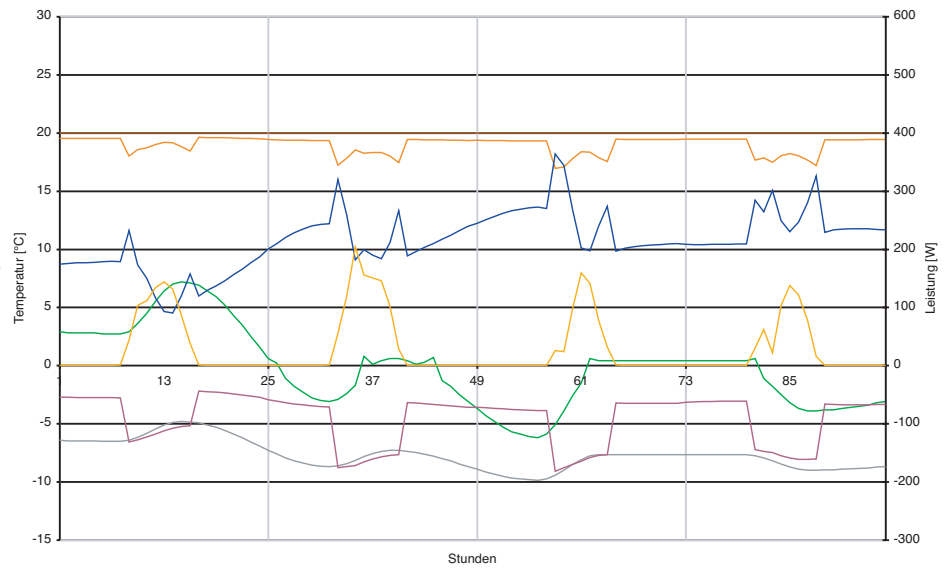
Ergebnisse zu V1-0, 4. -7. Januar



Ergebnisse zu V2-0, 4. -7. Januar



Ergebnisse zu V1-4, 4. -7. Januar



Ergebnisse zu V2-4, 4. -7. Januar

TL	Außenlufttemperatur in [°C]	QS	eingestrahlte Sonnenenergie durch das Fenster in [W]
TI	Raumlufttemperatur in [°C]	QAirC	Luftwechselverluste in [W]
TIF	Oberflächentemperatur der Innenscheibe in [°C]	QTr	Transmissionsverluste durch den Fensterbereich in [W]
H	Heizlast / Kühllast in [W]		

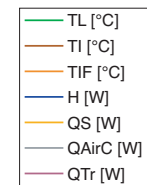
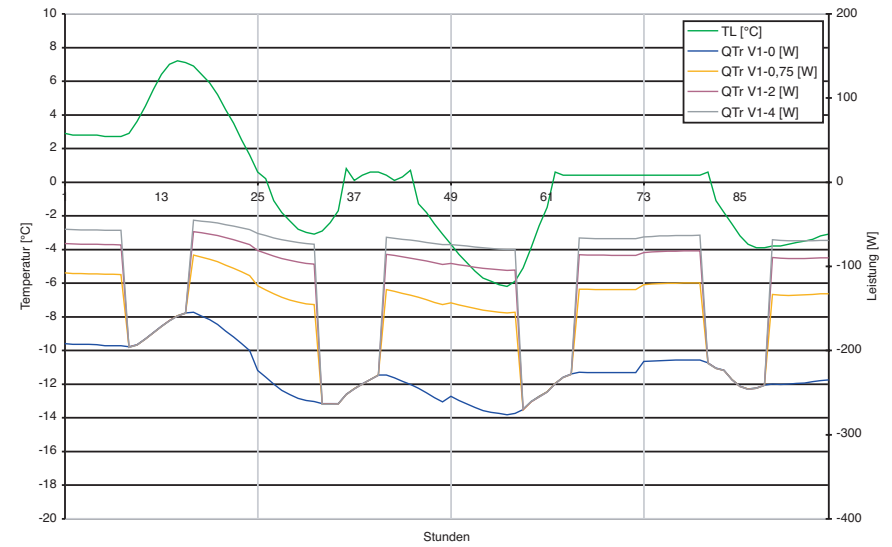
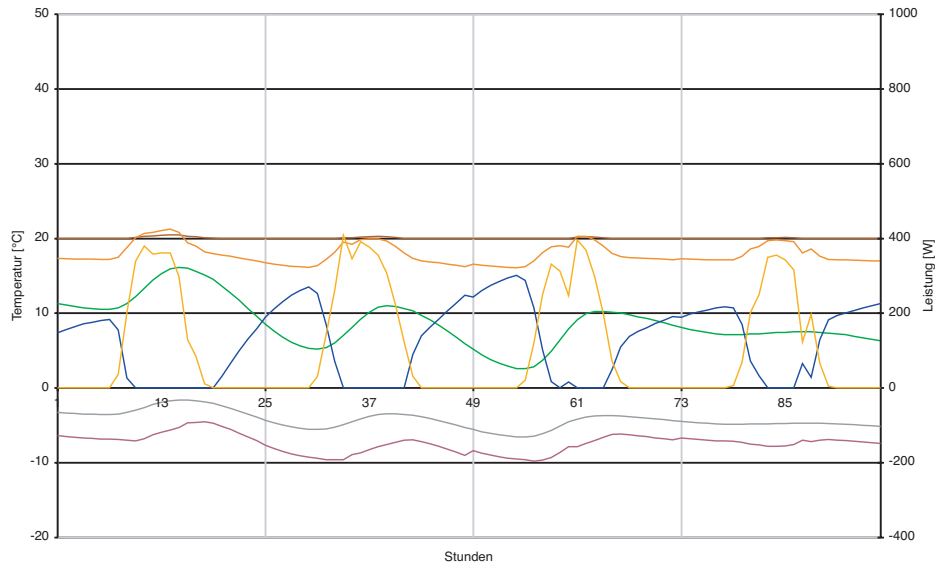
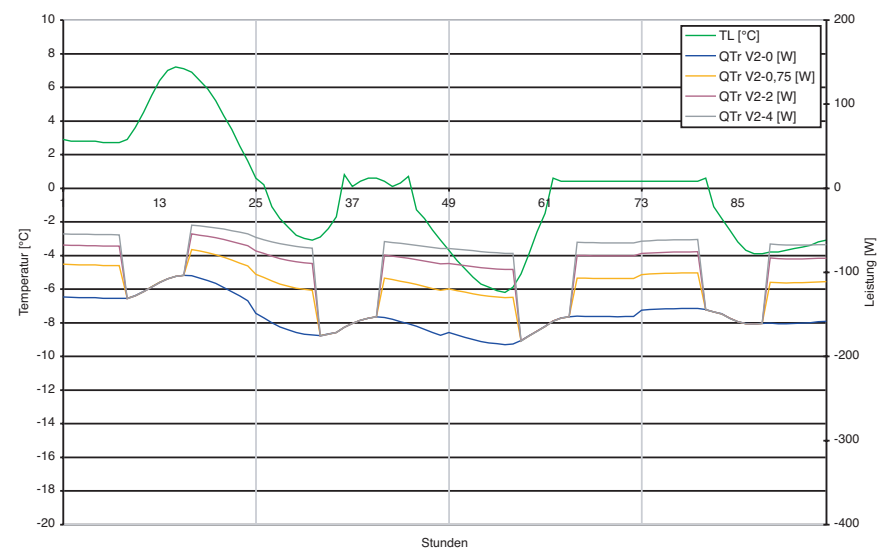
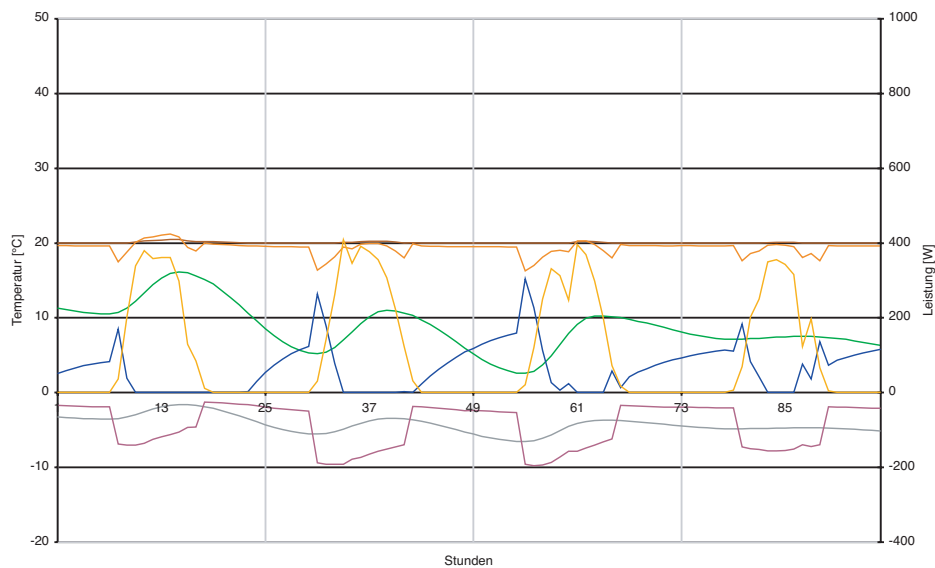


Abb. A2.16 Ausrichtung: Nord, Variantenbezogene Ergebnisse
 Simulationsperiode: 04. Januar, 0:00 Uhr bis 07. Januar, 24:00 Uhr



Ergebnisse zu V1-0, 4. -7. Oktober

Transmissionsverluste durch den Fensterbereich, Ergebnisse zu V1, 4. -7. Januar



Ergebnisse zu V1-4, 4. -7. Oktober

Transmissionsverluste durch den Fensterbereich, Ergebnisse zu V2, 4. -7. Januar

Abb. A2.17 Ausrichtung: Nord, Variantenbezogene Ergebnisse
 Simulationsperiode: 04. Okt., 0:00 Uhr bis 07. Okt., 24:00 Uhr

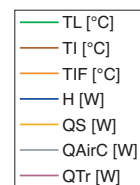
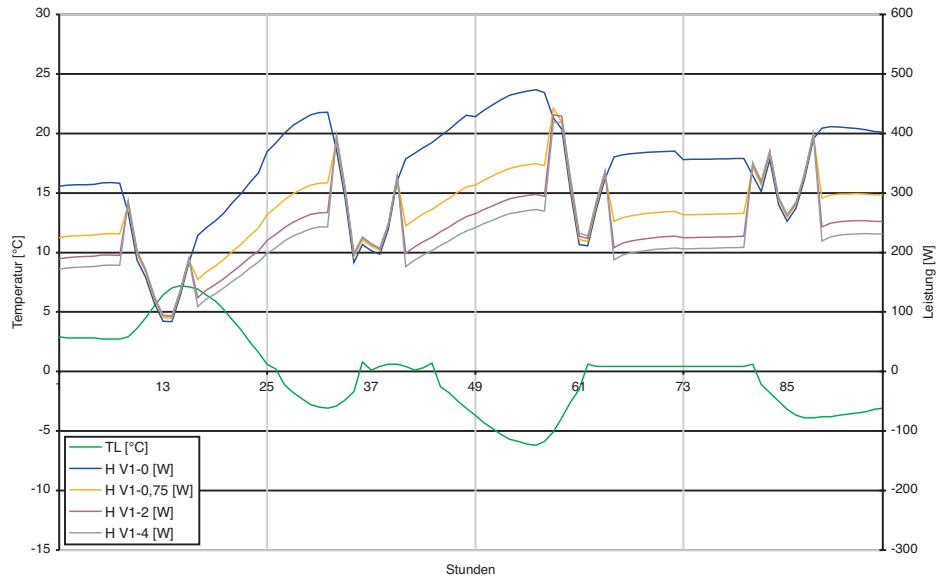
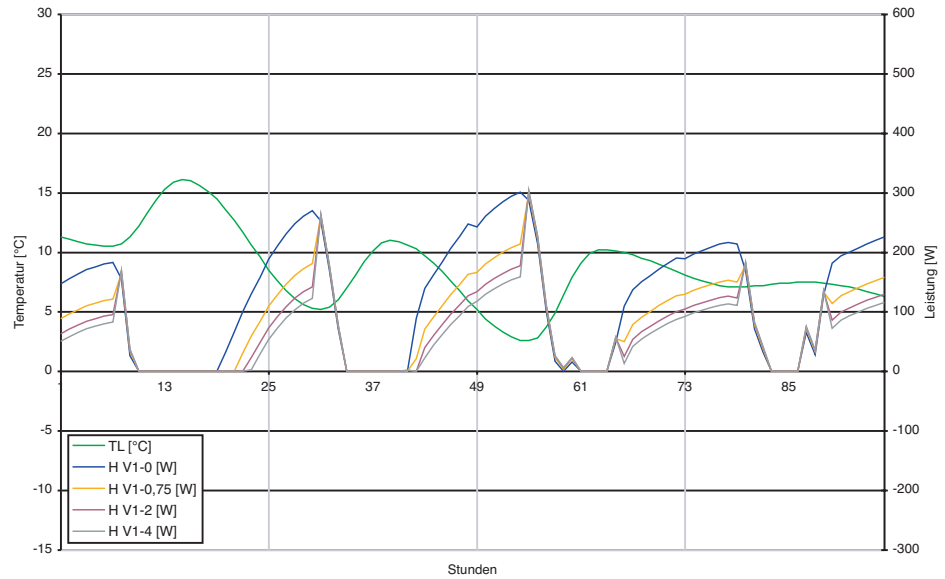


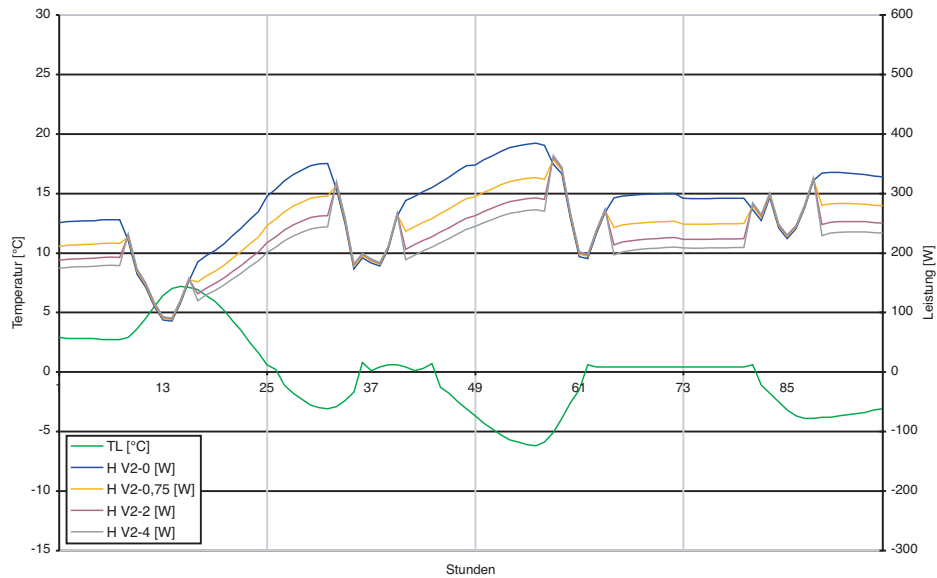
Abb. A2.18 Ausrichtung: Nord, Variantenbezogene Ergebnisse
 Simulationsperiode: 04. Januar, 0:00 Uhr bis 07. Januar, 24:00 Uhr



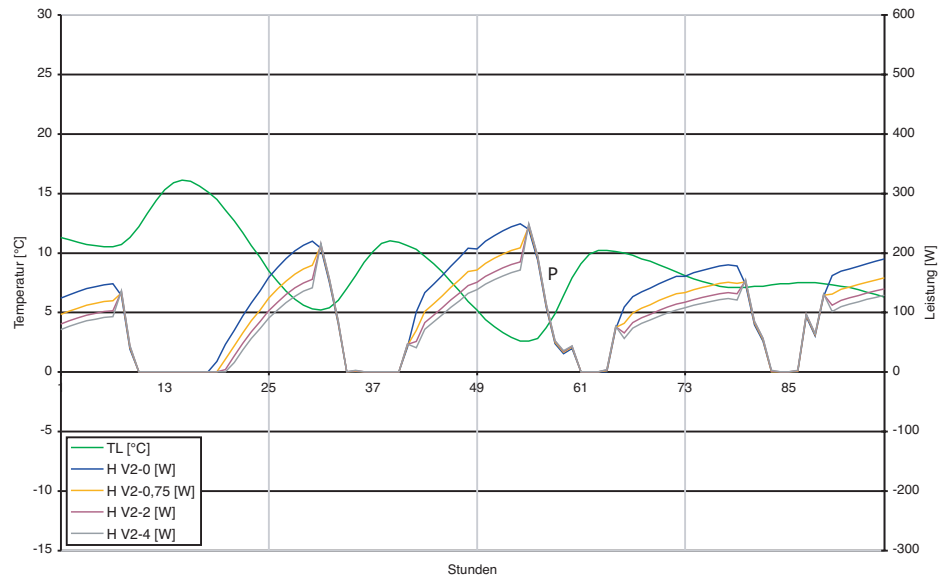
Heizenergiebedarf 4. -7. Januar, Ergebnisse zu V1



Heizenergiebedarf 4. -7. Oktober, Ergebnisse zu V1



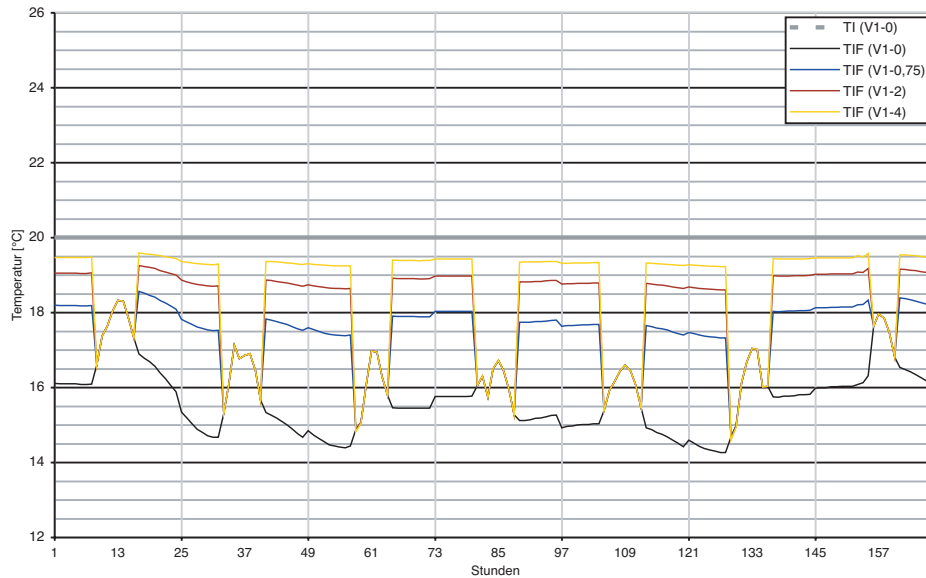
Heizenergiebedarf 4. -7. Januar, Ergebnisse zu V2



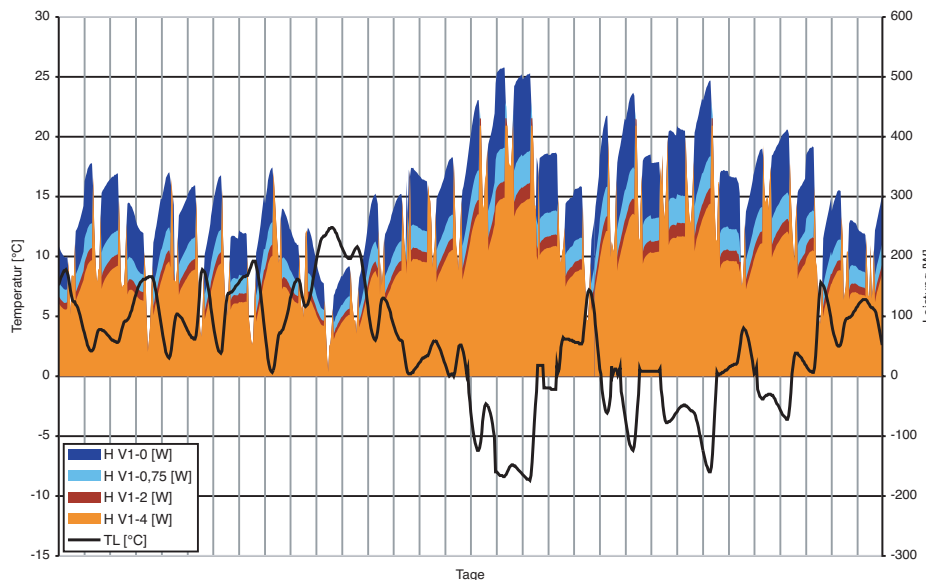
Heizenergiebedarf 4. -7. Oktober, Ergebnisse zu V2

Abb. A2.19 Ausrichtung: Nord, Variantenbezogene Ergebnisse
 Simulationsperiode: 04. Januar, 0:00 Uhr bis 07. Januar, 24:00 Uhr

Abb. A2.20 Ausrichtung: Nord, Variantenbezogene Ergebnisse
 Simulationsperiode: 04. Oktober, 0:00 Uhr bis 07. Oktober, 24:00 Uhr



Oberflächentemperaturen der Verglasungsinnenseite, Ergebnisse zu V1, 4.-10. Januar



Heizenergiebedarf, Ergebnisse zu V1, 15. Dezember - 15. Januar

Abb. A2.21 Ausrichtung: Nord, Ergebnisse zu V1
Oberflächentemperaturen der Verglasungsinnenseite und Heizenergiebedarf

2.2.2.2 Ausrichtung Ost und West

Die Ergebnisse für diese beiden Ausrichtungen sind nahezu identisch, obwohl die Profile für die solare Einstrahlung natürlich ihren Peak zu verschiedenen Stunden haben, was im Vergleich der Diagramme deutlich zu sehen ist.

Die während des Jahres sehr vergleichbare Einstrahlungssituation zeigt sich auch an der Zahl der Stunden, in denen der Sonnenschutz im Betrachtungszeitraum aktiv ist:

- Nord: 0 Stunden
- Ost: 117 Stunden
- West: 123 Stunden
- Süd: 393 Stunden

In Ergänzung zu dem zur Ausrichtung Nord Ausgeführten zeigt sich hier insbesondere folgender Effekt:

Wie schon erläutert, führt die gewählte Sonnenschutz-Strategie zu einem Anstieg des Heizenergiebedarfs. Dies zeigen Abb. A2.22 (rechte Spalte) und A2.23 deutlich.

2.2.2.3 Ausrichtung Süd

Auf der Südseite kommt es auch im betrachteten Zeitraum im Januar teilweise zu so hohem Solarstrahlungseintrag, dass der Sonnenschutz aktiv wird (vergleiche hierzu Abb. A2.25 linke und rechte Spalte).

Abb. A2.26 (linke Spalte) zeigt die Auswirkungen des nicht vorhandenen Sonnenschutzes auf die Innenverglasungstemperaturen, die nach diesen Rechnungen während des Tages Temperaturspitzen im Bereich von 40° C erreichen können und entsprechend wie Strahlungsheizkörper auf den Innenraum wirken.

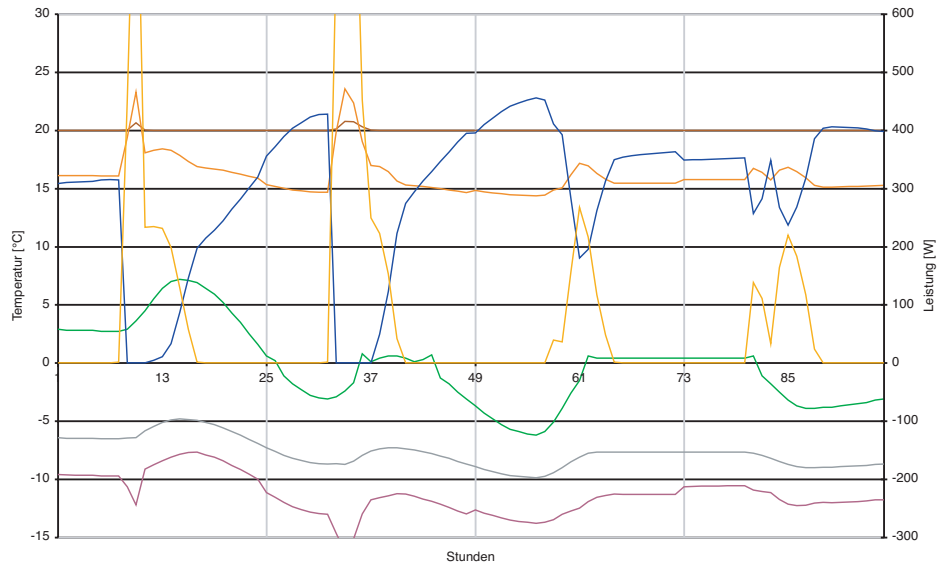
Dieser Effekt, der im Winter der Behaglichkeit zuträglich wäre, ist im Sommer sicher unerwünscht.

Durch den Sonnenschutz bleiben die Oberflächentemperaturen unter 25° C, siehe Abb. A2.26 (rechte Spalte).

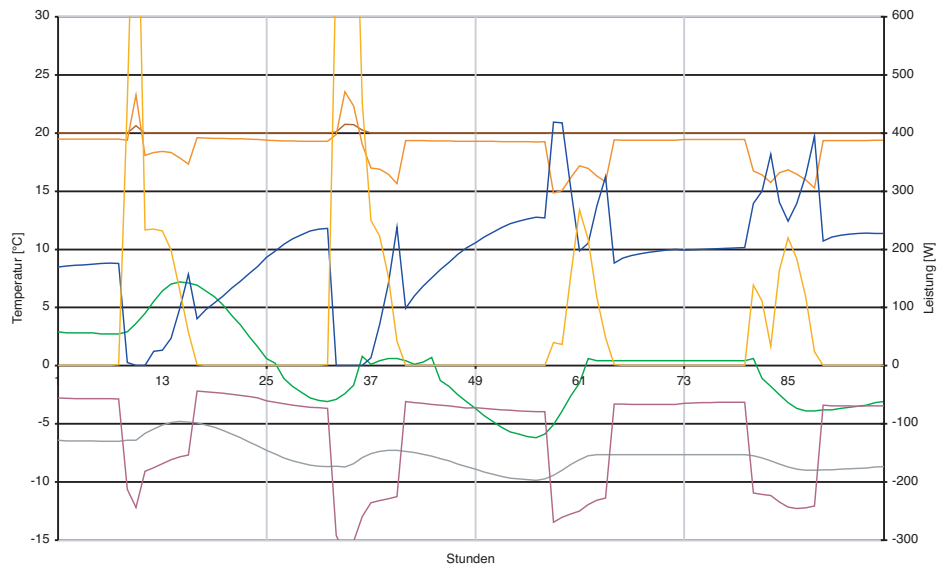
An dieser Abbildung wird auch erneut deutlich, dass die Sonnenschutz-Strategie, die die Raumtemperatur nicht berücksichtigt, zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs führt, ihn sogar für den hier dargestellten Fall im Oktober überhaupt erst begründet.

Die entgangenen solaren Gewinne können hier durch den temporären Wärmeschutz nicht ganz ausgeglichen werden.

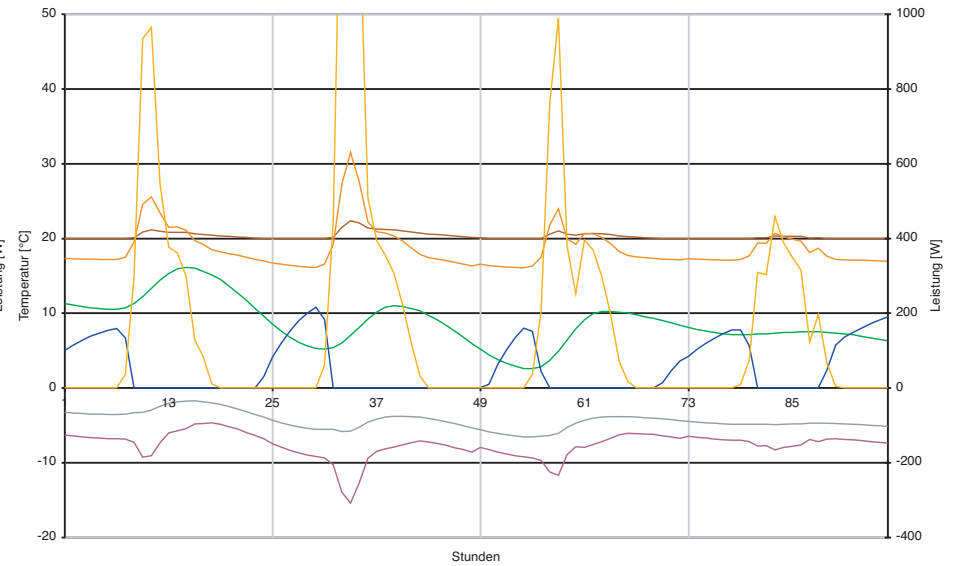
Die Darstellungen zu den Transmissionswärmeverlusten und dem Heizwärmebedarf im Januar (Abb. A2.27 oben und unten) entsprechen qualitativ denen für die Ausrichtung Nord besprochenen (Abb. A2.19 und A2.20).



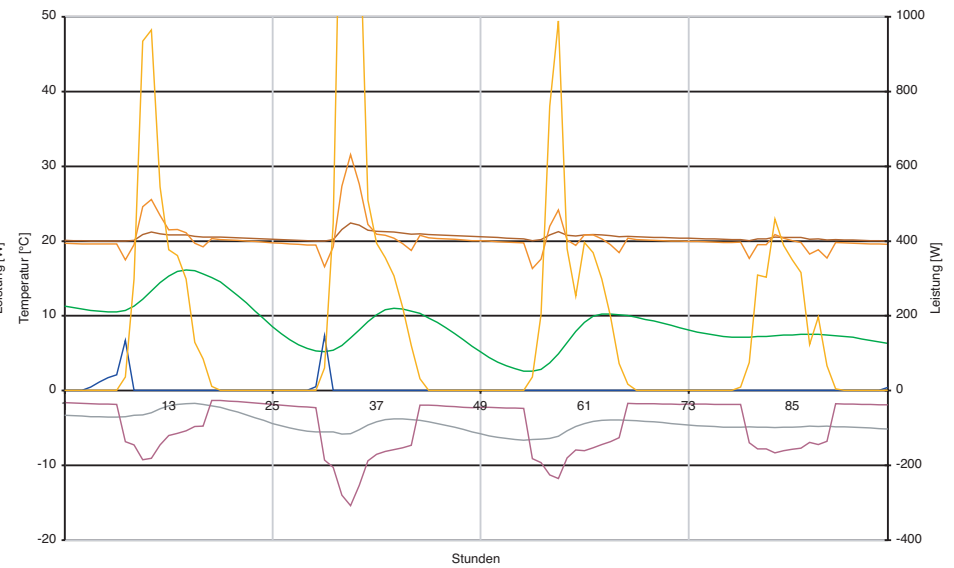
Ergebnisse zu V1-0, 4. -7. Januar



Ergebnisse zu V1-4, 4. -7. Januar



Ergebnisse zu V1-0, 4. -7. Oktober, ohne Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-4, 4. -7. Oktober, ohne Sonnenschutz-Strategie

TL	Außenlufttemperatur in [°C]	QS	eingestrahlte Sonnenenergie durch das Fenster in [W]
TI	Raumlufttemperatur in [°C]	QAirC	Luftwechselverluste in [W]
TIF	Oberflächentemperatur der Innenscheibe in [°C]	QTr	Transmissionsverluste durch den Fensterbereich in [W]
H	Heizlast / Kühllast in [W]		

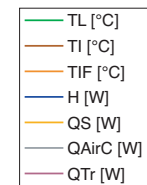
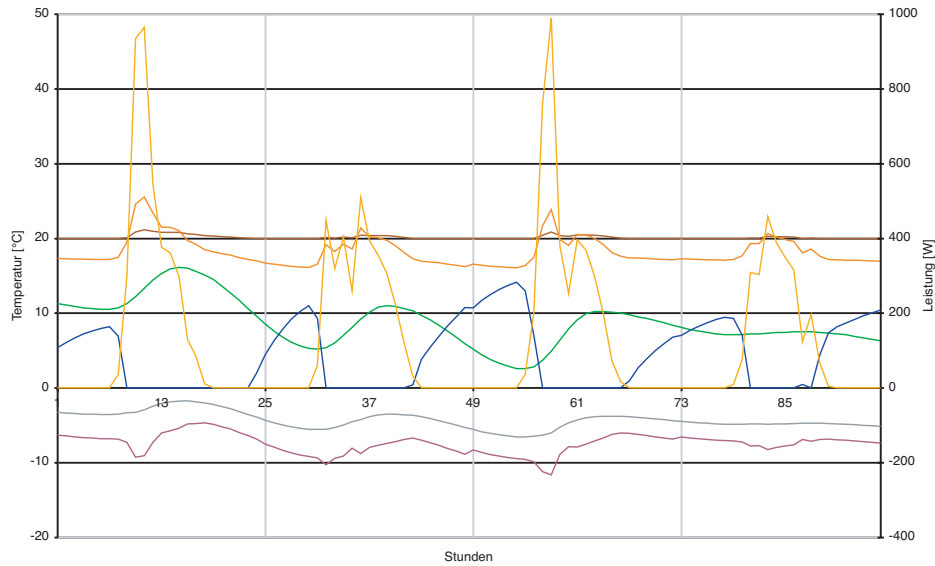
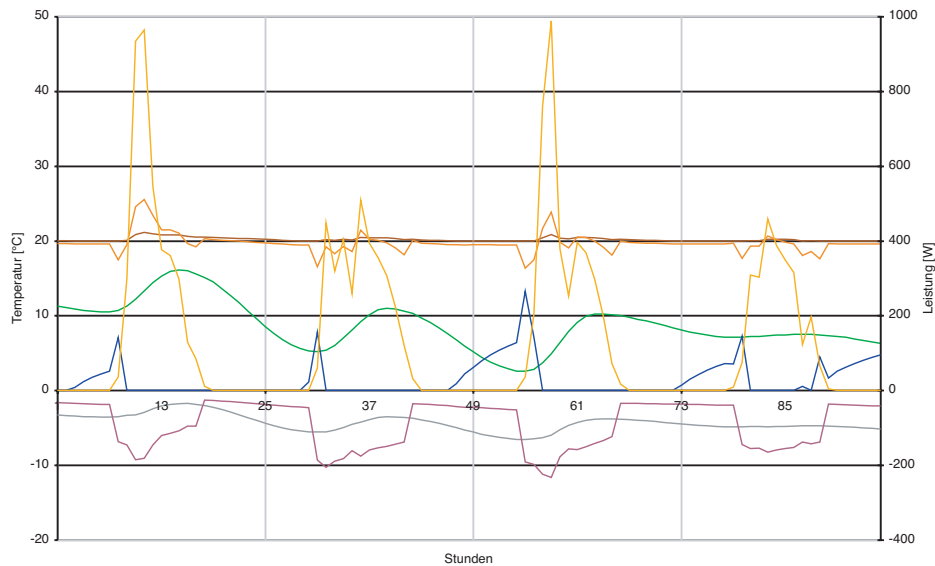


Abb. A2.22 Ausrichtung: Ost, Variantenbezogene Ergebnisse, Simulationsperiode: 4. Jan.- 7. Jan. und 4. Okt.- 7. Okt., jeweils 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr



Ergebnisse zu V1-0-SS, 4. -7. Oktober, mit Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-4-SS, 4. -7. Oktober, mit Sonnenschutz-Strategie

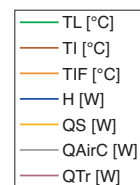
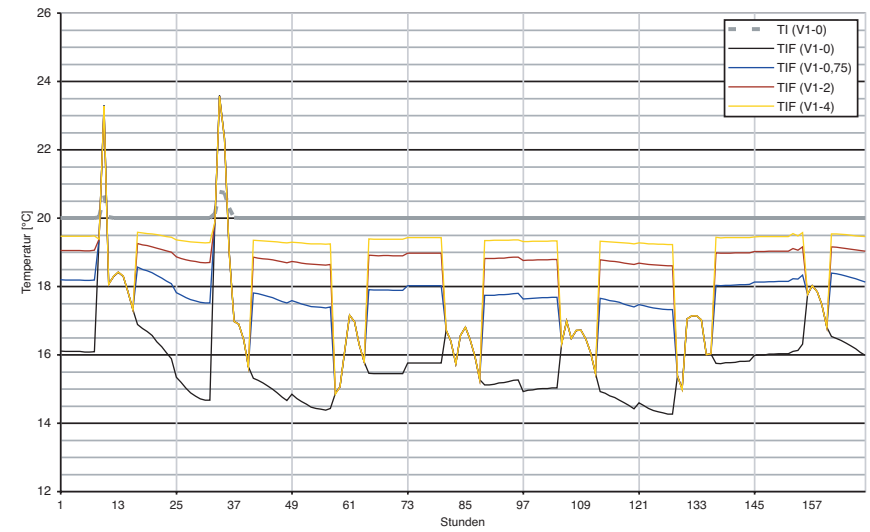
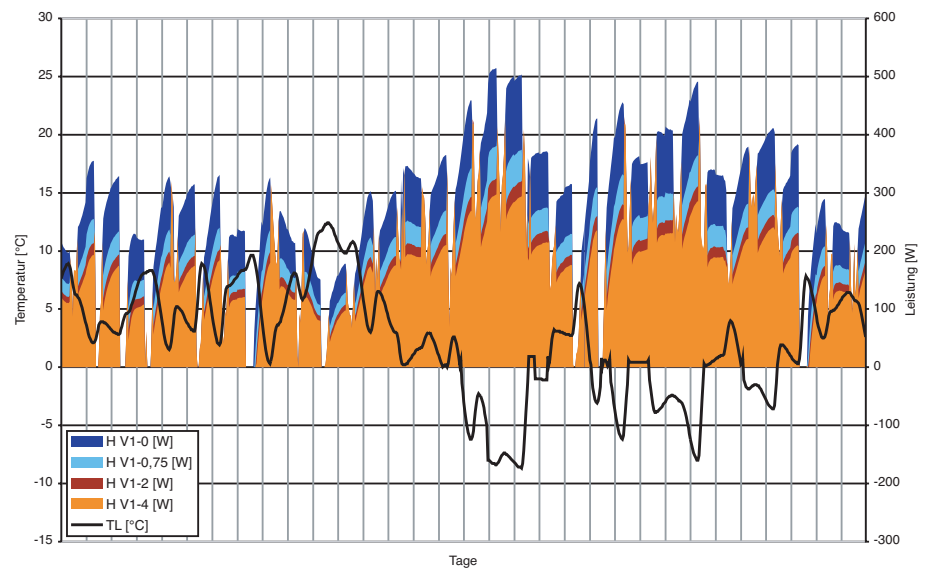


Abb. A2.23 Ausrichtung: Ost, Variantenbezogene Ergebnisse
Simulationsperiode: 04. Okt., 0:00 Uhr bis 07. Okt., 24:00 Uhr

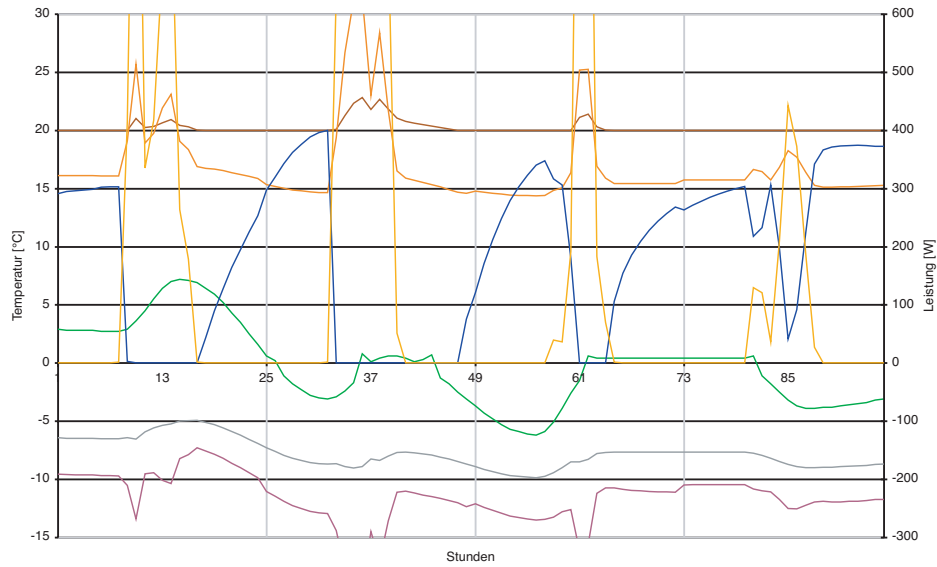


Oberflächentemperaturen der Verglasunginnenseite, Ergebnisse zu V1, 4.-10. Januar

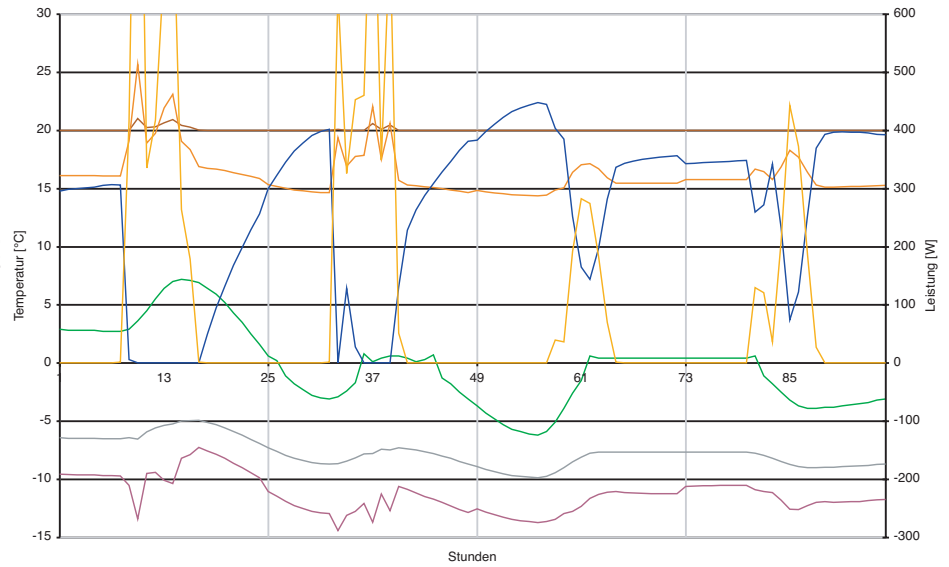


Heizenergiebedarf, Ergebnisse zu V1, 15. Dezember - 15. Januar

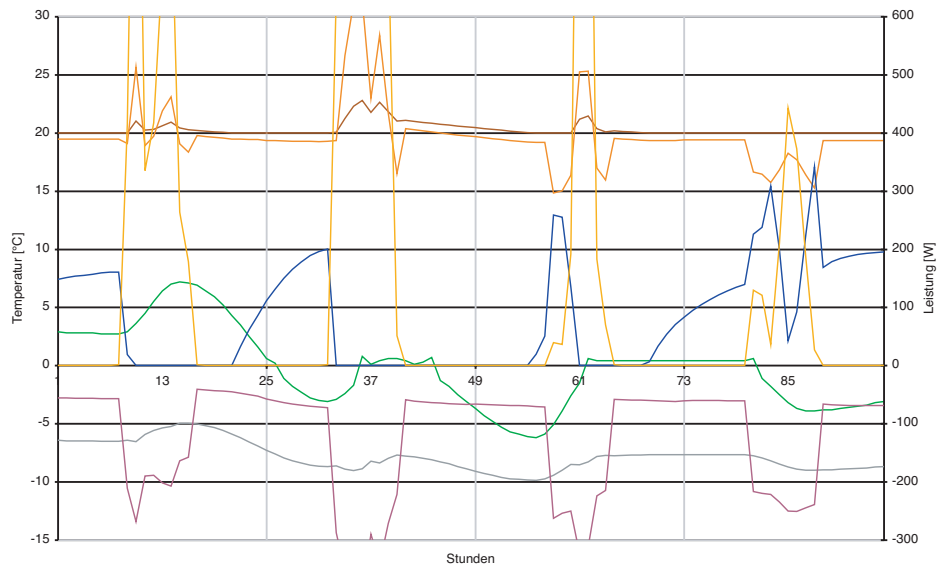
Abb. A2.24 Ausrichtung: Ost, Ergebnisse zu V1
Oberflächentemperaturen der Verglasunginnenseite und Heizenergiebedarf



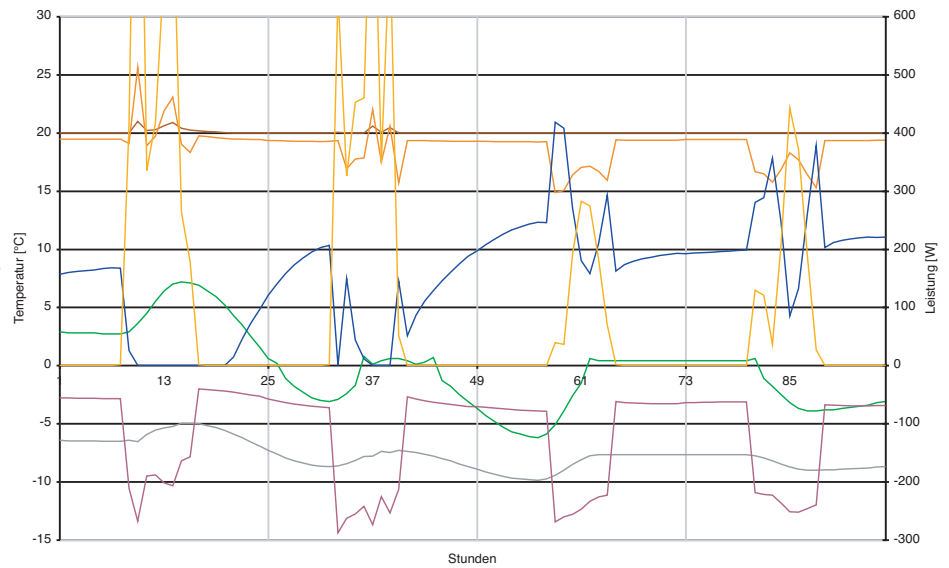
Ergebnisse zu V1-0, 4. -7. Januar, ohne Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-0-SS, 4. -7. Januar, mit Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-4, 4. -7. Januar, ohne Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-4-SS, 4. -7. Januar, mit Sonnenschutz-Strategie

- | | | | |
|-----|--|-------|---|
| TL | Außenlufttemperatur in [°C] | QS | eingestrahlte Sonnenenergie durch das Fenster in [W] |
| TI | Raumlufttemperatur in [°C] | QAirC | Luftwechselverluste in [W] |
| TIF | Oberflächentemperatur der Innenscheibe in [°C] | QTr | Transmissionsverluste durch den Fensterbereich in [W] |
| H | Heizlast / Kühllast in [W] | | |

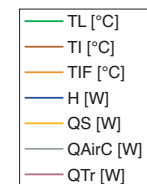
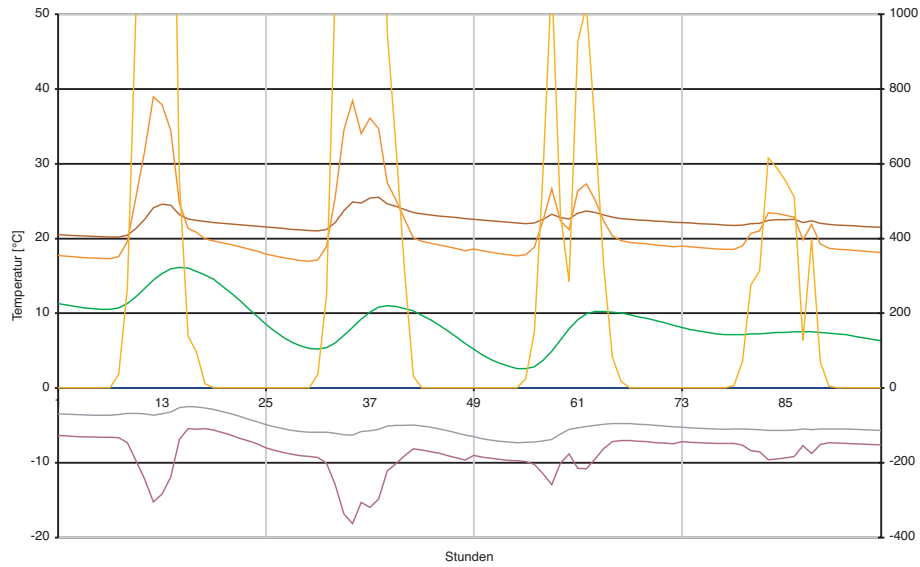
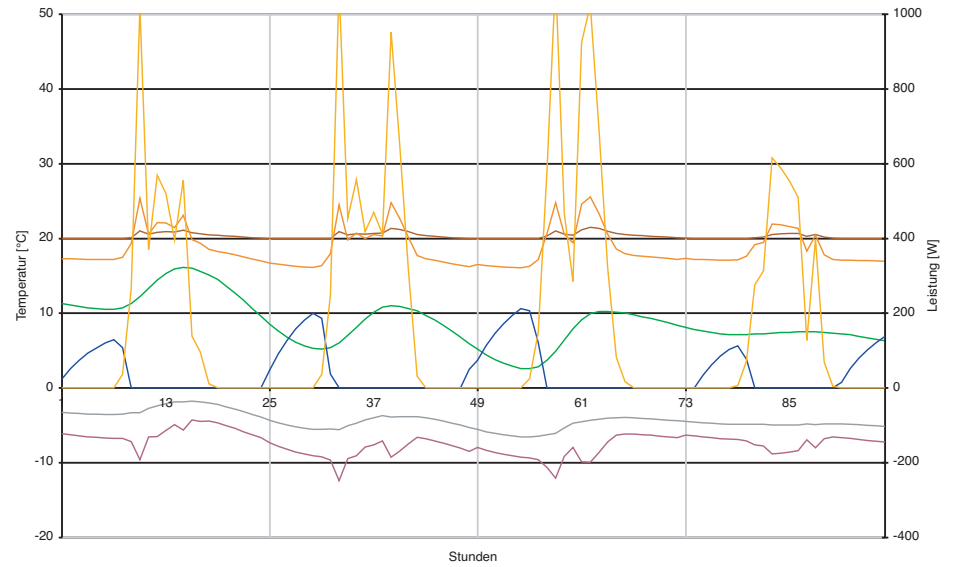


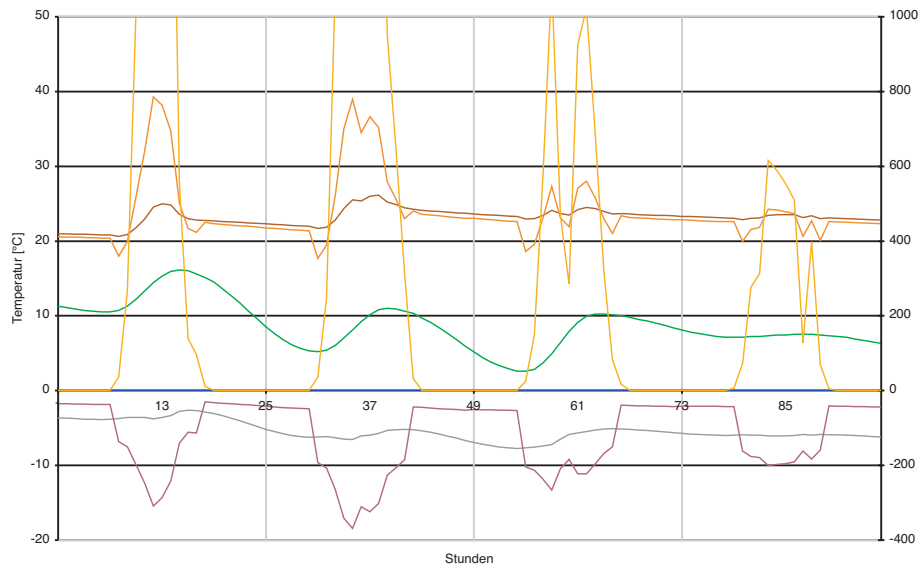
Abb. A2.25 Ausrichtung: Süd, Variantenbezogene Ergebnisse, Simulationsperiode: 04. Januar - 07. Januar, jeweils 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr



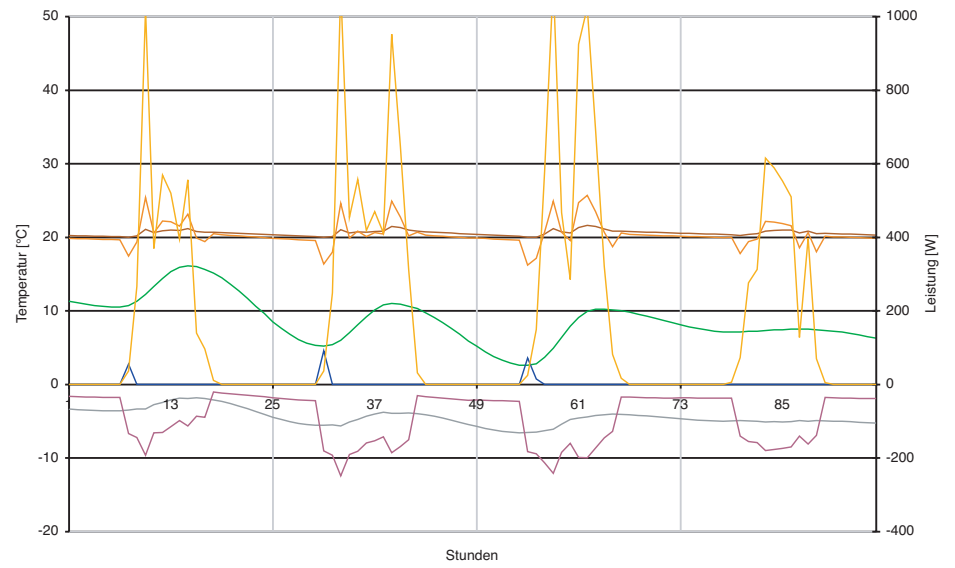
Ergebnisse zu V1-0, 4. -7. Oktober, ohne Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-0-SS, 4. -7. Oktober, mit Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-4, 4. -7. Oktober, ohne Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-4-SS, 4. -7. Oktober, mit Sonnenschutz-Strategie

- | | | | |
|-----|--|-------|---|
| TL | Außenlufttemperatur in [°C] | QS | eingestrahle Sonnenenergie durch das Fenster in [W] |
| TI | Raumlufttemperatur in [°C] | QAirC | Luftwechselverluste in [W] |
| TIF | Oberflächentemperatur der Innenscheibe in [°C] | QTr | Transmissionsverluste durch den Fensterbereich in [W] |
| H | Heizlast / Kühllast in [W] | | |

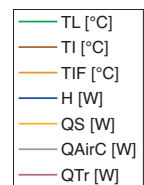
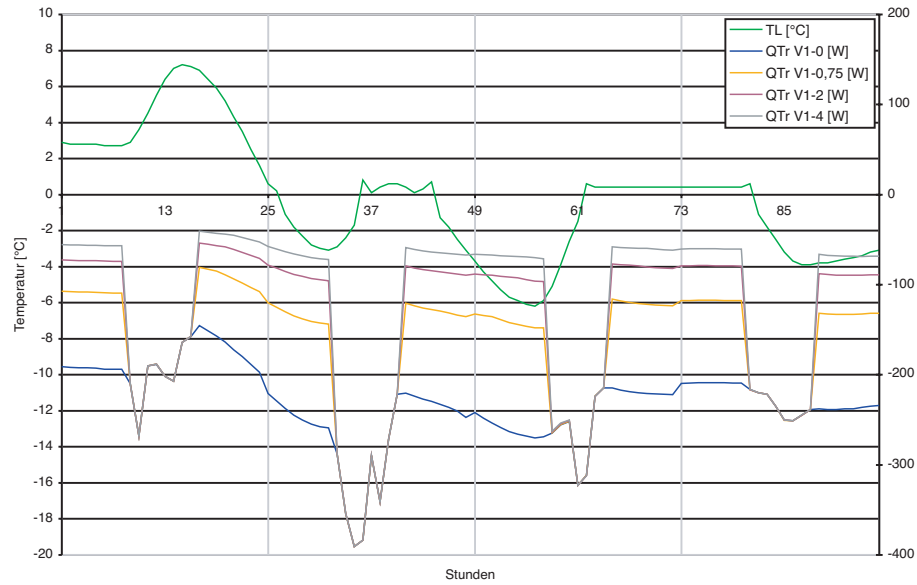
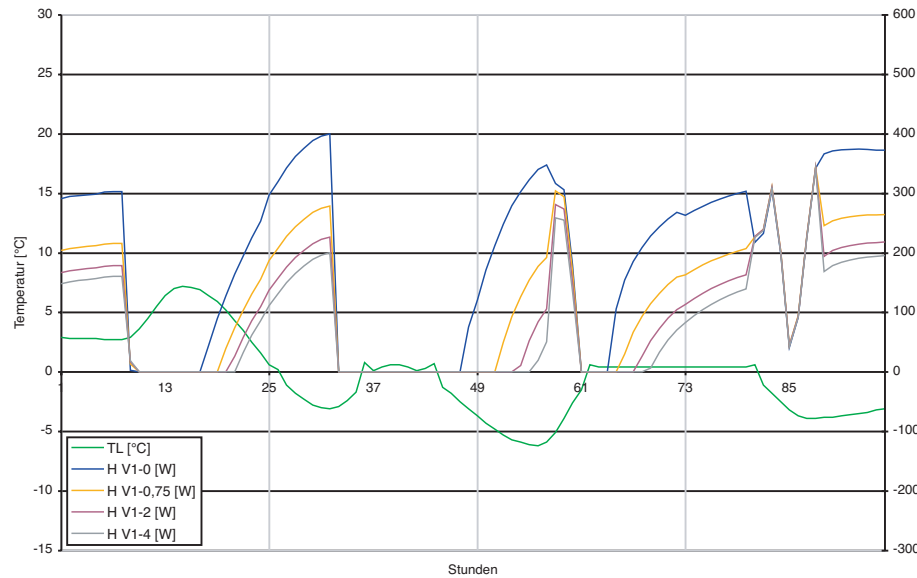


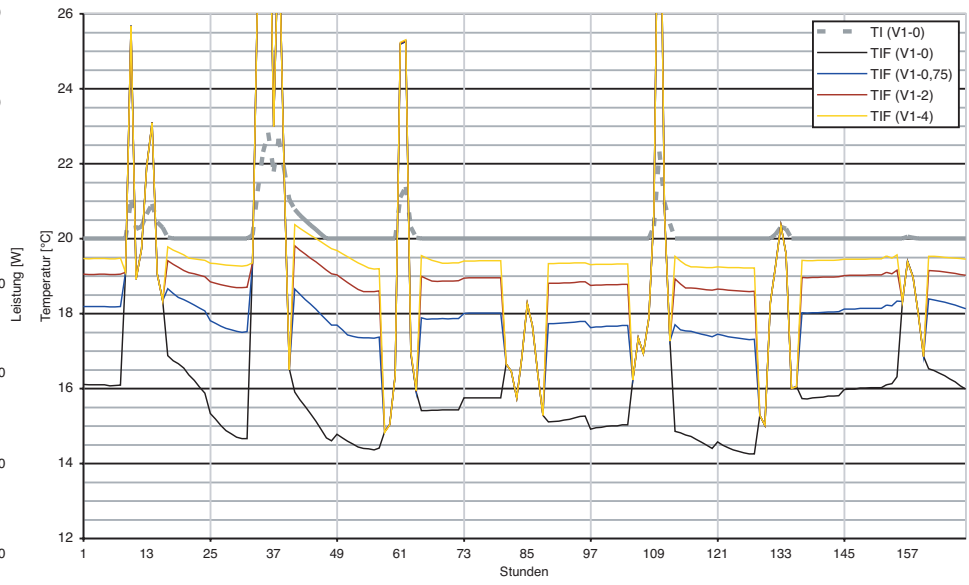
Abb. A2.26 Ausrichtung: Süd, Variantenbezogene Ergebnisse, Simulationsperiode: 04. Oktober - 07. Oktober, jeweils 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr



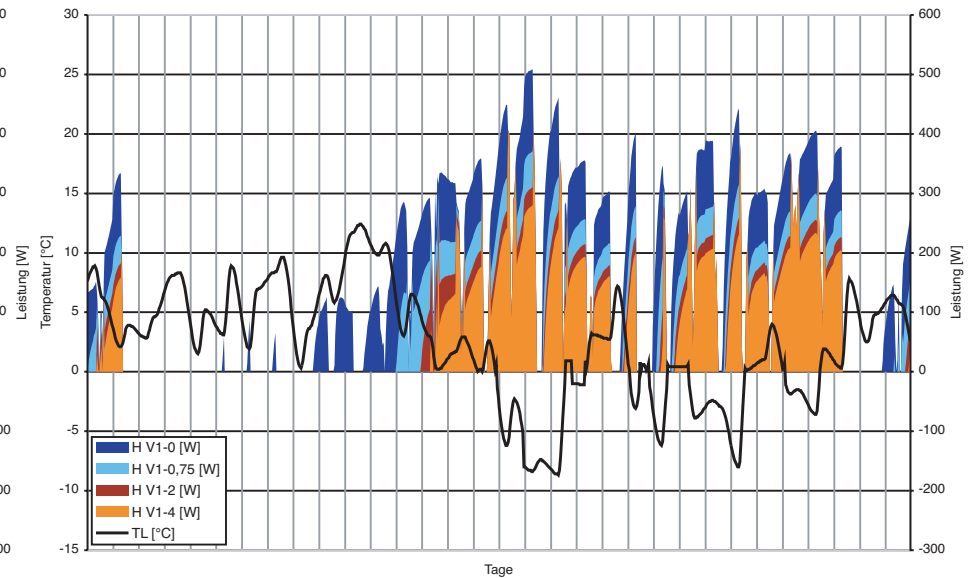
Transmissionsverluste durch den Fensterbereich, Ergebnisse zu V1, 4. -7. Januar



Heizenergiebedarf 4. -7. Januar, Ergebnisse zu V1



Oberflächentemperaturen der Verglasunginnenseite, Ergebnisse zu V1, 4.-10. Januar



Heizenergiebedarf, Ergebnisse zu V1, 15. Dezember - 15. Januar

Abb. A2.27 Ausrichtung: Süd, Ergebnisse zu V1, 4. -7. Januar
Transmissionsverluste (Fenster) und Heizenergiebedarf

Abb. A2.28 Ausrichtung: Süd, Ergebnisse zu V1
Oberflächentemperaturen der Verglasunginnenseite und Heizenergiebedarf

3 Schlussbetrachtungen zu diesem Teil

Obwohl auf Basis der gewählten Grundlagen und Randbedingungen selbst in den Übergangsmontaten positive Ergebnisse durch den temporären Wärmeschutz erzielbar sind, müssen folgende Aspekte im Hinblick auf eine Übertragung auf eine reale Situation Beachtung finden:

- Besonders im Falle üblicher Weise vorhandener interner Lasten besteht in diesen Zeiten in der Regel bereits die Gefahr der Überhitzung. Eine wirkungsvolle Möglichkeit dem entgegenzuwirken besteht in der Strategie der Nachtauskühlung in Verbindung mit dem Einsatz von Bauteilen mit möglichst hohem Wärmespeichervermögen. Dieser Wirkung wäre der Einsatz eines nachts wirksamen, besonderen Wärmeschutzes der Fensteröffnung diametral entgegengesetzt.
- Die zugrunde gelegte (und in Anbetracht der Möglichkeiten des Simulationswerkzeugs in Verbindung mit der Zielsetzung der Untersuchung wohl auch einzige sinnvolle) Sonnenschutz-Strategie hat deutliches Optimierungspotenzial aufgezeigt, das in der Wahl einer sinnvolleren Regelstrategie für Sonnenschutz und Heizung liegt, die im Zusammenspiel mit einem angepassten Luftwechselprofil und durch Einbeziehung der Raumtemperatur

auch differenzierte Nutzungsaspekte berücksichtigen sollte.

- Die in der Simulation ermittelten Heizenergie-Einsparungen in den Übergangszeiten (zum Beispiel zu sehen in Abb. A2.20) sind allesamt in der Nacht erzielt und zu einem großen Teil der simplen Heizregelstrategie geschuldet. In der Realität kann es in der Regel gut verkräftet werden, ja es kann sogar wünschenswert sein, wenn die Raumtemperatur unter 20 °C fällt (vor allem dann, wenn in dieser Zeit nicht gearbeitet werden soll).

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen besteht in der Erkenntnis, dass die Wirkung eines temporären Wärmeschutzes umso größer ist, je höher der Unterschied zwischen den beiden anzusetzenden U-Werten (zwischen Verglasung mit und ohne Wärmeschutzmaßnahme) ausfällt.

Mit anderen Worten: Eine solche Maßnahme ist umso sinnvoller, je minderwertiger (höher) der U-Wert der eingesetzten Verglasung ist. Diese Ausgangshypothese (siehe Argumentation in Teil 7) konnte durch die Simulation bestätigt werden.

Damit ist die beschriebene Anwendung für den Umgang mit dem Altbaubestand besonders prädestiniert. Hier sind nicht nur die beschriebenen Auswirkungen auf eine Ver-

besserung der Behaglichkeit von großer Bedeutung, in vielen Fällen könnten zudem Kondensaterscheinungen im Fensterbereich und eine daraus resultierende und gesundheitlich bedenkliche Schimmelpilzbildung vermieden werden.

Desweiteren wird insbesondere ein höheres A/V-Verhältnis und ein größerer Fensterflächenanteil zu einer Verstärkung der beschriebenen Effekte führen.

Aus dem oben Ausgeführten ergibt sich außerdem eine besondere Eignung für Gebäude mit Nutzungen, die konstant hohe Innenraumtemperaturen erfordern und damit keine Nachtabsenkung zulassen.

Dies trifft beispielsweise für viele Kliniken zu. Auch an Räume, in denen Sporteinrichtungen untergebracht sind, die auch zu Nachtzeiten geöffnet und zugänglich sind, werden entsprechende Anforderungen gestellt.

Eine weitere Steigerung des beschriebenen Effekts lässt eine Betrachtung von Standorten im Bereich von Breitengraden mit längeren und kälteren Wintern erwarten. Hier sind zu den maßgeblichen Jahreszeiten auch die Nächte und damit die Einsatzzeiten entsprechend länger.

Da die Wärmeverluste über verglaste Dachbereiche insbesondere in wolkenlosen Winternächten diejenigen von vertikalen Fenster-

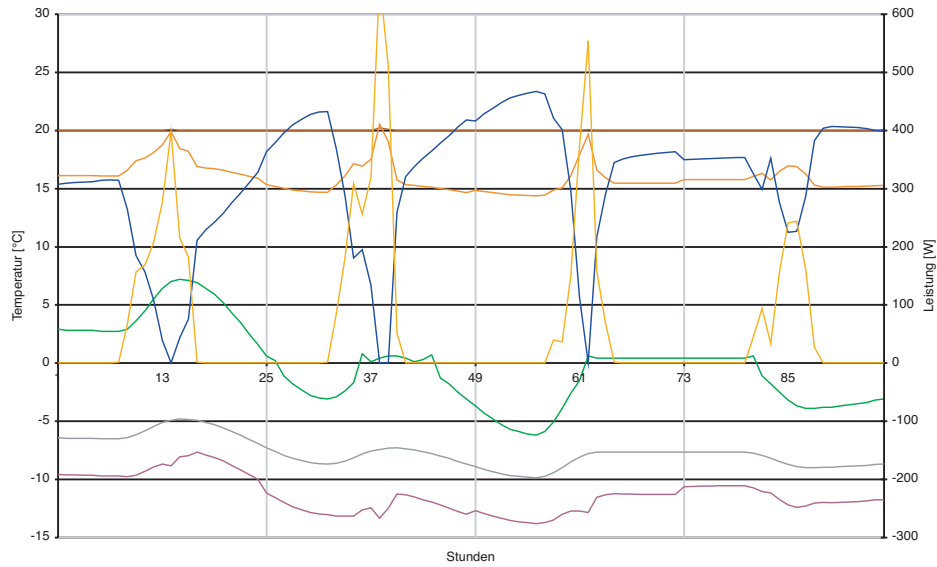
flächen deutlich übersteigen, wären auch hier zusätzliche und deutliche Einspareffekte zu erwarten.

Aus Sicht des Verfassers zeigt die vorliegende Untersuchung, dass der temporäre Wärmeschutz einen weiteren wirkungsvollen ‚Regler‘ im Repertoire der baulichen Maßnahmen bereitstellt, um die Gebäudehülle als entscheidende Ebene für die Energiebilanz eines Gebäudes weiter zu optimieren, und das insbesondere dann, wenn er bei geringer Materialstärke hochwirkungsvoll ist.

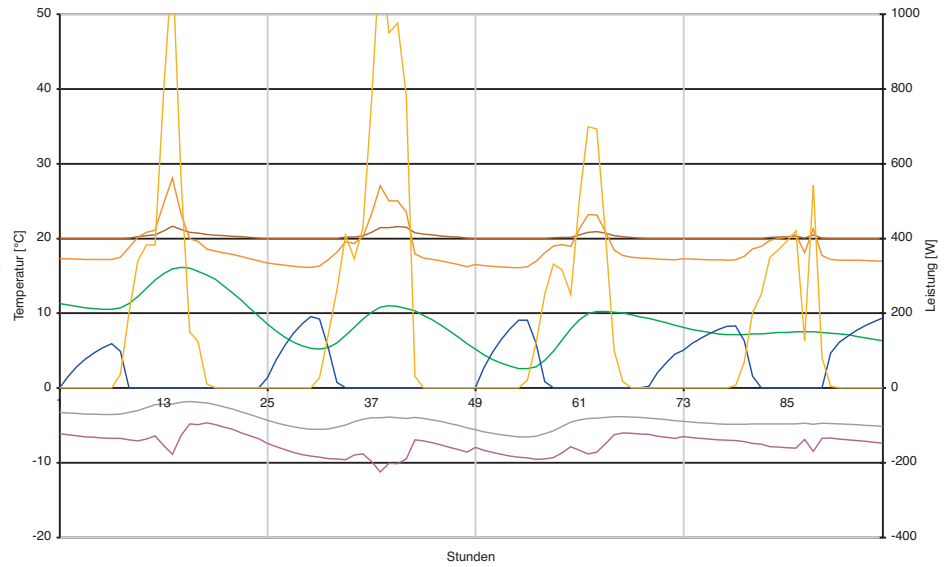
Anmerkungen

1. Eine Zusammenfassung der Untersuchung, die in diesem Anhang dargestellt ist, wurde veröffentlicht in Cremers, Jan: [Typology of Applications for Opaque and Translucent VIP in the Building Envelope and their Potential for Temporary Thermal Insulation](#) (2005), S. 189-196

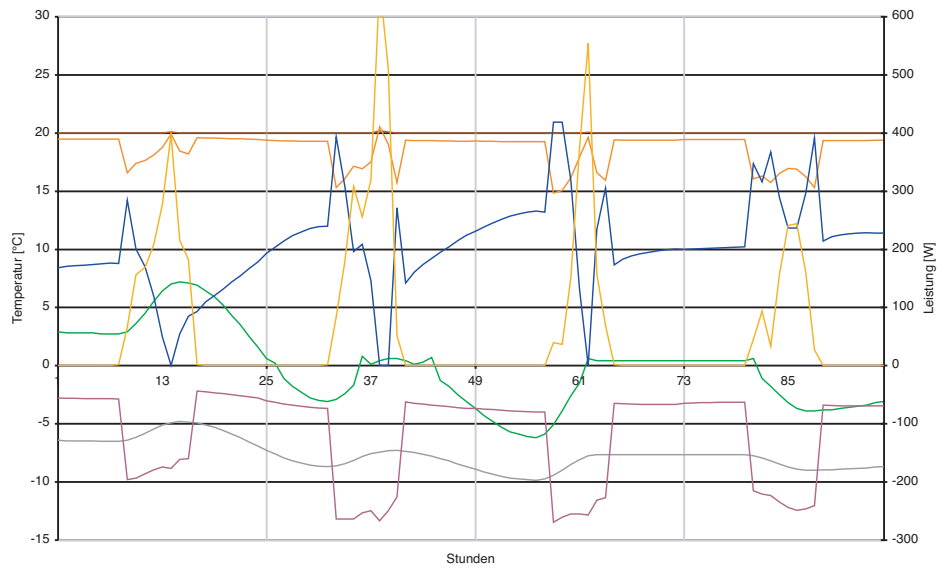
2. Die hier verwendete aktuelle Version des Programms HELIOS hat die Release-Number 1.3NT(94)1132. Das alternativ für diesen Zweck einsetzbare TRNSYS unterscheidet sich in wesent-



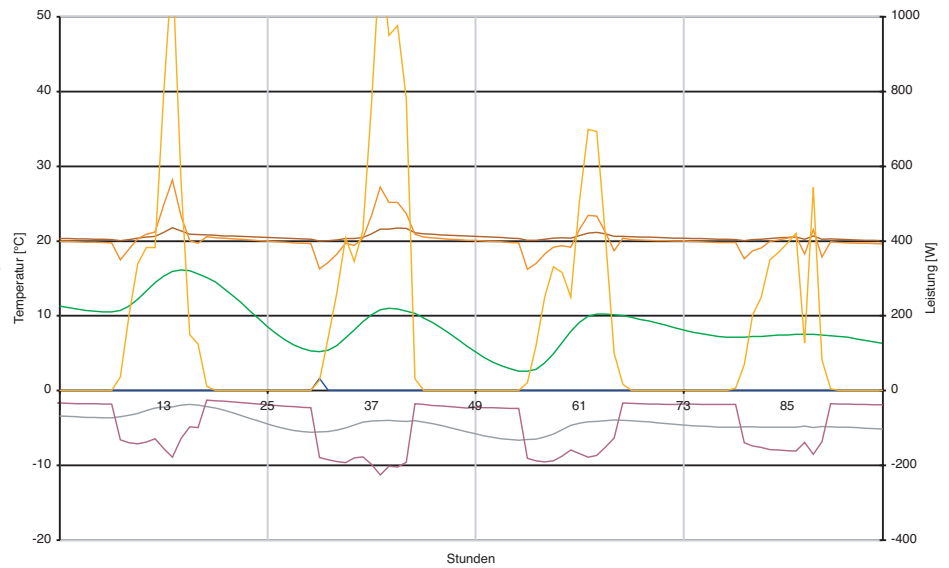
Ergebnisse zu V1-0, 4. -7. Januar



Ergebnisse zu V1-0, 4. -7. Oktober, ohne Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-4, 4. -7. Januar



Ergebnisse zu V1-4, 4. -7. Oktober, ohne Sonnenschutz-Strategie

- | | | | |
|-----|--|-------|---|
| TL | Außenlufttemperatur in [°C] | QS | eingestrahlte Sonnenenergie durch das Fenster in [W] |
| TI | Raumlufttemperatur in [°C] | QAirC | Luftwechselverluste in [W] |
| TIF | Oberflächentemperatur der Innenscheibe in [°C] | QTr | Transmissionsverluste durch den Fensterbereich in [W] |
| H | Heizlast / Kühllast in [W] | | |

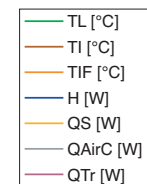
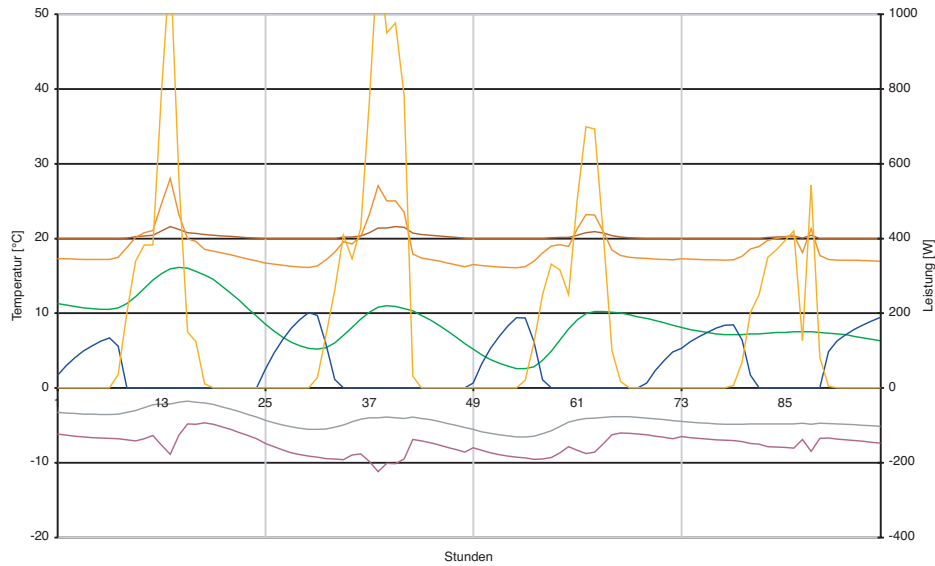
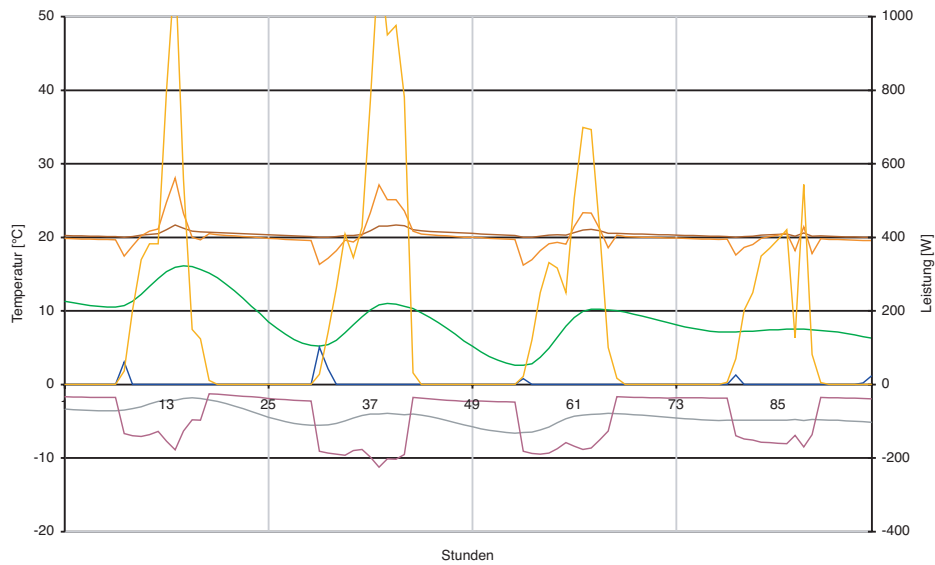


Abb. A2.29 Ausrichtung: West, Variantenbezogene Ergebnisse, Simulationsperiode: 4. Jan.- 7. Jan. und 4. Okt.- 7. Okt., jeweils 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr



Ergebnisse zu V1-0-SS, 4. -7. Oktober, mit Sonnenschutz-Strategie



Ergebnisse zu V1-4-SS, 4. -7. Oktober, mit Sonnenschutz-Strategie

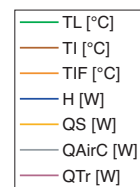
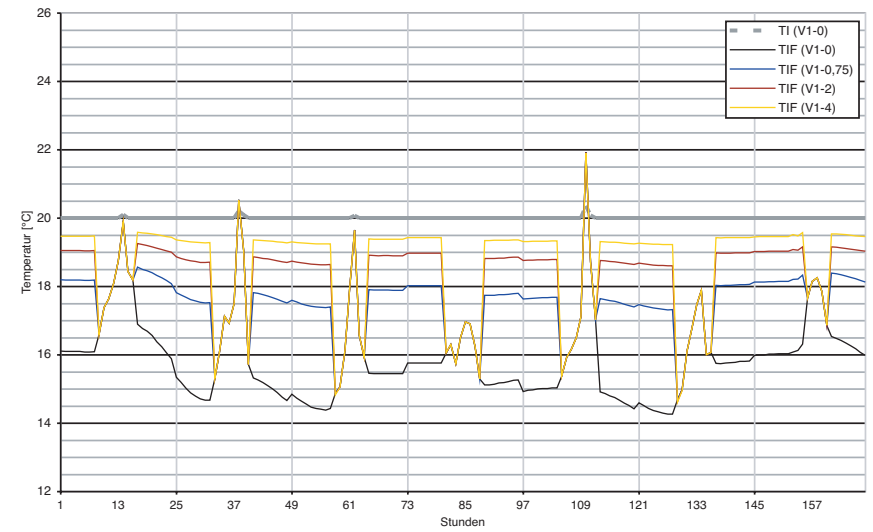
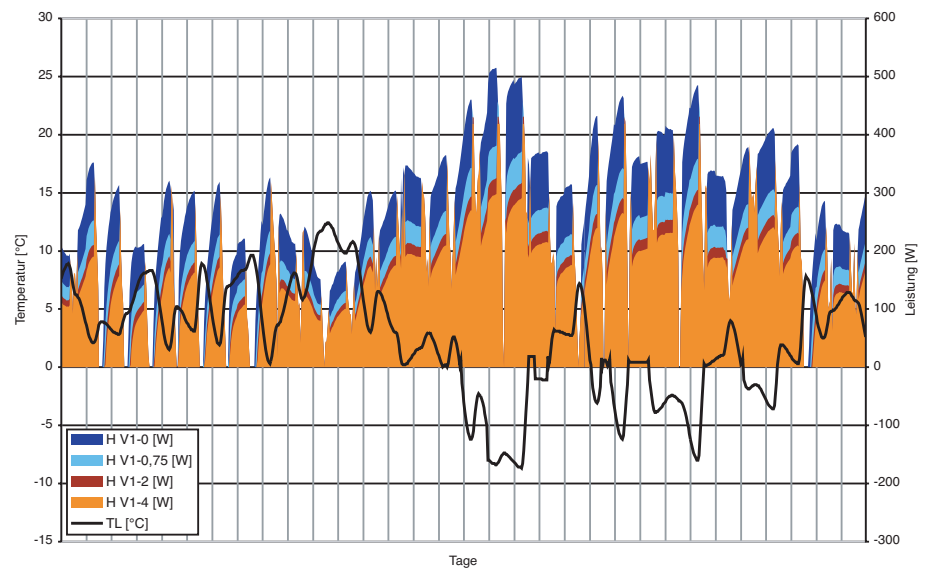


Abb. A2.30 Ausrichtung: West, Variantenbezogene Ergebnisse
Simulationsperiode: 04. Okt., 0:00 Uhr bis 07. Okt., 24:00 Uhr



Oberflächentemperaturen der Verglasunginnenseite, Ergebnisse zu V1, 4.-10. Januar



Heizenergiebedarf, Ergebnisse zu V1, 15. Dezember - 15. Januar

Abb. A2.31 Ausrichtung: West, Ergebnisse zu V1
Oberflächentemperaturen der Verglasunginnenseite und Heizenergiebedarf

lichen Punkten, die es in der Summe für den geplanten Einsatz weniger sinnvoll erscheinen lassen:

- Eine Mehrzonenmodellierung ist hier nicht erforderlich.
- Es besteht keine Notwendigkeit, komplexe Haustechnik abzubilden.
- Transmissionsvorgänge werden von Strahlungsvorgängen in der Bilanz nicht sauber getrennt ausgewiesen.
- Die durch die Komplexität des Programms gegebene ‚Stellschraubenfülle‘ bedingt eine ungleich höhere Einarbeitungszeit bei keinem ersichtlichen Informationszugewinn.

3. Dieser Ansatz lässt auf den ersten Blick die Entscheidung, Ausrichtungen in alle vier Himmelsrichtung zu untersuchen, wenig sinnvoll erscheinen, da der temporäre Wärmeschutz erst wirksam wird, wenn aufgrund fehlender Globalstrahlungseinträge die Randbedingungen gleich zu sein scheinen. In einer dynamischen Betrachtung spielen allerdings auch Effekte der Wärmespeicherung und der Solarstrahlungsgewinne zeitversetzt eine Rolle. Dies wird durch die vorliegenden absoluten und relativen Ergebnisse deutlich bestätigt.

4. Für Simulationen mit Lokalklimadaten sind durch die EMPA speziell für HELIOS Wetterdatensätze aufbereitet worden, welche als Jahresdatensätzen für 16 Stationen in der Schweiz und für 12 Stationen in Deutschland verfügbar sind. Zudem sind für das Jahrzehnt 1980-90 statistisch gemittelte Jahresdatensätze, sod. DRY-Daten (Design Reference Year), in einer internationalen Zusammenarbeit erstellt worden (IEA Task 9). Zur Untersuchung der vorliegenden Fragestellung wurde im Sinne einer

möglichst allgemeingültigen Aussagekraft wegen der mittleren Lage in Deutschland der Standort Stuttgart ausgewählt.

5. Auch wenn zum Beispiel nicht öffenbare Fenster einen Nutzereingriff vermeintlich verhindern, so hat unter anderem die Frage, wann, wie oft und wie lange Türen geöffnet werden, erheblichen Einfluss auf die Lüftungswärmeverluste und damit auf die gesamte Bilanz.

6. Vorgezogene Test-Simulationsdurchläufe mit GLARE-Werten von 200, 400 und 600 W/m² haben gezeigt, dass die Wahl der absoluten Größe dieses Wertes keine große Bedeutung hat.

7. Dieser Ansatz stellt somit ein Minimum dar. Je nach Nutzung wäre auch eine Strategie denkbar, bei dem der temporäre (opake) Wärmeschutz z.B. dann zum Einsatz kommt, wenn das Außenlicht nicht mehr ausreicht und auf Kunstlicht umgeschaltet wird. Die Simulationssoftware lässt allerdings die Einstellung eines anderen Globalstrahlungseintrag-bezogenen Grenzwertes für den temporären Wärmeschutz nicht zu. Weitere Aspekte, wie zum Beispiel die bedingte Veränderung des äußeren Erscheinungsbildes des Gebäudes durch den geschlossenen temporären Wärmeschutz, bleiben in dieser Untersuchung unberücksichtigt.

8. Die Bedeutung dieser Luftschicht, für den die THERM-Simulation wohl aufgrund der Schichtstärke von ca. 20 cm noch deutliche konvektive Vorgänge nachweist, lässt sich vor allem an den sehr guten Ergebnissen für den Holzklapladen ermessen, bei dem die

Reduzierung des Wärmedurchgangs durch das Holzmaterial von 5 mm selber minimal ist.

9. In der Realität ist eine solche Ausbildung des notwendigerweise wärmetechnisch relativ dichten seitlichen Abschlusses kaum vorstellbar. Man wird vielmehr stets darauf bedacht sein, den Anschluss mindestens im Bereich des Rahmens, wahrscheinlich sogar meist außerhalb dessen, auszuführen. Für diesen Fall ist mit einer weiteren Verbesserung des Ergebnisses zu rechnen, da der Rahmen bezogen auf den Gesamtwärmedurchgang doch eine erhebliche Schwachstelle darstellt, siehe hierzu auch Teil 7.

10. Der Aufwand für eine diesen Effekt berücksichtigende Simulation wäre enorm und ist derzeit - nach Kenntnis des Verfassers - mit verfügbaren Simulationswerkzeugen nicht umfassend durchführbar. Vermutlich müßte dieser Effekt empirisch untersucht werden.

11. Da eine lineare Interpolation der auf die einzelnen Ausrichtungen bezogenen Ergebnisse nicht zulässig ist, sind in der Darstellung die Linien zwischen den Punkten gestrichelt.

12. siehe [10.]

13. Diese Effekte haben bei allen untersuchten Varianten einen Anteil deutlich unter 1% (meist in der Größenordnung von 0,1%) und können daher im Hinblick auf die Zielsetzung vernachlässigt werden.

14. Hier ist die sogenannte Kühllast gemeint, und nicht die wahre zu deren Herstellung benötigte Energie. Diese

läge bekanntermaßen um ein Vielfaches über derjenigen, die zur Bereitstellung einer betragsmäßig gleichen Heizenergie benötigt wird. Dieser Zusammenhang ist aber nicht Gegenstand dieser Untersuchung und bleibt daher im weiteren unberücksichtigt.

15. Dieses Verhältnis würde sich schon durch einen Ansatz von geringen internen Lasten schnell ausgleichen, da diese auf der einen Seite die Heizlasten reduzieren (v.a. im Winter), auf der anderen Seite schneller den Einsatz von Kühlung notwendig machen.

16. Diese Parameter haben entweder die Einheit Grad Celsius oder Watt. Um diese im Zusammenhang darstellen zu können, verfügen die betroffenen Diagramme über zwei y-Achsen mit getrennten Skalen (links immer Temperatur, bei Bedarf rechts Leistung). Dabei wurde darauf geachtet, dass die jeweiligen Null-Linien zusammenfallen. Bei den reinen Temperaturverläufen wurde der aufgetragene Ausschnitt bei jedem Diagramm angepasst (gespreizt), um die jeweiligen Effekte sichtbar machen zu können; hier sind die Darstellungen aber zwischen den verschiedenen Ausrichtungen direkt vergleichbar.

17. vergl. hierzu den Beitrag des Verfassers in Herzog, Krippner, Lang: Fassadenatlas (2004), Kapitel ‚Außen- und Innenbedingungen‘, S.18 - 25 und hier insbesondere die Abbildungen A1.12-15 auf S. 22.