



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

BAUELEMENTE UND SYSTEME MIT VIP FÜR AUSSENWANDKONSTRUKTIONEN

Ausgearbeitet durch

Armin Binz und Gregor Steinke, Institut Energie am Bau – FHNW
St. Jakobs-Strasse 84, CH-4132 Muttenz

Industriepartner

Eternit AG, Niederurnen
swisspor AG, Steinhausen
va-Q-tec AG, DE-Würzburg

Auftraggeber und finanzielle Förderung

Bundesamt für Energie

Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden – REN

Programmleitung Charles Filleux

Auftragnehmer

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW – Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

Institut Energie am Bau

St. Jakobs-Strasse 84, CH-4132 Muttenz

Fon +41 61 467 45 45

Fax +41 61 467 45 43

E-Mail iebau.habg@fhnw.ch

Internet <http://www.fhnw.ch>

Industriepartner

Eternit AG, Niederurnen. Josef Hunold, Markus Marti

swisspor AG, Steinhausen. Blaise Sarrasin, Werner Breitenmoser,

va-Q-Tec AG, DE-Würzburg. Dr. Roland Caps

Autoren

Armin Binz

Prof., dipl. Arch. ETH/SIA, Leiter des Instituts Energie am Bau - FHNW

Gregor Steinke

Dipl.-Ing. Architekt TH, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut Energie am Bau - FHNW

Danksagung

Die Autoren danken allen Beteiligten, die zur Arbeit an diesem Projekt beigetragen haben, insbesondere den Industriepartnern für die gute Zusammenarbeit und das grosse Engagement. Ein besonderer Dank gilt Herrn Thomas Frei.

März 2008

Bundesamt für Energie

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen Postadresse: CH-3003 Bern

office@bfe.admin.ch www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Die Anforderungen an den Wärmeschutz der Gebäudehülle werden zukünftig weiter zunehmen. Im Minergie-P-Standard übliche Dämmstärken von 30 cm und mehr sind in konstruktiver und gestalterischer Hinsicht zunehmend schwieriger zu handhaben und beanspruchen zudem wertvolle Nutzfläche. Hier ermöglicht der Einsatz von Vakuumdämmpaneelen (VIP) schlanke und hochgedämmte Konstruktionen. Diese weisen im Vergleich zu herkömmlichen Wärmedämmmaterialien eine 3- bis 8-fach höhere Leistungsfähigkeit auf. VIP werden derzeit noch in überwiegendem Mass ungeschützt direkt auf der Baustelle verarbeitet. Bisher stehen allerdings nur wenige Bauprodukte und Systeme zur Verfügung, die den besonderen Eigenschaften der empfindlichen VIP gerecht werden und für die Anwendung unter den rauen Bedingungen auf der Baustelle gut geeignet sind.

Die Zielsetzung dieses Forschungsprojektes war die Entwicklung, praktische Anwendung und Markteinführung von Bauprodukten und Systemen mit VIP, die den besonderen Eigenschaften des Materials gerecht werden. Gemeinsam mit Industriepartnern wurden Anwendungen für Aussen- und Innendämmung von Fassaden, in Neubau und Sanierung untersucht. Bei der Entwicklungsarbeit wurden gleichermaßen Vakuum-Dämmpaneel selbst, ein geeigneter Schutz der Paneel für den Einsatz auf der Baustelle und die Konstruktion der entsprechenden Bausysteme betrachtet.

VIP unterscheiden sich nicht nur durch ihre exzellente Dämmwirkung von herkömmlichen Wärmedämmstoffen. Soll mit Vakuumpaneelen gedämmt werden, muss dies in der gesamten Prozesskette der Entstehung eines Gebäudes, von der Planung bis in die Nutzungsphase, berücksichtigt werden. So ist bei der Herstellung, beim Transport und bei der Montage der Paneel grösste Sorgfalt erforderlich. Um das Vertrauen der Anwender in diese noch junge Technologie zu stärken und den Einbau fehlerhafter Paneel zu vermeiden, spielt eine umfangreiche Qualitätssicherung eine zentrale Rolle. In der Produktion ist eine mehrstufige Qualitätskontrolle seit längerer Zeit verankert. Diese wurde von der Firma *va-Q-tec* nun durch eine neu entwickelte Methode zur berührungslosen Funktionskontrolle mit Hilfe eines RFID-Chips erweitert. Dieser sendet bei einem bestimmten Impuls ein Signal an ein Lesegerät. Somit liesse sich beispielsweise von der Aussenseite einer fertig montierten Fassade überprüfen, ob das Vakuum der Paneel noch intakt ist.

Ein entscheidender Aspekt für den sicheren Einsatz am Bau ist ein zuverlässiger Schutz der VIP-Hülle vor mechanischer Beschädigung. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden daher unterschiedliche Möglichkeiten untersucht, die Vakuum-Paneeel entweder mit einer Beschichtung zu versehen, zu umhüllen, mit dünnen Materialschichten zu kaschieren oder einzuschäumen. Anhand von Prototypen wurden die Eigenschaften verschiedener veredelter VIP beurteilt. Die Arbeiten sind noch nicht endgültig beendet und werden über die Projektdauer hinaus weiter fortgeführt.

Für eine erfolgreiche Bauanwendung stellt sich die Frage, wie die VIP konstruktiv in ein Bauteil integriert werden können. Konstruktionen müssen für den Einsatz von VIP unter Berücksichtigung ihrer besonderen Eigenschaften konzipiert werden. Eine einfache Substitution herkömmlicher Wärmedämmstoffe durch VIP ist nicht sinnvoll. Im Rahmen des Projektes wurde ein Bausystem für eine hinterlüftete Fassade und eine Innendämmung mit VIP entwickelt. Die ursprünglich angestrebte Entwicklung von Schrägdachsystemen mit VIP wurde nicht weiterverfolgt, da bei Dachkonstruktionen das Potential und die Vorteile schlanker Wärmedämmkonstruktionen als relativ gering eingeschätzt werden.

Das System für eine hinterlüftete Fassade mit VIP basiert auf einer wärmebrückenminimierten Unterkonstruktion mit Distanzschrauben. Im Rahmen einer Pilotanwendung konnte das System in der Praxis erprobt werden. Im konkreten Anwendungsfall misst die Konstruktion inklusive 3 cm VIP, Schutzschichten, Hinterlüftung und Bekleidung insgesamt knapp 11 cm und führt zu einer Verbesserung des U-

Wertes von $1.17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $0.18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Gegenüber einer konventionell wärmedämmten Konstruktion beträgt die Platzersparnis 40-50%.

Bei einer Innendämmung ist zusätzlich ein sicherer Schutz der VIP vor Beschädigung während der Nutzung, beispielsweise durch Bildernägeln, notwendig. Dieser Schutz sollte möglichst schlank sein, um nicht die Platzersparnis der VIP zu verlieren. Das entwickelte System basiert auf einer klaren konstruktiven Trennung der Wärmedämmung und der raumseitig sichtbaren Wandoberflächen. Die kaschierten oder eingeschäumten VIP sind raumseitig durch eine hochwertige Vorsatzschale (Faserzement, Holz, Glas etc.) geschützt. Im Vergleich zu konventionell wärmedämmten Konstruktionen beträgt die Platzersparnis bei 3 cm VIP etwa 40-45%.

Wärmebrücken sind bei hoch wärmedämmten Konstruktionen von grösserer Bedeutung. Dieser Effekt wird durch die dünnen, sehr leistungsfähigen Wärmedämmschichten bei VIP noch zusätzlich verstärkt. Daher muss auf die Optimierung der Wärmebrücken besonders geachtet werden. Bei einer Innendämmung mit VIP sind zudem die Oberflächentemperaturen an den Anschlüssen der Innenwände und Geschossdecken geringer, als bei konventionell wärmedämmten Konstruktionen. Dies ist bei jeder Situation individuell zu prüfen, um Feuchteschäden zu vermeiden.

Bei einer Markteinführung der Systeme stehen für die Industriepartner die Fragen der Zuverlässigkeit und Sicherheit im Focus. Deshalb muss zuvor die Entwicklung eines zugleich sicheren, dünnen und preiswerten mechanischen Schutzes fortgeführt werden. Um ein hohes Vertrauen in die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Systeme zu schaffen, muss zudem, in Ergänzung zu den bestehenden Qualitätskontrollen, ein lückenloses Verfahren der Qualitätssicherung – von der Produktion bis zur Montage – geschaffen werden.

Die Systeme werden vor allem in Situationen, welche sehr schlanke Aufbauten erfordern, als Problemlöser zur Anwendung kommen. Aus wirtschaftlicher Hinsicht können die Mehrkosten gegenüber konventionell wärmedämmten Konstruktionen bei den derzeitigen VIP-Preisen bisher nur in teuren Lagen durch den erzielten Nutzflächengewinn kompensiert werden.

Die Weiterentwicklung der vergleichsweise jungen VIP-Technologie für Bauanwendungen weist eine grosse Dynamik auf, die sich in den kommenden Jahren weiter fortsetzen wird. Der Einsatz neuer Hüllmaterialien höherer Gasdichtheit, alternativer Stützkörper, optimierte Produktionsverfahren und grössere Stückzahlen werden zu veränderten Produkteigenschaften und einer spürbaren Kostensenkung führen. Für eine sichere und erfolgreiche Anwendung am Bau müssen allerdings auch die Entwicklungsarbeiten für bauseitige Produkte, Bauelemente und Systemen fortgesetzt werden.

Zusammenfassung	3
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage.....	7
1.2 Ziele des Projekts.....	8
1.3 Arbeitsansatz.....	8
2 Grundlagen.....	9
2.1 VIP – Aufbau und Eigenschaften	9
2.1.1 Alterungseffekte	9
2.1.2 Wärmebrücken der VIP-Ränder und Fugen	9
2.1.3 Deklarierte Wärmeleitfähigkeit	10
2.2 Kosten und Zusatznutzen.....	11
3 VIP – Schutz, Funktionskontrolle, Optimierung.....	12
3.1 Verbesserter Schutz der VIP vor Beschädigung – veredelte VIP.....	12
3.1.1 Verstärkung des Hüllmaterials der VIP	12
3.1.2 Umhüllen der VIP	13
3.1.3 Kaschierung der VIP	13
3.1.4 Einschäumen der VIP	14
3.2 Funktionskontrolle.....	14
3.2.1 RFID-Sensor	14
3.3 Hüllmaterial und Stützkörper – Weiterentwicklung der VIP	15
3.3.1 Hüllmaterial	15
3.3.2 Stützkörper.....	16
4 Bauelemente und Bausysteme.....	17
4.1 Hinterlüftete Fassade mit VIP.....	17
4.1.1 Grundlagen	17
4.1.2 Unterkonstruktionen	18
4.2 Hinterlüftete Fassade mit VIP – System Distanzschrauben	20
4.2.1 Punktuelle Aussparung der VIP für die Distanzschrauben	20
4.2.2 Anordnung der Distanzschrauben in verbreiterten Stossfugen zwischen den VIP	21
4.2.3 Punktuelle Wärmebrückenverlustkoeffizient der Distanzschrauben.....	23
4.2.4 Vorbereitung der praktischen Umsetzung	25
4.3 Hinterlüftete Fassade – System Distanzschrauben – Pilotmontage.....	28
4.3.1 Planung und Vorbereitung zur Ausführung	28
4.3.2 Dokumentation der Pilotmontage	30

4.3.3	Ablauf der Pilotmontage – Optimierungsmöglichkeiten	33
4.3.4	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten der VIP-Pilotfassade	36
4.3.5	Vergleich mit herkömmlich wärmegeprägten Systemen.....	38
4.3.6	Optimierungsansätze	38
4.3.7	Wirtschaftlichkeit	40
4.3.8	Hinterlüftete Fassade mit VIP – Fazit.....	40
4.4	Innendämmung mit VIP	41
4.4.1	Bauphysikalische Besonderheiten bei Innendämmung	41
4.4.2	Grundlagen bei Innendämmung mit VIP	41
4.5	Modulares Wandsystem für eine Innendämmung mit VIP.....	42
4.5.1	Innendämmung mit VIP - Temperaturverlauf in der Konstruktion.....	44
4.5.2	Innendämmung mit VIP - Wärmebrücken und effektiver U-Wert.....	47
4.5.3	Vergleich mit herkömmlich wärmegeprägten Konstruktionen.....	48
4.5.4	Optimierungsansätze	48
4.5.5	Wirtschaftlichkeit	49
4.5.6	Innendämmung mit VIP – Fazit.....	49
5	Erkenntnisse und Ausblick.....	50
6	Literaturangaben	51

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Weitaus mehr als ein Drittel des gesamten Energieverbrauchs der Schweiz wird heute durch die Beheizung von Gebäuden verursacht. Für eine Verbesserung der Energieeffizienz im Gebäudebereich werden deshalb die Anforderungen an den Wärmeschutz der Gebäudehülle weiterhin steigen müssen.

Soll der mittlerweile etablierte Minergie-Standard erreicht werden, sind etwa 15 - 20 cm konventionelle Wärmedämmung erforderlich, beim Minergie-P- oder Passivhausstandard gar 30 cm und mehr (Abbildung 1). Diese Dämmstoffdicken sind gerade bei Sanierungen, aber auch bei Neubauten in konstruktiver und gestalterischer Hinsicht zunehmend schwieriger zu handhaben und beanspruchen zudem wertvolle Grundfläche, die der Nutzfläche verloren geht. Daher werden zunehmend hochleistungsfähige Wärmedämmmaterialien und -systeme für den Einsatz in der Bauwirtschaft erschlossen.

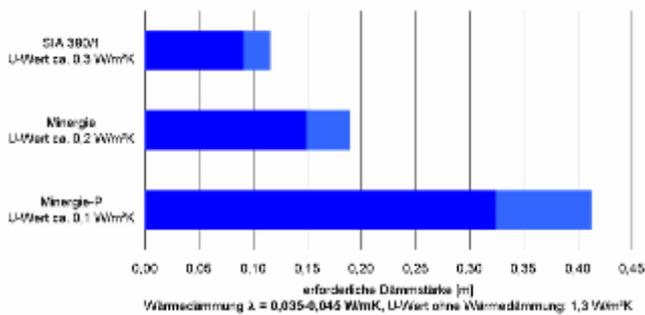


Abbildung 1: Unterschiedliche Standards und erforderliche Wärmedämmstärken. Bild: FHNW

Ursprünglich für den Einsatz in Geräten entwickelt, weisen Vakuumdämmpaneele im Vergleich zu herkömmlichen Wärmedämmmaterialien eine 3- bis 8-fach höhere Leistungsfähigkeit auf (Abbildung 2). In den letzten Jahren wurden bereits mehrere zehntausend Quadratmeter VIP (Vacuum Insulation Panels) in Gebäuden eingesetzt. In absolut überwiegendem Mass handelt es sich dabei um den direkten Einsatz von VIP auf der Baustelle, mehrheitlich als Dachterrassendämmung. Bisher stehen allerdings kaum Bauprodukte und Systeme zur Verfügung, die den besonderen Eigenschaften der empfindlichen VIP gerecht werden und für die Anwendung unter den rauen Bedingungen auf der Baustelle gut geeignet sind.

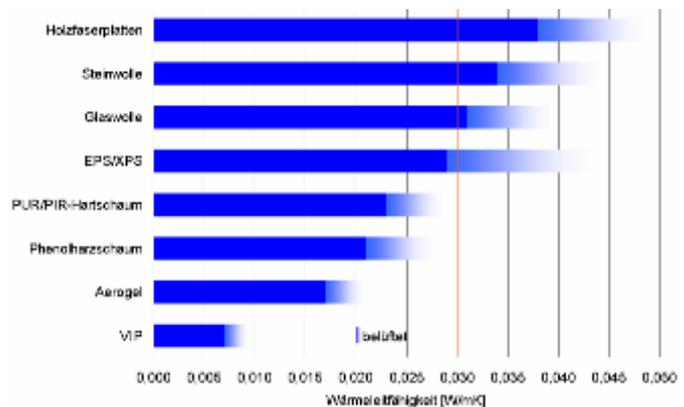


Abbildung 2: Links – Expandiertes Polystyrol (EPS) und VIP gleicher Wärmedämmwirkung. Rechts – Wärmeleitfähigkeit verschiedener Wärmedämmstoffe im Vergleich.

Bilder: FHNW

1.2 Ziele des Projekts

Die grundsätzliche Zielsetzung des Projektes ist die Entwicklung und spätere Markteinführung von Produkten und Systemen mit VIP für die Bauwirtschaft. Zum einen sollen „veredelte“ VIP entwickelt werden, im Sinne einer optimierten Gebrauchstauglichkeit der verhältnismässig empfindlichen Vakuuminulations-Paneele auf dem Bau bzw. in baunahen Betrieben. Technische Lösungsansätze liegen beispielsweise beim Umhüllen, bzw. Aufbringen entsprechender Schichten auf das VIP. Zum anderen sollen Anwendungen für Wandkonstruktionen mit VIP entwickelt werden, die als umfassende Bausysteme angeboten werden können. Hierbei sollen Lösungen für hinterlüftete Fassaden, aber auch Systeme für Innendämmung mit VIP untersucht werden, die bei Neubauten und Sanierungen eingesetzt werden können.

Im Focus stehen schlanke, hoch wärmedämmte Konstruktionen, die gegenüber konventionellen Systemen eine deutliche Platzersparnis aufweisen. Die entwickelten Systeme sollen mindestens U-Werte $\leq 0.20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreichen. Die Produkt- und Systemlösungen müssen eine hohe Sicherheit bezüglich der Funktionsfähigkeit und Lebensdauer besitzen.

1.3 Arbeitsansatz

Die Produkte und Systeme mit VIP werden in einem interdisziplinären Team aus Bauwirtschaft und angewandter Forschung entwickelt. Von Seiten der Industrie ist mit *va-Q-tec* ein erfahrener Entwickler und Hersteller von Vakuumdämmung, mit *swisspor* ein bedeutender Produzent und Handelskonzern von Dämmstoffen und Dämmsystemen, mit *Eternit* ein führender Systemanbieter und Hersteller für hinterlüftete Fassaden, Schrägdachsysteme und Innenausbaulemente am Projekt beteiligt. Das *Institut Energie am Bau* der *FHNW* bringt seine Erfahrungen vorangegangener Forschungsprojekte zum Thema VIP in das Projekt ein (Binz 2005).

Bei der Entwicklungsarbeit werden gleichermaßen Vakuüm-Dämmpaneele selbst, ein geeigneter Schutz der Paneele für den Einsatz auf der Baustelle und die Konstruktion des entsprechenden Bausystems betrachtet. Nach der Evaluation möglicher Lösungen werden viel versprechende Ansätze im Detail untersucht. Die konstruktive Durcharbeitung wird durch die Anfertigung von Prototypen und numerischen Simulationsrechnungen ergänzt. Abschliessend soll der praktische Einsatz im Rahmen von Pilotanwendungen stattfinden. Die Suche geeigneter Objekte gestaltete sich sehr langwierig und hat zu Verzögerungen im Projektablauf geführt.

2 Grundlagen

2.1 VIP – Aufbau und Eigenschaften

VIP bestehen im Wesentlichen aus einem nanoporösen Kernmaterial, welches in einer Vakuumkammer in eine hoch gasdichte Hülle eingeschweisst wird. Das Vakuum spielt dabei die Schlüsselrolle, denn die Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes wird massgeblich durch die Wärmeleitung des eingeschlossenen Gases bestimmt. Durch die Evakuierung wird diese Gasleitung unterbunden. Der Aufbau eines VIP ist in Abbildung 3 dargestellt. Als Kernmaterial kommt für Bauanwendungen heute meist pyrogene Kieselsäure zu Einsatz, welche bei Normaldruck ohne Vakuum bereits sehr gute Wärmeleitfähigkeitswerte von $0.020 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ besitzt.



Abbildung 3: Aufbau eines VIP. Bild: va-Q-tec

2.1.1 Alterungseffekte

Die Wärmeleitfähigkeit eines VIP beträgt unmittelbar nach der Herstellung in der Mitte des Panels etwa $0.004 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Allerdings kommt es aufgrund des Eindringens geringer Luft- und Wasserdampfmengen durch das Hüllmaterial über die Lebensdauer zu einer stetigen Verschlechterung der Dämmfähigkeit. Diese Effekte wurden im Rahmen eines internationalen Forschungsprojektes eingehend untersucht (Simmler 2005). In Abhängigkeit des verwendeten Hüllmaterials und der Abmessungen des Panels muss mit einem Zuschlag von mindestens 0.001 bis $0.002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ gerechnet werden.

2.1.2 Wärmebrücken der VIP-Ränder und Fugen

Die im Vergleich zum evakuierten Kernmaterial sehr hohe Wärmeleitfähigkeit der dünnen Metallschichten des VIP-Hüllmaterials führt zu linearen Wärmebrücken an den Kanten der VIP. Durch die heute übliche Verwendung von Hüllmaterialien aus mehrlagigen metallbedampften Kunststofffolien konnte dieser Wärmebrücken-Randeffekt auf ein Minimum reduziert werden.

Eine Kaschierung der VIP mit einem Material geringer Wärmeleitfähigkeit reduziert diesen Effekt noch weiter. Zudem verursachen die Fugen zwischen den VIP Wärmeverluste. Der lineare Wärmeverlustko-

effizient liegt beim Einsatz von mehrlagigen metallbedampften Kunststofffolien, angrenzenden Materialschichten geringer Wärmeleitfähigkeit ($< 0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, Dicke 20 mm) und schmalen Fugen zwischen den VIP ($< 4 \text{ mm}$) bei 0.002 und $0.007 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten wurden am *Institut Energie am Bau* mit Hilfe numerischer Simulationen (*Heat3 5.0*) berechnet und decken sich mit Untersuchungen der *EMPA* (Simmler 2005). Der Temperaturverlauf am VIP-Rand ist in Abbildung 4 dargestellt. Sie beinhalten den Wärmebrücken-Randeffekt des Hüllmaterials und die Wärmeverluste durch die Fugen.

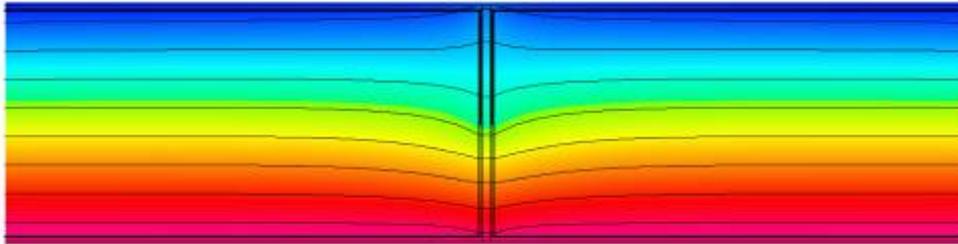


Abbildung 4: Temperaturverlauf am Rand eines VIP mit metallisiertem Hüllmaterial. Der Einfluss des Wärmebrücken-Randeffekts ist deutlich zu erkennen. Bild: FHNW

Der Wärmeverlust durch diese thermischen Schwachstellen kann pauschal durch eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit der VIP berücksichtigt werden. Dieser Zuschlag wird für ein VIP typischer Grösse ermittelt. Allerdings ist der Wert nur bedingt auf Paneele abweichender Grösse übertragbar. Für ein Paneel von $50 \times 100 \times 2 \text{ cm}^3$ mit angrenzenden Materialschichten $\lambda=0.04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ muss für den Wärmebrücken-Randeffekt ein Zuschlag zur Wärmeleitfähigkeit von 0.001 bis $0.002 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ berücksichtigt werden.

Alternativ kann der Zuschlag individuell bei der Berechnung des U-Wertes berücksichtigt werden. Dies erfolgt entsprechend der Berücksichtigung der sonstigen Wärmebrücken bei der Ermittlung der U-Werte. Dafür wird neben der VIP-Fläche auch der Umfang sämtlicher VIP ermittelt. Diese Daten sind aus der Planung ohnehin bekannt und können für die U-Wert Berechnung eingesetzt werden. Bei einer typischen Fassade mit 3 cm VIP und einem U-Wert der ungestörten Konstruktion von $0.14 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ beträgt der Zuschlag auf den U-Wert ca. $10\text{-}20\%$.

Grundsätzlich sollte auf den Einsatz möglichst grosser Paneele, auf schmale Fugen und angrenzende Materialschichten mit geringer Wärmeleitfähigkeit geachtet werden.

2.1.3 Deklarierte Wärmeleitfähigkeit

Derzeit wird im Rahmen eines Forschungsprojektes eine einheitliche Deklarationsmethode für die Wärmeleitfähigkeit der VIP erarbeitet. Gemäss SIA Merkblatt 2001 gelten für grossflächige, fachgerecht ausgeführte Wärmedämmungen ohne konstruktive Wärmebrücken folgende Rechenwerte:

$\lambda = 0.008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für VIP mit $15\text{-}25 \text{ mm}$

$\lambda = 0.007 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für VIP mit 30 mm und darüber

Diese Rechenwerte beziehen sich auf VIP einer Grösse von $50 \times 100 \text{ cm}^2$. In diesen Werten sind Alterungseffekte und der Wärmebrückenrandeffekt enthalten.

2.2 Kosten und Zusatznutzen

VIP sind deutlich teurer als herkömmliche Wärmedämmstoffe. Sie werden letztere nicht auf dem Markt ersetzen, wohl aber in sinnvoller Weise ergänzen. Tabelle 1 zeigt die Materialkosten im Verhältnis zum thermischen Widerstand. Demnach liegen die Kosten für VIP derzeit etwa um den Faktor 2 bis 6 über denen konventioneller Wärmedämmung. Dieser Preis spiegelt jedoch die typische Dynamik der Markteinführung eines neuen Produktes wider. Darüber hinaus werden VIP von den Herstellern noch weiterentwickelt, verbessert und langfristig voraussichtlich preiswerter.

Tabelle 1: Kosten von Wärmedämmstoffen im Verhältnis zum thermischen Widerstand.

	ca. Materialpreis	λ	R	Materialpreis / R
	CHF/m ³	W/(m·K)	m ² ·K/W	CHF/m ³ /(m ² ·K/W)
Steinwolle	220	0.036	28	8
Phenolharzschaum	450	0.023	43	10
Schaumglas	525	0.040	20	21
Aerogel (Granulat)	3400	0.018	55	60
VIP	7000	0.008	125	56
		0.007	143	49
		0.006	167	42

Die höheren Kosten der VIP sind in vielen Fällen durch signifikante Vorteile gerechtfertigt. Ein wesentlicher Punkt ist die Platzersparnis im Vergleich zu herkömmlicher Wärmedämmung. Folgende Gründe können für den Einsatz von VIP sprechen:

- Komfortgewinn
z.B. stufenloser Übergang von innen nach aussen bei Terrassen
- konstruktive Vereinfachung
z.B. nachträgliche Wärmedämmung bei Gebäuden mit sehr geringem Dachüberstand, ohne Veränderung der Dachkonstruktion
- Nutzflächengewinn
z.B. schlankere Aussenwandkonstruktionen bei baurechtlich festgelegten Aussenabmessungen des Gebäudes
- verbesserter Wärmeschutz
z.B. Dämmung von Laibungen und Rolladenkästen
- Ästhetik
z.B. schlanke Ansichtsbreiten bei hoch wärme gedämmten Lukarnen

Berechnungen bezüglich des Nutzflächengewinns durch eine schlankere Aussenwandkonstruktion haben gezeigt, dass unter bestimmten Umständen der Einsatz von VIP wirtschaftlich ist (Binz 2005).

3 VIP – Schutz, Funktionskontrolle, Optimierung

3.1 Verbesserter Schutz der VIP vor Beschädigung – veredelte VIP

Aufgrund der Gefahr der Beschädigung des Hüllmaterials (Verlust des Vakuums) sollten auf der Baustelle nur VIP mit einem geeigneten Schutz verarbeitet werden. Insbesondere die Ecken und Kanten der rohen Paneele sind beim Transport und der Montage gefährdet. Sind die Paneele erst einmal in eine entsprechend geplante Konstruktion eingebaut, besteht die Gefahr der Beschädigung des Hüllmaterials nicht mehr. In den folgenden Abschnitten sind Möglichkeiten eines Schutzes vor mechanischer Beschädigung der VIP für das Handling auf der Baustelle aufgeführt, die im Rahmen des Projektes diskutiert wurden.

3.1.1 Verstärkung des Hüllmaterials der VIP

Ein robusteres Hüllmaterial kann die Gefahr der Beschädigung senken. Aus produktionstechnischen Gründen sind der Dicke des Hüllmaterials aber auch Grenzen gesetzt. Die Schweissnähte werden mit zunehmender Dicke des Hüllmaterials weniger flexibel und stehen an den Paneelrändern daher weiter ab. Dadurch kann es zu breiteren Lücken an den Paneelstößen kommen. Zudem kann sich der Wärmebrücken-Randeffekt durch dickere Hüllmaterialien verstärken.

Die Firma *va-Q-tec* hat ein neuartiges VIP mit einem vlieskaschierten Hüllmaterial entwickelt (Abbildung 5). Neben einem leicht verbesserten Schutz vor mechanischer Beschädigung hat dieses VIP vor allem eine verbesserte Brandklassifizierung. Ein Spezialvlies wird vor der eigentlichen Herstellung des VIP der auf das Hüllmaterial kaschiert. Eine Messung des Innendrucks mit Hilfe des *va-Q-check* Verfahrens (siehe 3.2) ist auch mit der Vlieskaschierung problemlos möglich. In Deutschland liegt für dieses Produkt (*va-Q-vip-B*) seit Mitte 2007 eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vor. Allerdings ist die Zulassung auf Anwendungen im Innenbereich beschränkt, da die Vlieskaschierung nicht ausreichend feuchteresistent ist. Die Firma *va-Q-tec* arbeitet derzeit daran, die Hüllmaterialien mit einer feuchteresistenten Kaschierung für den Aussenbereich zu entwickeln. Der thermische Einfluss des modifizierten Hüllmaterials auf den Wärmebrücken-Randeffekt, sowie die tatsächliche Verbesserung des Schutzes vor mechanischer Beschädigung muss zukünftig noch genauer untersucht werden.



Abbildung 5: VIP mit vlieskaschiertem Hüllmaterial. Bild: va-Q-tec

3.1.2 Umhüllen der VIP

Es wurden von *va-Q-tec* verschiedene Versuche mit einer Glasgewebeamhüllung der VIP durchgeführt. Dieser Ansatz wurde zugunsten der oben beschriebenen Direktbeschichtung des Hüllmaterials aufgegeben. Die Umhüllung der VIP mit einer dünnen Faserzementschicht (ca. 2 mm) wurde nach der Erstellung eines Testmusters ebenfalls nicht weiter verfolgt.

3.1.3 Kaschierung der VIP

Um den Schutz vor mechanischer Beschädigung der VIP zu verbessern, können auf den Flächen einseitig oder beidseitig geeignete Materialien aufkaschert werden. Die Kaschierung muss je nach Einsatzgebiet verschiedene Anforderungen erfüllen. Neben einem ausreichenden Schutz, sollte beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit möglichst gering sein, die Kaschierung möglichst dünn sein, das Brandverhalten des VIP durch die Kaschierung nicht negativ beeinflusst werden, oder einen geeigneten Untergrund für die weitere Verarbeitung darstellen (z.B. Verputzen). Der Kleber der Kaschierung muss mit dem Hüllmaterial chemisch verträglich sein (lösungsmittelfrei). Die kaschierte VIP werden heute von verschiedenen Firmen am Markt angeboten. Zum Einsatz kommen unter anderem Schichten aus Gummigranulatmatten, EPS oder PUR-Hartschaum. Um die Ecken und Kanten sicher zu schützen, sollte die Kaschierung allseitig einen minimalen Überstand haben (ca. 1-3 mm). Ein Problem stellen allerdings die Masstoleranzen der VIP dar. Diese müssen für das Sollmass des fertig kaschierten Panels berücksichtigt werden (Abbildung 6). Dadurch kann es am Paneelstoss zu relativ breiten Lufthohlräumen kommen (bis zu 5-10 mm). Der VIP-Rand könnte mit einem zusätzlichen Schutz versehen werden (z.B. Gewebeklebeband), was den Aufwand und die Kosten allerdings weiter erhöht.



Abbildung 6: Schnitt durch ein VIP mit Kaschierung. Grafik: FHNW

Durch die Kaschierung kann ein guter Schutz gegen mechanische Beschädigung erreicht werden. Derzeit ist in der Produktion ein hoher Aufwand mit viel Handarbeit notwendig, der bei erforderlichen Sonderformaten zusätzlich ansteigt. Die technische Umsetzung im industriellen Masstab erfordert hier noch weitere Entwicklungsarbeit. Von den Industriepartnern wurden erfolgreich Tests mit verschiedenen Materialien (z.B. EPS, PUR-Hartschaum, Faserzement) durchgeführt, die nach Abschluss des Projektes fortgesetzt werden sollen.

3.1.4 Einschäumen der VIP

Die VIP können in verschiedene Materialien eingeschäumt werden (z.B. Polystyrol, Polyurethan). Dadurch kann ein sehr guter Schutz vor mechanischer Beschädigung erreicht werden. Zudem können die Masstoleranzen der VIP ausgeglichen und rechteckige Paneele mit sauberen Kanten hergestellt werden. Dies verbessert die Stöße zwischen den Paneelen. Allerdings entstehen an den Rändern thermische Schwachstellen. Beim Einschäumen können zu hohe Temperaturen der exothermen chemischen Reaktion das Hüllmaterial beschädigen. Eine Funktionskontrolle der eingeschäumten VIP ist nur durch entsprechende Aussparungen in der Einschäumung, oder durch berührungslos auslesbare Systeme möglich.

Von den Industriepartnern wurden gegen Ende des Projektes Tests mit verschiedenen Materialien durchgeführt, die nach Abschluss des Projektes fortgesetzt werden sollen.

3.2 Funktionskontrolle

Die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der VIP ist ein entscheidendes Element der Qualitätskontrolle und -sicherung. Fehlerhafte Paneele müssen in der Produktion rechtzeitig erkannt werden können. Die Firma *va-Q-tec* setzt hierfür seit einigen Jahren das von ihr entwickelte *va-Q-check*-System ein. Die sehr genaue Messung lässt sich innerhalb weniger Sekunden durchführen. Im VIP ist, von aussen sichtbar, eine mit Vlies abgedeckte Metallscheibe integriert. Auf diese Scheibe wird von aussen der Messkopf des mobilen Messgerätes aufgesetzt und der Innendruck unmittelbar angezeigt (Abbildung 7). Eine Funktionskontrolle der VIP im eingebauten Zustand spielt nur eine untergeordnete Rolle, da die Defekte in der Produktion selbst, oder durch das Handling beim Transport und der Montage auftreten. In bestimmten Situationen wäre die Funktionskontrolle der eingebauten VIP aber auch wünschenswert. Diese ist mit dem *va-Q-check*-System allerdings nur mit teuren Permanentsensoren möglich, die aufwändig verkabelt werden müssen.

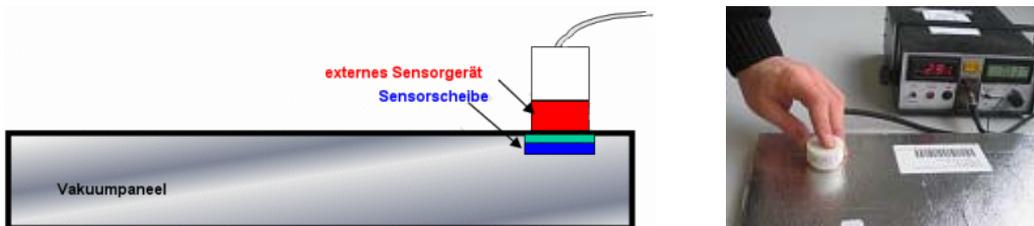


Abbildung 7: Innendruckmessung mit dem System *va-Q-check*. Bilder: va-Q-tec

3.2.1 RFID-Sensor

Von der Firma *va-Q-tec* wurde nun eine Methode zur berührungslosen Funktionskontrolle mit Hilfe eines RFID-Chips (Radio Frequency Identification) entwickelt. Abbildung 8 zeigt ein VIP mit diesem System. Ein integrierter Sensor, angeordnet zwischen RFID-Antenne und RFID-Chip, ändert beim Überschreiten eines festgelegten Paneel-Innendrucks seinen Schaltzustand. Somit lässt sich mit einem entsprechenden Messgerät berührungslos feststellen, ob das Paneel noch intakt ist. Der Maximalabstand zwischen Messkopf und RFID-Antenne beträgt derzeit etwa 15 cm. Die Reichweite könnte durch veränderte Systemkomponenten noch vergrößert werden. Jeder RFID-Chip besitzt eine eindeutige Nummer, die bei der Produktion der VIP zusammen mit den Herstellungsdaten in einer Datenbank abgelegt wird. Für das System wurde ein Gebrauchsmusterschutz angemeldet. Die Firma *va-Q-tec* setzt das System momentan vor allem bei VIP ein, welche in hoch wärmegeprägten Transportboxen zum Einsatz kommen und mehrfach verwendet werden. Die Anwendung am Bau soll zukünftig erprobt werden und ist für VIP, die leicht ausgewechselt werden können, aber nicht frei zugänglich sind, denkbar.

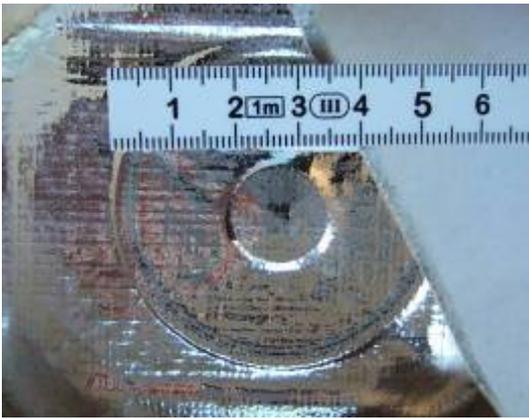


Abbildung 8: RFID-Chip zur berührungslosen Funktionskontrolle der VIP. Bild: FHNW

3.3 Hüllmaterial und Stützkörper – Weiterentwicklung der VIP

Es ist zu erwarten, dass die im Vergleich zu herkömmlichen Wärmedämmstoffen noch junge VIP-Technologie zukünftig intensiv weiterentwickelt wird. Auch wenn die Verbesserung der Materialeigenschaften der VIP-Komponenten selbst und die Optimierung der Produktionsprozesse und –kosten nicht Focus dieses Projektes waren, sollen einige Ansatzpunkte dennoch kurz erörtert werden.

3.3.1 Hüllmaterial

Die Gasdichtheit des Hüllmaterials beeinflusst wesentlich die Geschwindigkeit des Anstiegs des Innendrucks und der Feuchtezunahme, und somit die Wärmeleitfähigkeit und Lebensdauer des VIP. Die Kombination metallisierter Hüllmaterialien (Randbereich) mit Metallfolien (Fläche) wird von der Firma *va-Q-tec* erprobt. Durch diese Hybridhülle lässt sich der Druckanstieg wesentlich verlangsamen, ohne die für Metallfolien sonst typische Verstärkung des Wärmebrücken-Randeffekts in Kauf nehmen zu müssen.

Am *Institut Energie am Bau* wurde der Einfluss des Wärmebrücken-Randeffektes eines Metallfolien-Hüllmaterials mit reduzierter Metallschichtdicke untersucht (*Heat3 5.0*). Die Dicke der Aluminiumfolie dieses Hüllmaterials konnte im Vergleich zu früher verwendeten Aluminiumfolien um 25% reduziert werden, und beträgt $6\ \mu\text{m}$. Für das Hüllmaterial mit Aluminiumfolie ($6\ \mu\text{m}$) beträgt der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient $\Psi_{\text{VIP}}\ 0.031\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, für einen dreilagig metallisierten Film ($300\ \text{nm}$ Aluminium) beträgt $\Psi_{\text{VIP}}\ 0.006\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die Berechnungen haben allerdings gezeigt, dass trotz der weitaus höheren Gasdichtheit im Vergleich zu metallisierten Hüllmaterialien aufgrund des Wärmebrücken-Randeffektes der Einsatz erst für VIP einer Fläche grösser $1\ \text{m}^2$ sinnvoll ist (Abbildung 9). Die typische Grösse der von *va-Q-tec* produzierten Standard-VIP beträgt derzeit allerdings $1.00 \times 0.60\ \text{m}^2$. Der ursprünglich vorgesehene Einsatz von VIP mit diesem Hüllmaterial bei einer Pilotanwendung wurde aufgrund der Berechnungsergebnisse verworfen.

Zurzeit befinden sich für den Bereich organischer Solarzellen und Displays neue hoch gasdichte Folien in der Entwicklung, die zukünftig auch für VIP eingesetzt werden könnten.

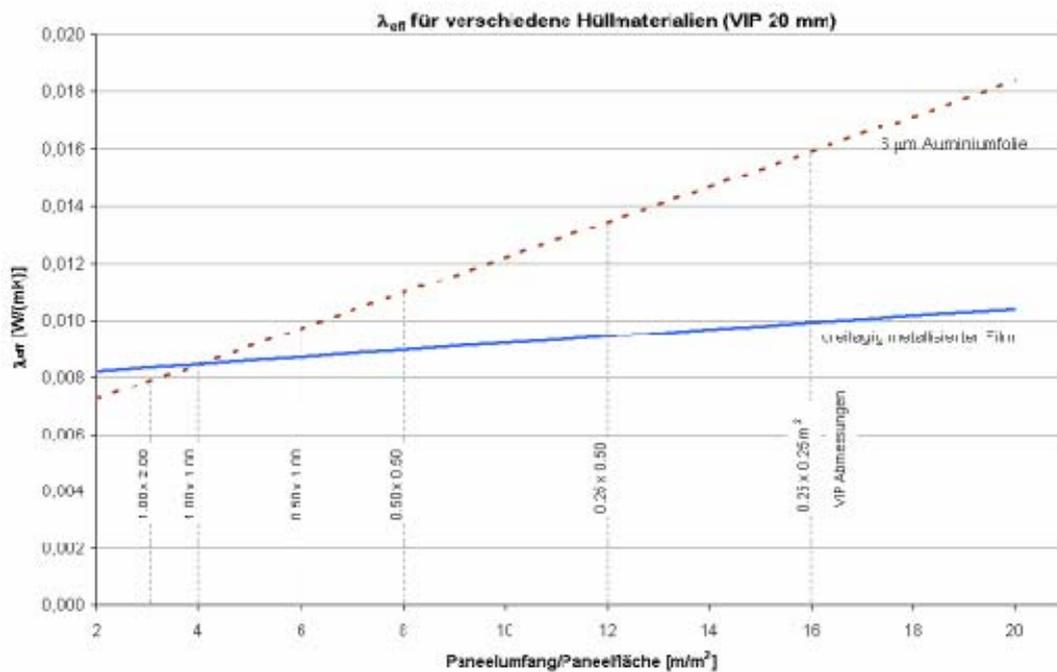


Abbildung 9: Einfluss verschiedener Hüllmaterialien und verschiedener Paneelformate auf die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} . Aluminiumfolie 6 μm : $\lambda_{\text{cop}} = 0.006 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\Psi_{\text{VIP}} = 0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; dreilagig metallisierter Film 300 nm: $\lambda_{\text{cop}} = 0.008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\Psi_{\text{VIP}} = 0.006 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Grafik: FHNW

3.3.2 Stützkörper

Als Stützkörper für am Bau eingesetzte VIP wird aufgrund der geringen Porengröße derzeit in der Regel pyrogene Kieselsäure verwendet. Diese wird zusammen mit Fasern, Infrarot-Trübungsmitteln und Gettermaterialien zu Platten gepresst. Diese Platten haben einen hohen Anteil (schätzungsweise über 40%) der VIP-Produktionskosten. Durch einen preiswerteren Stützmaterial könnten die Kosten gesenkt werden. Die Firma *va-Q-tec* arbeitet im Rahmen eines nationalen Forschungsprojektes in Deutschland an der Entwicklung von VIP mit alternativen Stützkörpern. Diese VIP werden momentan zur Marktreife weiterentwickelt und sind im Vergleich zu heutigen VIP voraussichtlich 20-30% preiswerter. Das Produktionsverfahren wurde zum Patent angemeldet.

4 Bauelemente und Bausysteme

Bei der Bauanwendung von VIP bestehen wesentliche Unterschiede zu herkömmlichen Wärmedämmstoffen. Beispielsweise können VIP nicht nachträglich zugeschnitten werden und müssen sicher vor mechanischer Beschädigung geschützt werden. Konstruktionen müssen für den Einsatz von VIP unter Berücksichtigung ihrer besonderen Eigenschaften konzipiert werden. Eine einfache Substitution herkömmlicher Wärmedämmstoffe durch VIP ist nicht sinnvoll.

VIP können entweder direkt auf der Baustelle in Konstruktionen eingebaut, oder im Werk in vorfabrizierte Bauteile integriert werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes stand die Konzeption von Bausystemen mit dem Einsatz von VIP direkt auf der Baustelle im Vordergrund. Hierbei ist ein geeigneter Schutz der VIP vor Beschädigung durch mechanische Einwirkung beim Transport, der Montage und im eingebauten Zustand sehr wichtig (siehe Kapitel 3.1). Näher untersucht wurden Konstruktionen für hinterlüftete Fassaden und Innendämmung mit VIP. Die ursprünglich angestrebte Entwicklung von Schrägdachsystemen mit VIP wurde nicht weiterverfolgt, da bei Dachkonstruktionen das Potential und die Vorteile schlanker Konstruktionen als relativ gering eingeschätzt werden. Insbesondere zwischen den Balken der Dachkonstruktion ist in der Regel genügend Platz für eine ausreichend dimensionierte, konventionelle Wärmedämmung vorhanden.

4.1 Hinterlüftete Fassade mit VIP

4.1.1 Grundlagen

Bei hinterlüfteten Fassaden mit VIP bestehen im Vergleich zu Konstruktionen mit herkömmlicher Wärmedämmung unter anderem folgende Unterschiede:

- Dämmdicke ist bei gleicher Dämmwirkung geringer. Daher ist der statisch wirksame Hebelarm der Befestigung der Unterkonstruktion kleiner
- Aus statischer Sicht können die Querschnitte der Befestigungselemente geringer dimensioniert werden, eventuell sind weniger Befestigungspunkte erforderlich
- Die punktuellen und linearen Wärmebrücken der Unterkonstruktion haben bei hoch wärmegeämmten Konstruktionen eine grössere Bedeutung. Daher sollten möglichst wärmebrückenarme Unterkonstruktionen zum Einsatz kommen
- Die Lage der Befestigungspunkte der Unterkonstruktion der hinterlüfteten Fassade muss mit den VIP korrespondieren. Die Befestigungspunkte müssen genau an zuvor definierten Punkten (Aussparungen im VIP), oder im Bereich der Fugen zwischen den VIP liegen
- VIP können nachträglich nicht zugeschnitten werden. Daher muss ein exaktes Aufmass der Fassaden erstellt werden und ein Verlegeplan der VIP-Einteilung gezeichnet werden. Dabei muss frühzeitig die Anordnung und Lage der Befestigungspunkte der Unterkonstruktion und sonstiger Durchdringungen der Wärmedämmebene festgelegt und berücksichtigt werden (z.B. Gerüstanker, Regenfallrohre, Leuchten etc.)
- Anschlussdetails an Öffnungen, Dächern, Gebäudekanten etc. müssen sorgfältig geplant werden, da Nacharbeiten vor Ort kaum möglich sind.
- Aus bauphysikalischer Sicht muss beachtet werden, dass es sich um ein praktisch dampfdichtes System handelt.

4.1.2 Unterkonstruktionen

Am Markt wird eine Vielzahl verschiedener Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden angeboten. Abbildung 10 zeigt drei typische Systeme mit herkömmlicher Wärmedämmung und die entsprechenden U-Werte inklusive der resultierenden U-Wert-Zuschläge der jeweiligen Konstruktion. Die Werte wurden auf Basis der Richtlinie zur Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden mit Hilfe des entsprechenden *Excel-Tools* ermittelt (Frank 1998). Der Verankerungsgrund besteht aus 25 cm Modulbackstein ($\lambda = 0,37 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) mit 20 cm Wärmedämmung ($\lambda = 0,32 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Demnach erhöht sich durch eine zweischichtige Holzlattung der U-Wert der ungestörten Konstruktion im untersuchten Fall um 16%, bei der gezeigten Alu-Unterkonstruktion um 41% und bei einer Unterkonstruktion mit Distanzschrauben um 7%.

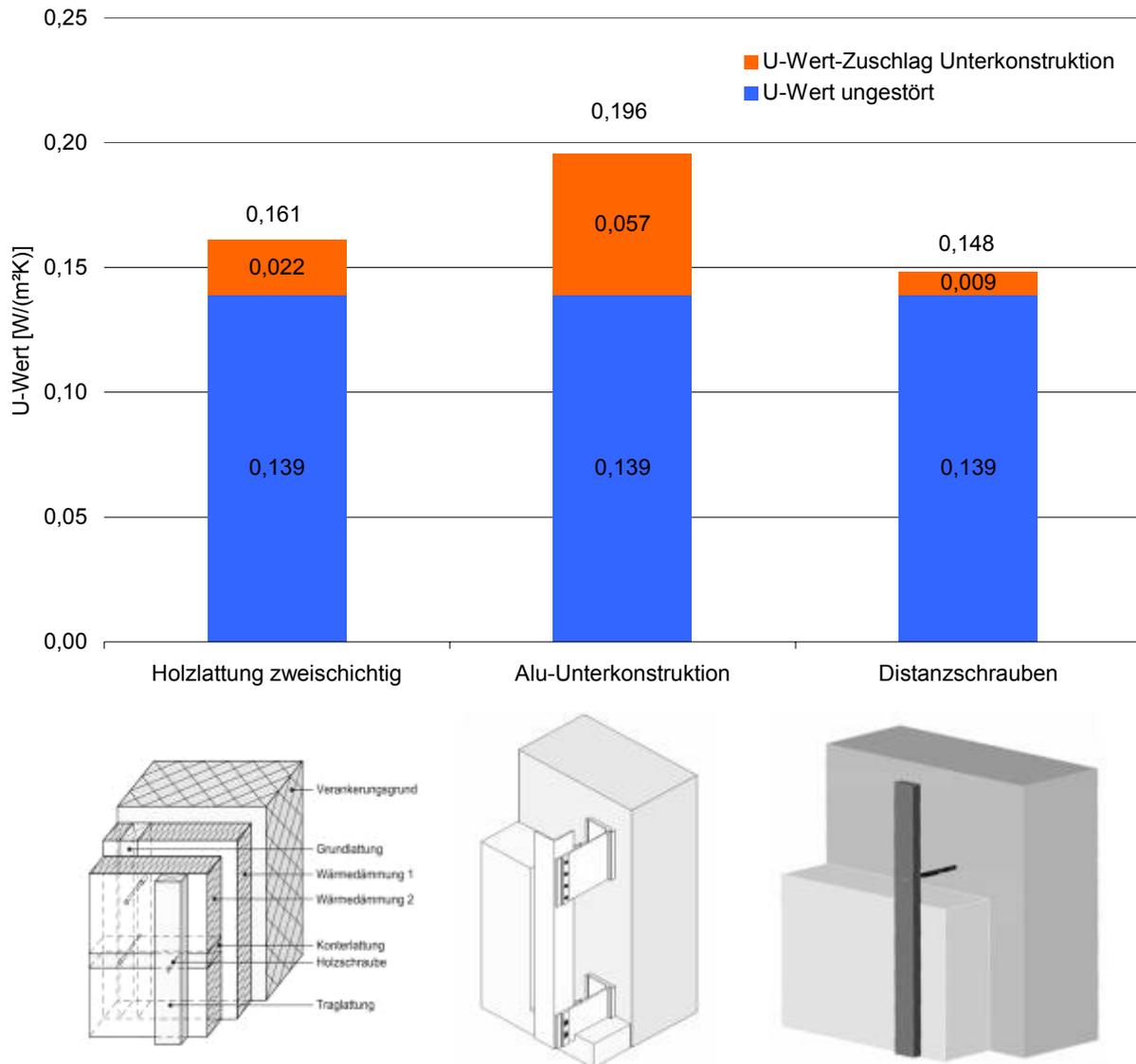


Abbildung 10: U-Werte unterschiedlicher hinterlüfteter Fassaden inklusive der Zuschläge für die Unterkonstruktion.

Grafiken: EMPA, Diagramm: FHNW

Die wärmebrückenarme Unterkonstruktion mit Distanzschrauben wird von den Industriepartnern *Swisspor* und *Eternit* für hinterlüftete Fassaden mit herkömmlicher Wärmedämmung seit einiger Zeit erfolgreich eingesetzt. Abhängig vom Verankerungsgrund, Dämmstärke, Bekleidung, Gebäudegeometrie sind typischerweise 1.5 bis 3.5 Schrauben pro Quadratmeter notwendig. Das betrachtete Beispiel wurde mit 2.3 Distanzschrauben pro Quadratmeter gerechnet. Neben den geringen Wärmebrücken

zeichnet sich das System vor allem durch kurze Montagezeiten aus. Das Montageprinzip der Distanzschrauben ist in Abbildung 11 gezeigt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Konsolsystemen für hinterlüftete Fassaden werden die Distanzschrauben meist erst nach der vollflächigen Montage der Wärmedämmung gesetzt. Aufgrund der günstigen Systemeigenschaften und der positiven Erfahrungen der Industriepartner wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes das System für den Einsatz mit VIP weiterentwickelt (Kapitel 4.2).

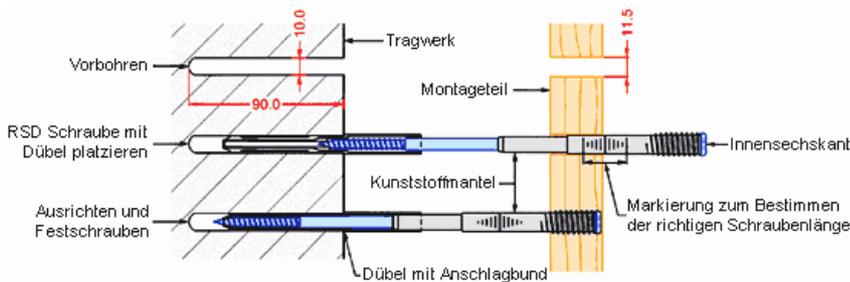


Abbildung 11: Montageablauf der Distanzschrauben-Unterkonstruktion (Firma Rogger) bei herkömmlicher Wärmedämmung.

Quelle: Rogger

Neben dem Distanzschrauben-System wurde von der Firma *Eternit* gemeinsam mit der Firma *EMS-Grivory* an einer Konsole aus faserverstärktem Kunststoff für eine hinterlüftete Fassade mit VIP gearbeitet. Abbildung 12 zeigt verschiedene Konstruktionsvarianten. Mit Hilfe von FEM-Berechnungen wurde das statische Verhalten untersucht. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde die Entwicklung nicht weiterverfolgt.

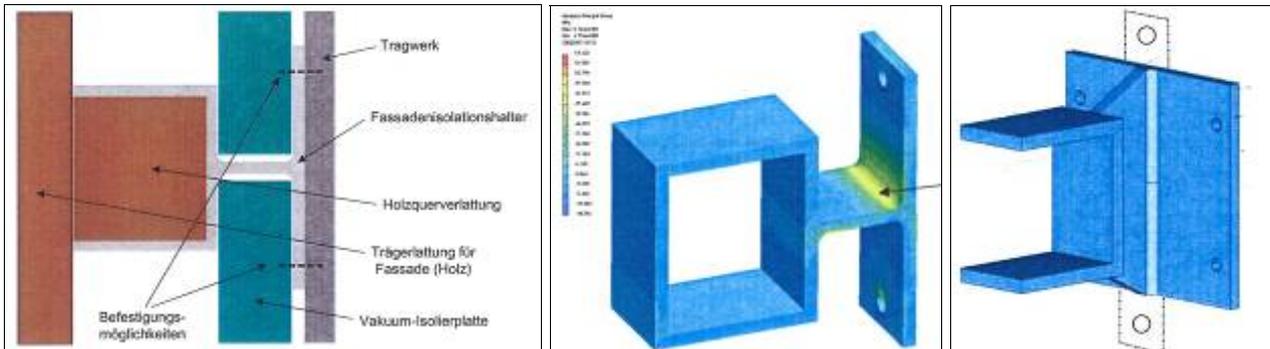


Abbildung 12: Konsole aus faserverstärktem Kunststoff für eine hinterlüftete Fassade mit VIP.

Grafiken: EMS-Grivory

4.2 Hinterlüftete Fassade mit VIP – System Distanzschrauben

Zunächst wurde untersucht, wie die Durchdringung der VIP-Ebene mit den Distanzschrauben gelöst werden kann. Einerseits sollten zusätzliche Wärmebrücken möglichst gering gehalten werden, andererseits die Flexibilität in der Positionierung der Distanzschrauben, die Aufnahme von Toleranzen und eine einfache Montage berücksichtigt werden. Es wurden hierfür die in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 beschriebenen Möglichkeiten näher betrachtet und die entsprechenden Wärmeverluste berechnet. Im Anschluss werden in Kapitel 4.2.3 die punktuellen Wärmebrücken der Distanzschrauben untersucht und in Kapitel 4.2.4 die Vorbereitung zur praktischen Umsetzung des Systems beschrieben.

4.2.1 Punktuelle Aussparung der VIP für die Distanzschrauben

Typischerweise sind bei dieser Art der Unterkonstruktion 2 bis 3 Distanzschrauben pro Quadratmeter notwendig. Für die Distanzschrauben können die VIP Aussparungen am Rand (Abbildung 13), an der Ecke oder punktuellen Durchdringungen auf der Fläche erhalten. Die zusätzlichen Wärmeverluste durch die punktuellen Aussparungen sind bei dieser Lösung minimal. Allerdings müssen die Aussparungen exakt auf die Unterkonstruktion und Einteilung der hinterlüfteten Fassade abgestimmt werden. Die Anzahl, sowie horizontale und vertikale Position der Schrauben sind eindeutig festgelegt und können nachträglich nicht angepasst werden.

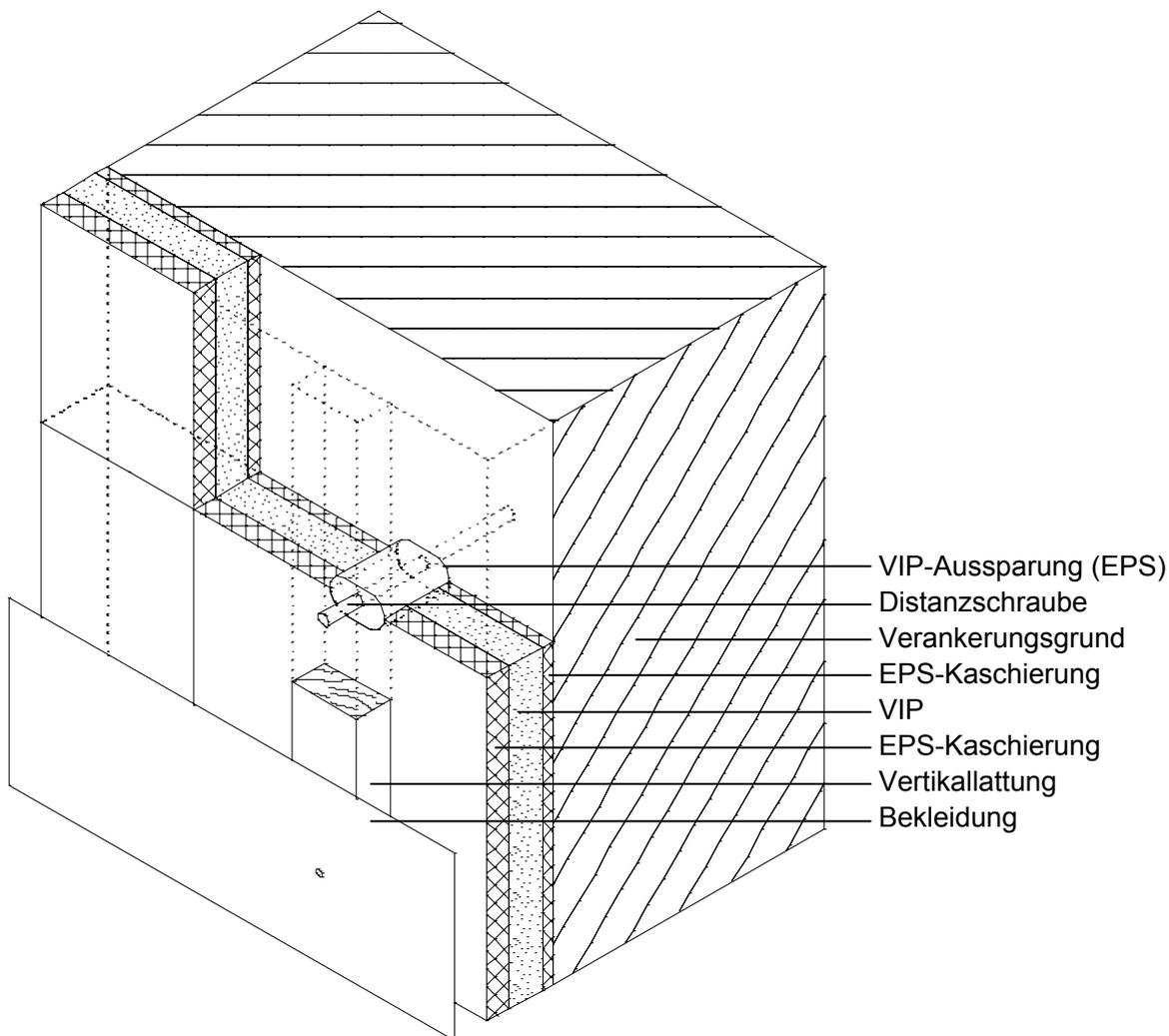


Abbildung 13: Hinterlüftete Fassade mit Distanzschrauben und VIP. Punktuelle Aussparungen an den VIP-Rändern für die Distanzschrauben. Grafik: FHNW

Der Zuschlag auf den U-Wert durch die Aussparungen, ohne Berücksichtigung der punktuellen Wärmebrücken der Distanzschrauben selbst, beträgt bei 2.7 Stück pro Quadratmeter und einem U-Wert der ungestörten VIP-Konstruktion von $0.139 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ca. $0.001 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Bei der Berechnung wurde eine Wärmedämmung mit $\lambda=0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ in den Aussparungen angenommen.

4.2.2 Anordnung der Distanzschrauben in verbreiterten Stossfugen zwischen den VIP

In den horizontalen Stossfugen der kaschierten VIP werden für die Montage der Distanzschrauben 2-3 cm breite Wärmedämmstoffstreifen vorgesehen (Abbildung 14). Für eine Wandkonstruktion mit 3 cm VIP und einem U-Wert im ungestörten Bereich von $0.139 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ wurde der Zuschlag auf den U-Wert für die Horizontalstreifen ($\lambda=0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) ermittelt. Dieser beträgt $0.006-0.008 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Bei den Berechnungen wurde ein Flächenanteil der Fugen an der gesamten Fassadenfläche von 2.5-4.5% und der lineare Wärmebrückenverlust durch die Fugen berücksichtigt. Die Position und Anzahl der Distanzschrauben ist bei dieser Variante nicht

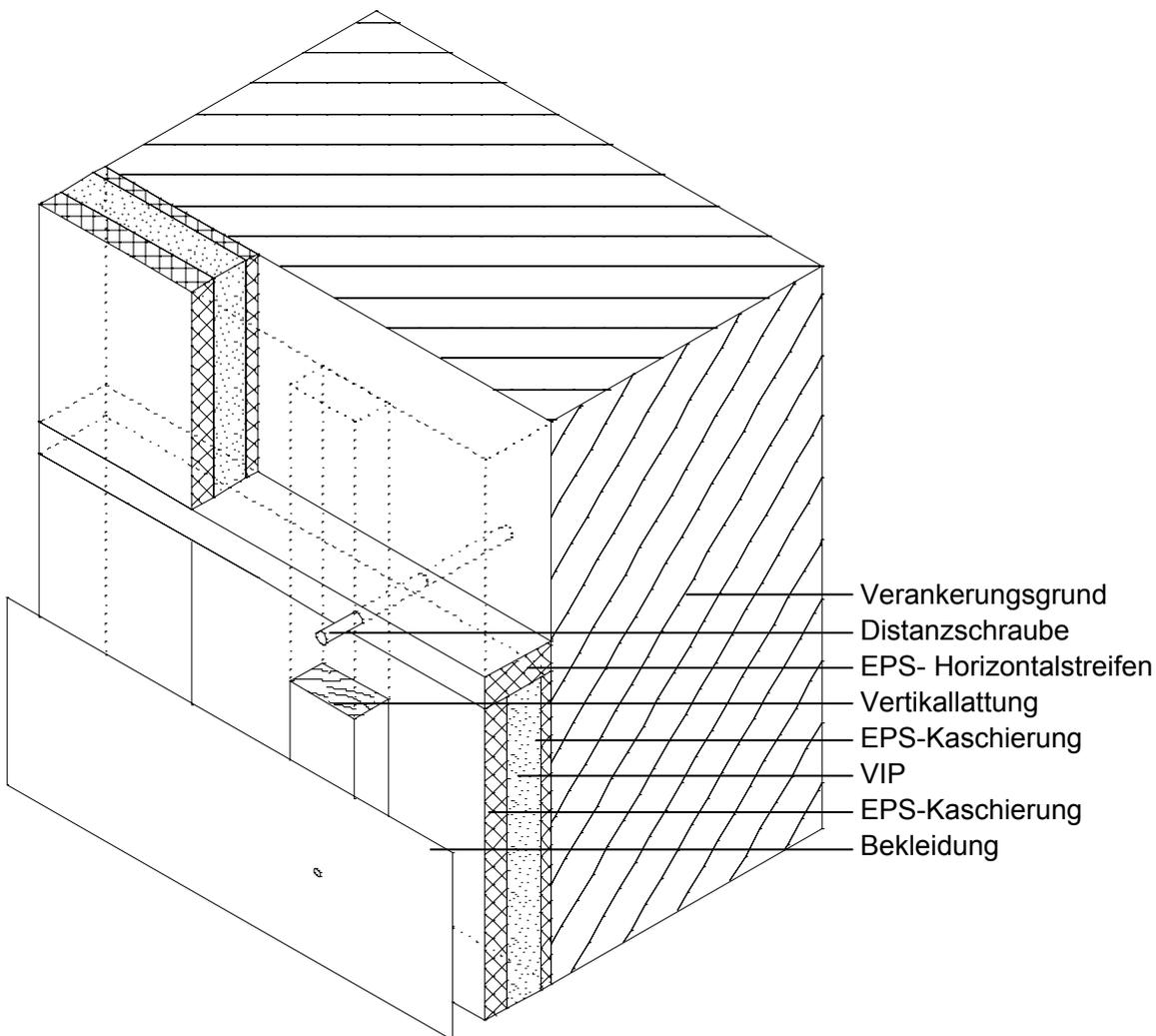


Abbildung 14: Hinterlüftete Fassade mit Distanzschrauben und VIP. Horizontale Streifen aus Wärmedämmstoff zwischen den VIP für die Anordnung der Distanzschrauben. Grafik: FHNW

Die in Abbildung 14 dargestellte Variante mit horizontal durchgehenden Wärmedämmstoff-Streifen hat gegenüber den punktuellen Aussparungen höhere Wärmeverluste, die absolut gesehen aber relativ gering sind. Die verbreiterten Horizontalfugen bieten eine weitaus höhere Flexibilität bei der Montage und der Positionierung der Distanzschrauben. Zudem können hierbei Toleranzen besser aufgenommen

werden. Das System mit den punktuellen Aussparungen wäre produktionstechnisch sehr aufwändig, da diese für jedes Objekt individuell positioniert werden müssen. Aus diesen Gründen wurde die Variante mit den Horizontalfugen in der Entwicklung weiterverfolgt.

Um die Wärmeverluste durch die Horizontalfugen weiter zu reduzieren, könnten diese anstelle der äusseren EPS-Kaschierung mit einer zusätzlichen VIP-Lage abgedeckt werden. Diese Variante wurde mit Hilfe verschiedener 2-D Simulationen (*Heat2 6.0*) rechnerisch untersucht. Die Grundlagen der Berechnung sind in Tabelle 2 dargestellt. Das Berechnungsmodell und der Temperaturverlauf sind in Abbildung 15 gezeigt. Die punktuellen Wärmebrücken durch die Distanzschrauben sind hier nicht berücksichtigt.

Durch die Überdeckung der EPS-Fuge mit VIP anstelle von EPS würde sich der U-Wert der Konstruktion um $0.008 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ reduzieren, was einer Verbesserung um ca. 5% entspricht (Arbeitsmodell siehe Seite 25). Aufgrund des sehr hohen Aufwandes für die Montage und der zusätzlichen Kosten für die zweite VIP-Lage wurde bei den weiteren Betrachtungen dieser Ansatz nicht weiterverfolgt und der etwas höhere Wärmeverlust durch die Fugen in Kauf genommen.

Tabelle 2: Daten für das Berechnungsmodell.

	Abmessungen [mm]	λ [W/(m·K)]
Verankerungsgrund (MW)	200	0.3
VIP-Kaschierung	20	0.031
VIP	40	0.006
VIP-Kaschierung / VIP	20	0.031 / 0.007
Horizontalstreifen	30 x 80	0.031

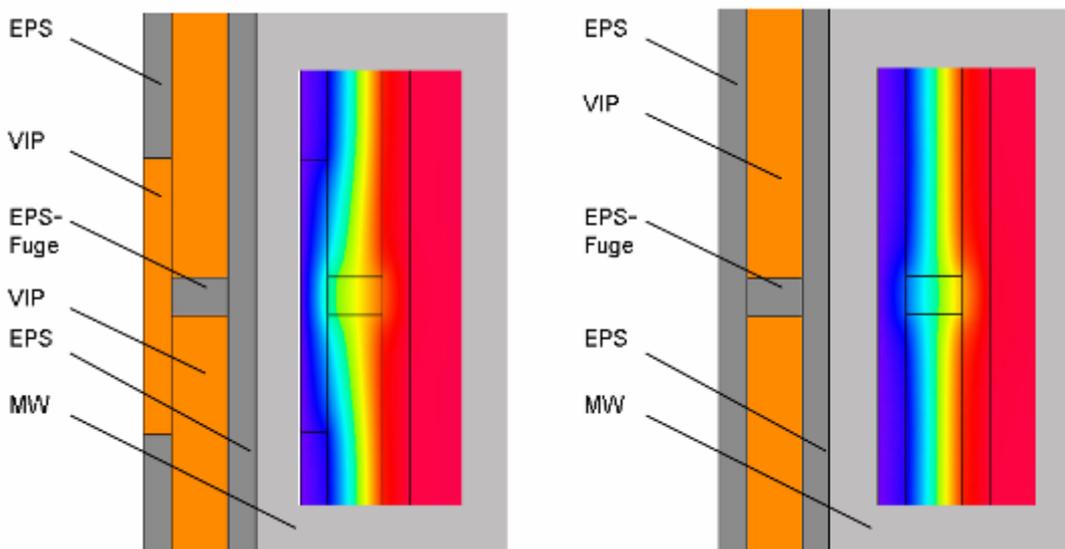


Abbildung 15: Vertikalschnitte durch die berechneten Konstruktionsvarianten mit der jeweiligen Temperaturverteilung. Links mit zusätzlicher VIP-Überdeckung der EPS-Fuge, rechts mit EPS-Abdeckung der EPS-Fuge. Grafik: FHNW

4.2.3 Punktueller Wärmebrückenverlustkoeffizient der Distanzschrauben

Der Einfluss der punktuellen Wärmebrücken durch die Distanzschrauben wurde für verschiedene VIP-Dicken und verschiedene Schraubenmaterialien in Abhängigkeit vom thermischen Widerstand des Verankerungsgrundes untersucht. Die Berechnungen wurden mit der Software *Heat3 5.0* vorgenommen. Das Berechnungsmodell wurde entsprechend der Konstruktion in Abbildung 14 mit den in Tabelle 3 gezeigten Daten angelegt. Abbildung 16 zeigt den Temperaturverlauf im Berechnungsmodell im Bereich der Distanzschraube.

Tabelle 3: Daten für das Berechnungsmodell des punktuellen Wärmebrückenverlustkoeffizienten der Distanzschrauben.

	Abmessungen [mm]	λ [W/(m·K)]
Verankerungsgrund	200	2.3 / 1.3 / 0.5 / 0.3
VIP-Kaschierung	20	0.031
VIP	20 / 30 / 40 / 50	0.007 (20 mm) / 0.006
VIP-Kaschierung	20	0.031
Horizontalstreifen	30 x 60 / 70 / 80 / 90	0.031
Distanzschraube (Stahl / V2A-Stahl)	7	50 / 16
Dübel	10	0.25
Lattung	30 x 60	0.13

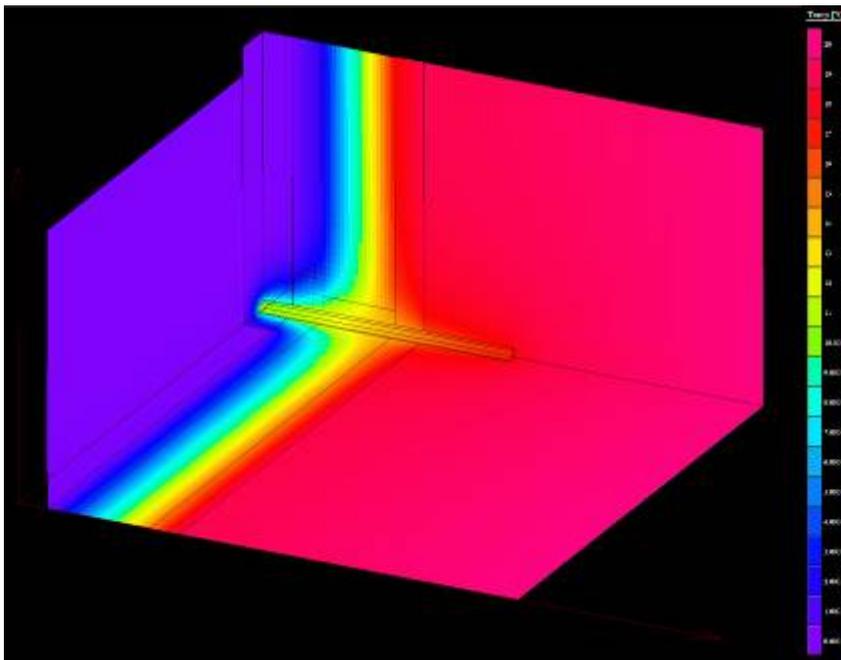


Abbildung 16: 3-D Wärmestromsimulation und Darstellung des Temperaturverlaufs der hinterlüfteten Fassade mit VIP im Bereich der Distanzschrauben. Bild: FHNW

Der punktuelle Wärmebrückenverlustkoeffizient nimmt mit steigendem thermischem Widerstand des Verankerungsgrundes ab (Abbildung 17). Die χ -Werte sind 20 - 30% höher, als bei Konstruktionen mit herkömmlicher Wärmedämmung und vergleichbaren U-Werten. Die Änderung der Dicke der VIP hat nur einen sehr geringen Einfluss. Mit grösserer VIP-Dicke reduziert sich der χ -Wert. In den Berechnungen

wurde die Wärmeleitfähigkeit der VIP bei einer Dicke von 2 cm mit 0.007 W/(m·K), über 2 cm mit 0.006 W/(m·K) angesetzt, woraus von 2 cm zu 3 cm VIP-Dicke ein Sprung der χ -Werte resultiert. Bei der VIP-Kaschierung besteht ein vergleichbarer Zusammenhang, wie bei der VIP-Dicke. Mit zunehmender Dicke und abnehmender Wärmeleitfähigkeit der Kaschierung reduzieren sich die χ -Werte. Wird für die Distanzschrauben anstelle des üblicherweise eingesetzten verzinkten Stahls, V2A-Stahl verwendet, führt dies zu einer knappen Halbierung der χ -Werte. V2A-Stahl hat zwar etwas ungünstigere statische Eigenschaften, kann bei Konstruktionen mit VIP aufgrund des weitaus geringeren Hebelarmes bei gleichem Durchmesser aus statischer Sicht aber eingesetzt werden.

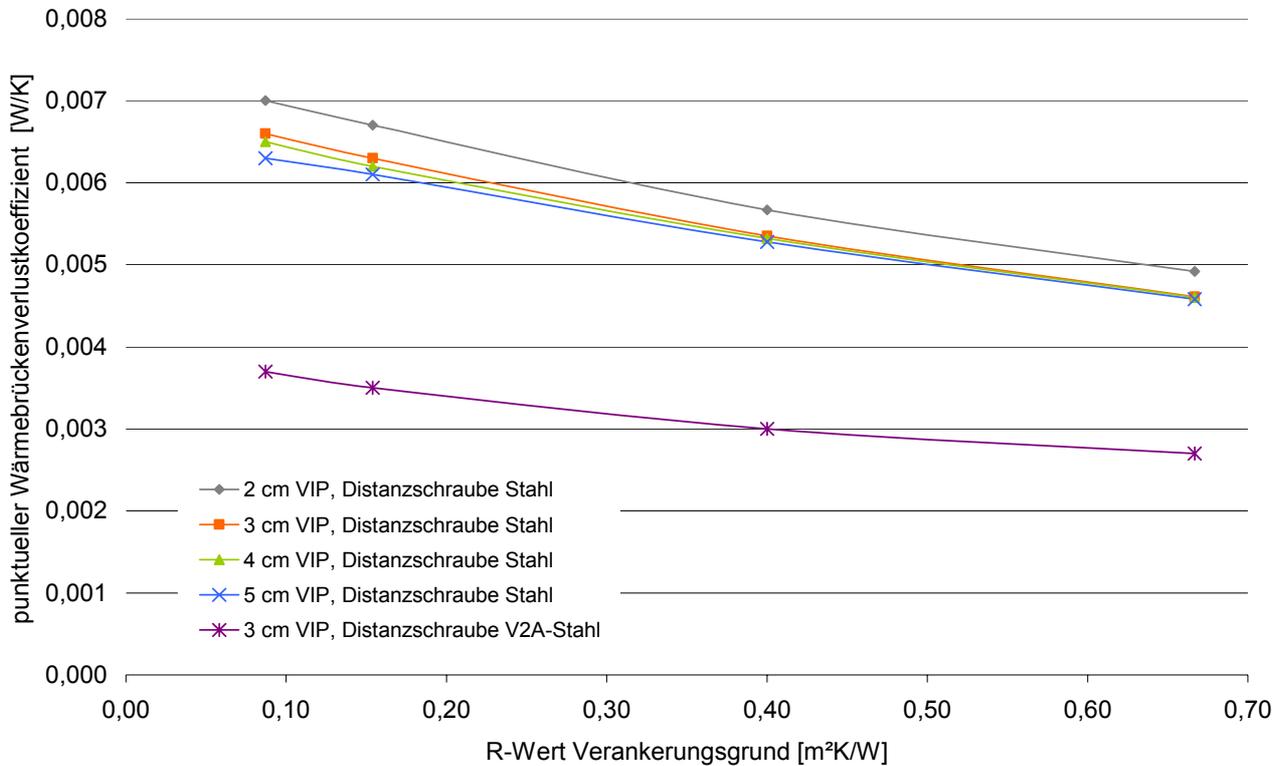


Abbildung 17: Punktueller Wärmebrückenverlustkoeffizient der Distanzschrauben bei verschiedenen VIP-Dicken in Abhängigkeit zum R-Wert des Verankerungsgrundes. Grafik: FHNW

Einfluss des Durchmessers der Distanzschrauben

Mit zunehmendem Durchmesser der Distanzschrauben steigt der χ -Wert an. Bei einem thermischen Widerstand des Verankerungsgrundes von 0.1 m²W/K und einer Wärmeleitfähigkeit der Distanzschraube von 16 W/(m²·K) ergeben sich für die VIP-Konstruktion die in Tabelle 4 aufgeführten Werte. Aufgrund der Ergebnisse sollte geprüft werden, ob für geringe Wärmedämmstoffstärken der Durchmesser der Distanzschrauben reduziert werden könnte, um die punktuellen Wärmebrücken weiter zu reduzieren.

Tabelle 4: Punktueller Wärmebrückenverlustkoeffizient für Distanzschrauben aus V2A-Stahl in einer VIP-Fassade für verschiedene Schraubendurchmesser.

Durchmesser [mm]	7	8	9	10
χ -Wert [W/K]	0.0037	0.0044	0.0052	0.0061

4.2.4 Vorbereitung der praktischen Umsetzung

Die Detailentwicklung und Optimierung der Konstruktion wurde durch die Anfertigung von Materialmustern, realer Modelle und der Installation einer Testfassade begleitet. Abbildung 18 zeigt ein erstes Testmuster der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Konstruktion als Schnittmodell im Massstab 1:2. In diesem Muster kamen keine funktionierenden VIP zum Einsatz. Um die Wärmebrücken der horizontalen EPS-Fuge zu minimieren, wurde in diesen Bereichen anstelle der äusseren EPS-Kaschierung eine zweite VIP-Lage vorgesehen (Berechnung Wärmestrom siehe 4.2.2). In der Praxis ist dies aufgrund variierender Abstände der Vertikallattung nur sehr aufwändig umzusetzen (viele verschiedene Paneel-formate). Zudem wäre die äussere VIP-Lage bei diesem Aufbau zunächst ungeschützt. Die einzelnen Montageschritte sind in Abbildung 19 dargestellt. Die ungeschützte Verarbeitung der VIP auf der Baustelle ist nicht zu empfehlen. Die Montage der ungeschützten VIP muss mit äusserster Sorgfalt erfolgen.



Abbildung 18: Arbeitsmodell des Distanzschraubensystems im Massstab 1:2. Die horizontalen EPS-Fugen werden hier zusätzlich mit einer zweiten VIP-Lage abgedeckt. Bilder: swisspor

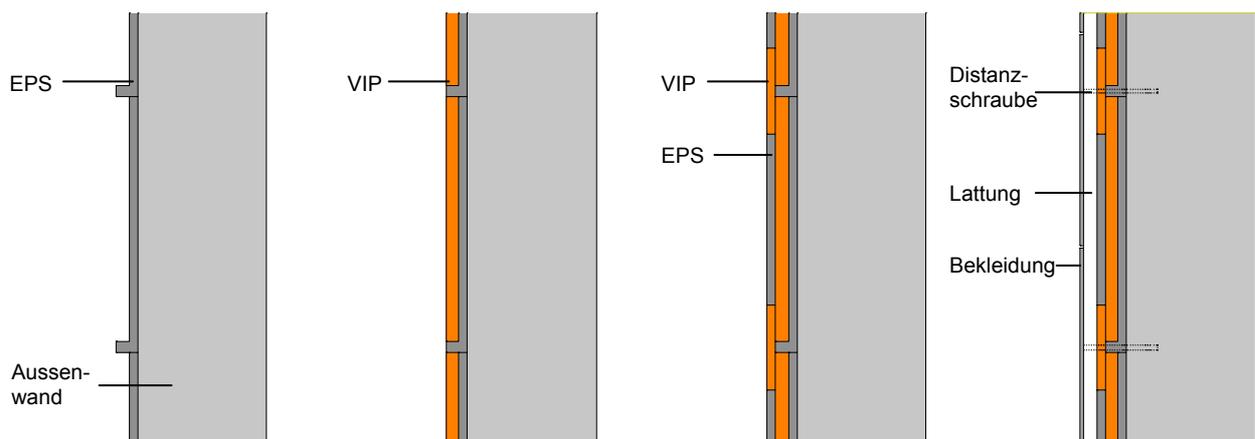


Abbildung 19: Konstruktionsvariante mit VIP-Abdeckung der EPS-Horizontalfuge. Montageschritte im Vertikalschnitt.

Grafik: FHNW

Im Rahmen einer Testmontage auf dem Werksgelände der Firma *Eternit* in Niederurnen wurde eine Variante des Systems erprobt (Abbildung 20). Hierbei sollte untersucht werden, wie die Anzahl der notwendigen VIP-Formate reduziert werden kann. Dies wurde durch eine versetzt zweilagige VIP-Anordnung in Sonderbereichen (Fassadenöffnungen, Randbereiche etc.) erreicht. Bei der Testmontage stand der Montageablauf im Vordergrund. Deshalb wurde auf den Einsatz funktionsfähiger VIP verzichtet. Auch bei dieser Systemvariante muss aufgrund der ungeschützten Verarbeitung der VIP die Montage mit äusserster Sorgfalt erfolgen. Die einzelnen Montageschritte sind in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 20: Testmontage des Distanzschraubensystems mit einer versetzt zweilagigen VIP-Anordnung in Randbereichen und an Öffnungen zur Reduzierung der Anzahl notwendiger Paneelformate. Bilder: swisspor

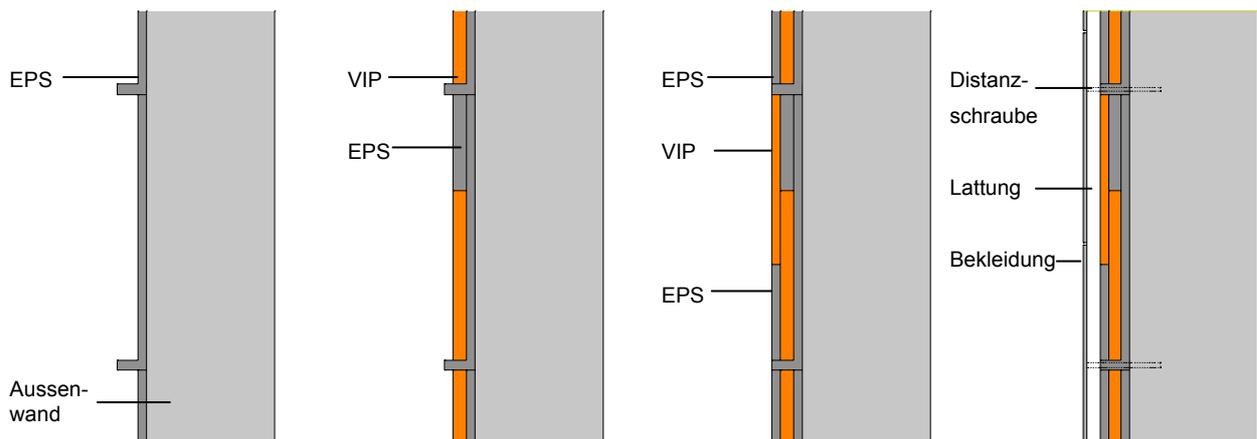


Abbildung 21: Konstruktionsvariante mit versetzt zweilagigen VIP in Sonderbereichen. Montageschritte im Vertikalschnitt.

Grafik: FHNW

Auf der Messe *Swissbau07* wurde am Gemeinschaftsstand der Firmen *swisspor* und *Eternit* ein Modell der Konstruktion im Massstab 1:1 gezeigt (Abbildung 22). Hier wurde auf die Abdeckung der Horizontalfugen mit VIP und auf die versetzt zweilagige Anordnung der Paneele verzichtet. So sind nach der Montage der äusseren EPS-Schicht sämtliche VIP vor mechanischer Beschädigung geschützt. Das Handling ungeschützter VIP auf der Baustelle ist allerdings kritisch zu beurteilen. Für die Weiterentwicklung des Systems soll der Schutz der VIP weiter verbessert werden und entsprechend des Montageablaufs in Abbildung 23 ab Werk geschützte VIP zum Einsatz kommen. Hiefür können kaschierte oder eingeschäumte VIP verwendet werden (siehe Kapitel 3.1.3 und 3.1.4). Das Modell stiess auf der Messe auf sehr reges Interesse.



Abbildung 22: Modell des Distanzschraubensystems auf der Messe *Swissbau07* am Gemeinschaftsstand der Firmen *Eternit* und *swisspor*. Bilder: *swisspor*

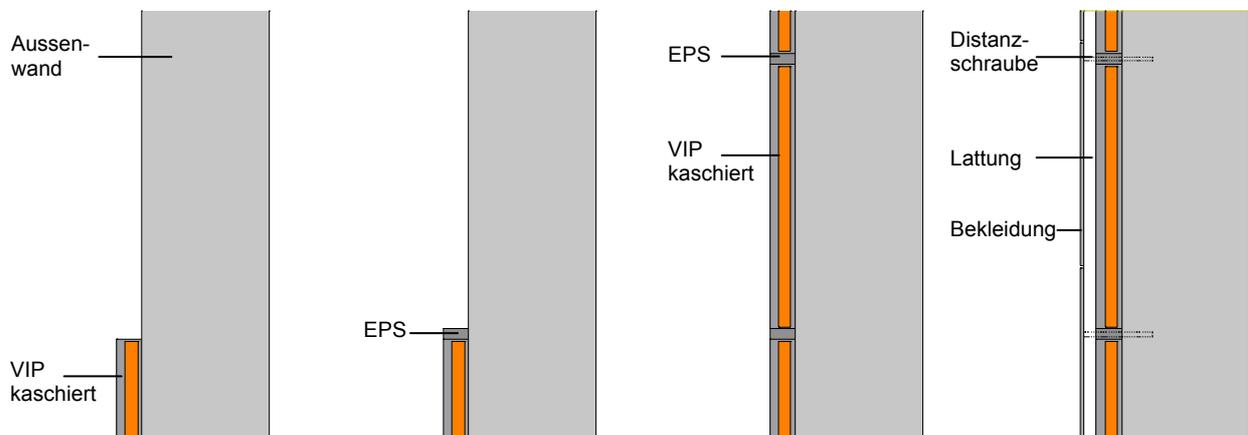


Abbildung 23: Konstruktion mit geschützten VIP. Die Paneele werden im Voraus kaschiert oder eingeschäumt. So wird das Risiko einer Beschädigung stark minimiert. Montageschritte im Vertikalschnitt. Grafik: FHNW

4.3 Hinterlüftete Fassade – System Distanzschrauben – Pilotmontage

Das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Bausystem für eine hinterlüftete Fassade mit VIP sollte an einem Pilotprojekt in der Praxis erprobt werden. Die Suche nach einem geeigneten Objekt gestaltete sich allerdings sehr schwierig. Schliesslich konnte mit einem Reihenhaus eines Mitarbeiters der Firma *Eternit* doch noch ein Objekt gefunden werden (Abbildung 24 links). Der Wärmeschutz der Frontfassade, der Rückfassade und des Daches sollte wesentlich verbessert werden. Bei der Frontfassade stand für die Wärmedämmung nur wenig Platz zur Verfügung, da der Absatz zu den Nachbargebäuden möglichst gering bleiben sollte. Aus diesem Grund bot sich hier der Einsatz des VIP-Systems an. Mit einem schlanken Aufbau kann ein sehr guter Wärmeschutz realisiert werden.

4.3.1 Planung und Vorbereitung zur Ausführung

Der Eigentümer hat die Sanierungsarbeiten am Gebäude teilweise in Eigenleistung konzipiert und auch selbst umgesetzt. An der Frontfassade wurden im Zuge der Sanierung zwei der acht vorhandenen Fensteröffnungen zugemauert. Die Fenster wurden erneuert, erhielten neue Kunststoffrahmen und eine Dreifachverglasung. Die Einbauposition der Fenster im Mauerwerk wurde nicht verändert, die Laibungen blieben in der ursprünglichen Form bestehen. Die konkrete Detailplanung des VIP-Systems für die Pilotmontage wurde im Wesentlichen von der Firma *Eternit* geleistet.



Abbildung 24: Links - Ursprungszustand des Reihenhauses vor der Sanierung. Bild: swisspor
Rechts - Zustand nach dem Zumauern zweier Fensteröffnungen und der Montage der ersten EPS-Ausgleichsschicht. Bild: FHNW

Die Planung und Vorbereitung zur Ausführung gliederte sich in folgende Schritte:

- Statische Prüfung des Verankerungsgrundes
- Ausgleich grosser Unebenheiten der Fassade durch Aufbringen einer EPS-Schicht
- Detailliertes Aufmass der Fassade
- Planung der Details und Erarbeiten eines Verlegeplans inklusive einer Positionsliste
- Bestellung, Produktion und Anlieferung der VIP gemäss Positionsliste

Im Folgenden wird auf diese Schritte genauer eingegangen.

1. Die statische Prüfung des Verankerungsgrundes lief erfolgreich. Das Mauerwerk ist für die Montage des Distanzschraubensystems geeignet. Hier müssen die auftretenden Horizontal- und Vertikalkräfte und deren Einleitung über die Distanzschrauben in den Verankerungsgrund dauerhaft gewährleistet werden.

2. Die bestehende Aussenwand weist grosse Unebenheiten auf. In der Senkrechten und Waagerechten sind Toleranzen bis zu 30 mm vorhanden (Ausbeulungen und Einbuchtungen). Nach dem Zumauern der beiden Fenster wurde eine dünne Lage EPS (20 mm) auf die Fassade aufgebracht, um diese Unebenheiten etwas auszugleichen und einen geeigneten Untergrund für die VIP-Montage zu schaffen (Abbildung 24 rechts).
3. In einem detaillierten Aufmass wurde die Lage der Öffnungen und Anschlüsse der Fassade festgehalten. Sämtliche Öffnungen und Kanten der Fassade weichen leicht vom rechten Winkel ab und liegen weder horizontal noch vertikal in einer Linie. Die Ausbeulungen und Einbuchtungen des Mauerwerks konnten durch die Montage der ersten EPS-Lage abgemildert, aber nicht vollkommen beseitigt werden.
4. Parallel zur Erstellung der Details (siehe Kapitel 4.2.2 und 4.2.4) wurde auf Grundlage des Aufmasses ein Verlegeplan ausgearbeitet. Die Einteilung der VIP wird durch zahlreiche Faktoren bestimmt: Geometrie der Fassade, maximale und minimale VIP-Formate, Toleranzen bei Aufmass und VIP-Fertigung, Anordnung der Unterkonstruktion der hinterlüfteten Fassade. Abbildung 25 zeigt den Verlegeplan. Aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen sämtlicher Öffnungen, und wegen vertikalen und horizontalen Abweichungen ist eine grosse Anzahl verschiedener VIP-Sonderformate notwendig. In einer Positionsliste wurden die Abmessungen und die Anzahl der Paneele mit eindeutiger Zuordnung zum Verlegeplan festgehalten.
5. Die VIP wurden gemäss der Positionsliste bei der Firma *va-Q-tec* bestellt, produziert und nach vier Wochen angeliefert. In der Produktion findet eine umfassende Qualitätskontrolle statt. Bei jedem einzelnen Paneel wird mit dem *va-Q-check*-System (Kapitel 3.2) der Innendruck gemessen. So wird sichergestellt, dass keine defekten VIP ausgeliefert werden. Jedes VIP erhält einen Aufkleber mit Abmessungen, Positionsnummer. Entgegen ursprünglicher Planungen konnten bei diesem Objekt noch keine kaschierten oder eingeschäumten VIP eingesetzt werden. Dies soll in zukünftigen Objekten umgesetzt werden.

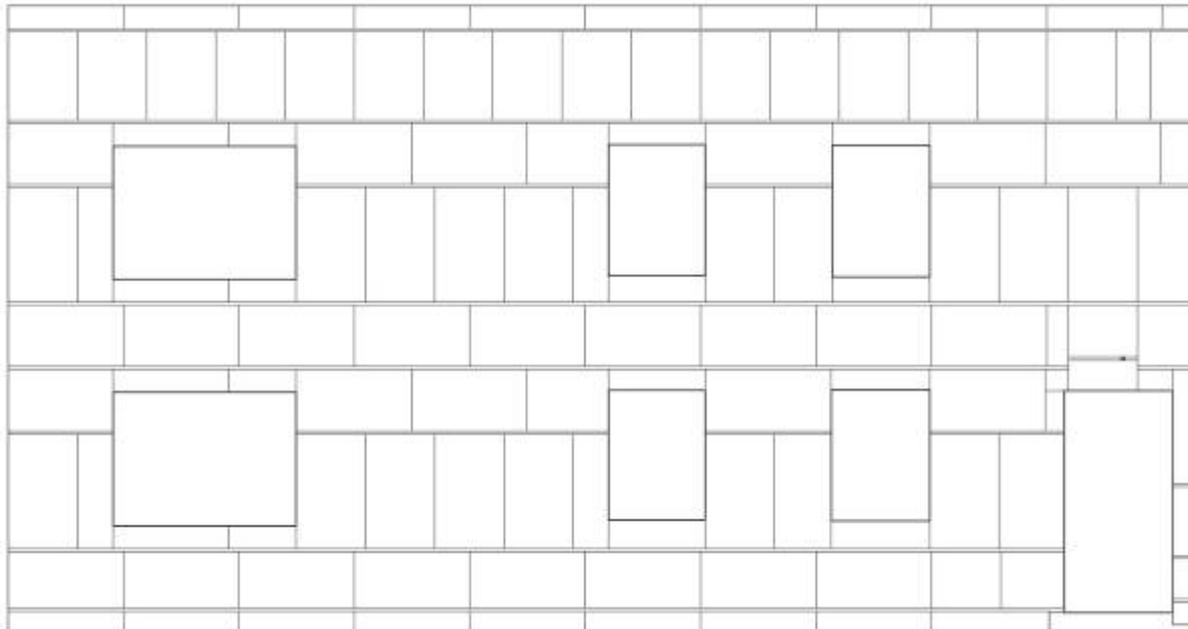


Abbildung 25: Verlegeplan mit Einteilung der VIP und horizontalen EPS-Fugen für die Montage der Unterkonstruktion der hinterlüfteten Fassade. Bild: Eternit

4.3.2 Dokumentation der Pilotmontage

Die Pilotmontage wurde von Mitarbeitern der Firmen *swisspor* und *Eternit* durchgeführt, und der Firma *Rogger* und dem *Institut für Energie am Bau* vor Ort begleitet. Entgegen der ursprünglichen Planung konnten die VIP nicht im Voraus mit EPS kaschiert werden. Die VIP wurden ungeschützt auf die Baustelle geliefert und im Zuge der Montage mit EPS geschützt.

Abbildung 26 bis Abbildung 32 zeigt die VIP-Montage. Die Arbeit gliederte sich in folgende Schritte:

- Auspacken, Kontrollieren und Vorsortieren der VIP
- Überprüfen und Abgleich der Fassadenabmessungen mit den VIP-Abmessungen
- Aufbringen des PU-Klebers auf die VIP
- Ankleben der VIP (in horizontalen Reihen von unten nach oben)
- Parallel dazu Ankleben der horizontalen EPS-Streifen
- Parallel dazu Aufbringen der äusseren EPS-Schicht auf die VIP
- Optional parallel dazu Bohren der Löcher für Kunststoff-Telleranker in den horizontalen EPS-Streifen
- Optional zusätzliches Fixieren der VIP durch Kunststoff-Telleranker
- Ausrichten der Vertikallattung der hinterlüfteten Fassade
- Bohren der Löcher für die Distanzschrauben in die Lattung durch den horizontalen EPS-Streifen
- Befestigung der Vertikallattung der hinterlüfteten Fassade durch die Distanzschrauben
- Aufbringen der Bekleidung der hinterlüfteten Fassade



Abbildung 26: Links – Die VIP wurden auf Paletten in zwei gut geschützten Grosspaketen angeliefert.

Rechts – Vor der Montage mussten die VIP entsprechend der Montagereihenfolge sortiert werden. Bilder: FHNW



Abbildung 27: Links – Jedes VIP ist mit einem Aufkleber mit Abmessungen, Positionsnummer und Auftragsnummer versehen.

Rechts – Die VIP werden mit lösungsmittelfreiem PU-Kleber für die Montage vorbereitet. Bilder: FHNW



Abbildung 28: Links – Der Untergrund wurde zum Ausgleich der Unebenheiten vorgängig mit einer Lage EPS versehen. Die noch vorhandenen, leichten Unebenheiten können durch den PU-Kleber ausgeglichen werden.
Rechts – Nach der Montage der ersten VIP-Reihe wird der horizontale EPS-Streifen installiert. Bilder: FHNW



Abbildung 29: Links – Durch die äussere EPS-Schicht werden die VIP gut vor Beschädigung geschützt.
Rechts – An den Rändern und Fassadenöffnungen ist der sandwichartige Aufbau sichtbar. Bilder: FHNW



Abbildung 30: Links – In den horizontalen EPS-Streifen werden Löcher für die Kunststoff-Telleranker gebohrt. Später sitzen in den Horizontalstreifen auch die Distanzschrauben der hinterlüfteten Fassade.
Rechts – Mit Hilfe von Kunststoff-Tellerankern werden die VIP zusätzlich zum PU-Kleber mechanisch fixiert. Bilder: FHNW



Abbildung 31: Links – Die äussere EPS-Schicht wird an den Rändern und Öffnungen nach Aufmass zugeschnitten und mit PU-Kleber auf die VIP geklebt.
 Rechts – Die VIP über den Fensteröffnungen müssen eine gute Klebehaftung aufweisen, um ein Abrutschen und Herunterfallen zu vermeiden. Bilder: FHNW

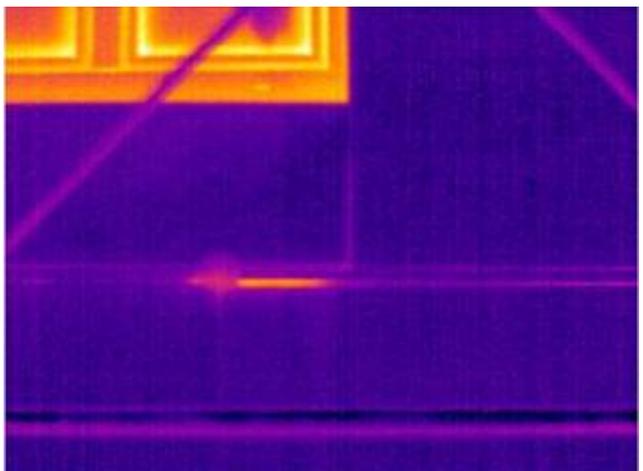
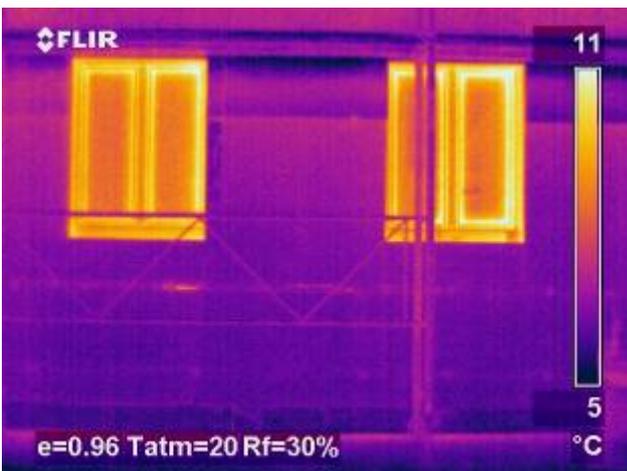


Abbildung 32: Die Thermographieaufnahmen zeigen thermische Schwachstellen an den EPS-Horizontalstreifen. Die Fugen müssen entsprechend verschlossen werden, um Konvektion und Hinterströmung zu verhindern. Bilder: FHNW

4.3.3 Ablauf der Pilotmontage – Optimierungsmöglichkeiten

Bei der Pilotmontage konnten wichtige Erkenntnisse für zukünftige Projekte gewonnen werden. Im Folgenden werden einzelne Aspekte näher erläutert und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Witterung bei Montage

- Beschreibung

Fassade war am Tag der Montage an einigen Stellen feucht, da es zuvor geregnet hatte. Die grossen VIP-Pakete wurden im Aussenbereich gelagert und waren bis zum Auspacken durch eine Abdeckplane gut gegen Regen geschützt. Während des Auspackens war es trocken. Niederschlag hätte das Auspacken und Sortieren der VIP erschwert. Es ist nicht im Detail geklärt, wie die Feuchte die Klebewirkung des PU-Klebers beeinflusst. Die Feuchte der Wand kann aufgrund der dampfdichten Hüllfolie der VIP nur sehr langsam trocknen.

- Optimierung

Die Fassaden sollten vor der VIP-Montage gut vor Feuchte geschützt werden und bei der Montage trocken sein. Die VIP sollten im Trockenen gelagert werden. Das Auspacken und Sortieren der VIP muss im Trockenen erfolgen können. Dafür muss genügend Platz zur Verfügung stehen. Die VIP sollten entsprechend der Montagereihenfolge verpackt werden, um Sortieraufwand zu vermeiden.

Anlieferung, Verpackung, Sortieren

- Beschreibung

Anlieferung in zwei grossen Paketen auf Paletten. VIP müssen vor der Montage aus den Grosspaketen ausgepackt werden und gemäss den Positionsnummern der Montagereihenfolge nach sortiert werden. Dies kann bei vielen verschiedenen VIP-Formaten sehr zeitaufwändig sein, beansprucht entsprechend viel Platz zum Auslegen der Paneele und birgt zusätzliche Gefahren der Beschädigung der VIP. Das Auspacken und Sortieren sollte im Trockenen erfolgen können.

- Optimierung

Bei der Verpackung der Paneele nach der Produktion sollte die Reihenfolge der Montage berücksichtigt werden, damit kein Sortieren der Paneele vor der Montage mehr nötig ist. Der Montageablauf sollte daher bereits beim Erstellen des Verlegeplans festgelegt werden. Die Paneele sollten stossicher in kleineren Paketen verpackt werden, die gut von zwei Personen angehoben und getragen werden können. Die VIP sollten grundsätzlich mit einem mechanischen Schutz versehen sein.

Fassadenöffnungen – Aufmass und VIP-Montage

- Beschreibung

Die vorhandenen Öffnungen der Fassade sind oftmals nicht exakt rechtwinklig und lotrecht. Auch die Kanten der Leibungen laufen häufig nicht exakt orthogonal zur Fensterebene. Dies kann beim Aufmass zu Ungenauigkeiten und Massverschiebungen führen. Zudem fehlt ein eindeutiger Anschlag für die VIP bei der Montage. Breite Lücken zwischen den VIP oder Überstände an den Fassadenöffnungen können die Folge sein. Dieses Problem kann durch die Masstoleranzen und breite Fugen an den VIP-Stössen noch verstärkt werden.

- Optimierung

Beim Aufmass sollten sämtliche Punkte der Fassade exakt aufgenommen und für den Verlegeplan aufgezeichnet werden. Für die Montage sollten eindeutige Anschlagpunkte an den Öffnungen in der Planung definiert werden. Leibungsdämmung eventuell vor dem Aufmass montieren, oder eine Hilfskonstruktion als Anschlag vorsehen.

Verarbeiten ungeschützter VIP

- Beschreibung

Die VIP konnten entgegen der ursprünglichen Planung nicht im Voraus kaschiert werden. Die ungeschützte Verarbeitung erfordert äusserste Sorgfalt bei allen Schritten der Ausführung (Transport, Handling, Montage), was zu einem höheren zeitlichen Aufwand führt. Die Gefahr der Beschädigung der Hüllfolie ist bei der ungeschützten Verarbeitung aufgrund der rauen Verhältnisse auf der Baustelle relativ hoch.

- Optimierung

Ungeschützte VIP sollten auf der Baustelle nicht zum Einsatz kommen. Sie sind für die Anwendung in der Baupraxis nur in Ausnahmefällen geeignet. Ein guter mechanischer Schutz der Paneele durch Kaschieren oder Einschäumen vor der Anlieferung auf der Baustelle beugt wirksam der Beschädigung vor. Das Aufbringen des Schutzes kann im Werk unter kontrollierten Bedingungen erfolgen. Der Schutz sollte auf den Flächen und am Rand möglichst dünn sein und eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Kleben der VIP

- Beschreibung

Der verwendete lösungsmittelfreie PU-Kleber entfaltet seine Klebekraft erst nach einigen Stunden. Die VIP könnten sich bei unebenem Untergrund nach dem Andrücken teilweise wieder Ablösen oder im Sturzbereich nach unten abrutschen und runterfallen. Da die Paneele relativ steif sind können sie Unebenheiten nicht ausgleichen. Bei einem sehr unebenen Untergrund besteht die Gefahr der unkontrollierten Hinterlüftung der VIP, was zu bauphysikalischen Problemen führen kann. Daher ist eine zusätzliche, eventuell temporäre Fixierung notwendig. Bei der Pilotmontage kamen Telleranker aus Kunststoff zum Einsatz, wofür in den horizontalen EPS-Streifen Löcher gebohrt wurden. Die Position der Telleranker muss auf die Anordnung der Befestigungspunkte der Lattung abgestimmt werden.

- Optimierung

Der Untergrund muss möglichst eben sein, damit die VIP vollflächig und plan an der Fassade anliegen, nicht gebogen werden müssen und nicht unter Spannung stehen. Unebenheiten des Untergrundes sollten durch entsprechende Vorarbeiten minimiert werden. Der Kleber sollte schnell abbinden, wodurch spätere Korrekturen allerdings kaum noch möglich sind. Die Korrekturmöglichkeit hat sich teilweise als nützlich erwiesen. Der Kleber sollte grosszügig verwendet werden und in umlaufenden Klebewürsten aufgetragen werden. Vor allem im Sturzbereich müssen die VIP zumindest temporär mechanisch fixiert werden, um das Abrutschen zu verhindern. Kaschierte VIP liessen sich besser verarbeiten und befestigen (andere Kleber, mehr Möglichkeiten einer temporären Fixierung). Eine gut komprimierbare Schicht zwischen VIP und Untergrund könnte die Unebenheiten ausgleichen. In diesem Fall müsste das VIP durch eine entsprechende Konstruktion an die Fassade gepresst werden.

VIP-Stösse

- Beschreibung

An den VIP-Stössen gibt es Fugen, die sich aufgrund der Unebenheiten an den VIP-Kanten nicht ganz vermeiden lassen. An den Kanten mit Schweissnähten der VIP-Hülle können die Fugen 2-5 mm breit sein, wodurch thermische Schwachstellen entstehen. Die Fertigungstoleranzen der VIP können dieses Problem noch verstärken. Die VIP sollten bei der Montage nicht zu stark aneinandergedrückt werden, da das Hüllmaterial an den Kanten beschädigt werden könnte.

- Optimierung

Einschäumen oder Kaschieren der VIP könnte die Unebenheiten an den VIP-Kanten und die Masstoleranzen ausgleichen. Mit geschützten VIP können Stösse sauberer ausgebildet werden. Grosse Unebenheiten des Untergrundes müssen durch Vorarbeiten ausgeglichen werden.

Masstoleranzen VIP

- Beschreibung

Die Masstoleranzen der VIP (+2/-5 mm) haben teilweise zu leichten Zwängungen, ungewolltem Versatz der VIP-Kanten und breiten Fugen geführt. Fugen und Lücken sind thermische Schwachstellen und bergen die Gefahr der unkontrollierten Durchströmung der Fugen oder gar einer Hinterströmung der VIP-Ebene mit kalter Aussenluft. Dies kann zu bauphysikalischen Problemen führen.

- Optimierung

Die Masstoleranzen der VIP (+2/-5 mm) erfordern entsprechende Planung (mögliches Maximalmass berücksichtigen). Bei breiten Fugen und Lücken sind Ausgleichs- und Füllstreifen oder Ausschäumen notwendig. Eine unkontrollierte Durchströmung der Fugen oder gar einer Hinterströmung der VIP mit kalter Aussenluft muss auf jeden Fall vermieden werden. Die Anzahl der Fugen sollte möglichst gering gehalten werden, Fugen sollten möglichst luftdicht verschäumt oder verstopft werden und die VIP möglichst plan und vollflächig an der Fassade anliegen. Umlaufende Kleberwürste auf den VIP helfen eine Hinterlüftung zu vermeiden. Eine Kaschierung könnte die Masstoleranzen der VIP ausgleichen. Mit kaschierten VIP können Stösse sauberer ausgebildet werden. Ausgleichs- und Füllstreifen lassen sich besser montieren. Ausschäumen von Fugen ist besser möglich.

4.3.4 Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten der VIP-Pilotfassade

Für die VIP-Fassade des Pilotobjektes wurde der tatsächliche U-Wert inklusive aller Inhomogenitäten und Wärmebrücken berechnet. Bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten mussten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Wärmeleitfähigkeiten sämtlicher Materialschichten, insbesondere der VIP (inklusive Alterung)
- Wärmeverlust durch VIP-Ränder und Stösse (linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient) unter Berücksichtigung der tatsächlichen Paneelabmessungen und jeweiligen Paneelanzahl
- Wärmeverlust durch horizontale EPS-Streifen (Inhomogenität und linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient) unter Berücksichtigung der Länge und Breite der EPS-Streifen
- Wärmeverlust durch die Befestigung der Unterkonstruktion der hinterlüfteten Fassade (punktuelle Wärmebrückenverlustkoeffizient) unter Berücksichtigung der Anzahl der Befestigungspunkte.

Die Daten der Berechnung wurden auf Basis des Verlegeplans ermittelt und sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Es wurden zunächst drei Varianten mit unterschiedlichen breiten Fugen zwischen den einzelnen VIP und unterschiedlichen Breiten der EPS-Fuge untersucht, sowie eine Variante mit belüfteten VIP betrachtet. Abstimmung mit der EMPA wurde mit einem λ_{cop} von 0.006 W/(m·K) gerechnet. In diesem Wert sind die Alterungseffekte durch Druckanstieg und Feuchtezunahme berücksichtigt. Wärmebrückeneffekte an den Rändern der Paneele wurden wegen der vielen verschiedenen Sonderformate für die Fassade individuell erfasst.

Tabelle 5: Daten für die Berechnung des U-Wertes der VIP-Fassade am Pilotobjekt.

		VIP-Stösse breit EPS-Fuge 30 mm	VIP-Stösse mittell EPS-Fuge 25 mm	VIP-Stösse schmal EPS-Fuge 20 mm	VIP belüftet EPS-Fuge 25 mm
Fassadenfläche gesamt	[m ²]	46,92	46,92	46,92	46,92
EPS-Fugenbreite	[m]	0,030	0,025	0,020	0,025
EPS-Fugenlänge	[m]	72,64	72,64	72,64	72,64
EPS-Fugenfläche	[m ²]	2,18	1,82	1,45	1,82
VIP-Fläche	[m ²]	44,74	45,10	45,47	44,74
Fläche gesamt	[m ²]	46,92	46,92	46,92	46,92
Flächenanteil EPS-Fuge	[%]	4,6%	3,9%	3,1%	3,9%
<hr/>					
Bestandswand U-Wert	[W/(m ² K)]	1,17	1,17	1,17	1,17
Bestandswand Dicke	[mm]	300	300	300	300
<hr/>					
EPS-Kaschierung λ	[W/(m·K)]	0,031	0,031	0,031	0,031
EPS-Kaschierung Dicke	[mm]	2 x 20	2 x 20	2 x 20	2 x 20
<hr/>					
VIP λ_{cop}	[W/(m·K)]	0,006	0,006	0,006	0,020
VIP Dicke	[mm]	30	30	30	30
VIP-Ränder+Stösse Ψ	[W/(m·K)]	0,005	0,003	0,002	0,002
VIP-Ränder Länge	[m]	313,21	313,21	313,21	313,21
VIP λ_{eff} (inkl. VIP-Ränder Ψ)	[W/(m·K)]	0,008	0,007	0,007	0,022
<hr/>					
EPS-Fuge λ	[W/(m·K)]	0,031	0,031	0,031	0,031
EPS-Fuge Dicke	[mm]	70	70	70	70
<hr/>					
Distanzschrauben χ	[W/K]	0,0044	0,0046	0,0049	0,0041
Distanzschrauben Anzahl	[Stck]	125	125	125	125
Schrauben pro m2	[Stck/m ²]	2,7	2,7	2,7	2,7

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 6 und Abbildung 33 dargestellt. Demnach beträgt der Zuschlag durch die zusätzlichen Wärmeverluste je nach Breite der horizontalen EPS-Fugen und der VIP-Stösse 0.033 – 0.055 W/(m²·K), was einer Erhöhung des ungestörten U-Wert von 0.139 W/(m²·K) von 24 – 40% entspricht. Den grössten Anteil haben dabei die VIP-Ränder und Stösse. Der Einfluss ist stark von der tatsächlichen Ausführungsqualität abhängig. Bei günstigeren Paneelabmessungen (möglichst grosse und quadratische Paneele) und schmalen Fugen würde dieser Zuschlag entsprechend kleiner ausfallen, allerdings sind die Optimierungsmöglichkeiten hier begrenzt. Die durchschnittliche Paneelgrösse beträgt in diesem Projekt ca. 0.40 x 0.90 m². Rechnet man diese Verluste der VIP-Ränder und Stösse in die Wärmeleitfähigkeit der VIP ein, entspricht die so ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} mit 0.007-0.008 W/(m·K) dem empfohlenen Rechenwert der EMPA und den aktuellen λ_D -Werten gemäss SIA Merkblatt 2001. Den geringsten Anteil am zusätzlichen Wärmeverlust haben die horizontalen EPS-Fugen. Der Flächenanteil der EPS-Fugen beträgt je nach Breite der Fugen 3.1 – 4.6%. Pro Quadratmeter Wandfläche werden 2.7 Distanzschrauben benötigt. Daraus ergibt sich ein Zuschlag zum U-Wert von 0.012 W/(m²·K). Aufgrund der Kleinteiligkeit der Fassade liegt die Anzahl der Schrauben leicht über dem Durchschnitt typischer Fassaden.

Tabelle 6: Ergebnisse der U-Wertberechnung der VIP-Fassade am Pilotobjekt.

		VIP-Stösse breit EPS-Fuge 30 mm	VIP-Stösse mittel EPS-Fuge 25 mm	VIP-Stösse schmal EPS-Fuge 20 mm	VIP belüftet EPS-Fuge 25 mm
U-Wert ungestört	[W/(m ² ·K)]	0,139	0,139	0,139	0,270
Δ U-Wert EPS-Fuge	[W/(m ² ·K)]	0,008	0,007	0,006	0,002
Δ U-Wert VIP Ränder+Stösse	[W/(m ² ·K)]	0,035	0,021	0,014	0,012
Δ U-Wert Distanzschrauben	[W/(m ² ·K)]	0,012	0,012	0,013	0,011
U-Wert gesamt	[W/(m ² ·K)]	0,194	0,179	0,172	0,295

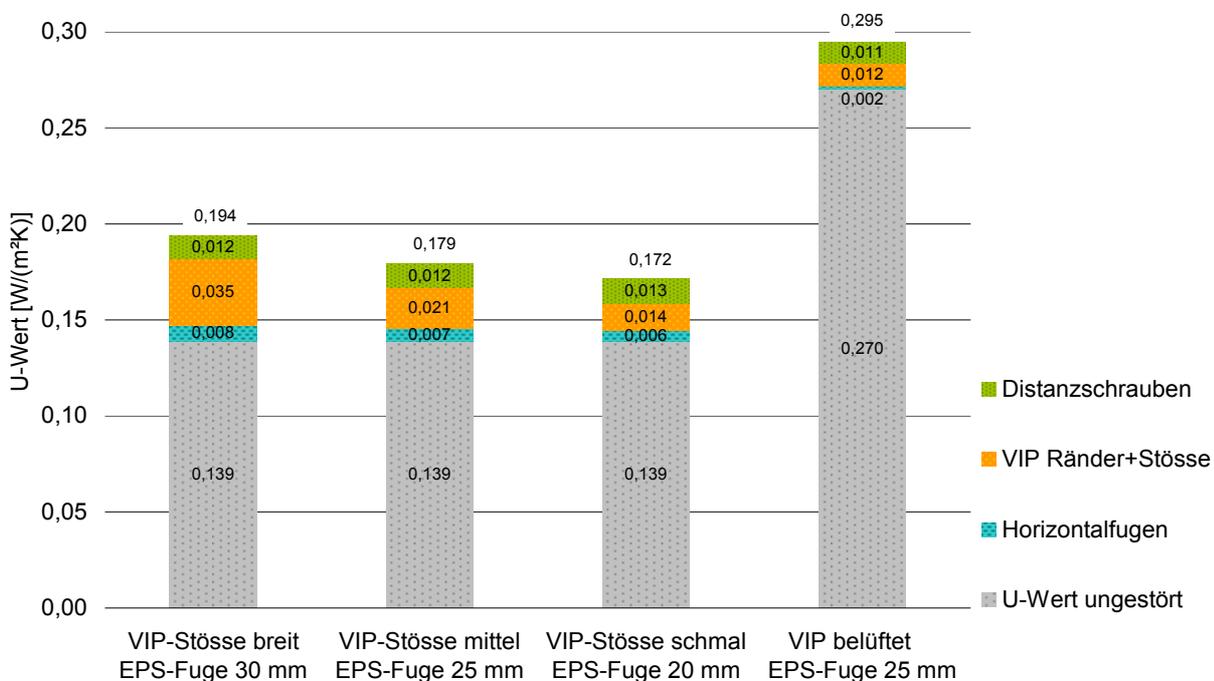


Abbildung 33: U-Werte der VIP-Fassade am Pilotobjekt inklusive sämtlicher Wärmeverluste in verschiedenen Varianten mit unterschiedlich breiten Fugen zwischen den einzelnen VIP, unterschiedlichen Breiten der EPS-Fuge und mit belüfteten VIP. Grafik: FHNW

4.3.5 Vergleich mit herkömmlich wärmedämmten Systemen

Im Vergleich zu einer hinterlüfteten Fassade mit guter, herkömmlicher Wärmedämmung (EPS, $\lambda = 0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) wäre bei gleicher Dämmdicke (70 mm) der U-Wert mit $0.33 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ um den Faktor 1.7 bis 1.9 schlechter als bei der VIP-gedämmten Konstruktion mit $0.17 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Die Transmissionswärmeverluste sind bei der VIP-Fassade ca. 45% geringer.

Soll mit guter, herkömmlicher Wärmedämmung (EPS, Wärmeleitfähigkeit $0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) der gleiche U-Wert erreicht werden, ist eine Dämmdicke von 150 mm notwendig, was einem Faktor 2.1 für die Dämmschichten und einem Faktor 1.8 für die gesamte Konstruktion entspricht. Die VIP-Fassade benötigt mit einer Ersparnis von 80 mm 45% weniger Platz.

4.3.6 Optimierungsansätze

Im Folgenden sind einige Optimierungsansätze detaillierter beschrieben. Tabelle 7 gibt einen Überblick zu möglichen Massnahmen zur weiteren Verbesserung des U-Wertes.

- Dicke der VIP-Kaschierung reduzieren

Die oben genannten Faktoren lassen sich verbessern, wenn die Dicke der herkömmlichen Wärmedämmstoffe in der VIP-Konstruktion reduziert, also der VIP-Anteil am Dämmpaket erhöht wird. Werden in der Konstruktion die Dicken der EPS-Kaschierung von $2 \times 40 \text{ mm}$ auf $2 \times 5 \text{ mm}$ verringert, liegt der Faktor für die Dämmschichten bei 3.5 und für die gesamte Konstruktion bei 2.5.

- VIP-Kaschierung und Horizontalfugen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit verwenden

Weitere Verbesserungen sind zu erreichen, wenn für die Kaschierung und die Fugen Materialien geringerer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Hier wären PUR-Hartschaum ($\lambda=0.024\text{-}0.028 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), Phenolharzschaum ($\lambda=0.021\text{-}0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) oder Aerogelvliese ($\lambda=0.015\text{-}0.018 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) in Frage. Zudem wird dadurch der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient der VIP-Ränder und Stösse reduziert.

- Anzahl der Distanzschrauben reduzieren

Bei der Verwendung grossformatiger Bekleidungen und einer Abstimmung der Einteilung der Bekleidung mit der VIP-Einteilung kann die Anzahl der Distanzschrauben pro Quadratmeter reduziert werden. Durch die Verwendung einer Lattung aus Schichtholz statt herkömmlichem Vollholz liesse sich die Statik der Unterkonstruktion optimieren.

Tabelle 7: Optimierungsansätze zur Reduzierung des U-Wertes der Konstruktion.

U-Wert Teilaspekt	Optimierung
U-Wert ungestört	<ul style="list-style-type: none"> - VIP-Kaschierung mit tieferer Wärmeleitfähigkeit z.B. PUR-Hartschaum, Phenolharzschaum, Aerogelvlies → VIP-Wärmebrücken-Randeffekt wird reduziert - Grössere Dicke der Kaschierung → Verhältnis Dämmwirkung zu Gesamtdicke verschlechtert sich → VIP-Wärmebrücken-Randeffekt wird reduziert - VIP mit tieferer Wärmeleitfähigkeit → Hülle mit Metallfolie (Wärmebrücken-Randeffekt grösser) → alternative Hüllmaterialien (noch nicht verfügbar) - Grössere Dicke der VIP → Kosten
Zuschlag auf U-Wert durch Horizontalfuge	<ul style="list-style-type: none"> - Material mit tieferer Wärmeleitfähigkeit → PUR-Hartschaum, Phenolharzschaum, Aerogelvlies - Flächenanteil der Horizontalfuge an gesamter Wandfläche minimieren → Breite Horizontalfuge minimieren → Anzahl Horizontalfugen minimieren
Zuschlag auf U-Wert durch VIP-Ränder und Fugen	<ul style="list-style-type: none"> - Anzahl der Fugen reduzieren → grosse VIP-Formate einsetzen → Aufteilung der VIP optimieren - Fugenbreiten reduzieren → Massgenauigkeit der VIP verbessern → Toleranzen bei Aufmass und Montage reduzieren - Wärmebrücken-Randeffekt der VIP reduzieren → alternative Hüllmaterialien (noch nicht verfügbar) → Angrenzende Schichten mit tieferer Wärmeleitfähigkeit
Zuschlag auf U-Wert durch Distanzschrauben	<ul style="list-style-type: none"> - Anzahl der Distanzschrauben reduzieren → Gewicht + Formate der Bekleidung → Statik Lattung → Geometrie Fassade - Durchmesser der Distanzschrauben reduzieren → Tragfähigkeit, Statik - Material mit tieferer Wärmeleitfähigkeit → z.B. V2A-Stahl, Glasfaserverstärkter Kunststoff

Durch die kombinierte Umsetzung verschiedener Optimierungsansätze liesse sich bei gleich bleibender VIP-Dicke der U-Wert der VIP-Konstruktion der Pilotfassade von 0.17 W/(m²·K) um 0.01 - 0.02 W/(m²·K) reduzieren. Hierbei wurden Distanzschrauben mit nochmals geringeren punktuellen Wärmebrückenverlusten und ein alternatives Material mit geringerer Wärmeleitfähigkeit für die Kaschierung und die Horizontalstreifen eingesetzt.

4.3.7 Wirtschaftlichkeit

Für Baugrundstücke mit einer festgelegten Ausnützungsziffer oder fix vorgegebenen Aussenabmessungen der Bebauung kann durch den schlankeren Aufbau der Fassade mehr nutzbare Fläche geschaffen werden. Bei der untersuchten Konstruktion mit 3 cm VIP beträgt die Platzersparnis gegenüber einer hinterlüfteten Fassade mit guter, herkömmlicher Wärmedämmung (EPS, $\lambda = 0.031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) etwa 8 cm. Bei weiterer Optimierung sind 10 cm Platzersparnis durchaus realistisch erreichbar. Die Mehrkosten betragen pro Quadratmeter mit 3 cm VIP inklusive Kaschierung und Mehraufwand bei der Verarbeitung ca. 240-300 CHF. Nicht berücksichtigt ist hier der Aufwand für Leibungsdämmung, da diese auch bei EPS gedämmten Fassaden notwendig sind. Ausgehend von einem Fensteranteil der Fassade von 30% und einer Geschosshöhe von 3.0 m, ergibt sich pro Laufmeter Fassade eine opake Wandfläche von 2.1 m². Dies führt zu Mehrkosten je Laufmeter Fassade von ca. 500-650 CHF für das VIP-System. Aus dem Nutzflächengewinn von 0.1 m² pro Laufmeter Fassade und den Mehrkosten von ca. 500-650 CHF lässt sich der Grenzwert für den Verkaufspreis pro Quadratmeter Nutzfläche errechnen, ab welchem der Einsatz der VIP-Konstruktion als wirtschaftlich zu betrachten ist. Eventuelle Mehrkosten, die durch das grösser werdende Netto-Gebäudevolumen entstehen können wurden hierbei nicht berücksichtigt. Der Grenzwert für den Verkaufspreis pro Quadratmeter Nutzfläche liegt für die vorangegangenen Annahmen bei 5000-6500 CHF/m² Nutzfläche. Diese Preise können in teuren Lagen durchaus erzielt werden. Insofern kann der Einsatz des Systems aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll sein.

4.3.8 Hinterlüftete Fassade mit VIP – Fazit

Das entwickelte Bausystem zeichnet sich durch einen schlanken Aufbau bei hoher Dämmwirkung und eine gute Bautaughkeit aus. Die horizontalen Montagestreifen führen zwar zu geringfügig höheren Wärmeverlusten, bieten aber gleichzeitig eine hohe Flexibilität bei der Montage der Distanzschrauben der Unterkonstruktion und Möglichkeiten des Toleranzausgleichs. Die Pilotmontage hat gezeigt, dass der Einsatz ungeschützter VIP auf der Baustelle sehr hohe Ansprüche an die Verarbeitung stellt, und zukünftig vermieden werden sollte. Ein sicherer Schutz der VIP vor mechanischer Beschädigung kann durch Kaschieren oder Einschäumen gewährleistet werden. Bei kleinteiligen Fassaden mit unregelmässigen Öffnungen ist eine grosse Anzahl an Sonderformaten notwendig, was zu höheren Kosten und einem Mehraufwand bei der Montage führt. Für Neubauten sollte in der Planung frühzeitig das VIP-Raster berücksichtigt werden.

Im Vergleich zum Einsatz herkömmlicher Wärmedämmung ist der Platzbedarf für das System bei gleicher Dämmwirkung für die untersuchte Pilotfassade um 45% geringer. Dieser Vorteil kann beispielsweise durch eine Optimierung der Distanzschrauben (Material und Abmessungen, Anzahl) und dünnere VIP-Kaschierung mit geringerer Wärmeleitfähigkeit weiter verbessert werden.

Das System kann als Problemlöser in Situationen eingesetzt werden, wo nur wenig Platz für die Konstruktion zur Verfügung steht (Gehweg, Anschluss zum Nachbargebäude, Grenzabstand etc.). Sind planungsrechtlich eindeutige Aussenumrisse eines Gebäudes festgelegt, kann durch den schlankeren Wandaufbau wertvolle nutzbare Fläche hinzugewonnen werden. An teuren Standorten können die Mehrkosten der VIP durch diesen Gewinn an nutzbarer Fläche ausgeglichen werden.

4.4 Innendämmung mit VIP

4.4.1 Bauphysikalische Besonderheiten bei Innendämmung

Bei zahlreichen Altbauten ist eine nachträgliche Aussendämmung der Fassade aus verschiedenen Gründen nicht möglich. Gleichwohl kann durch eine Innendämmung bei diesen Gebäuden unter Beachtung der bauphysikalischen Besonderheiten der Konstruktion, der Wärmeschutz verbessert werden.

Aus bauphysikalischer Sicht müssen bei Innendämmung folgende Aspekte bedacht werden:

- An den Anschlüssen der Innenwände und Geschossdecken an die Aussenwand ist der Wärmedämmperimeter der Innendämmung unterbrochen und es kommt zu nicht vermeidbaren Wärmebrücken. An diesen Punkten müssen ausreichend hohe Oberflächentemperaturen sichergestellt werden, um Feuchteschäden durch Kondensation der Raumluffeuchte zu vermeiden. Eine Komfortlüftung kann diese Gefahr durch eine reduzierte Feuchtebelastung der Raumluff entschärfen.
- Durch einen sorgfältig geplanten und ausgeführten luftdichten Abschluss der Innendämmung zur Raumluff an allen Fugen und Anschlüssen wird die unkontrollierte Hinterströmung der Wärmedämmebene, und somit die Kondensation der Raumluffeuchte in der Konstruktion vermieden.
- Ein nach innen dampfdichter Aufbau der Konstruktion verhindert die Dampfdiffusion und den Tauwasserausfall in der Konstruktion.
- Während der Heizperiode sinkt durch die Innendämmung die Temperatur der Aussenwandkonstruktion und an Geschossdeckenauflegern stärker ab, weshalb das Risiko feuchtebedingter Schäden beachtet und untersucht werden muss. Hier ist auch die Gefahr der Durchfeuchtung der Aussenwand von aussen durch schadhafte Putz etc. von Bedeutung.
- Für das Innenraumklima steht die Speichermasse der Aussenwand bei innenseitiger Wärmedämmung nicht mehr zur Verfügung.

4.4.2 Grundlagen bei Innendämmung mit VIP

Durch eine Innendämmung geht zudem wertvolle Nutzfläche im Gebäude verloren, weshalb die Reduktion der Dämmstärke von besonderer Bedeutung ist. Der Einsatz von VIP ermöglicht hier schlanke und zugleich hoch wärmedämmende Konstruktionen.

Bei Innendämmung mit VIP bestehen im Vergleich zu Konstruktionen mit herkömmlicher Wärmedämmung folgende Unterschiede:

- Die VIP müssen gegen mechanische Beschädigung durch Bildernägeln, Befestigungselemente für Möbel etc. geschützt werden.
- Die Dämmdicke ist bei gleicher Dämmwirkung geringer. Daher können die Oberflächentemperaturen an den Anschlüssen der einbindenden Bauteile tiefer sein, was die Gefahr der Raumluffkondensation erhöht.
- VIP können nachträglich nicht zugeschnitten werden. Daher muss ein exaktes Aufmass der Innenwände erstellt, und ein Verlegeplan der VIP-Einteilung gezeichnet werden.
- Anschlussdetails an Wänden, Decken, Fensteröffnungen, Rollladensteuerung, Heizkörpern, Mauervorsprüngen, Elektroinstallationen etc. müssen sorgfältig geplant werden, da Nacharbeiten vor Ort kaum möglich sind.
- Aus bauphysikalischer Sicht muss beachtet werden, dass es sich um ein praktisch dampfdichtes Wärmedämmsystem handelt. Randanschlüsse und Fugen zwischen den VIP müssen dampfdicht ausgeführt werden.

4.5 Modulares Wandsystem für eine Innendämmung mit VIP

Im Rahmen dieses Projektes sollte ein System für eine Innendämmung mit VIP entwickelt werden, welches

- einen schlanken und zugleich sicheren Schutz der VIP vor Beschädigung bietet,
- ohne zusätzliche Durchdringungen der VIP-Ebene durch Befestigungselemente auskommt,
- die Speichermassenentkopplung durch die Innendämmung abmildert,
- für einen gehobenen Innenausbaustandard konzipiert ist.

Das entwickelte System basiert auf einer klaren konstruktiven Trennung der Wärmedämmung und der raumseitig sichtbaren Wandoberflächen. Abbildung 34 zeigt eine Isometrische Darstellung des Systems. Die kaschierten oder eingeschäumten VIP sind raumseitig durch eine hochwertige Vorsatzschale (Faserzement, Holz, Glas etc.) geschützt. Die Konstruktion basiert auf modular aufgebauten, versetzbaren Bürotrennwänden und Systemen zur Wandverkleidung mit flächigen Elementen. Das System bietet konstruktive Lösungen für das Aufhängen von Bildern, Tablaren etc. Die vertikalen Profilträger für die Vorsatzschale werden an Decke und Boden befestigt, die VIP-Ebene wird nicht durch Tragelemente durchstossen. Die Konstruktion der schützenden Vorsatzschale sollte möglichst schlank sein (Ziel: 25-35 mm inklusive Verkleidung) Je grösser der Anteil der VIP-Dicke an der Dicke der Gesamtkonstruktion, umso grösser ist er Raumgewinn gegenüber herkömmlich wärmedämmten Konstruktionen. Der Montageablauf ist in Abbildung 35 dargestellt.

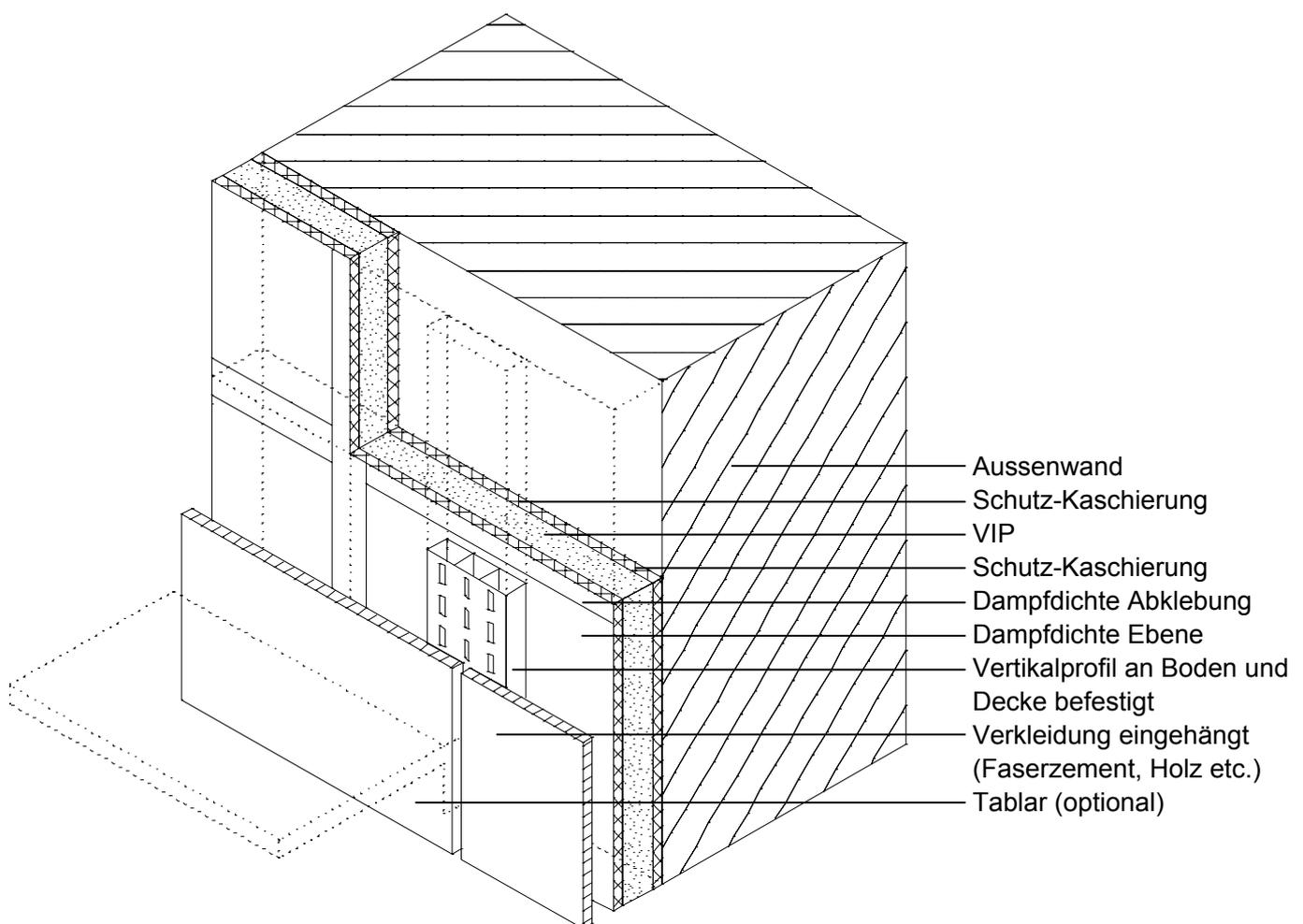


Abbildung 34: System einer Innendämmung mit VIP. Konstruktive Trennung der Wärmedämmebene und der Wandverkleidung. Grafik: FHNW

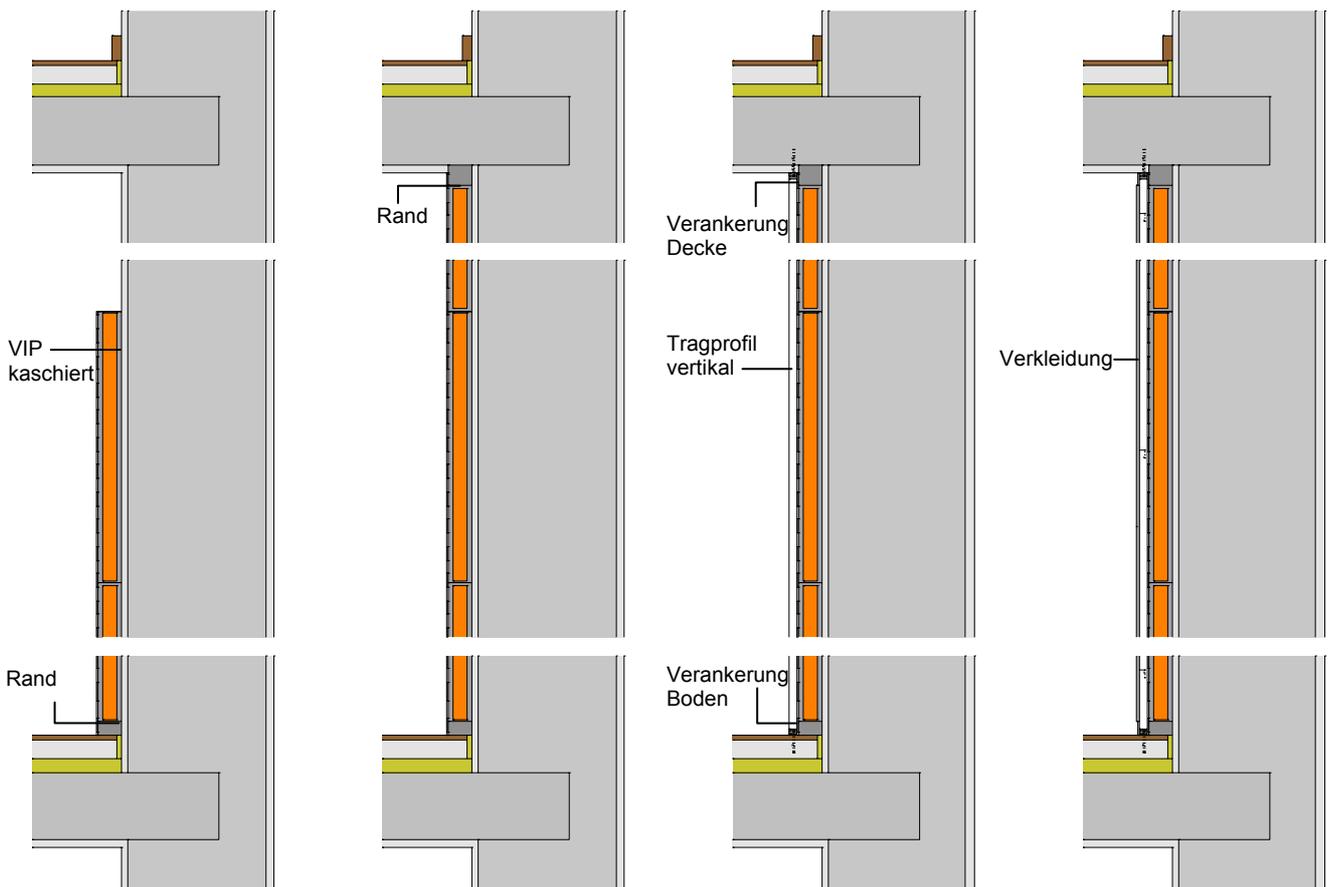


Abbildung 35: Montageablauf des Systems für eine Innendämmung mit VIP. Grafik: FHNW

Die kaschierten oder eingeschäumten VIP sind ab Werk raumseitig mit einer Dampfsperre versehen. Die Paneele werden vollflächig auf die Wand geklebt und Toleranzzonen am Rand mit herkömmlicher Wärmedämmung ausgefüllt. Die Fugen und Randanschlüsse werden mit nicht quellendem Ortschaum ausgefüllt oder mit Faserdämmstoffen verstopft, um unkontrollierte Konvektion zu vermeiden. Anschliessend werden Fugen und Randanschlüsse dampfdicht abgeklebt.

Die vertikalen Tragprofile für die Wandverkleidung werden an zuvor montierten Decken und Bodenschienen befestigt, entsprechend des Rasters der Wandverkleidung ausgerichtet und justiert. Nach der Montage der Boden- und Deckenanschlussblenden werden abschliessend die raumhohen Wandpaneele mit rückseitig angebrachten Befestigungshaken in die Vertikalprofile eingehängt. Abbildung 36 zeigt ein Arbeitsmodell des Innendämmsystems mit VIP.

Alternativ zum Vertikalprofilssystem kann auch ein Boden- und Deckenprofil, vergleichbar mit Ganzglastrennwandsystemen, eingesetzt werden.

Die raumseitige Ebene der inneren Wandverkleidung kann bei Bedarf noch zusätzliche Funktionen aufnehmen:

- Installationszone für Hoch- und Niedervoltverkabelung
- Zu- / Abluft von Lüftungssystemen
- Flächenheizsysteme, Flächenkühlssysteme
- Beleuchtung, Bildschirmflächen
- Erhöhung der Speichermasse durch den Einsatz von Latentspeichermaterialien (PCM)

Die Firma *Eternit* hat den Einsatz von microverkapseltem PCM (*Micronal* Firma *BASF*) bei der Produktion von Faserzementplatten für den Innenausbau untersucht. Das Wärmespeichervermögen der Platten kann dadurch erheblich gesteigert werden. Gipskartonplatten (12 mm) mit dieser Ausrüstung erreichen die Wärmespeicherfähigkeit einer 10 cm Betonwand. Der Einsatz in Faserzementplatten ist prinzipiell möglich, allerdings auch sehr teuer.



Abbildung 36: Arbeitsmodell des Systems für Innendämmung mit VIP. Foto: FHNW

4.5.1 Innendämmung mit VIP - Temperaturverlauf in der Konstruktion

Mit Hilfe thermischer Simulationen wurde die Konstruktion am *Institut Energie am Bau* hinsichtlich kritischer Oberflächentemperaturen überprüft (Software *Heat2 6.0*). Um feuchtebedingte Schäden zu vermeiden, sollten die minimalen Oberflächentemperaturen 13 °C nicht unterschreiten (Feist 2005).

Abbildung 37 zeigt den zunächst untersuchten Aufbau und den Temperaturverlauf in der Konstruktion. Die Wärmebrücke ist deutlich zu erkennen. Die Temperatur liegt mit 12.9 °C am Deckenanschluss knapp im kritischen Bereich. Diese Ausführung könnte zu Schäden führen, und wäre nur eingeschränkt zu empfehlen.

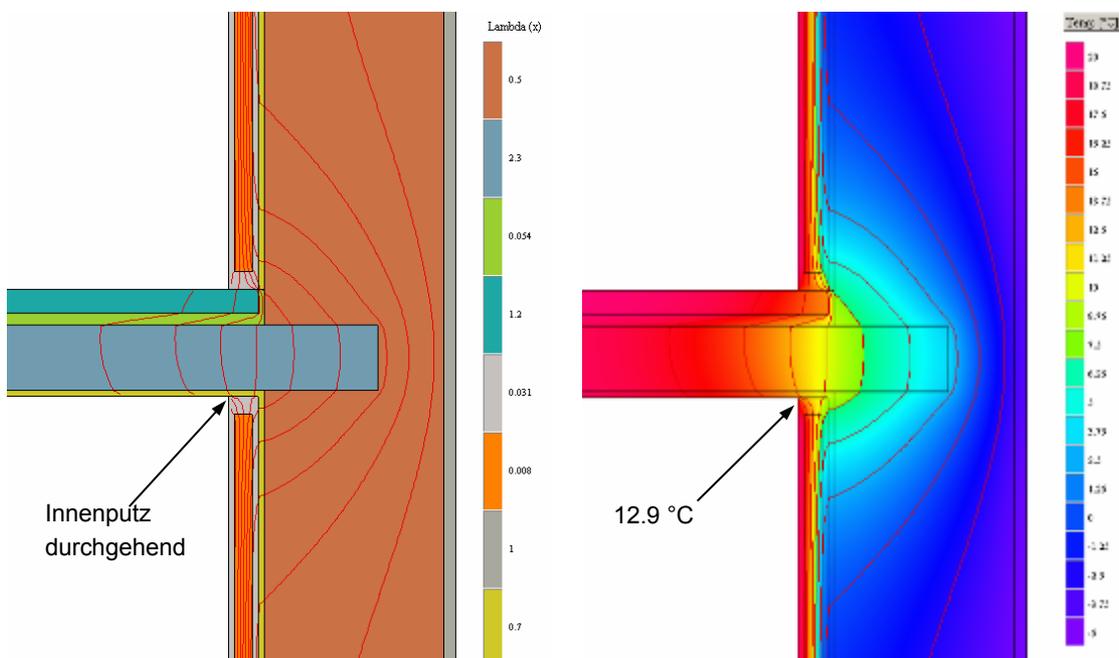


Abbildung 37: Vertikalschnitt der Innendämmung mit VIP im Bereich des Deckenanschlusses. Die minimale Oberflächentemperatur liegt mit 12.9 °C im kritischen Bereich. VIP 30 mm, EPS 2 x 10 mm. $\Psi = 0.49 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Bild: FHNW

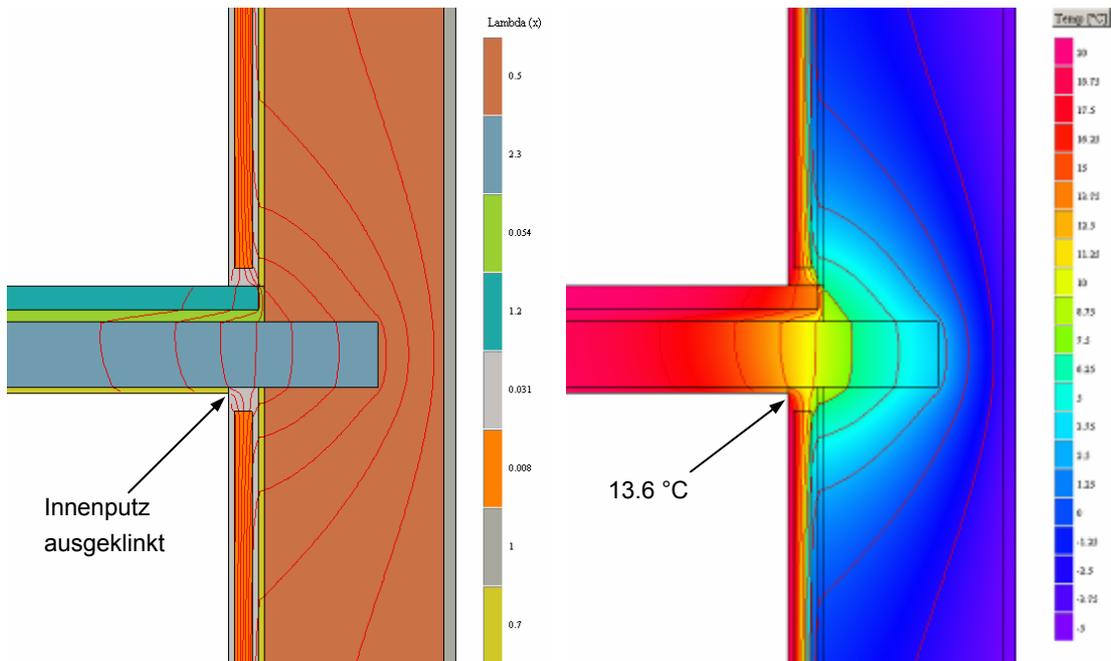


Abbildung 38: Vertikalschnitt der Innendämmung mit VIP im Bereich des Deckenanschlusses. Das „Ausklinken“ des Innenputzes führt bereits zur einer Verbesserung der Situation. Die minimale Oberflächentemperatur ist mit 13,6 °C akzeptabel. VIP 30 mm, EPS 2 x 10 mm. $\Psi = 0,48 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Bild: FHNW

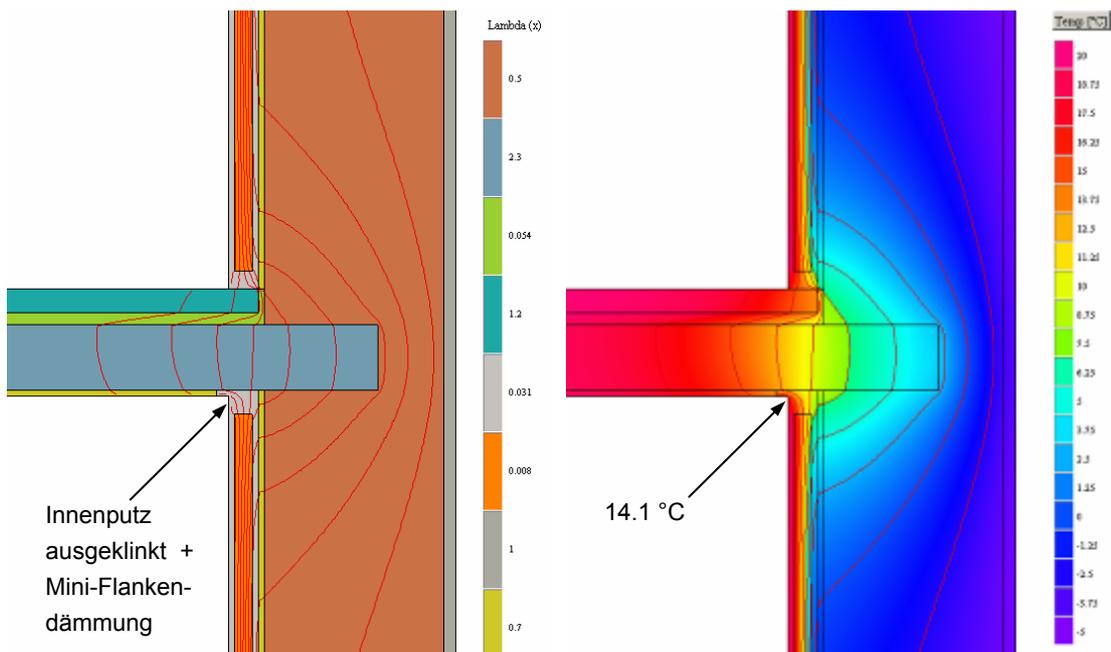


Abbildung 39: Vertikalschnitt der Innendämmung mit VIP im Bereich des Deckenanschlusses. Der Innenputz wird um weitere 20 mm ausgeklinkt. Dadurch ist eine minimale Flankendämmung möglich, die auch noch hinter der Wandverkleidung verschwindet. Die minimale Oberflächentemperatur steigt auf 14,1 °C an. Eine noch breitere Flankendämmung würde die Situation weiter verbessern. VIP 30 mm, EPS 2 x 10 mm. $\Psi = 0,47 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Bild: FHNW

Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen Optimierungsansätze der untersuchten Konstruktion. Wird der Innenputz im Bereich des Deckenanschlusses in der Breite der Wärmedämmschicht entfernt und die Wärmedämmung bis zur Betondecke hochgezogen, führt dies mit minimalen Oberflächentemperaturen von 13,6 °C bereits zu einer Entschärfung der Situation (Abbildung 38).

Eine zusätzliche Mini-Flankendämmung von 20 mm Breite und 10 mm Dicke kann noch hinter der Deckenschiene der Wandverkleidung verschwinden, und hebt die minimale Oberflächentemperatur bei der untersuchten Konstruktion mit 14.1 °C in den unkritischen Bereich an. Zudem wird so die Deckenschiene thermisch von der Deckenkonstruktion entkoppelt.

Beim Anschluss der Innenwände wird die Dämmebene unterbrochen. Hier beträgt die minimale Oberflächentemperatur der untersuchten Konstruktion ohne Entfernen des Innenputzes und ohne Flankendämmung 13.9 °C (Abbildung 40). Somit kann hier auf diese Massnahmen verzichtet werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen beziehen sich auf die hier untersuchte Situation und sind nicht auf abweichende Rahmenbedingungen übertragbar. Es ist unbedingt notwendig jede Situation individuell zu prüfen.

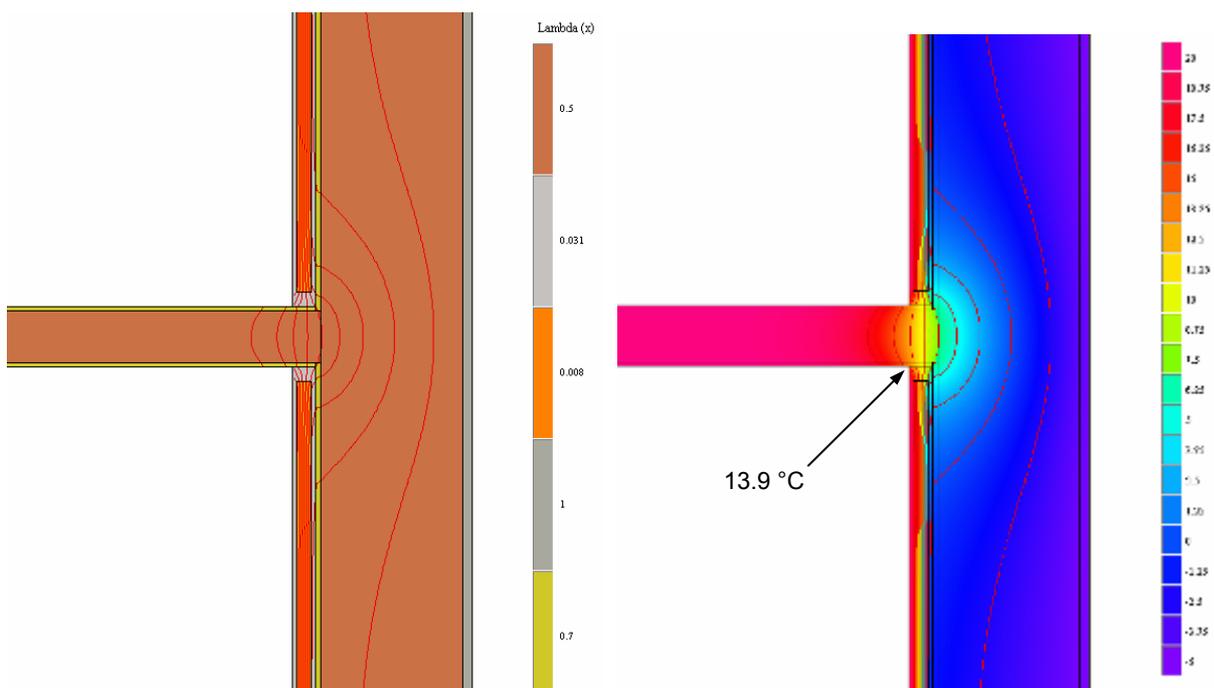


Abbildung 40: Horizontalschnitt der Innendämmung mit VIP im Bereich des Innenwandanschlusses. Die Oberflächentemperatur beträgt 13.9 °C. VIP 30 mm, EPS 2 x 10 mm. $\Psi = 0.23 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Bild: FHNW

4.5.2 Innendämmung mit VIP - Wärmebrücken und effektiver U-Wert

Der U-Wert der ungedämmten Konstruktion liegt bei $1.25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Mit einer Innendämmung von 30 mm VIP ($\lambda_{\text{eff}} = 0.008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) und 2 x 10 mm EPS ($\lambda_{\text{eff}} = 0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) liegt der U-Wert im ungestörten Bereich der Konstruktion bei $0.189 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Die Gesamtstärke der Konstruktion (inklusive Wandverkleidung) beträgt 80 mm. Der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient des Deckenanschlusses beträgt für die untersuchte Konstruktion nach Abbildung 39 $\Psi_{\text{Decke}} = 0.47 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Der Wärmeverlust des Deckenanschlusses auf einem Meter Länge entspricht dem Wärmeverlust von 2.5 m^2 ungestörter Wandkonstruktion. Der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient des Innenwandanschlusses beträgt für die untersuchte Konstruktion nach Abbildung 40 $\Psi_{\text{Wand}} = 0.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Der effektive U-Wert der Konstruktion liegt für eine typische Aussenwandgeometrie unter Berücksichtigung der linearen Wärmebrücken bei $0.40 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Falls sämtliche VIP belüftet werden sollten ergibt sich ein U-Wert der ungestörten Konstruktion von $0.34 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ und inklusive der Wärmebrückenverluste von $0.53 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 41 dargestellt.

Eine Erhöhung der VIP-Dicke von 30 mm auf 50 mm ($\lambda_{\text{eff}} = 0.007 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), verbessert den U-Wert im ungestörten Bereich von $0.189 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ auf $0.115 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Allerdings fallen die Wärmebrückenverluste anteilig immer stärker ins Gewicht. Der effektive U-Wert verbessert sich lediglich von $0.40 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ auf $0.34 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Insofern ist der Nutzen weiter erhöhter VIP-Dicken angesichts des grossen Einflusses der Wärmebrücken sehr begrenzt und steht derzeit in keinem Verhältnis zu den notwendigen Mehrinvestitionen.

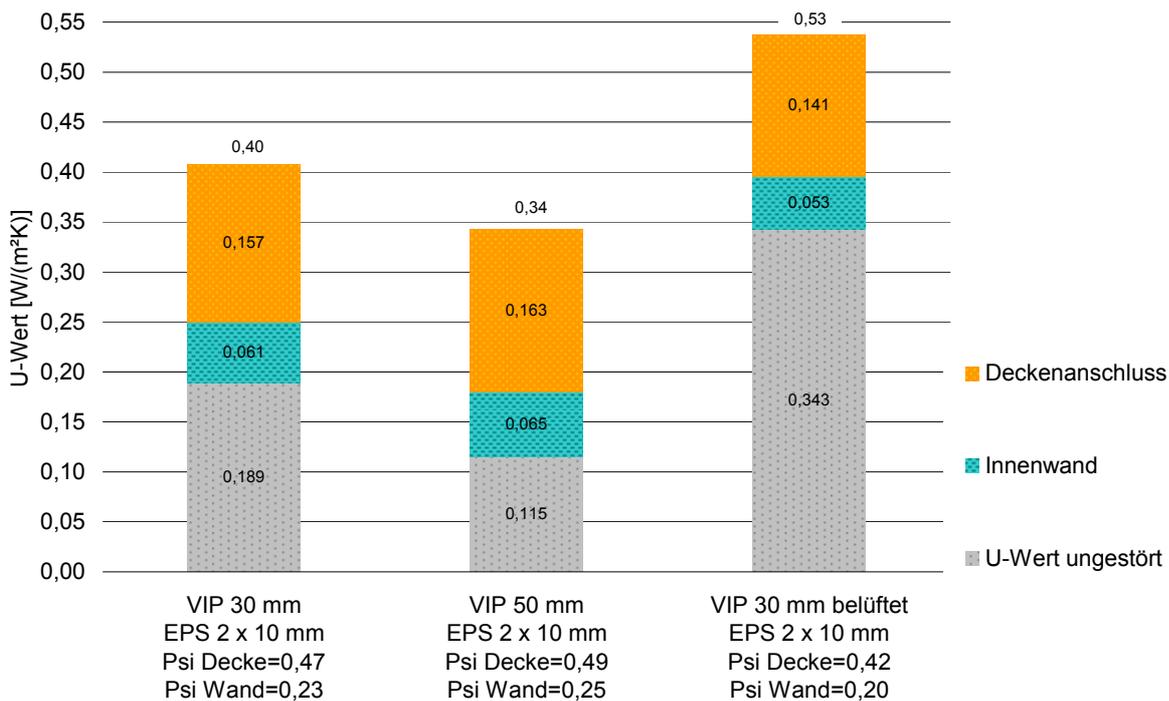


Abbildung 41: U-Werte der VIP-Innendämmung inklusive der Wärmebrückenverluste an Decken- und Innenwandanschluss für VIP 30 mm ($\lambda_{\text{eff}} = 0.008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) und VIP 50 mm ($\lambda_{\text{eff}} = 0.007 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) und belüftete VIP ($\lambda_{\text{eff}} = 0.020 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$).

Grafik: FHNW

Auch wenn sich durch die Wärmebrücken ein grosser Zuschlag auf den ungestörten U-Wert ergibt, führt die Innendämmung dennoch zu einer erheblichen Verbesserung des Wärmeschutzes der bestehenden Wandkonstruktion.

4.5.3 Vergleich mit herkömmlich wärmedämmten Konstruktionen

Im Vergleich zu einer Innendämmung mit guter, herkömmlicher Wärmedämmung (EPS, $\lambda=0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) wäre bei gleicher Dämmdicke (50 mm) der U-Wert im ungestörten Bereich mit $0.41 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ um den Faktor 2 schlechter als bei der VIP-gedämmten Konstruktion mit $0.19 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. Die linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten sind bei herkömmlicher Wärmedämmung mit $0.36 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ am Deckenanschluss und $0.15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für den Innenwandanschluss wesentlich geringer.

Der effektive U-Wert der herkömmlich wärmedämmten Konstruktion ist mit $0.57 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ im Vergleich zur VIP-Konstruktion mit $0.40 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ um den Faktor 1.4 schlechter.

Soll mit guter, herkömmlicher Wärmedämmung (EPS, Wärmeleitfähigkeit $0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) der gleiche ungestörte U-Wert von $0.19 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ erreicht werden, ist eine Dämmdicke von 135 mm notwendig, was einem Faktor 2.7 für die Dämmschichten und einem Faktor 2.1 für die gesamte Konstruktion entspricht. Werden die linearen Wärmebrückenverlustkoeffizienten berücksichtigt und der effektive U-Wert der VIP-Konstruktion von $0.40 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ angesetzt, sind 100 mm herkömmliche Wärmedämmung notwendig, was einem Faktor 2 für die Dämmschichten und einem Faktor 1.6 für die gesamte Konstruktion entspricht.

Bei gleicher Dämmdicke reduzieren sich bei der untersuchten VIP-Innendämmung gegenüber einer Konstruktion mit guter herkömmlicher Wärmedämmung (Wärmeleitfähigkeit $0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) die Transmissionswärmeverluste der Aussenwand um 30%.

Bei gleicher Dämmwirkung benötigt die VIP-Fassade 40-45% weniger Platz. Pro Laufmeter Fassade wird ein Streifen von 50-60 mm Breite eingespart. Die Mehrinvestition für die VIP-Innendämmung kann bei Bürogebäuden in teuren Innenstadtlagen bereits heute wirtschaftlich sein.

4.5.4 Optimierungsansätze

Im Folgenden sind einige Optimierungsansätze zur weiteren Verbesserung des Systems beschrieben.

- VIP-Anteil an der Gesamtstärke des Systems erhöhen

Der Vorteil der VIP gegenüber herkömmlichen Wärmedämmstoffen kommt umso mehr zum tragen, je grösser der VIP-Anteil an der Gesamtkonstruktion ist. Daher sollte die Dicke der VIP-Kaschierung auf ein Minimum reduziert werden, ohne den mechanischen Schutz für den Transport und die Montage zu verschlechtern. Ebenso sollte die raumseitige Wandverkleidung minimale Stärke aufweisen, und gleichzeitig einen sicheren Schutz vor Beschädigung der VIP während der Nutzungsphase des Gebäudes bieten. Eine Platzersparnis wäre durch den Verzicht auf Vertikalprofile bei genügend steifen Wandverkleidungsmaterialien möglich.

- VIP-Kaschierung und Randanschlüsse mit geringerer Wärmeleitfähigkeit verwenden

Weitere Verbesserungen sind zu erreichen, wenn für die VIP-Kaschierung und die Randanschlüsse Materialien geringerer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Hier kämen z.B. PUR-Hartschaum ($\lambda=0.024-0.028 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), Phenolharzschaum ($\lambda=0.021-0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) oder Aerogelvliese ($\lambda=0.015-0.018 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) in Frage. Zudem wird dadurch der lineare Wärmebrückenverlustkoeffizient der VIP-Ränder und Stösse reduziert.

- Wärmebrücken der Decken- und Innenwandanschlüsse reduzieren

Durch verschiedene Massnahmen könnten die Wärmebrücken an den Anschlüssen reduziert werden. Dies kann in der Praxis allerdings mit einem unverhältnismässig hohen Aufwand verbunden sein.

Eine nachträgliche thermische Entkopplung der Innenwände oder Geschosdecken ist meist unmöglich. Dennoch sollte die Auswirkung einfacherer Massnahmen untersucht werden. Beispielsweise führt das Entfernen des Putzes oder des Bodenaufbaus zu einer leichten Verminderung der Wärmebrücken. Gleichzeitig werden die minimalen Oberflächentemperaturen erhöht.

4.5.5 Wirtschaftlichkeit

Durch den schlankeren Aufbau der Innendämmung kann mehr nutzbare Fläche geschaffen werden. Bei der untersuchten Konstruktion mit 3 cm VIP beträgt die Platzersparnis gegenüber einer vergleichbaren Konstruktion (ebenfalls mit Wandverkleidung) mit guter, herkömmlicher Wärmedämmung (EPS, $\lambda = 0.031 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) je nach Anteil der linearen Wärmebrücken der Anschlüsse etwa 6 - 8 cm. Die Mehrkosten betragen pro Quadratmeter mit 3 cm VIP inklusive Kaschierung und Mehraufwand bei der Verarbeitung ca. 240 - 300 CHF. Nicht berücksichtigt ist hier der Aufwand für Fensteranschlüsse, da diese auch bei EPS gedämmten Fassaden notwendig sind. Ausgehend von einem Fensteranteil der Fassade von 30% und einer Geschosshöhe von 3.0 m, ergibt sich pro Laufmeter Fassade eine opake Nettowandfläche von 1.8 m². Dies führt zu Mehrkosten je Laufmeter Fassade von ca. 430 - 540 CHF für das VIP-System. Aus dem Nutzflächengewinn von 0.06-0.08 m² pro Laufmeter Fassade und den Mehrkosten von ca. 430 - 550 CHF lässt sich der Grenzwert für den Verkaufspreis pro Quadratmeter Nutzfläche errechnen, ab welchem der Einsatz der VIP-Konstruktion als wirtschaftlich zu betrachten ist. Bei den Berechnungen wurde der Einfluss der linearen Wärmebrücken der Anschlüsse berücksichtigt. Der Grenzwert für den Verkaufspreis pro Quadratmeter Nutzfläche liegt für die vorangegangenen Annahmen bei 0.06 m² Nutzflächengewinn pro Laufmeter Fassade ca. 7000 - 9000 CHF/m²Nutzfläche und bei 0.08 m² bei 5500 - 7000 CHF/m²Nutzfläche. Diese Preise können in teuren Lagen durchaus erzielt werden. Insofern kann der Einsatz des Systems aus wirtschaftlichen Gründen sinnvoll sein. Der Einfluss der linearen Wärmebrücken ist eng mit der tatsächlichen Platzersparnis verknüpft. Daher muss dieser auch bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt werden.

4.5.6 Innendämmung mit VIP – Fazit

Grundsätzlich sind bei Innendämmsystemen mit VIP, wie auch bei herkömmlicher Innendämmung, stets detaillierte bauphysikalische Abklärungen notwendig, um eine schadensfreie Konstruktion zu gewährleisten. Der Einfluss der Wärmebrücken an den Decken- und Wandanschlüssen gewinnt beim Einsatz von VIP noch mehr an Bedeutung. Dies wirkt sich durch einen höheren Anteil der Wärmebrücken an den Transmissionswärmeverlusten aus. Die minimalen Oberflächentemperaturen an den Anschlussstellen müssen sorgfältig geprüft, und bei Bedarf durch entsprechende Massnahmen angehoben werden. Im Vergleich zum Einsatz herkömmlicher Wärmedämmung beansprucht das entwickelte System 40-45% weniger Nutzfläche.

Wie bei allen VIP-Anwendungen müssen die Paneele bei Transport und Verarbeitung auf der Baustelle sicher vor Beschädigung geschützt werden. Dies kann durch Kaschieren oder Einschäumen gewährleistet werden. Zusätzlich ist bei innen gedämmten Konstruktionen wirksamer Schutz der VIP von Beschädigung (Bildernägel etc.) während der Nutzungsphase zwingend notwendig. Dies wird hier durch eine funktionale Trennung der Dämmschicht und einer schützenden Verkleidung erreicht. Für die Wandverkleidung stehen verschiedenste Materialien zu Verfügung (Faserzement, Holz, Glas etc.). Zudem können weitere Funktionen in das Wandsystem integriert werden (Raumklima, Licht, etc.).

Der Praxiseinsatz des Systems steht noch bevor. Der Focus der Anwendung liegt auf Sichtfassaden von Gebäuden in teuren Lagen, welche nutzungsbedingt einen hochwertigen Innenausbau aufweisen. Hier kommt die gestalterische und funktionale Flexibilität des Systems zum tragen. An teuren Standorten eingesetzt, können die Mehrkosten der VIP durch den Gewinn an nutzbarer Fläche ausgeglichen werden.

5 Erkenntnisse und Ausblick

Aus den Arbeiten im Rahmen des Projektes konnten wichtige Erkenntnisse für zukünftige Anwendungen gewonnen werden. Der Ansatz, im interdisziplinär zusammengesetzten Projektteam sowohl die Paneele selbst, veredelte VIP und komplette Bausysteme zu betrachten, hat sich bewährt. Insbesondere die praktische Umsetzung des entwickelten Systems für eine hinterlüftete Fassade ergab wertvolle Hinweise. Die folgenden Aspekte sind für die hinterlüftete Fassade und die Innendämmung gleichermaßen gültig.

- Die Platzersparnis bei den entwickelten Systemen mit VIP beträgt im Vergleich zu guter konventioneller Wärmedämmung für die konkreten Beispiele unter Berücksichtigung sämtlicher Wärmebrücken 40-45%. Diesbezüglich bestehen noch weitere Optimierungsmöglichkeiten, die in zukünftigen Anwendungen umgesetzt werden sollen.
- Aus wirtschaftlicher Hinsicht können die Mehrkosten der Systeme bei den derzeitigen VIP-Preisen bisher nur in teuren Lagen durch den erzielten Nutzflächengewinn kompensiert werden. Die Systeme können aber auch in Situationen, welche sehr schlanke Aufbauten erfordern, als Problemlöser zur Anwendung kommen.
- Der Einsatz von VIP erfordert hinsichtlich Konzeption und Detailplanung, Arbeitsvorbereitung und Ausführung ein hohes Know-how aller Beteiligten und muss möglichst früh in der Planung berücksichtigt werden. Sämtliche Anschlussdetails und Durchdringungen der Dämmebene müssen auf die VIP-Anwendung abgestimmt werden.
- Wärmebrücken sind bei hoch wärmegeprägten Konstruktionen von grösserer Bedeutung. Dieser Effekt wird durch die dünnen, sehr leistungsfähigen Wärmedämmschichten bei VIP noch zusätzlich verstärkt. Daher muss auf die Optimierung der Wärmebrücken besonders geachtet werden. Bei einer Innendämmung mit VIP sind die Oberflächentemperaturen an den Anschlüssen der Innenwände und Geschossdecken geringer, als bei konventionell wärmegeprägten Konstruktionen. Dies ist bei jeder Situation sorgfältig zu prüfen, um Feuchteschäden zu vermeiden.
- Ein detailliertes Aufmass der Situation vor Ort bildet die Grundlage für die Erstellung des Verlegeplans und der Bestelllisten. Bei Bestandsgebäuden mit kleinteiligen Fassaden mit Vor- und Rücksprünge muss der Einsatz des Systems sorgfältig abgewogen werden. Einfache Fassadengeometrien mit wenigen Öffnungen und Anschlüssen sind hier klar im Vorteil.
- Die Verpackung und Anlieferung der Paneele sollte auf den Montageablauf abgestimmt werden, um aufwendiges Sortieren der VIP unterschiedlicher Formate auf der Baustelle zu vermeiden.
- Ein sicherer Schutz vor mechanischer Beschädigung der Paneele beim Transport, Verarbeitung und während der Nutzung ist unabdingbar. Dies hat sich auch in der Pilotanwendung gezeigt. Die ungeschützte Verarbeitung auf der Baustelle sollte auf jeden Fall vermieden werden. An den im Projekt untersuchten Ansätzen der Kaschierung und Einschäumung muss zukünftig weiter gearbeitet werden.
- Bei einer Markteinführung der Systeme stehen für die Industriepartner die Fragen der Zuverlässigkeit und Sicherheit im Focus. Deshalb muss zuvor die Entwicklung eines zugleich sicheren, dünnen und preiswerten mechanischen Schutzes fortgeführt werden. Um ein hohes Vertrauen in die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Systeme zu schaffen, muss zudem, in Ergänzung zu den bestehenden Qualitätskontrollen, ein lückenloses Verfahren der Qualitätssicherung – von der Produktion bis zur Montage – geschaffen werden.

Die Weiterentwicklung der vergleichsweise jungen VIP-Technologie für Bauanwendungen weist eine grosse Dynamik auf, die sich in den kommenden Jahren weiter fortsetzen wird. Der Einsatz neuer Hüllmaterialien höherer Gasdichtheit, alternativer Stützkörper, optimierte Produktionsverfahren und grössere Stückzahlen werden zu veränderten Produkteigenschaften und einer spürbaren Kostensenkung führen. Für eine sichere und erfolgreiche Anwendung am Bau müssen allerdings noch weitere baulogische Produkte, Bauelemente und Systeme entwickelt werden.

6 Literaturangaben

- Binz, A., Simmler, H. u.a. (2005): "Vacuum Insulation in the Building Sector - Systems and Applications", IEA/ECBCS Annex 39 SubtaskB report, IEA (Hrsg.), Download unter www.vip-bau.ch
- Feist, W., Pfluger, R. u.a. (2005): „ Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauen: Passivhauskomponenten und Innendämmung“, Passivhaus Institut, Darmstadt
- Frank, T., Zimmermann, M. u.a. (1998): „Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden“, Richtlinie, EMPA, Dübendorf
- SIA Merkblatt 2001 (2007):“ Wärmedämmstoffe. Deklarierte Werte der Wärmeleitfähigkeit und weitere Angaben für bauphysikalische Berechnungen“, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- SIA 380/1 (2007):“ Thermische Energie im Hochbau“, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- Simmler, H., Heinemann, U. u.a. (2005): "Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications", IEA/ECBCS Annex 39 Subtask A report, IEA (Hrsg.), Download unter www.vip-bau.ch