



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

# ENTWICKLUNG EINES PASSIVHAUSFASSADENELEMENTS MIT VAKUUM-DÄMMUNG

## Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Martin Jordi, Renggli AG**

Gläng, 6247 Schötz, [martin.jordi@renggli-haus.ch](mailto:martin.jordi@renggli-haus.ch), [www.renggli-haus.ch](http://www.renggli-haus.ch)

**Markus Erb, Dr. Eicher+Pauli AG**

Kasernenstrasse 21, 4410 Liestal, [markus.erb@eicher-pauli.ch](mailto:markus.erb@eicher-pauli.ch), [www.eicher-pauli.ch](http://www.eicher-pauli.ch)

**Marco Ragonesi, Ragonesi Strobel & Partner**

Schützenstrasse 8, 6003 Luzern, [m.ragonesi@rsp-bauphysik.ch](mailto:m.ragonesi@rsp-bauphysik.ch), <http://rsp-bauphysik.ch>

## **Impressum**

Datum: 19. September 2007

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogrammleiter Rationelle Energienutzung in Gebäuden

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Projektleiter: Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

Projektnummer: 101338

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Zusammenfassung und Fazit

Die Renggli AG baut Niedrigenergiehäuser nach Minergie und Minergie-P Standard in Leichtbauweise. Als Variante zur mineralwolle gedämmten Holzständerkonstruktion wurde in diesem Projekt eine Konstruktion mit Vakuum-Dämmung (VIP) entwickelt.

In einem Pflichtenheft wurden die Anforderungen an die angestrebte Konstruktion definiert. Diese umfassen technische und ökonomische Faktoren. Bezuglich Kosten sollte eine Lösung gefunden werden, welche unter Berücksichtigung des Raumgewinns in absehbarer Zeit konkurrenzfähig mit der konventionellen Konstruktion wird. Technisch stand der U-Wert der Konstruktion im Mittelpunkt. Damit Minergie-P erreicht werden kann, musste ein U-Wert der opaken Fassade von  $0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht werden. Dieser Wert wurde für das Renggli Konzepthaus *Futura* ermittelt.

Aus verschiedenen Gründen wurde von der ursprünglichen Idee, der Verwendung einer Holzwerkstoffplatte als tragendes Element, abgesehen. Die entwickelte Konstruktion basiert also auf der von Renggli normalerweise eingesetzten Holzständerbauweise. Die Dämmung besteht aus der in Steinwolle ausgeführten Ausfachung des Ständers (120 mm) und einer aussen aufgebrachten Vakuum-Dämmung. Zum Einsatz kam das Qasa-Paneel der Fa. Variotec. Dieses besteht im vorliegenden Fall aus einem 40 mm starken VIP-Kern, welcher durch Aluminium beplankte PUR-Paneele geschützt wird. Stirnseitig sind diese Elemente mittels Kompriband und dampfdichtem Klebeband abgeschlossen.

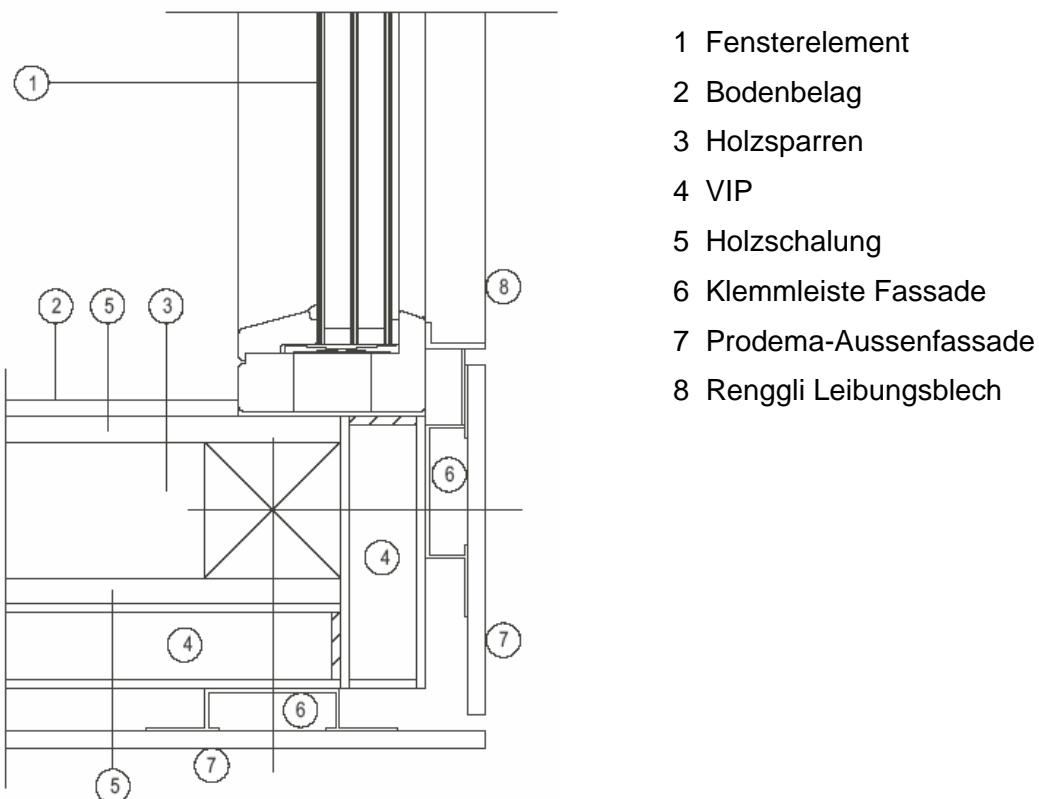


Abbildung 1: Eckdetail der VIP-gedämmten Konstruktion mit Fensteranschluss.

Die Konstruktion erreicht ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken einen U-Wert von 0.10 W/(m<sup>2</sup>K). In der realen Ausführung zeigte sich, dass die verbleibenden 10% zum Zielwert von 11 W/(m<sup>2</sup>K) nicht ausreichen, um alle Wärmebrückeneffekte abzudecken. Zur Kompensation der linearen (Stösse) und punktuellen (Schraubdurchdringungen) Wärmebrücken muss die VIP-Stärke von 40 auf 50 - 60 mm erhöht werden.

Als Demonstrations- und Messobjekt baute Renggli ein Pavillon mit einer Grundfläche von 5.5 x 3.3 m<sup>2</sup>. Der Pavillon ist als Kleinstwohnung mit Minergie-P Standard konzipiert.



Abbildung 2: Der als Kleinstwohnung (BGF 18 m<sup>2</sup>) mit Minergie-P Standard konzipierte Pavillon mit Vakuum-Dämmung aller opaker Bauteile.

Neben den Aussenwänden wurden hier auch Boden und Decke mit den Qasa-Elementen gedämmt.

Im Sinne einer Erfolgskontrolle wurden und werden am Pavillon umfangreiche Messungen gemacht. Neben der Dichtigkeit der Hülle (Blowerdoor/Thermographie und Tracergas) wurde auch der Wärmeleistungsbedarf messtechnisch bestimmt. Weiterhin werden an verschiedenen Orten in der Konstruktion Temperatur und Feuchte gemessen. Zur Bestimmung der Lebensdauer der Vakuum-Paneele werden periodisch Messungen des Innendrucks von VIP gemacht.

Als Fazit des Projekts kann gesagt werden, dass der Einsatz von Vakuum-Dämmung technisch durchaus möglich und praktikabel ist. Der Einsatz von geschützten VIP reduziert das Risiko einer Verletzung der VIP-Hülle durch unsachgemäße Handhabung sehr stark und ist auf jeden Fall empfehlenswert.

Wegen der heute hohen VIP-Preise ist ein ökonomisch sinnvoller Einsatz von Vakuum-Dämmung aber nur bei einem sehr hohen Wert des zusätzlich nutzbaren Raumes gewährleistet. Nicht quantifizierbar ist der ästhetische Gewinn der schlankeren Fassade, welcher insbesondere bei Fenster- und Türleibungen auffällt.

# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT</b>                     | <b>I</b>   |
| <b>INHALTSVERZEICHNIS</b>                            | <b>III</b> |
| <b>1. EINLEITUNG</b>                                 | <b>1</b>   |
| <b>2. ZIELE</b>                                      | <b>2</b>   |
| <b>3. ERGEBNISSE</b>                                 | <b>3</b>   |
| <b>3.1 Pflichtenheft</b>                             | <b>3</b>   |
| 3.1.1 Ökonomische Rahmenbedingungen                  | 3          |
| 3.1.2 Technische Eigenschaften und Rahmenbedingungen | 4          |
| <b>3.2 Lösungsvarianten und Evaluation</b>           | <b>5</b>   |
| 3.2.1 Kreuzlattung                                   | 5          |
| 3.2.2 Eingehaustes VIP                               | 6          |
| <b>3.3 Gewählte Konstruktion</b>                     | <b>7</b>   |
| 3.3.1 Aufbau   | 7          |
| 3.3.2 Wärmebrücken                                   | 9          |
| <b>3.4 Demonstration</b>                             | <b>11</b>  |
| 3.4.1 Konstruktion                                   | 11         |
| 3.4.2 Erfolgskontrolle                               | 15         |
| <b>3.5 Konstruktion Futura</b>                       | <b>22</b>  |
| <b>4. ERKENNTNISSE</b>                               | <b>23</b>  |
| <b>4.1 Kosten / Nutzen</b>                           | <b>23</b>  |
| <b>4.2 Weitere Anforderungen</b>                     | <b>23</b>  |
| 4.2.1 Vorfertigung                                   | 23         |
| 4.2.2 Ökologie / LCA                                 | 24         |
| 4.2.3 Feuchteschutz                                  | 24         |
| 4.2.4 Schallschutz                                   | 24         |
| 4.2.5 Minimale Lebensdauer                           | 25         |
| 4.2.6 Brandschutz                                    | 25         |
| <b>5. LITERATUR</b>                                  | <b>26</b>  |
| <b>6. ANHANG</b>                                     | <b>27</b>  |

# 1. Einleitung

Vakuumdämmung (VIP) weist im Vergleich zu herkömmlichen Isolationsmaterialien eine sehr tiefe Wärmeleitfähigkeit auf [1]. Dieser Vorteil steht einem relativ hohen Preis und der Verletzlichkeit der Hüllfolie gegenüber. Heute werden VIP vorwiegend als kaum oder gar nicht geschützte Paneele auf der Baustelle eingesetzt und zwar primär für die Terrassendämmung. Diese Art des VIP-Einsatzes birgt doch gewisse Risiken bezüglich Belüftung der Paneele [2]. Mit diesem Projekt soll einerseits das Handling der Paneele in eine geschützte Umgebung mit definierten und kontrollierten Abläufen (Produktionshalle) verlagert werden, womit das Verletzungsrisiko der Hüllfolie stark reduziert werden kann. Weiter soll mit der angestrebten, sehr schlanken Konstruktion ein ästhetisch ansprechender Typ von Passivhausfassade (inkl. Aussentüre) entwickelt werden, der ein breiteres Kundensegment anzusprechen vermag. Die schlanke Konstruktion soll die Mehrkosten der Dämmung durch Raumgewinn (1 Zimmer pro Haus bei gleichen Außenmassen) und einfachere Konstruktion weitgehend aufwiegen. Die entwickelten Konstruktionen werden mittels Feldmessungen geprüft.

## 2. Ziele

Ziel des Projektes ist, eine VIP-gedämmte Passivhausfassade für das Renggli Konzepthaus Futura zu entwickeln. Dabei sind insbesondere Lösungen für die beim VIP-Einsatz besonders kritischen Wärmebrücken bei Anschlüssen und Durchdringungen zu lösen.

Die Mehrkosten der Vakuum-Dämmung sollen durch den Raumgewinn (ein zusätzliches Zimmer) weitgehend kompensiert werden. Neben der reinen Raumersparnis sollten mit der VIP-Dämmung auch architektonische und konstruktive Vorteile realisiert werden.



Abbildung 3: Renggli Konzepthaus Futura in der Flachdach-Variante.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Pflichtenheft

Das Projektteam hat in einem ersten Schritt ein Pflichtenheft zu den ökonomischen und technischen Aspekten der zu entwickelnden Konstruktion erstellt.

##### 3.1.1 Ökonomische Rahmenbedingungen

###### Analyse des Umfelds

- Bisher realisierte Objekte
- Marktanalyse

###### Eruieren eines Vergleichsobjekts und der entsprechenden Bauteile

Renggli Konzepthaus Futura

###### Ermitteln der Bauteilkosten

Bei bereits bestehenden Passivhäusern in Holzrahmenbauweise (Wandstärke ca. 470 mm) kann von einem Preis von ca. 450 bis 500 Fr./m<sup>2</sup> Wand ausgegangen werden (je nach Ausbaustandard). Ziel muss es sein, mit dem VIP-Passivhausfassadenelement eine ähnliche Größenordnung zu erreichen.

###### Ermitteln des Wertes des gewonnenen Raumes

Bei gleichbleibenden Außenmassen wird von einem Raumgewinn von ca. 18 m<sup>2</sup> ausgegangen. Der Mehrwert dieses Raumes ist nur objektspezifisch quantifizierbar (Ausbaustandard, Landpreis, Nutzung des zusätzlichen Raums).

###### Ermitteln von neu entstehenden Nutzen und Kosten

###### Nutzen

- Reduktion der Leibungstiefen durch die schlankere Konstruktion. Dadurch geringerer Materialaufwand bei den Fenster- und Türzargen
- Kostenreduktion bei Fenstern und Türen durch einen allfälligen Entfall der Rahmen
- Bessere Ästhetik durch schlankere Konstruktionen

###### Kosten

- Mehraufwand Material bei den Geschossdecken und dem Dach (größere Spannweiten)
- Mehraufwand für den Innenausbau des gewonnenen Raumes

###### Zulässige Kosten für VIP-Bauteile ermitteln

- Szenario 1  
VIP-Kosten werden mit 60 bis 80 Fr./m<sup>2</sup> pro 10 mm Stärke eingesetzt. Dies entspricht den heutigen Materialkosten
- Szenario 2  
VIP-Kosten werden mit 30 bis 40 Fr./m<sup>2</sup> pro 10 mm Stärke eingesetzt. Dies entspricht einem mittelfristigen (5 bis 10 Jahre) Erwartungswert

- Kosten über den ganzen Gebäudelebenszyklus  
Entstehende Kosten durch einen allfälligen Austausch der Paneele
- Ökologienachweis  
Graue Energie im Vergleich zur Ständerkonstruktion und anderen Konstruktionssystemen

### 3.1.2 Technische Eigenschaften und Rahmenbedingungen

#### Vorfertigung

- Bestimmung des Vorfertigungsgrads
- Definition der Masshaltigkeit und des Verformungsverhaltens der Paneele
- Definition der zulässigen Bautoleranzen

#### Wärmeschutz

- Ziel des Wärmeschutzes über das ganze Gebäude: Minergie-P
- Wärmedurchgangskoeffizient: U-Wert max. 0.11 W/m<sup>2</sup>K

#### Feuchteschutz

- Kondensierende Wasserdampfmenge: 0 g/m<sup>2</sup>a

#### Schallschutz

- Bewertetes Bauschalldämmmass R'w: ca. 46 dB

#### Minimale Lebensdauer

- Austauschbare Bauteile: bis 25 Jahre (SIA-Norm 260)
- Gebäude und andere Bauwerke von normaler Bedeutung: 50 Jahre (SIA-Norm 260)

#### Ersetzbarkeit der Paneele

- Paneele müssen ersetzt werden können
- „Abdeckung“ muss ohne grosse Zerstörung des bestehenden Bauwerks demontiert werden können

#### Statische Anforderungen

- Einsetzbarkeit bis auf eine bewertete Meereshöhe von  $h_0 = 600$  m über Meer (Bezugshöhe gemäss SIA-Norm 261)
- Einsetzbar bei normalen Windlasten im Mittelland. Referenzwert des Staudrucks 0.9 kN/m<sup>2</sup> (SIA-Norm 261)
- Einsetzbar in der Erdbebenzone 1 und normal konsolidiertem Baugrund (SIA-Norm 261)

#### Brandschutz

Anforderungen gemäss den schweizerischen Brandschutzvorschriften

#### Mechanische Belastungen

Es dürfen keine Schwerkräfte über das Vakuum Paneel abgeführt werden

## 3.2 Lösungsvarianten und Evaluation

Im Rahmen dieses Projektes wollte die Fa. Renggli nicht nur den Einsatz von Vakuum-Dämmung erproben, sondern auch den Ersatz der üblichen Rahmenkonstruktion durch eine Holzwerkstoffplatte als statisches Element ausloten.

In einem ersten Schritt wurde die benötigte Gesamtstärke der Vakuum-Paneele diskutiert. Ein mittlerer U-Wert von  $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$  galt dabei als Zielgröße. Dieser Wert ergibt sich aus dem Minergie-P Nachweis für den untersuchten Haustyp. Er ist als Mittelwert der opaken Fassade zu verstehen, also exklusiv Öffnungen und die durch diese bedingte Wärmebrücken (Anschlüsse).

Es wurde davon ausgegangen, dass die gesamte Dämmleistung durch die Vakuum-Paneele übernommen wird. Zur Kompensation von Wärmebrückenverlusten wurde der angestrebte U-Wert im ungestörten Bereich der Fassade um 10% auf  $0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$  reduziert. Um nun auf die benötigte VIP-Stärke zu schliessen, musste eine Annahme bezüglich der Wärmeleitfähigkeit der Vakuum-Paneele getroffen werden. Im Rahmen des IEA/ECBCS Forschungsprogramms Annex 39 [1] wurde von der EMPA ein provisorischer Auslegungswert für VIP mit metallisierter Hüllfolie von  $0.008 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  angenommen. Dieser Wert geht von einem Startwert der Vakuum-Paneele von  $0.004 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  aus. Dazu kommen nun alterungsbedingte Zuschläge wegen Permeation von Wasserdampf und Luft in die Paneele. Deren Höhe liegt bei je  $0.002 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ , womit sich ein Endwert von  $0.008 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ergibt.

Nach intensiver Diskussion haben sich alle Beteiligten darauf geeinigt, im Projekt mit einem Wert von  $0.006 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  zu rechnen. Der wichtigste Grund für die Wahl des tieferen Wertes ist, dass die Entwicklung der Hüllfolien eine grosse Dynamik aufweist und damit zu rechnen ist, dass schon bald dichtere Hüllmaterialien zur Verfügung stehen werden, welche den tieferen Wert rechtfertigen. Um den angestrebten U-Wert von  $0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$  zu erreichen, ist damit eine Gesamtstärke an Vakuum-Paneele von mindestens 6 cm notwendig.

### 3.2.1 Kreuzlattung

Zurzeit sind keine Vakuum-Paneele mit einer Stärke von 60 mm auf dem Markt verfügbar. Aus diesem Grund wurde von einer zweilagigen VIP-Dämmsschicht ausgegangen. Ein erster Ansatz war eine Kreuzlattenkonstruktion mit zweimal 30 mm VIP.

In Tabelle 1 und 2 ist eine mögliche Konstruktion mit deren energetischen Eigenschaften dargestellt. Der U-Wert der untersuchten Konstruktion liegt um ca. 5% tiefer als die Vorgabe. Bei dieser Berechnung wurden keine Wärmebrücken berücksichtigt, d.h. der U-Wert wurde aus den Flächenanteilen der homogenen Situationen (Tabelle 2) ermittelt. Aus [4] ist aber erkennbar (Zweischichtige, kreuzweise Holzlattung, Lattenabstand 60 cm), dass der reale Effekt wohl deutlich höher liegt. Zur exakten Bestimmung des Effektes wäre eine Wärmebrückeneberechnung (dreidimensional) notwendig gewesen.

Tabelle 1: Schichtaufbau von innen nach aussen. Die XPS-Schicht dient dem Schutz der VIP und würde in zwei Lagen à je 5 mm hinter und vor den VIP aufgebracht.

| Schicht      | Material            | Lambda<br>[W/(mK)] | Dicke<br>[m] | Achsabstand<br>[m] | Breite<br>[m] | Anteil<br>[-] | R-Wert<br>[m <sup>2</sup> K/W] |
|--------------|---------------------|--------------------|--------------|--------------------|---------------|---------------|--------------------------------|
| 1            | Holzwerkstoffplatte | 0.170              | 0.120        |                    |               | 1.000         | 0.71                           |
| 2            | XPS                 | 0.035              | 0.005        |                    |               | 1.000         | 0.14                           |
| 3a           | Längslattung        | 0.170              | 0.030        | 0.60               | 0.05          | 0.076         | 0.18                           |
| 3b           | VIP                 | 0.006              | 0.030        |                    |               | 0.917         | 5.00                           |
| 4a           | Querlattung         | 0.170              | 0.030        | 0.60               | 0.05          | 0.076         | 0.18                           |
| 4b           | VIP                 | 0.006              | 0.030        |                    |               | 0.917         | 5.00                           |
| 3&4          | Lattenkreuzung      | 0.170              | 0.060        |                    |               | 0.007         | 0.35                           |
| 5            | XPS                 | 0.035              | 0.005        |                    |               | 1.000         | 0.14                           |
| <b>Total</b> |                     | <b>0.190</b>       |              |                    |               |               | <b>11.87</b>                   |

G:\2005\1061\Berechnungen\Wärmebrücken.xls\Tabelle1

Tabelle 2: Die resultierenden Flächen- resp. U-Wert-Anteile der Lattenkonstruktion. Der U-Wert wurde aus den Flächenanteilen der homogenen Situationen ermittelt.

| U-Werte              | absolut<br>[W/m <sup>2</sup> K] | Anteile<br>[-] | gewichtet<br>[W/m <sup>2</sup> K] |
|----------------------|---------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| VIP ungestört        | 0.090                           | 84.0%          | 0.075                             |
| Lattung innen        | 0.158                           | 7.6%           | 0.012                             |
| Lattung innen        | 0.158                           | 7.6%           | 0.012                             |
| Lattenkreuz          | 0.658                           | 0.7%           | 0.005                             |
| <b>U-Wert gesamt</b> |                                 |                | <b>0.104</b>                      |

### 3.2.2 Eingehaustes VIP

Die Firma Variotec bietet seit kurzem Vakuum-Paneele an. Unter anderem auch als beplankte Elemente mit einem VIP-Kern bis maximal 50 mm Stärke. Die beidseitige Beplankung besteht aus recyceltem PUR-massiv, welches mit einer Alu-Schicht von 0.5 mm überdeckt ist. Beplankung und Paneele werden in einem Hotmelt-Verfahren verklebt. Die Stirnseiten werden mit einem umlaufenden Kompriband versehen und mit einem dampfdichten Klebeband abgeschlossen (vgl. Abbildung 4). Diese Konstruktion hat zum Ziel, einerseits das Paneele so gut wie möglich zu schützen und möglichst dichte Stoßfugen zu erreichen. Diese Sandwichelemente werden unter dem Namen Qasa vertrieben.

Variotec hat bereits vor Start des hier beschriebenen Projektes ein Haus in Voggental (Deutschland) vollständig mit Qasa-Elementen gedämmt.

Die vielversprechende Sandwichkonstruktion und die bereits bestehenden Geschäftsbeziehungen zwischen den beiden Firmen haben Renggli dazu gebracht, sich für eine Konstruktion auf Basis der Qasa-Elemente zu entscheiden.

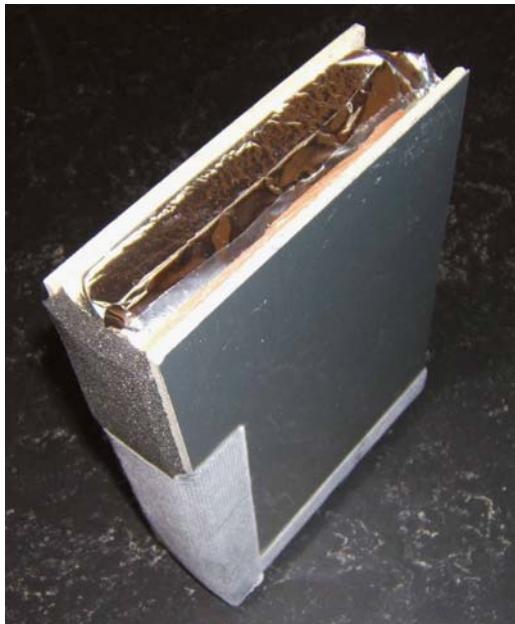


Abbildung 4: Qasa-Element (Fa. Variotec) mit VIP-Kern, Beplankung und umlaufendem Randverbund (Kompri- und Klebeband).

Da wie erwähnt die maximale VIP-Stärke der Qasa-Elemente bei 50 mm liegt, ergibt sich das Problem, dass der angestrebte U-Wert nur durch eine zusätzliche Dämmsschicht erreicht werden kann. Renggli hat deshalb die ursprüngliche Idee der Verwendung einer Holzwerkstoffplatte als tragendes Element verworfen und eine Lösung mit der üblichen Rahmenkonstruktion gesucht. Wobei die notwendige Zusatzdämmleistung primär durch Ausfachen der Rahmenkonstruktion mit konventioneller Dämmung (Steinwolle) erreicht wird.

### 3.3 Gewählte Konstruktion

Auf Basis dieser Entscheidungen wurde der im nachfolgenden Kapitel beschriebene Aussenwandaufbau entwickelt. Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit zwischen Renggli und Variotec, resp. des Architekten des Variotec-Hauses in Voggental, Martin Forstner, durchgeführt.

#### 3.3.1 Aufbau

Die gesamte Wandstärke beträgt 230 mm. Die VIP-Stärke von 40 mm wurde gewählt, da diese zusammen mit der gedämmten Rahmenkonstruktion einen U-Wert (ohne Wärmebrücken) von  $0.10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ergibt (Tabelle 3).

##### Aussenwand (von aussen nach innen)

- Fassadenbekleidung: Vollkernplatte Prodema 10 mm
- Hinterlüftung: Aluminium Klemmleiste 25 mm
- Dämmung: VIP-Qasa 50 mm (VIP 40 mm)
- Flachpressplatte OSB-3 15 mm
- Ständerkonstruktion bzw. Mineralfaserdämmung: 120 mm. Für den Demonstrationspavillon wurde nur ein 80 mm Ständer verwendet (Achsmass 600 mm).
- Innenbekleidung: Vollkernplatte Prodema 10 mm

Die Differenz von 10% zum angestrebten mittleren U-Wert von  $0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  wurde als genügend erachtet, um Wärmebrückeneffekte von Durchdringungen der VIP-Ebene (Befestigungen) abzudecken.

Tabelle 3: U-Wert Berechnung der Fassade ohne Wärmebrückeneffekte.

| Fassade ungestört      |  | Kantenlänge | Fläche         | lambda | lambda_tot | Dicke  | R     | U-Wert             |                    |
|------------------------|--|-------------|----------------|--------|------------|--------|-------|--------------------|--------------------|
|                        |  | m           | m <sup>2</sup> | W/mK   | W/mK       |        | m     | m <sup>2</sup> K/W | W/m <sup>2</sup> K |
| Holzständer            |  |             | 0.050          | 0.140  | 0.007      |        |       |                    |                    |
| Dämmung konv.          |  |             | 0.950          | 0.036  | 0.0342     | 0.0412 | 0.120 | 2.9126             |                    |
| OSB-Platte (2x)        |  |             |                | 0.150  |            |        | 0.030 | 0.2000             |                    |
| Recyclingplatte (QASA) |  |             |                | 0.060  |            |        | 0.004 | 0.0667             |                    |
| VIP                    |  |             |                | 0.006  |            |        | 0.040 | 6.6667             |                    |
| Aufbau total           |  |             |                |        |            |        |       |                    | 0.100              |

Die Wetterschutzschicht (Prodema-Platte) wird auf eine Alu-Klemmleiste verklebt, welche durch Schraubverbindungen mit der Rahmenkonstruktion verbunden ist (Abbildung 5). Beziiglich Wärmebrückeneffekten sind einerseits diese Schraubverbindungen und andererseits die Alubeplankung der Qasa-Elemente in den Ecken von Bedeutung. Letztere sind relativ einfach durch Wegschneiden des nach aussen laufenden Aluminiumstreifens zu eliminieren.

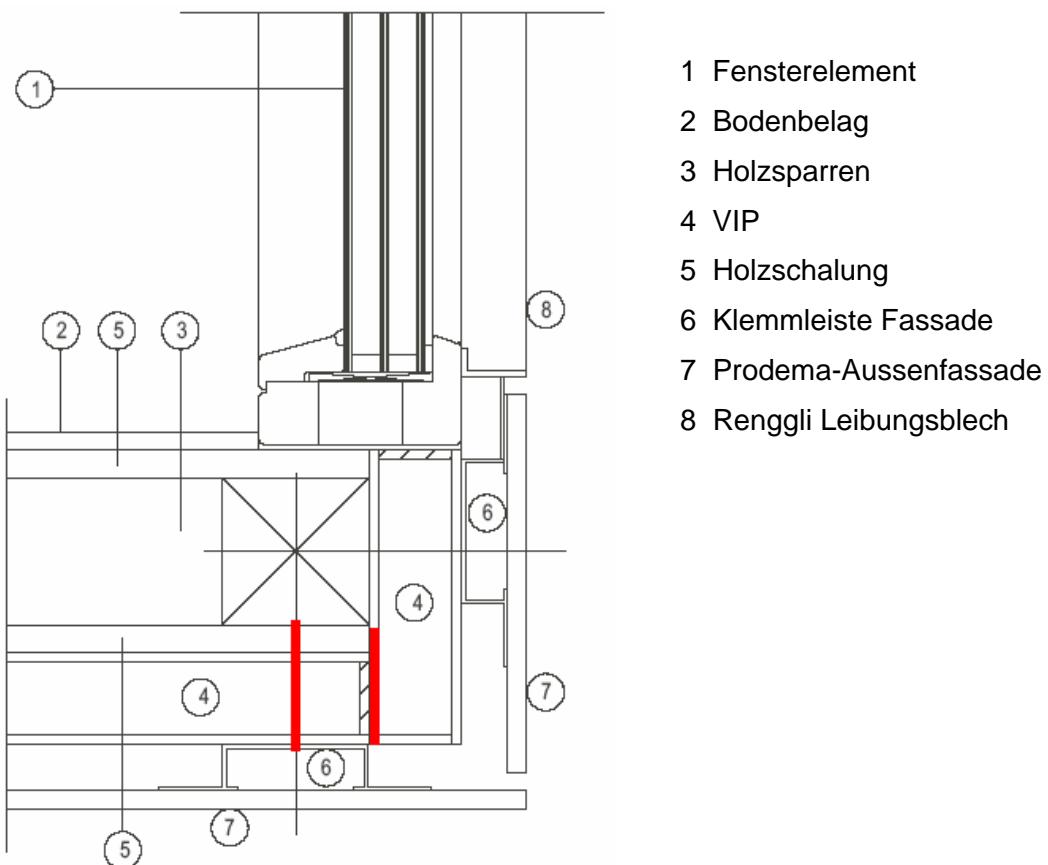


Abbildung 5: Eckdetail mit Fensteranschluss und den bezüglich Wärmebrückeneffekten besonders zu beachtenden Situationen (rot).

### 3.3.2 Wärmebrücken

#### Aussenwand

Es sind hier zwei Typen von Wärmebrücken zu unterscheiden. Einerseits linienförmige Stösse von Vakuum-Paneele und Qasa-Elementen und andererseits die punktuellen Durchdringungen der Dämmebene durch die Schraubverbindungen. Der Wärmebrückeneffekt des Holzstängers wurde ebenfalls berechnet. Dabei hat sich gezeigt, dass er keine relevante Verschlechterung des U-Wertes verursacht.

Wie Tabelle 4 zeigt, hätte durchlaufendes Aluminium in den Ecken einen massiven Wärmebrückeneffekt zur Folge. Wird das Metall in den Stössen entfernt, resultiert ein negativer  $\Psi$ -Wert. Dass dieser Wert negativ ist, liegt an der Berechnungsweise gemäss SIA 380/1 (Wärmeschutz im Hochbau), welche zur Berechnung der Wärmeverluste die Wandaussenflächen verwendet. Da die innere (beheizte) Wandfläche aber kleiner ist, führt diese Betrachtungsweise zu einem Überschätzen der Verluste.

Die in Tabelle 4 beschriebenen Wärmebrückenzuschläge beziehen sich auf einen  $\lambda$ -Wert der Vakuum-Paneele von 0.006 W/(m·K). Bei tieferem  $\lambda$ -Wert der Paneele (Neuzustand) erhöhen sich die Wärmebrückenzuschläge gegenüber der ungestörten Situation deutlich.

*Tabelle 4:* Lineare und punktuelle Wärmebrücken in der Dämmebene (exkl. Anschlüsse an Öffnungen) bei einem  $\lambda$ -Wert der VIP von 0.006 W/(m·K).

Quellen: 1: FIW-München (Variotec, pers. Kom.), 2: Ragonesi Strobel & Partner (vgl. Anhang), 3: verändert nach [5].

| Wärmebrücke   | Effekt        |
|---|---------------|
| Stösse der Vakuum-Paneele innerhalb eines Qasa-Elementes <sup>1</sup>   | 0.0122 W/(mK) |
| Stösse der Qasa-Paneele in der Fläche <sup>1</sup>                      | 0.0122 W/(mK) |
| Stösse der Qasa-Paneele in den Ecken (Alu durchlaufend) <sup>2</sup>    | 0.115 W/(mK)  |
| Stösse der Qasa-Paneele in den Ecken (ohne Alu) <sup>2</sup>            | -0.016 W/(mK) |
| Schraubverbindungen von Klemmleiste und Rahmenkonstruktion <sup>3</sup> | 0.018 W/K     |

Die Schraubverbindungen (Abbildung 6) bestehen aus Chromstahlschrauben der Dimension 12 x 140 mm. Das Institut Wohnen und Umwelt [5] hat den Effekt derartiger Durchdringungen untersucht (Abbildung 7). Für die hier verwendete Konstruktion ergäbe sich ein punktuelle Wärmebrückenzuschlag ( $\chi$ -Wert) von 0.012 W/K. Dieser Wert berücksichtigt aber nicht, dass für die Schraube eine Aussparung in den VIP-Stössen notwendig ist, welche deutlich grösser ist, als der Schraubendurchmesser. Aus diesem Grund wird hier mit einem um 50% erhöhten  $\chi$ -Wert von 0.018 W/K gerechnet.

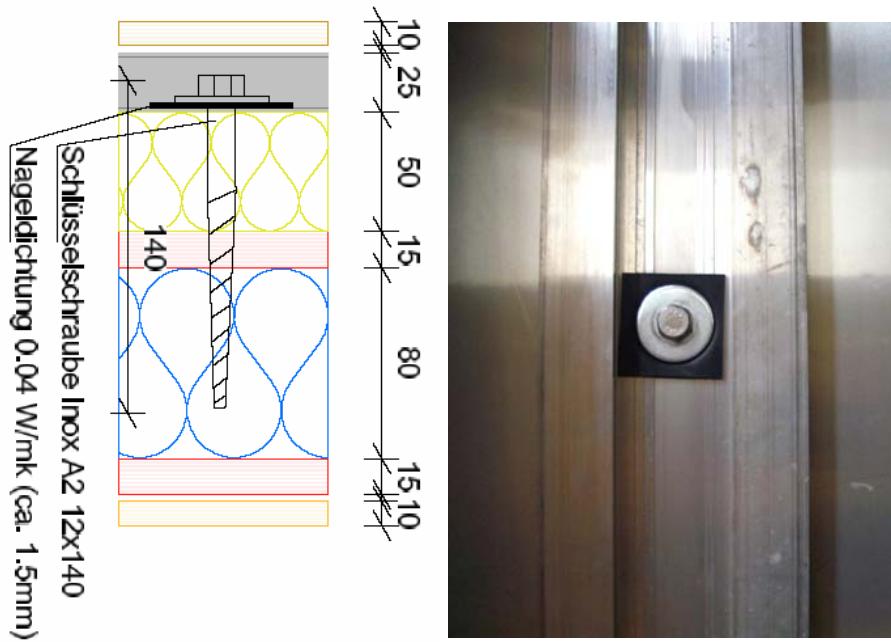


Abbildung 6: Schraubverbindung der Alu-Klemmleiste auf den Holzrahmen. Links: Schnitt, rechts: Aussenansicht auf Klemmleiste mit Schraube.

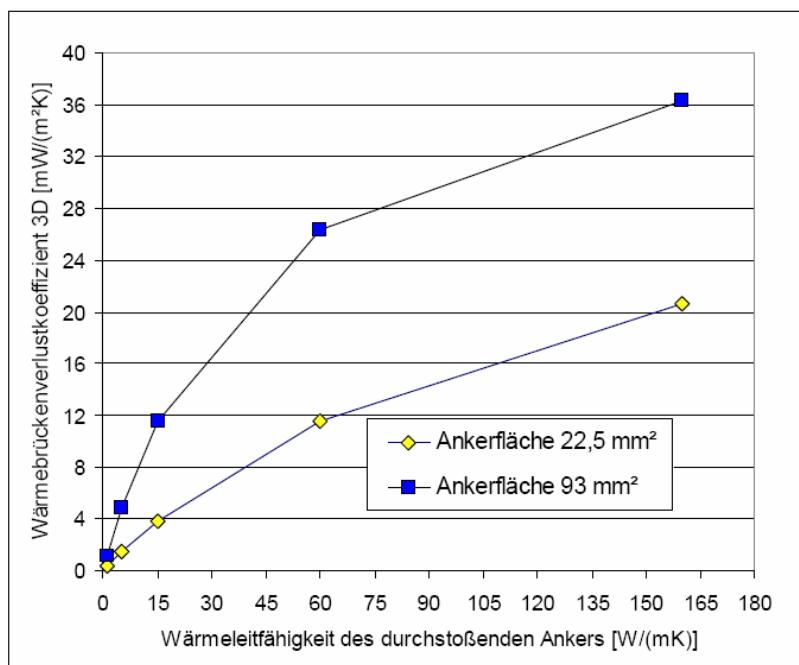


Abbildung 7: Wärmebrückeneffekt eines durchstossenden Ankers [5]. Da hier ein Anker pro m<sup>2</sup> untersucht wurde, entspricht der Wert des angegebenen Wärmebrücke verlustkoeffizienten jenem des  $\chi$ -Wertes.

## Bauteilübergänge

Die linearen Wärmebrücken für Türe und Fenster sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

*Tabelle 5: Lineare Wärmebrücken bei Bauteilübergängen (Anschlüsse von Türe und Fenster). Ragonesi Strobel & Partner (vgl. Anhang).*

| Wärmebrücke   | Effekt       |
|---|--------------|
| Türe: 1.1 m x 2.2 m, U-Wert (Mitte): 0.62 W/(m <sup>2</sup> K)                        | 0.033 W/(mK) |
| Fensteranschlag seitlich (Leibung): total (Glas: 0.6, Rahmen 0.6 W/(m <sup>2</sup> K) | 0.149 W/(mK) |
| Glasverbund   | 0.031 W/(mK) |

Für die Türe (1.1 m x 2.2 m) ergibt sich somit ein totaler U-Wert von 1.0 W/(m<sup>2</sup>K). Obwohl Glas und Rahmen grundsätzlich sehr gute U-Werte von je 0.6 W/(m<sup>2</sup>K) aufweisen, führen die  $\Psi$ -Werte von Rahmenanschlag und Glasverbund zu einem linearen Zuschlag von total 0.18 W/(mK). Dies bedeutet, dass beispielsweise bei einem Fenster der Dimension 1.0 x 1.0 m<sup>2</sup> ein mittlerer U-Wert von 1.3 W/(m<sup>2</sup>K) resultiert.

## 3.4 Demonstration

### 3.4.1 Konstruktion

Als Demonstrations- und Messobjekt baute Renggli ein Pavillon mit einer Grundfläche von 5.5 x 3.3 m<sup>2</sup>. Der Pavillon ist als Kleinstwohnung mit Minergie-P Standard konzipiert. Er ist also mit der für ein solches Gebäude notwendigen Haustechnik ausgerüstet: Nasszelle mit Dusche, Komfortlüftung, elektrischer Wärmeerzeugung, Wärmeabgabe über Deckenheizung.





Abbildung 8: Der als Kleinstwohnung (BGF 18 m<sup>2</sup>) mit Minergie-P Standard konzipierte Pavillon mit Vakuum-Dämmung aller opaker Bauteile.

Neben den Außenwänden wurden hier auch Boden und Decke mit den Qasa-Elementen gedämmt. Deren Konstruktion ist nachfolgend beschrieben.

#### **Boden** (von oben nach unten)

- Bodenbelag: Parkett Eiche 10 mm
- Holzwerkstoffplatte Livingboard 22 mm
- Lattung 80 mm
- Luftdichtigkeitsschicht: Teguvap 537
- Dämmung: VIP-Qasa 50 mm (VIP 40 mm)
- Konstruktive Bodenplatte: Mehrschichtplatte 105 mm auf Stahlträgern

#### **Dach** (von oben nach unten)

- Wasserführende Schicht: Chromstahl
- Holzwerkstoffplatte Livingboard 25 mm
- Hinterlüftungsbohle: 60 mm
- Dämmung: VIP-Qasa 50 mm (VIP 40 mm)
- Tragende Dachplatte: Mehrschichtplatte 80 mm
- Deckenheizung 40 mm
- Deckenverkleidung: Akustikpaneel Ahorn 18 mm



*Abbildung 9:* Der Pavillon in der Bauphase. Gut sichtbar die Sandwichpaneelle und die Alu-Klemmleiste, mit welcher im nächsten Schritt die Prodema-Fassadenpaneelle verklebt werden.

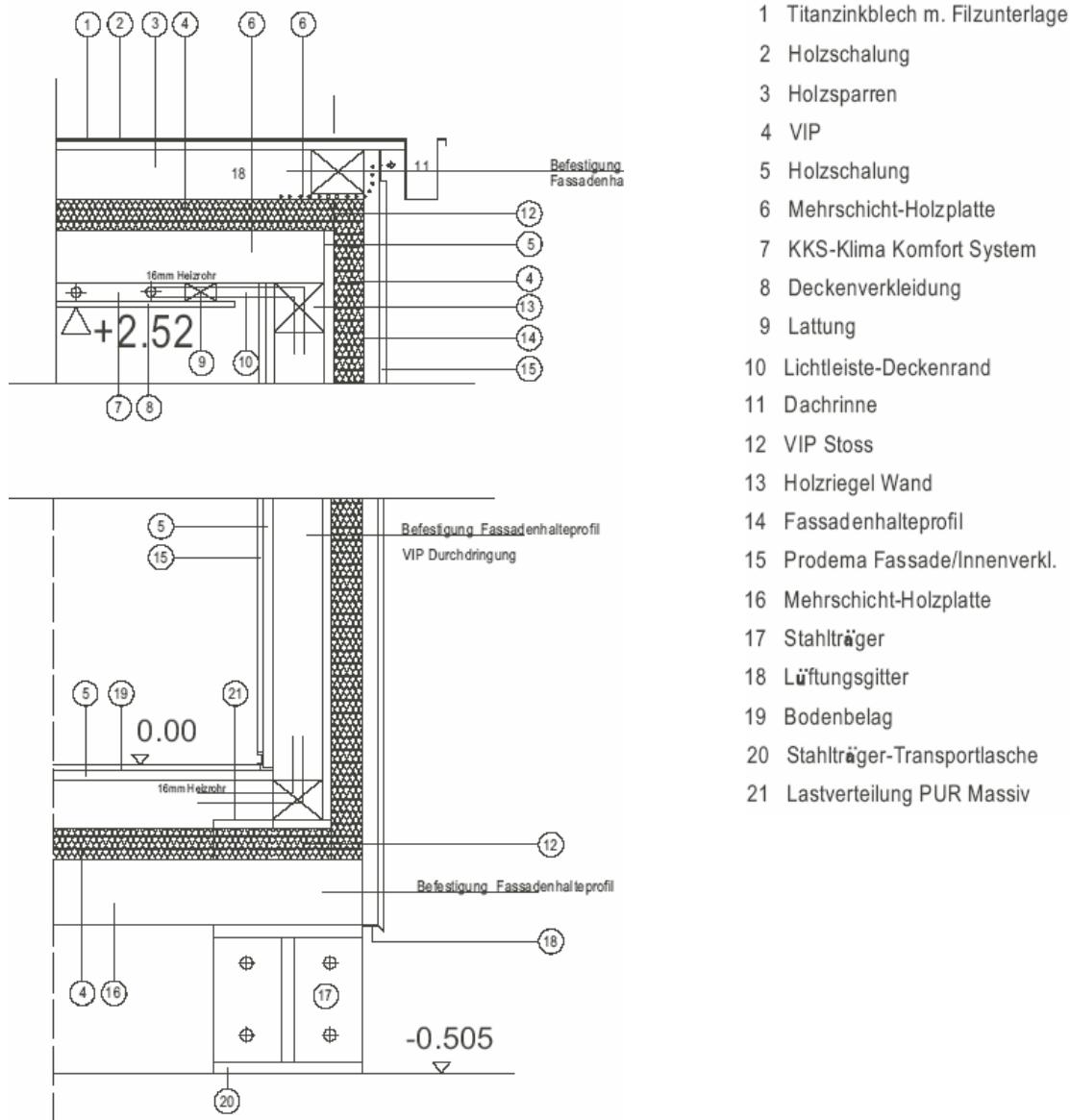


Abbildung 10: Dach- und Bodenkonstruktion des Pavillons mit jeweiligem Anschlussdetail zur Wand.

Leider musste nach Fertigstellung des Pavillons festgestellt werden, dass die Vorgabe bezüglich des Entfernen der Alubeplankung in den Eckstössen der Qasa-Elemente vom Hersteller nicht umgesetzt wurde.

### 3.4.2 Erfolgskontrolle

Im Rahmen dieses Projektes dient der Pavillon für eine messtechnische Erfolgskontrolle. Diese umfasst:

- Wärmeleistungsbedarf (mittlerer U-Wert) des Pavillons: Durch eine mehrtägige Messung von Aussen- und Innentemperatur sowie der Heizleistung wird der mittlere U-Wert ermittelt.
- Dichtigkeit der Hülle: Tracergas- und Blowerdoor-Messungen.
- Integrität der Vakuum-Paneele nach dem Einbau und Alterung der Paneele: Dazu wird der Innendruck der Paneele in regelmässigen Abständen mittels eingebauter Sensoren überprüft.
- Feuchte- und Temperaturbelastung der Konstruktion (i.b. der Vakuum-Paneele): Einbau von kombinierten Feuchte-/Temperatursensoren.

#### 3.4.2.1 Dichtigkeit der Hülle

##### *Tracergas-Abklingmethode*

Die HTA-Luzern hat zwischen dem 9. und 10. Januar 2007 mit der Tracergas-Abklingmethode eine Luftwechselzahl von  $0.06 \text{ h}^{-1}$  gemessen. Diese Luftwechselzahl bezieht sich auf den Ruhezustand des Gebäudes ohne extern aufgesetzten Differenzdruck zur Umgebung. Dieser Wert ist tief und die Hülle kann somit als dicht bezeichnet werden.

##### *Blowerdoor*

Die LTM GmbH aus Ulm hat am 10. Januar eine Blowerdoor-Messung durchgeführt. Das arithmetische Mittel der Unter- und Überdruckmessung ergab einen Leckagestrom  $V_{50}$  von  $69.0 \text{ m}^3/\text{h}$ , resp. eine Luftwechselrate  $n_{50}$  von  $1.86 \text{ h}^{-1}$ , ein eher enttäuschender Wert.

##### *Vergleich von Tracergas- und Blowerdoor-Messung*

Dass die Blowerdoor-Messung bei einer Druckdifferenz von 50 Pa einen um den Faktor 31 höheren Wert ergab als die Tracergas-Messung, ist auf den ersten Blick erstaunlich.

Aus der mittels Blowerdoor ermittelten Graphik bezüglich Druckdifferenz zu Volumenstrom kann herausgelesen werden, dass bei einer Druckdifferenz von 2 bis 4 Pa ein Volumenstrom von 15 bis  $18 \text{ m}^3/\text{h}$ , resp. eine Luftwechselrate von  $0.41$  bis  $0.49 \text{ h}^{-1}$  resultiert. Die erwähnte Druckdifferenz entspricht in etwa dem an normalen Lagen windinduzierten Druckgefälle an Aussenwänden. Geht man davon aus, dass während der Tracergas-Messung im Mittel eben diese normalen Bedingungen herrschten, so muss erklärt werden, weshalb die Luftwechselrate der Tracergas-Messung nur ca. 15% des Wertes der Blowerdoor-Messung ergab.

Mit einiger Sicherheit kann diese Differenz dadurch erklärt werden, dass die bekannten Leckagen im Boden des Pavillons liegen (Durchführung von Leitungen). An diesen Stellen liegt im Normalbetrieb (Tracergas-Messung) kaum ein Druckgefälle an, entsprechend tief die hier gemessene Luftwechselrate. Beim künstlich erzeugten Druckgefälle der Blowerdoor hingegen werden die undichten Stellen im Boden voll erfasst. Die Blowerdoor-Messung kann deshalb als Artefakt gewertet werden. Für die nachfolgend beschriebene Modellrechnung des Wärmeleistungsbedarfs wurde deshalb der Luftwechsel gemäss Tracergas-Messung verwendet.

### 3.4.2.2 Wärmeleistungsbedarf

In der zweiten Dezemberhälfte 2006 wurde im Pavillon eine Wärmebedarfsmessung durchgeführt, mit dem Ziel, den Mess- mit einem Modellwert zu vergleichen. Der Modellwert ergibt sich aus den U-Werten der verwendeten Konstruktionen.

Für die Messung wurde mit einem Heizlüfter eine konstante Raumtemperatur von knapp 50°C erzeugt. Mit Ventilatoren wurde eine Temperaturschichtung verhindert. Mittels Temperaturmessungen an vier Oberflächen im Pavillon und zwei Messungen der Außenlufttemperatur wurde das Temperaturgefälle zwischen Innen- und Außenklima ermittelt. Alle Fenster wurden für die Messung lichtdicht abgeklebt, so dass keine Strahlungsgewinne auftraten. Während der ausgewerteten Messperiode von drei Tagen war die Sonne dauernd abgedeckt. Damit konnte weitestgehend sichergestellt werden, dass die gemessenen Außenlufttemperaturen für die Ermittlung des mittleren U-Wertes verwendet werden können. Die Lüftung war während der Messung ausgeschaltet, als Luftwechselrate wurde der Wert der Tracergas-Messung von 0.06 h<sup>-1</sup> eingesetzt.

Tabelle 6: Geometrische und energetische Charakterisierung des Pavillons. Diese Werte beziehen sich auf den Zustand, wie er gemessen wurde, d.h. VIP mit  $\lambda$  0.004 W/(mK) und ohne mechanische Lüftung.

|                                    | Fläche [m <sup>2</sup> ] |             | U-Werte [W/(m <sup>2</sup> K)]   |              |      |
|------------------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|--------------|------|
|                                    | total                    | opak        | Mittel                           | total        | opak |
| <b>Fassade 1 (Eingang)</b>         | 9.5                      | 7.3         | 0.33                             | 0.13         |      |
| <b>Fassade 2 (hohes Fenster)</b>   | 15.8                     | 15.0        | 0.26                             | 0.17         |      |
| <b>Fassade 3 (grosses Fenster)</b> | 9.5                      | 2.8         | 0.68                             | 0.19         |      |
| <b>Fassade 4 (breites Fenster)</b> | 15.8                     | 13.4        | 0.33                             | 0.18         |      |
| <b>Boden</b>                       | 17.9                     | 17.8        | 0.29                             | 0.28         |      |
| <b>Decke</b>                       | 17.9                     | 17.9        | 0.29                             | 0.30         |      |
| <b>Summe, resp. Mittelwert</b>     | <b>86.5</b>              | <b>74.2</b> | <b>0.34</b>                      | <b>0.225</b> |      |
| <b>EBF</b>                         |                          |             | <b>14.5 m<sup>2</sup></b>        |              |      |
| <b>A/EBF</b>                       |                          |             | <b>6.0 -</b>                     |              |      |
| <b>Belüftetes Volumen</b>          |                          |             | <b>34.3 m<sup>3</sup></b>        |              |      |
| nL mechanisch                      |                          |             | 0.0 h <sup>-1</sup>              |              |      |
| Eta WRG                            |                          |             | 0.9 -                            |              |      |
| nL Fugen                           |                          |             | <b>0.06 h<sup>-1</sup></b>       |              |      |
| Leistungsbedarf Lüftung            |                          |             | 0.7 W/K                          |              |      |
| Leistungsbedarf Transmission       |                          |             | 29.2 W/K                         |              |      |
| Leistungsbedarf Total              |                          |             | 29.9 W/K                         |              |      |
| <b>dT Auslegung</b>                |                          |             | <b>28 K</b>                      |              |      |
| <b>Leistungsbedarf Auslegung</b>   |                          |             | <b>837 W</b>                     |              |      |
| <b>Vollbetriebsstunden</b>         |                          |             | <b>1'800 h</b>                   |              |      |
| <b>Energiebedarf</b>               |                          |             | 1'507 kWh                        |              |      |
| Total                              |                          |             | <b>104 kWh/m<sup>2</sup> EBF</b> |              |      |
| <b>IST pro EBF</b>                 |                          |             | <b>35 kWh/m<sup>2</sup> EBF</b>  |              |      |
| <b>SOLL (Grenzwert Minergie-P)</b> |                          |             | <b>58 W/m<sup>2</sup></b>        |              |      |

Wie die Modellrechnung in Tabelle 6 zeigt, führen die ungenügenden U-Werte (Wärmebrücken) zusammen mit dem sehr schlechten A/EBF-Verhältnis zu einem sehr hohen flächenbezogenen Leistungsbedarf und Energieverbrauch. Während der Messperiode (23. - 26.12.06) wurde beim Pavillon eine mittlere Aussentemperatur von 0.0°C unter dem Boden und -0.7°C auf dem Dach des Pavillons gemessen. Die Mittelwerte der fünf Innentemperatursmessstellen liegen zwischen 46.6 und 48.5°C. Diese Werte an den Messstellen waren ziemlich konstant (Standardabweichungen von 0.5 - 0.8 K). Aus diesen Werten ergibt sich in der Modellrechnung ein Erwartungswert bezüglich des mittleren Leistungsbedarfs von 1'463 W, der Messwert lag jedoch bei 1'157 W. Der Modellwert liegt somit 26% über dem Messwert. Es stellt sich nun die Frage nach den Gründen des real deutlich tieferen Wertes. In einem ersten Schritt wurde die Messtechnik überprüft. Dabei wurden aber keine Fehler gefunden. In einem zweiten Schritt wurde das Modell überprüft. Dieses verwendet bezüglich Berechnung der Transmissionsverluste die Pavillon-Aussenflächen (vgl. SIA 380/1). Physikalisch korrekter wären die Flächen in der Mitte (thermisch) der Dämmebene. Der Flächeneffekt liegt im vorliegenden Fall bei etwa 5%. Verbleiben als weitere Fehlerquelle noch die U-Werte, da die Lüftungsverluste im Modell nur 2% des Leistungsbedarfs ausmachen. Bezuglich der U-Werte können die Fenster wohl ausgeschlossen werden, da der verwendete Wert ( $U_{Glas}$  0.60 W/(m<sup>2</sup>K)) beim Lieferanten überprüft wurde. Der mittlere U-Wert der opaken Bauteile beträgt im Modell 0.23 W/(m<sup>2</sup>K). Dieser Wert ist 165% höher als der Wert ohne jegliche Wärmebrücken (vgl. Tabelle 4). Der gesamte Leistungsbedarf würde sich durch Elimination der „opaken“ Wärmebrücken, bezogen auf den Messwert, von 126% auf 83%, resp. um 34% reduzieren. Die Hälfte des Wärmebrückeneffekts wird durch die nach aussen laufende Alubeplankung der Qasa-Elemente bedingt. Der Modellwert des Leistungsbedarfs wird durch diese Wärmebrücken, bezogen auf den Messwert, von 94% auf die erwähnten 126% erhöht. Wie in Abbildung 11 ersichtlich, ist das Qasa-Element stirnseitig mit einem Klebeband abgeschlossen. Bei den eingesetzten Paneelen besteht dieses Band aus einem ca. 1 mm starken Schaumstoff mit Gewebeoberfläche. In der Wärmebrückeneberechnung wurde dieses Band nicht berücksichtigt. Dadurch liegt der berechnete Wärmebrückeneffekt höher als der reale, womit ein Teil der Differenz zwischen Messung und Modellrechnung erklärt werden kann.



Abbildung 11: Klebeband, welches den stirnseitigen Abschluss der Qasa-Elemente bildet.

### 3.4.2.3 Integrität und Alterung der Vakuum-Paneele

Sechs Paneele wurden im Werk des VIP-Herstellers am 6.10.06 vom Projektteam mit Innendrucksensoren (va-Q-perm., Fa. va-Q-tec) ausgerüstet. Dazu waren Aussparungen in der PUR-Schicht der Beplankung notwendig.



Abbildung 12: Montage der Innendrucksensoren. Links: Aussparung in der PUR-Schicht der Beplankung, rechts: Auf VIP geklebter Sensor (mit Klebefolie geschützt)..

Seit der Montage der Qasa-Elemente wurde der Innendruck viermal ausgelesen. Eine Messung musste wegen elektrischen Störsignalen verworfen werden. In Abbildung 13 sind die Resultate dargestellt. Mit Ausnahme von Paneel 18 (P18) zeigen alle Paneele plausible Druckanstiege. Diese liegen hochgerechnet auf ein Jahr im Mittel bei 1.6 mbar/a. Die einzelnen Paneele zeigen Werte von 0.3 bis 2.4 mbar/a. Die breite Streuung hat mit der Genauigkeit des verwendeten Messsystems zu tun. Verlässliche Voraussagen sind erst ab einem Untersuchungszeitraum von einem Jahr möglich.

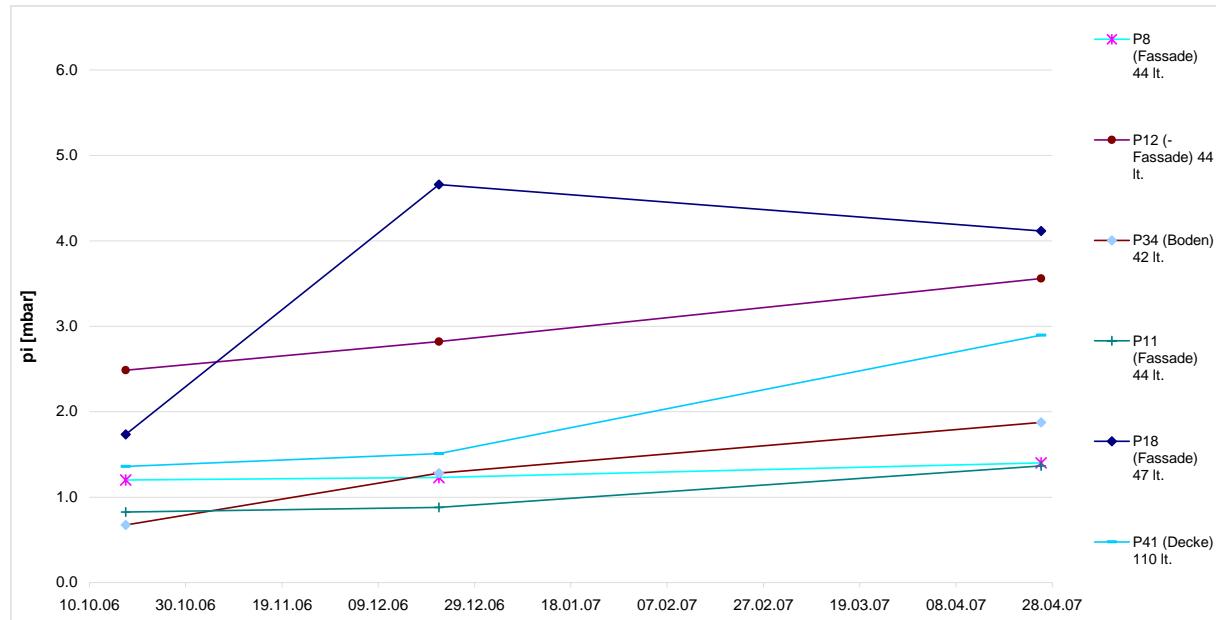


Abbildung 13: Ergebnisse der Paneelinnendruckmessungen.

### 3.4.2.4 Feuchte- und Temperaturbelastung

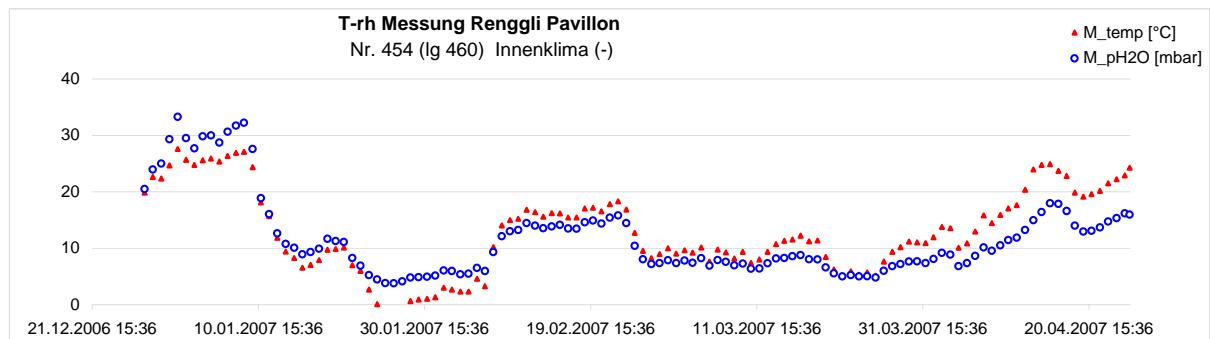
Im Pavillon wurden sieben Feuchte-/Temperatursensoren eingebaut. Gemessen wird:

- Aussen- und Innenluft
- Zwei Stösse zwischen Qasa-Elementen
- VIP-Innen- und Aussenseite eines Qasa-Elements (zw. VIP und Alu-Beplankung).
- Schraubendurchdringung (vgl. Abbildung 6)

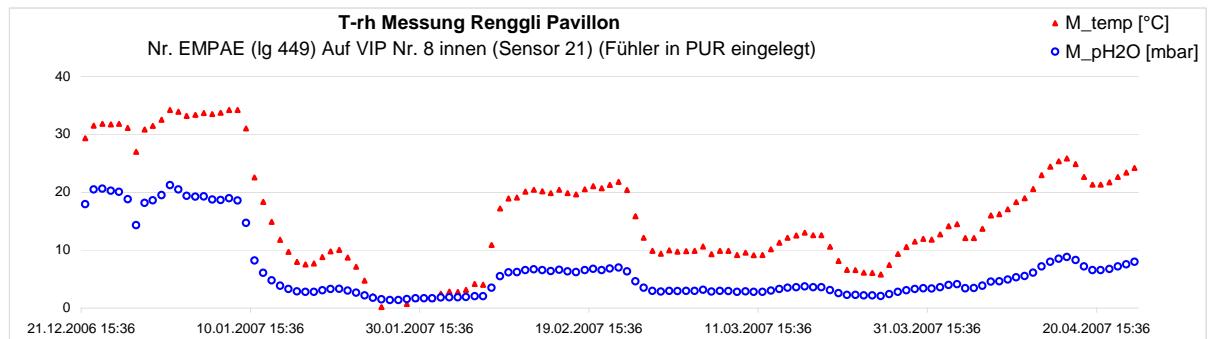


Abbildung 14: In der Haustechnik-Box wurden alle Kabel von Innendruck- und T/RH-Fühlern zusammengeführt..

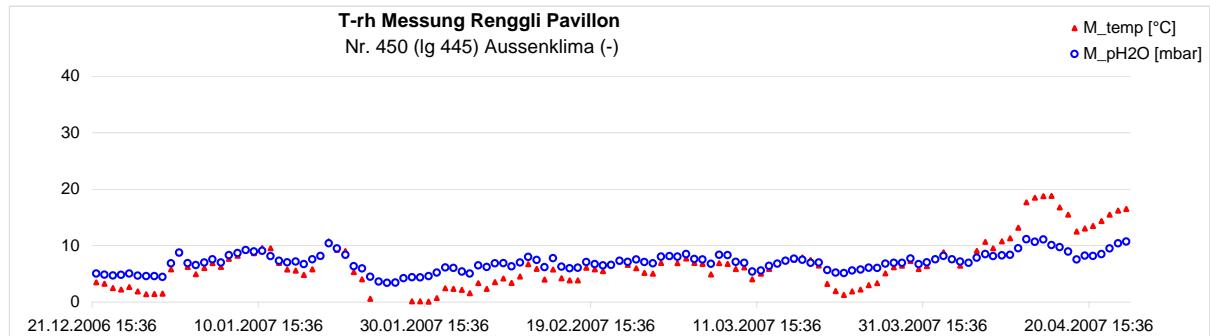
a



b



c



d

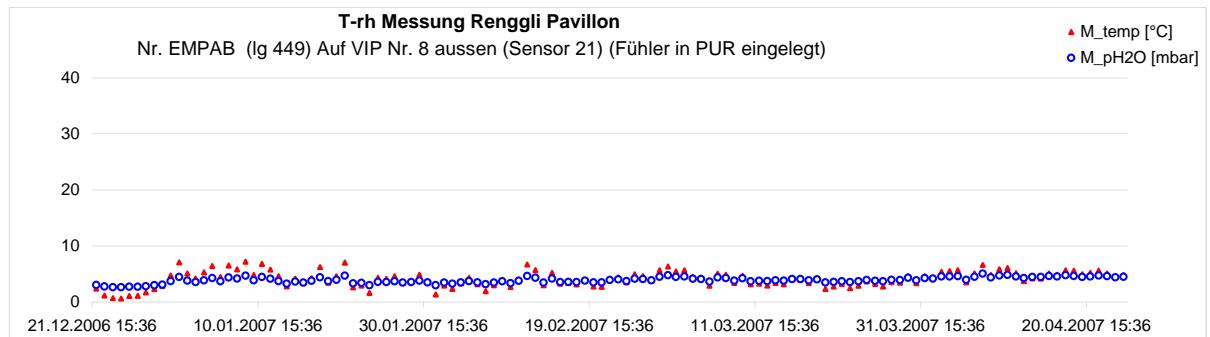


Abbildung 15: Temperaturen und Wasserdampfpartialdrucke (24 h-Mittelwerte) der Innen- und Aussenluft (a+c) sowie auf der VIP-Innen- und Aussenseite (b+d). Die Temperaturverläufe in a + b sind durch den Umstand bedingt, dass in der Messperiode zeitweise auf verschiedene Temperaturniveaus geheizt wurde. Die Innenlufttemperatur ist teilweise zu tief, da der Sensor zu nahe bei der Zulufteinlassstelle platziert wurde.

Wie die Grafiken in Abbildung 15 zeigen, sind die Wasserdampfpartialdrucke in den Qasa-Elementen tiefer als in der Innen- und Aussenluft. Die Differenz beträgt ca. 5 mbar. Diese Differenz wird durch die Schutzwirkung der Beplankung erzeugt.

Bei erhöhten Innentemperaturen liegt der Wert auf der VIP-Innenseite über der Innenlufttemperatur. Eine Erklärung für diesen Sachverhalt konnte nicht gefunden werden.

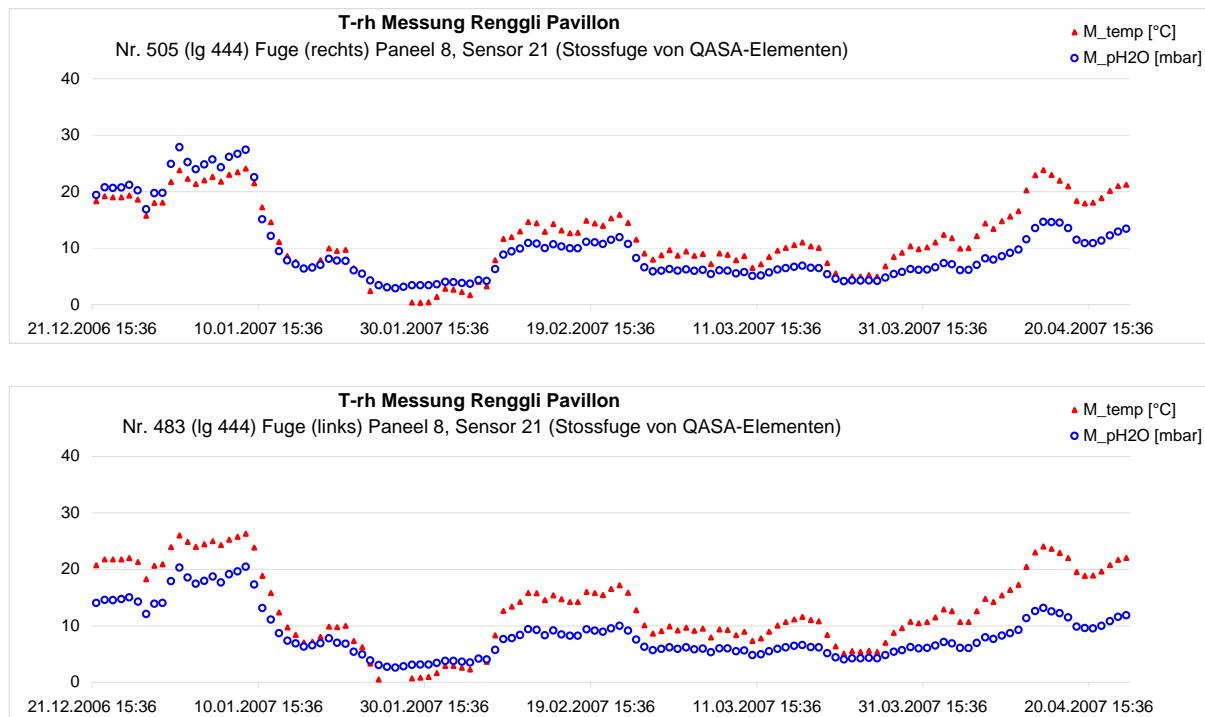


Abbildung 16: Temperaturen und Wasserdampfpartialdrucke (24 h-Mittelwerte) von zwei Messungen in den Stossfugen von Qasa-Elementen.

Die Messungen in den Stossfugen der Qasa-Elemente zeigen bezüglich Temperatur und Feuchte ein Profil, das nahe an jenem des Innenklimas liegt. Die Werte der relativen Feuchte sind sehr konstant im Bereich von rh 60%. Generell wurden durch die Messungen keine kritischen Stellen entdeckt bezüglich Kondensat.

Die Messung im Loch der Schraubdurchdringung lieferte bis dato wegen einem inzwischen behobenem Loggerdefekt noch keine Daten.

### 3.5 Konstruktion Futura

Aus den oben beschriebenen Erkenntnissen kann nun abgeleitet werden, wie eine Konstruktion aussehen müsste, welche den energetischen Zielwert von maximal U 0.11 W/(m<sup>2</sup>K) erreicht. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass nun wieder mit dem Design Wert der Wärmeleitfähigkeit von VIP, also 6 statt 4 mW/(mK) gerechnet werden muss. Aus statischen Gründen wird der Ständer hier eine Stärke von 12 cm aufweisen. Mit wenig Aufwand können die Verluste der nicht gedämmten Schraubdurchdringungen optimiert werden (Ausschäumen mit PU). Die Summe dieser Massnahmen führt aber noch nicht zum Ziel. Nur eine Erhöhung der VIP-Stärke von 4 auf 5 bis 6 cm führt zu einem U-Wert im Zielbereich.

In der Tabelle 7 sind die U-Werte der real gemessenen Pavillon-Konstruktion der vorgeschlagenen Futura-Konstruktion gegenüber gestellt. Trotz des höheren Lambda-Wertes von VIP verbessert sich der mittlere U-Wert hier um 50%.

Tabelle 7: U-Werte der real gemessenen Pavillon-Konstruktion und der vorgeschlagenen Futura-Konstruktion.

|                                    |             | <b>Pavillon real</b><br>4 cm VIP (4 mW), 8 cm Ständer (Fassade) |              | <b>Futura-Zielvariante</b><br>6 cm VIP (6 mW) Schrauben: 1 cm&PU, 12 cm Ständer (Fassade) |             |
|------------------------------------|-------------|---|--------------|---|-------------|
| <b>Fläche [m<sup>2</sup>]</b>      |             | <b>U-Werte [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>                             |              | <b>U-Werte [W/(m<sup>2</sup>K)]</b>   |             |
|                                    | total       | opak  | Mittel total | Mittel opak   | Mittel opak |
| <b>Fassade 1 (Eingang)</b>         | 9.5         | 7.3   | 0.33         | 0.13  | 0.11        |
| <b>Fassade 2 (hohes Fenster)</b>   | 15.8        | 15.0  | 0.26         | 0.17  | <b>0.10</b> |
| <b>Fassade 3 (grosses Fenster)</b> | 9.5         | 2.8   | 0.68         | 0.19  | 0.16        |
| <b>Fassade 4 (breites Fenster)</b> | 15.8        | 13.4  | 0.33         | 0.18  | <b>0.11</b> |
| <b>Boden</b>                       | 17.9        | 17.8  | 0.29         | 0.28  | 0.13        |
| <b>Decke</b>                       | 17.9        | 17.9  | 0.29         | 0.30  | 0.10        |
| <b>Summe, resp. Mittelwert</b>     | <b>86.5</b> | <b>74.2</b>   | <b>0.34</b>  | <b>0.225</b>  | <b>0.11</b> |
|                                    |             |   |              |   | 50%         |

## 4. Erkenntnisse

Vergleicht man das Pflichtenheft (Kapitel 3.1) mit den erreichten Resultaten, so kann festgehalten werden, dass abgesehen vom Kostenaspekt alle Anforderungen eingehalten werden können – soweit diese im Projekt untersucht wurden.

### 4.1 Kosten / Nutzen

Bedingt durch Wärmebrückenzuschläge kann der Passivhausstandard in der gewählten Konstruktion nur mit einer 5 bis 6 cm starken VIP-Schicht erreicht werden. Die hohen Kosten von heute verfügbaren, bautauglichen Vakuum-Paneele führen dazu, dass sich die Außenwandkosten beinahe verdoppeln. Im untersuchten Objekt (Futura) führt dies zu Mehrkosten um Fr. 75'000.-- bei einem Raumgewinn von 18 m<sup>2</sup>. Der gewonnene Raum kostet also gut Fr. 4'000.--/m<sup>2</sup>. Diese Kosten dürfen nun nicht direkt mit BKP 2 Kosten verglichen werden. Der gewonnene Raum lag ja bei der konventionellen Lösung in der Konstruktionsebene. Zumindest muss also noch der Innenausbau zu den Fr. 4'000.--/m<sup>2</sup> hinzugerechnet werden. So oder so ist klar, dass sich VIP als Fassadendämmung, rein ökonomisch betrachtet, nur an Hochpreisstandorten (hohe Grundstückspreise) lohnt.

Weitere Vorteile der VIP-Lösung:

- Die Kosten bei den Fenster- und Türzargen konnten durch die geringere Stärke (leicht) reduziert werden.
- Die normalerweise eher behäbige Ästhetik von Passivhäusern wurde, wie im Pavillon ersichtlich, deutlich verbessert.

### 4.2 Weitere Anforderungen

#### 4.2.1 Vorfertigung

- Bestimmung des Vorfertigungsgrads: Das VIP-Modul konnte komplett im Werk vorgefertigt werden. Bei einem Einfamilienhaus kann der grösste Teil vorgefertigt werden und es wären nur einige kleine Passtücke erforderlich. Durch die Einhausung der Vakuum-Paneele ist das Risiko von Beschädigungen klein.
- Definition der Masshaltigkeit und des Verformungsverhaltens der Paneele: Für die Vorfertigung stellen die relativ grossen Abweichungen der VIP ein Problem dar. Um eine sinnvolle Vorfertigung zu betreiben, müssen Bautoleranzen definiert werden, welche sich im Millimeterbereich bewegen.

## 4.2.2 Ökologie / LCA

Bei der Frage nach der Ökologie von Dämmstoffen muss man bedenken, dass diese nur einen sehr geringen Einfluss auf die Ökobilanz eines Gebäudes haben. Ist die Ökobilanz eines Dämmstoffes schlechter, dämmt er aber besser, werden Nachteile im Betrieb sehr schnell amortisiert. Auch sind bei Life Cycle Analysen (LCA) viele Annahmen notwendig. Bei VIP ist beispielsweise zu entscheiden, zu welchem Anteil der Stützkörper nach Ablauf der VIP-Lebenszeit recycelt wird. Da der Stützkörper die Ökobilanz dominiert, führen hier unterschiedliche Annahmen zu sehr unterschiedlichen Resultaten.

In [2] wurden Glaswolle und Polystyrol mit VIP verglichen. Die Dämmstoffstärken wurden so gewählt, dass der gleiche U-Wert resultierte. Als Indikatoren für die ökologischen Eigenschaften von VIP wurden die LCA-Systeme Eco-Indicator und Umweltbelastungspunkte angewendet. Bei VIP wurde 0% Recycling angenommen.

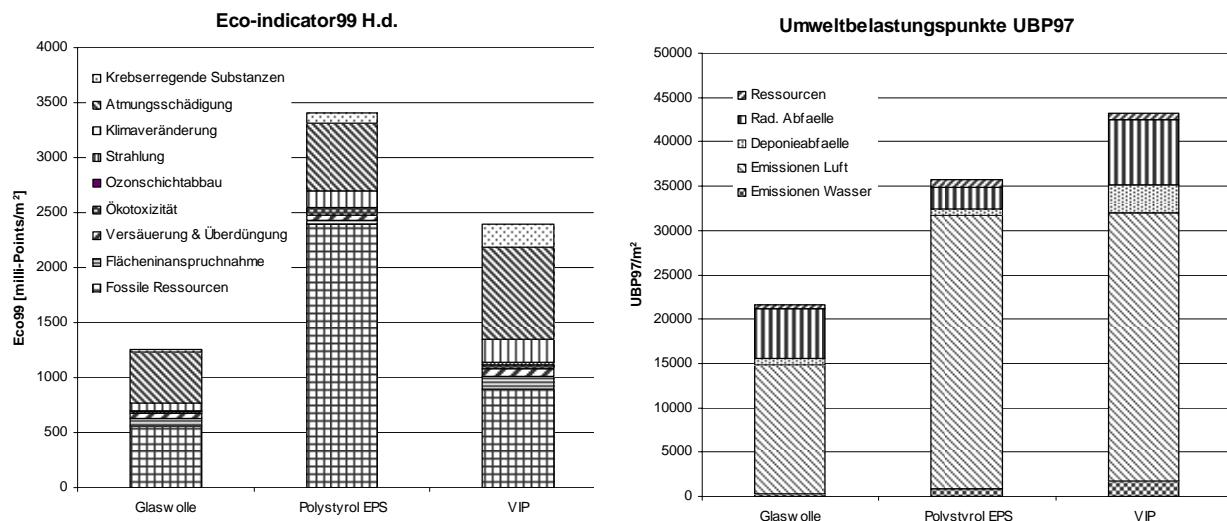


Abbildung 17: Links: Vergleich der Wirkkategorien für die Dämmmaterialien Glaswolle, Polystyrol EPS und VIP nach der Methode Eco-indicator 99.  
Rechts: Vergleich der Dämmmaterialien Glaswolle, Polystyrol EPS und VIP nach der Methode der ökologischen Knapheit mit Umweltbelastungspunkten UBP 97.

Die Analysen zeigen primär, dass die materialbedingte Umweltbelastung von VIP sehr ähnlich wie bei konventionellen Dämmstoffen ist, obwohl die zugrundeliegenden Annahmen eher zuungunsten von VIP (kein Recycling) getroffen wurden.

## 4.2.3 Feuchteschutz

Die vorliegenden Messungen zeigen keine kritischen Stellen bezüglich Kondensatanfall.

## 4.2.4 Schallschutz

Es wurden in diesem Projekt keine entsprechenden Analysen durchgeführt.

#### **4.2.5 Minimale Lebensdauer**

Die vorliegenden Messungen können noch nicht für eine Hochrechnung der zu erwartenden Lebensdauer verwendet werden. Die festgestellten Feuchte- und Temperaturdaten lassen aber den Schluss zu, dass für intakte Paneele von einem Druckanstieg von 1 - 2 mbar/a auszugehen ist. Dies bedeutet eine Lebenserwartung im Bereich von 50 Jahren. Die Ersetzbarkeit der Qasa-Elemente, d.h. der VIP, ist gegeben.

#### **4.2.6 Brandschutz**

Die Anforderungen gemäss den schweizerischen Brandschutzzvorschriften sind eingehalten. Alle Bauteile weisen einen Brandwiderstand von EI30 aus (gemäss Lignatec). Diese Aussage bezieht sich auf die Holzwerkstoffe. Der Einfluss der Qasa-Elemente wurde nicht speziell untersucht.

## 5. Literatur

- [1] IEA/ECBCS Annex 39 (2005): **VIP - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications**, Subtask A report. Download: [www.vip-bau.ch](http://www.vip-bau.ch).
- [2] IEA/ECBCS Annex 39 (2005): **Vacuum Insulation in the Building Sector - Systems and Applications**, Subtask B report. Download: [www.vip-bau.ch](http://www.vip-bau.ch).
- [3] **Arbeitsgruppe Vakuum-Dämmung**: energie-cluster: [www.energie-cluster.ch/bereiche/wtt/ag-vip/index.html](http://www.energie-cluster.ch/bereiche/wtt/ag-vip/index.html).
- [4] Frank et al. (1998). **Bestimmung der wärmetechnischen Einflüsse von Wärmebrücken bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden**. Vertrieb: Schweizerische Zentralstelle für Fenster- und Fassadenbau (SZFF), Dietikon.
- [5] Grossklos (2006). **Wärmebrücken in vorgefertigten Dämmelementen mit Vakuumdämmung** - Beitrag zur Passivhaustagung 2006 in Hannover. Download: [www.iwu.de/aktuell/hofheim/wilhelmstrasse.htm](http://www.iwu.de/aktuell/hofheim/wilhelmstrasse.htm).

## **6. Anhang**

Renggli AG  
Herr Martin Jordi  
Gleng  
CH - 6247 Schötz

Schützenstrasse 8  
CH-6003 Luzern  
Tel 041 420 60 68  
Fax 041 420 60 39  
info@rsp-bauphysik.ch  
www.rsp-bauphysik.ch

Luzern, 27. November 2006

**c1 1477**  
**Projekt VIP-Holzbau**  
**Wärmetechnische Berechnungen zum Pavillon**

Sehr geehrter Herr Jordi

Gestützt auf die Besprechung vom 23. Oktober 2006 und die erhaltenen Unterlagen haben wir den Wärmeschutz bei einzelnen Bauteilen und Bauteilübergängen berechnet (vgl. Beilagen) und fassen die Erkenntnisse wie folgt zusammen.

### 1. U-Werte von Einzelbauteilen

- Die U-Werte der inhomogenen Bauteile haben wir mittels Wärmebrückeberechnung (Flixo) ermittelt und dabei folgende Kennwerte erhalten:
  - Aussenwand mit 80 mm Holzrahmen/Steinwolle und 40 mm VIP  $U = 0,110 \text{ W/m}^2\text{K}$
  - Bodenkonstruktion mit 105 mm Mehrschichtholzplatte und 40 mm VIP  $U = 0,122 \text{ W/m}^2\text{K}$
  - Flachdach mit 80 mm Mehrschichtholzplatte und 40 mm VIP  $U = 0,131 \text{ W/m}^2\text{K}$In diesen Bauteil-U-Werten sind punktförmige Wärmebrücken bei den Befestigungsdurchdringungen und linienförmige Wärmebrücken, z.B. bei den VIP-Stößen (bzw. Stößen des QASA-Elementes), nicht berücksichtigt.
- Für das Fenster haben wir einen Rahmen-U-Wert  $U_f$  von  $0,584 \text{ W/m}^2\text{K}$  errechnet. Bei bekannten Kennwerten der Verglasung ( $U_g$  und  $\Psi_g$ ) und der Fenstergeometrie (Abmessungen als äussere Projektionsflächen bzw. lichte Fensteröffnungen) kann somit der U-Wert  $U_w$  des Fensters errechnet werden.
- Von Herr Holger Thoms habe ich Angaben zur Türe (1,1 m x 2,2 m) erhalten:
  - Türblatt bzw. Türe ohne Wärmebrücken beim Einbau mit U-Wert von  $0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$
  - Unter Berücksichtigung des Einbaus wird ein U-Wert von  $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreichtBei einer Türe von 1,1 m x 2,2 m entspricht dies einem  $\Psi_{\text{Einbau}}$ -Wert von etwa  $0,033 \text{ W/mK}$ . Berücksichtigt man den für das Fenster errechneten Wärmebrückenverlust beim Einbau (Alublech in Richtung des Wärmeflusses) von  $0,149 \text{ W/mK}$  wäre für die Türe ein U-Wert von  $1,03 \text{ W/m}^2\text{K}$  statt  $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$  realistischer.

## 2. Wärmebrücken bei Bauteilübergängen

- Beim Fensteranschlag seitlich (Leibung) resultiert ein Wärmebrückenverlust  $\Psi_{\text{Einbau}}$  von 0,149 W/mK. Negativ wirkt sich das in Wärmeflussrichtung vorhandene Alublech aus.
- Bei ausspringenden Wanddecken resultiert ein Wärmebrückenverlust  $\Psi$  von 0,113 W/mK, wenn das Alublech nicht ausgeklinkt wird, was beim Pavillon der Fall ist. Durch Vermeidung des vom Warm- in den Kaltbereich verlaufenden Alubleches könnte der Wärmebrückenverlust  $\Psi$  auf -0,016 W/mK reduziert werden. Diese Wärmebrückenverluste dürften in etwa auch im Übergangsbereich Aussenwand/Boden und Aussenwand/Dach vorhanden sein.

Wir hoffen, Ihnen mit diesen Abklärungen zu dienen und verbleiben mit freundlichen Grüßen.

RAGONESI · STROBEL & PARTNER AG

Marco  Ragonesi, dipl. Architekt HTL

## Konstruktion



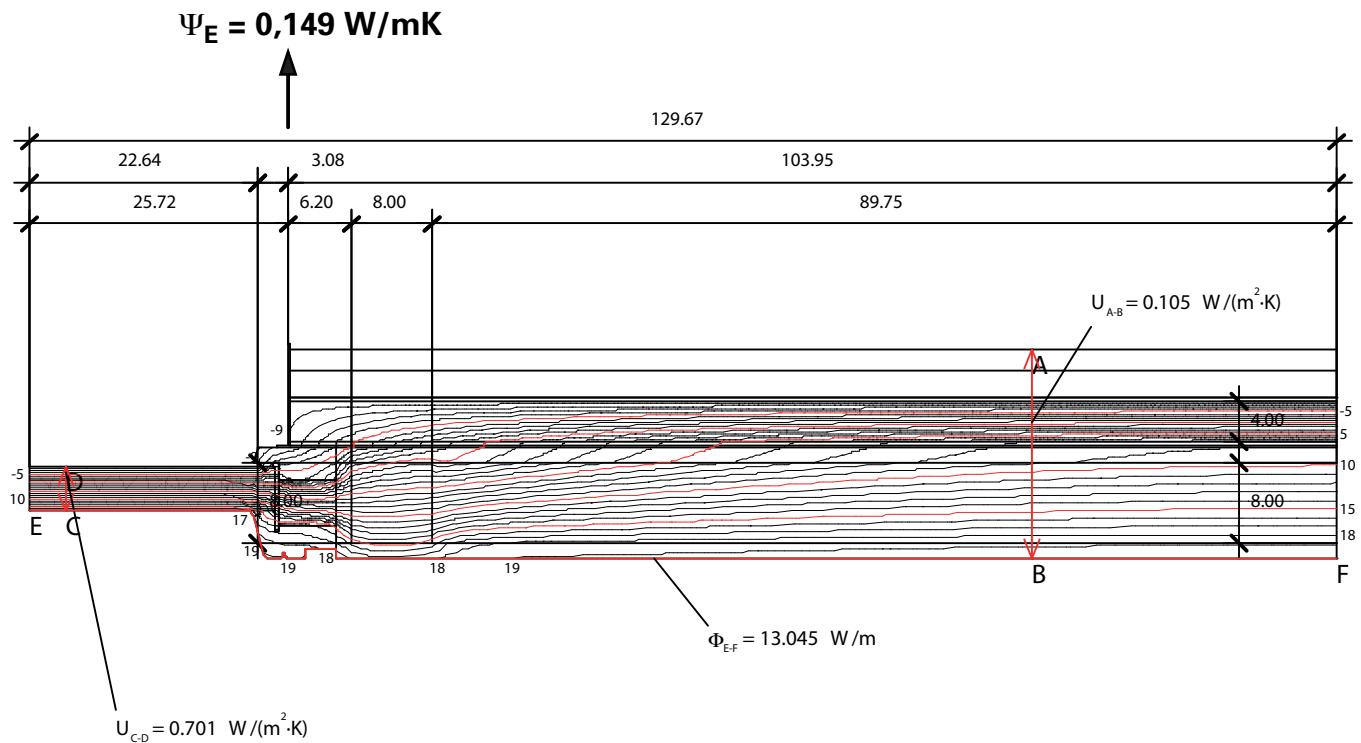
### Randbedingungen

|   | Name                       | q[W/m <sup>2</sup> ] | θ[°C]   | h[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|---|----------------------------|----------------------|---------|--------------------------|
| ■ | Aussen Standard            |                      | -10.000 | 25.000                   |
| ■ | Innen Standard             |                      | 20.000  | 7.700                    |
| ■ | Symmetrie/Perfekt isoliert | 0.000                |         |                          |

### Materialien

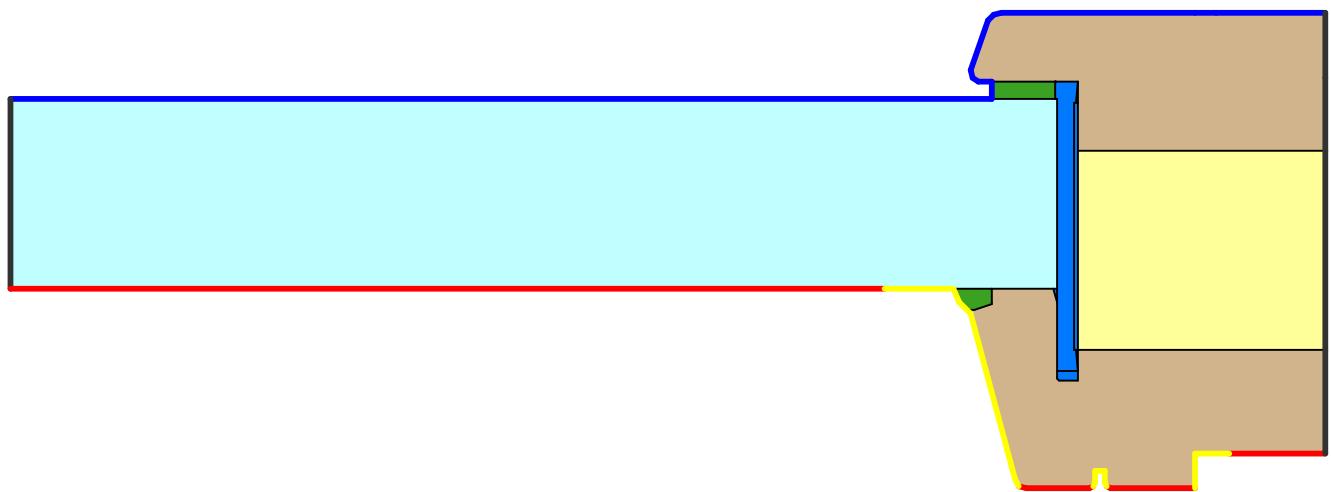
|   | Name                           | λ[W/(m·K)] |
|---|--------------------------------|------------|
| ■ | Aluminium                      | 160.000    |
| ■ | Durchlüftung 27 mm             | 0.375      |
| ■ | Fassadenbekleidung             | 9999.000   |
| ■ | Flumroc Typ 1                  | 0.036      |
| ■ | Gasersatz                      | 0.035      |
| ■ | Holzwerkstoffe                 | 0.140      |
| ■ | OSB-Platte                     | 0.120      |
| ■ | PUR-Fensterdämmung             | 0.025      |
| ■ | PUR-Platte                     | 0.070      |
| ■ | Pavatherm-Platte               | 0.048      |
| ■ | Silicagel (Trockenmittel) (1)  | 0.130      |
| ■ | Unbelüftete Hohlräume, Eps=0.9 |            |
| ■ | VIP-Wärmedämmeschicht          | 0.006      |

## Temperaturen



$$\Psi_E = \frac{13,045 - (1,0395 \cdot 0,105 \cdot 30) - (0,0308 \cdot 0,584 \cdot 30) - (0,2264 \cdot 0,701 \cdot 30)}{30} = 0,149 \text{ W/mK}$$

## Konstruktion



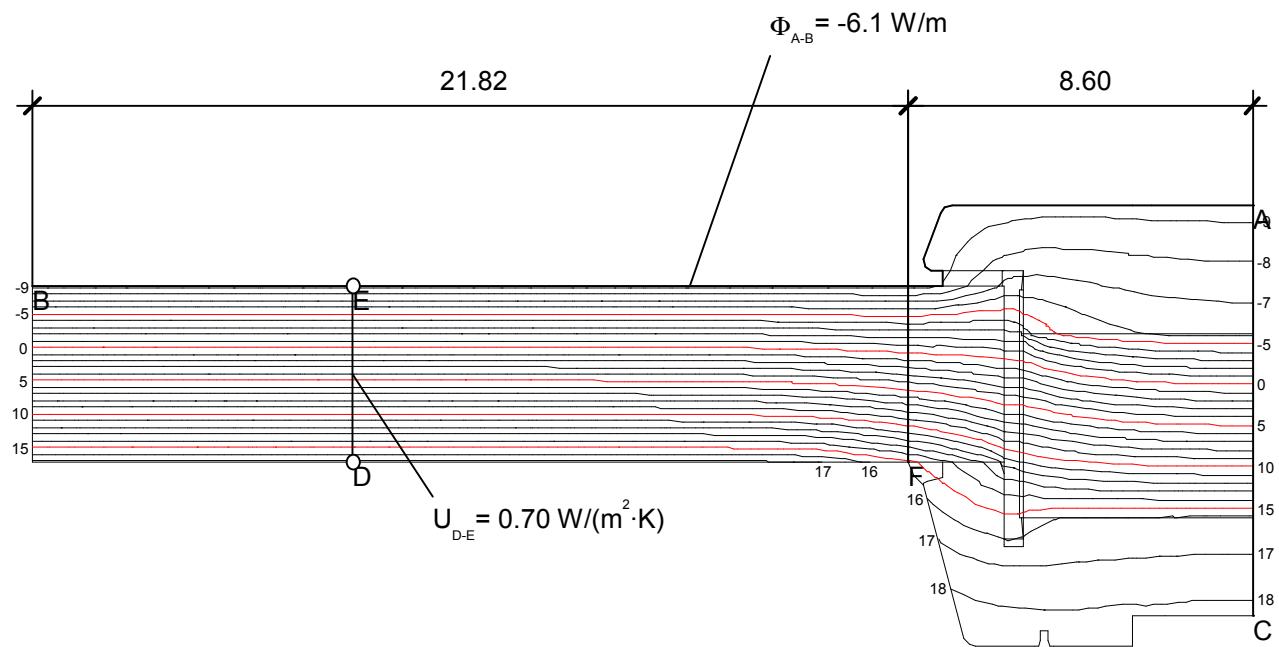
### Randbedingungen

| Name                          | q[W/m <sup>2</sup> ] | θ[°C]   | h[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|-------------------------------|----------------------|---------|--------------------------|
| Aussen Standard               |                      | -10.000 | 25.000                   |
| Innen Fensterrahmen Reduziert |                      | 20.000  | 5.000                    |
| Innen Fensterrahmen Standard  |                      | 20.000  | 7.692                    |
| Symmetrie/Perfekt isoliert    | 0.000                |         |                          |

### Materialien

| Name                           | λ[W/(m·K)] |
|--------------------------------|------------|
| Gasersatz                      | 0.035      |
| Holzwerkstoffe                 | 0.140      |
| PUR-Fensterdämmung             | 0.025      |
| Silicagel (Trockenmittel) (1)  | 0.130      |
| Unbelüftete Hohlräume, Eps=0.9 |            |

## Temperaturen



$$U_{fF} = \frac{\frac{\Phi}{\Delta T} - U_p \cdot b_p}{b_f} = \frac{\frac{-6.094}{-30.000} - 0.701 \cdot 0.218}{0.086} = 0.584 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

## Konstruktion



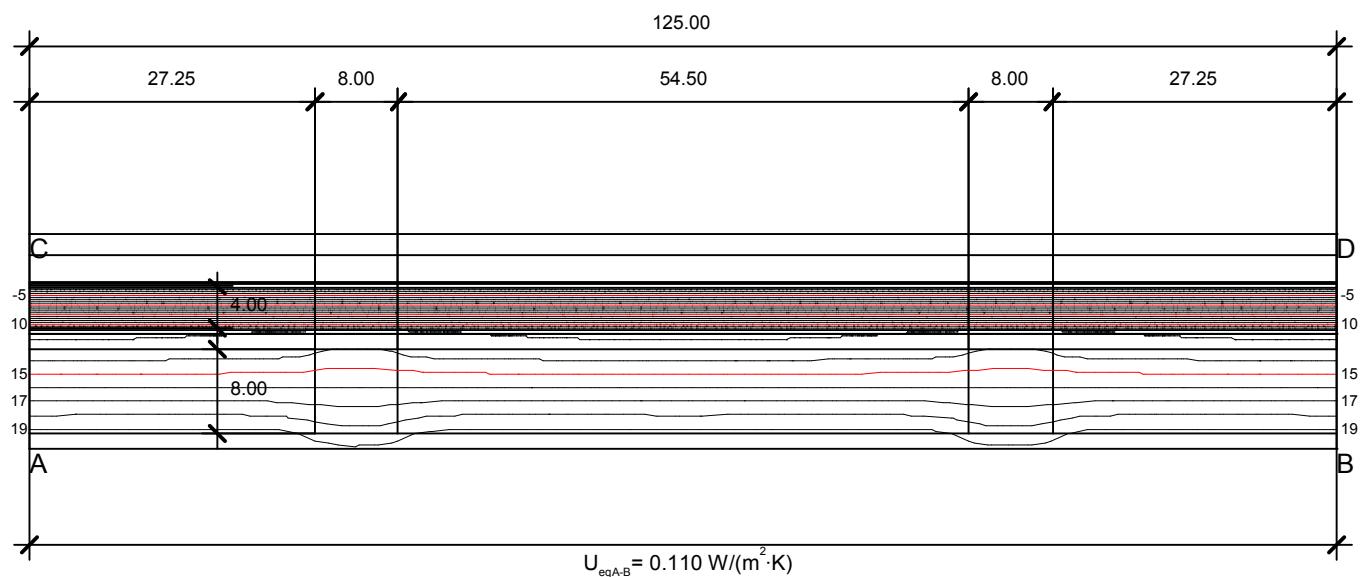
### Randbedingungen

|   | Name                       | q[W/m <sup>2</sup> ] | θ[°C]   | h[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|---|----------------------------|----------------------|---------|--------------------------|
| ■ | Aussen Standard            |                      | -10.000 | 25.000                   |
| ■ | Innen Standard             |                      | 20.000  | 7.700                    |
| ■ | Symmetrie/Perfekt isoliert | 0.000                |         |                          |

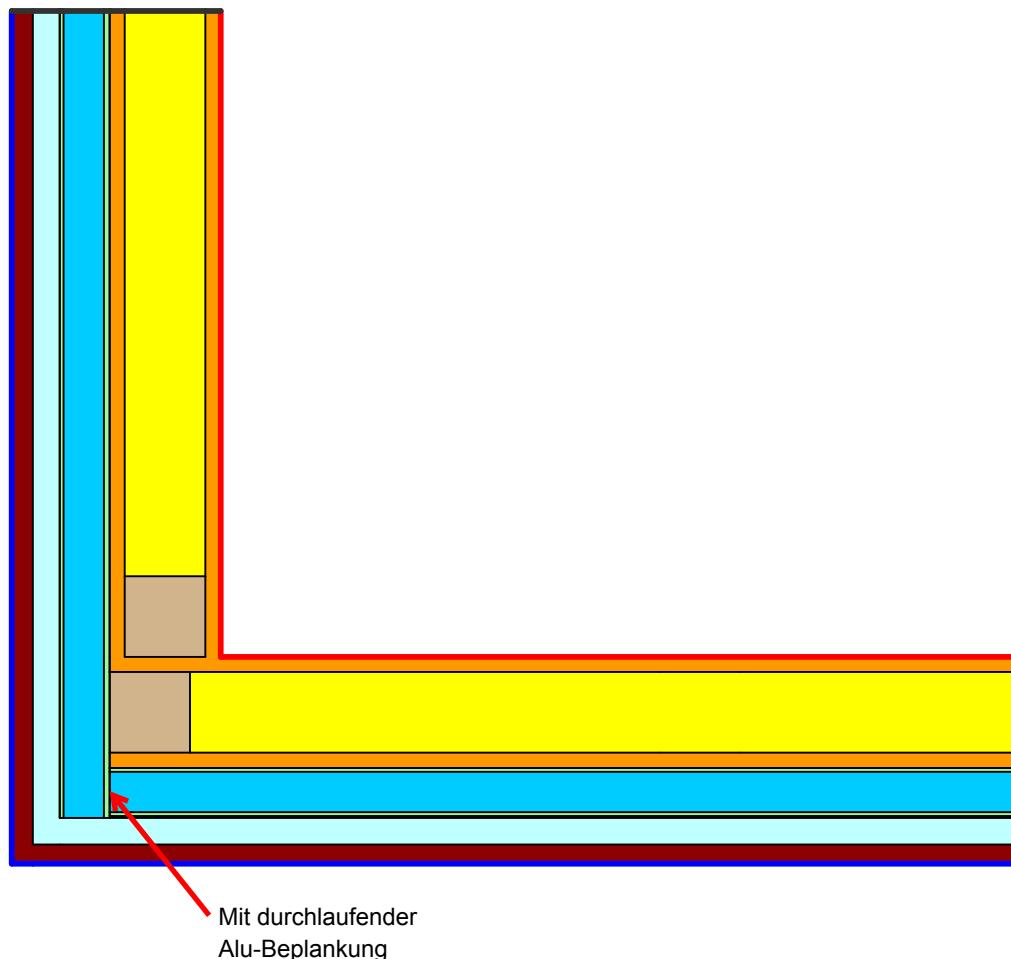
### Materialien

|   | Name                   | λ[W/(m·K)] |
|---|------------------------|------------|
| ■ | Aluminium              | 160.000    |
| ■ | Durchlüftung 27 mm     | 0.375      |
| ■ | Fassadenbekleidung     | 9999.000   |
| ■ | Flumroc Typ 1          | 0.036      |
| ■ | Holzwerkstoffe         | 0.140      |
| ■ | OSB-Platte             | 0.120      |
| ■ | PUR-Platte             | 0.070      |
| ■ | VIP-Wärmedämmenschicht | 0.006      |

## Temperaturen



## Konstruktion



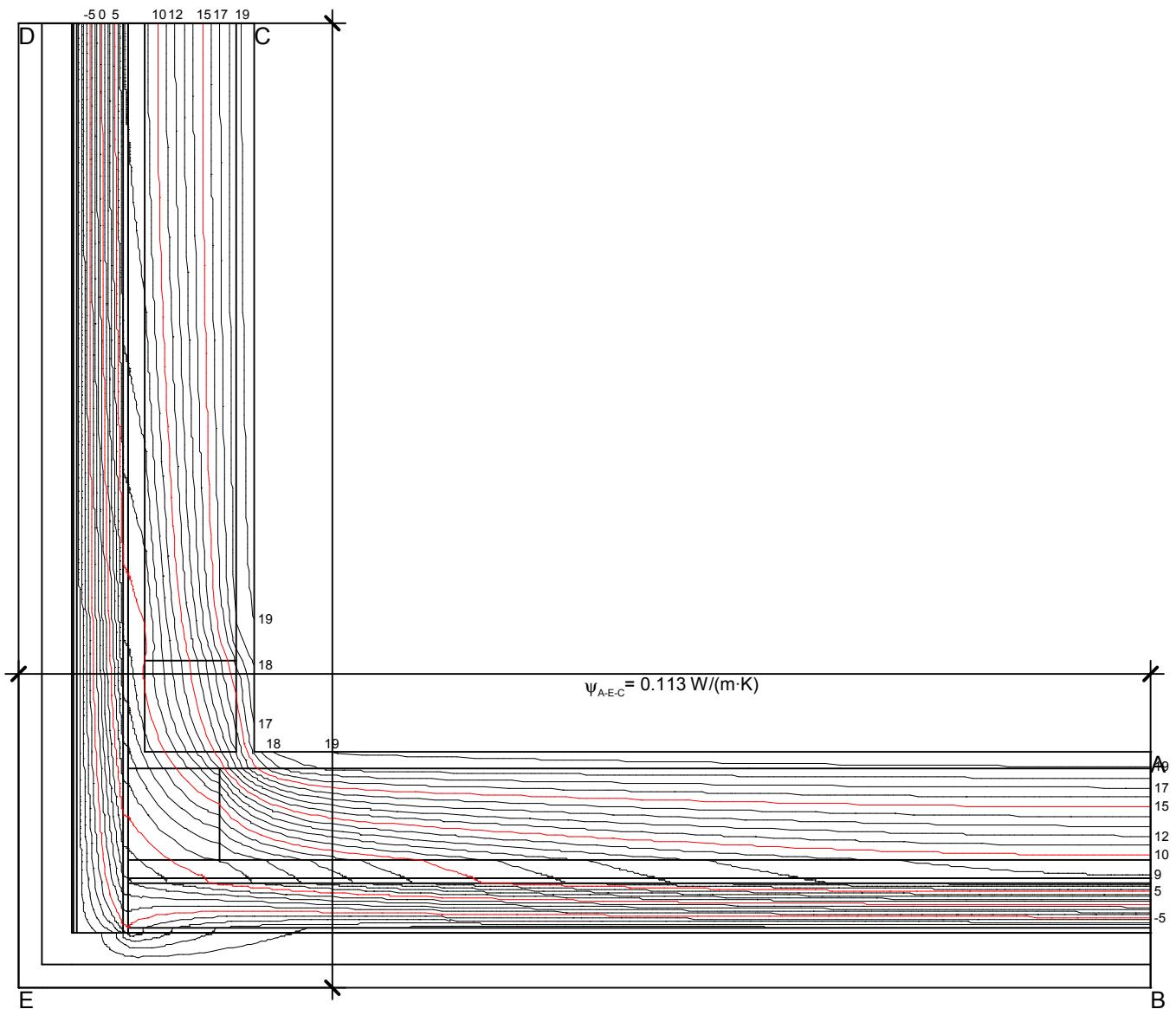
### Randbedingungen

| Name                       | $q[W/m^2]$ | $\theta[^{\circ}C]$ | $h[W/(m^2 \cdot K)]$ |
|----------------------------|------------|---------------------|----------------------|
| Aussen Standard            |            | -10.000             | 25.000               |
| Innen Standard             |            | 20.000              | 7.700                |
| Symmetrie/Perfekt isoliert | 0.000      |                     |                      |

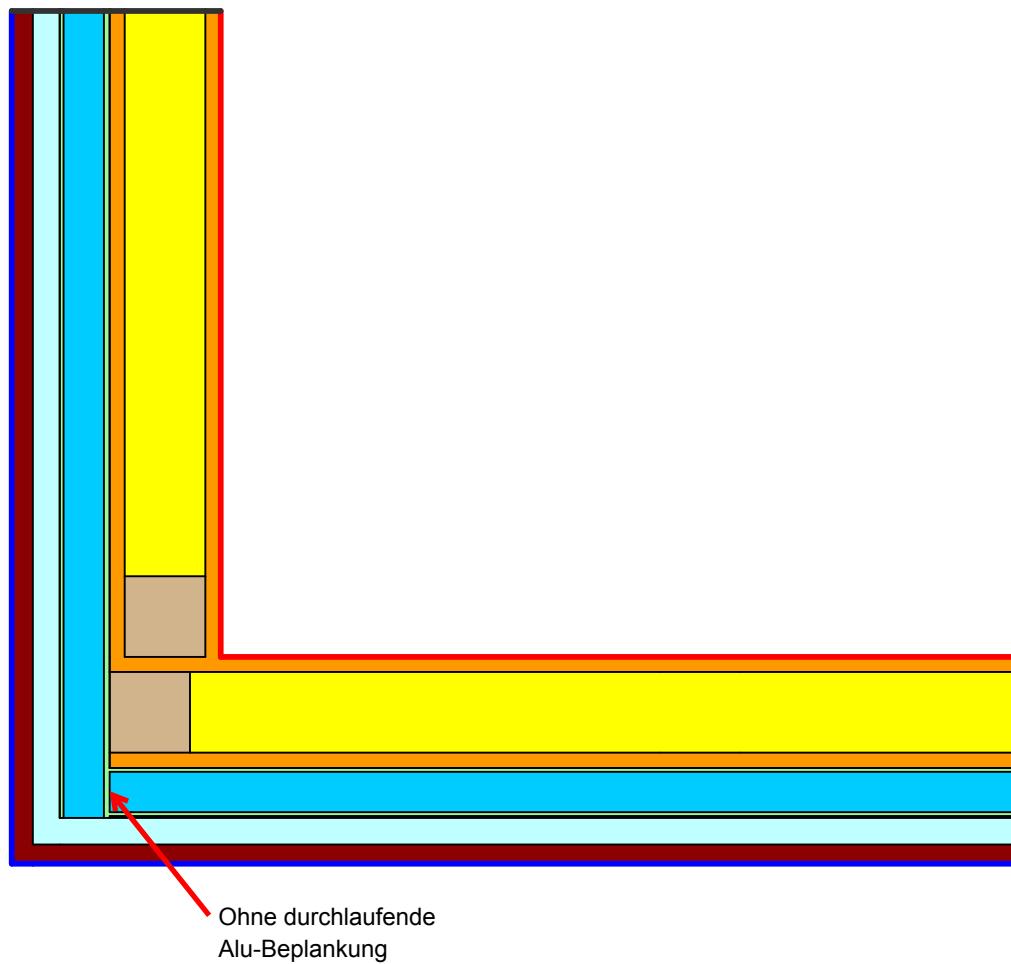
### Materialien

| Name                   | $\lambda[W/(m \cdot K)]$ |
|------------------------|--------------------------|
| Aluminium              | 160.000                  |
| Durchlüftung 27 mm     | 0.375                    |
| Fassadenbekleidung     | 9999.000                 |
| Flumroc Typ 1          | 0.036                    |
| Holzwerkstoffe         | 0.140                    |
| OSB-Platte             | 0.120                    |
| PUR-Platte             | 0.070                    |
| VIP-Wärmedämmenschicht | 0.006                    |

## Temperaturen



## Konstruktion



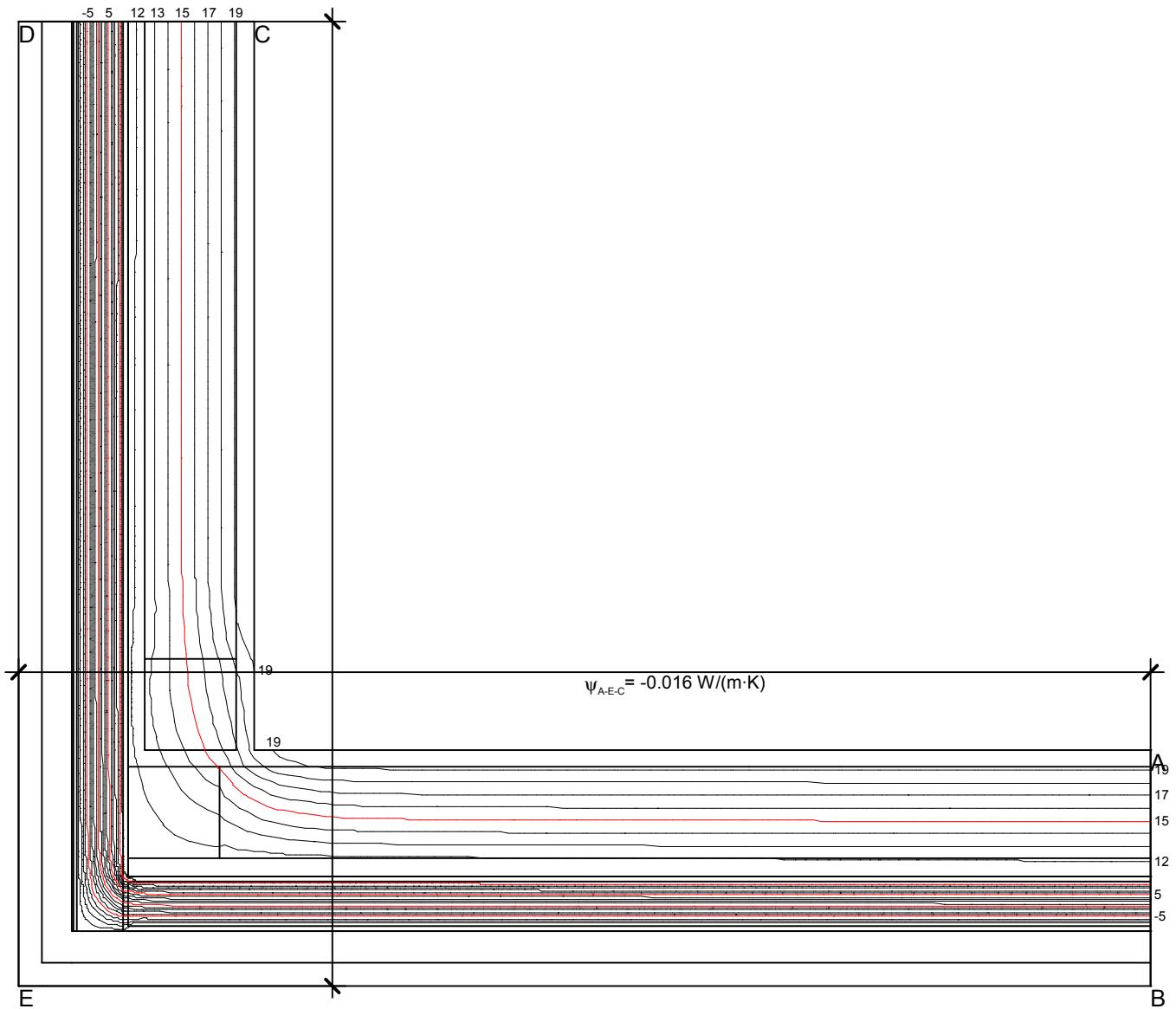
### Randbedingungen

| Name                       | $q[W/m^2]$ | $\theta[^{\circ}C]$ | $h[W/(m^2 \cdot K)]$ |
|----------------------------|------------|---------------------|----------------------|
| Aussen Standard            |            | -10.000             | 25.000               |
| Innen Standard             |            | 20.000              | 7.700                |
| Symmetrie/Perfekt isoliert | 0.000      |                     |                      |

### Materialien

| Name                   | $\lambda[W/(m \cdot K)]$ |
|------------------------|--------------------------|
| Aluminium              | 160.000                  |
| Durchlüftung 27 mm     | 0.375                    |
| Fassadenbekleidung     | 9999.000                 |
| Flumroc Typ 1          | 0.036                    |
| Holzwerkstoffe         | 0.140                    |
| OSB-Platte             | 0.120                    |
| PUR-Platte             | 0.070                    |
| VIP-Wärmedämmenschicht | 0.006                    |

## Temperaturen



## Konstruktion



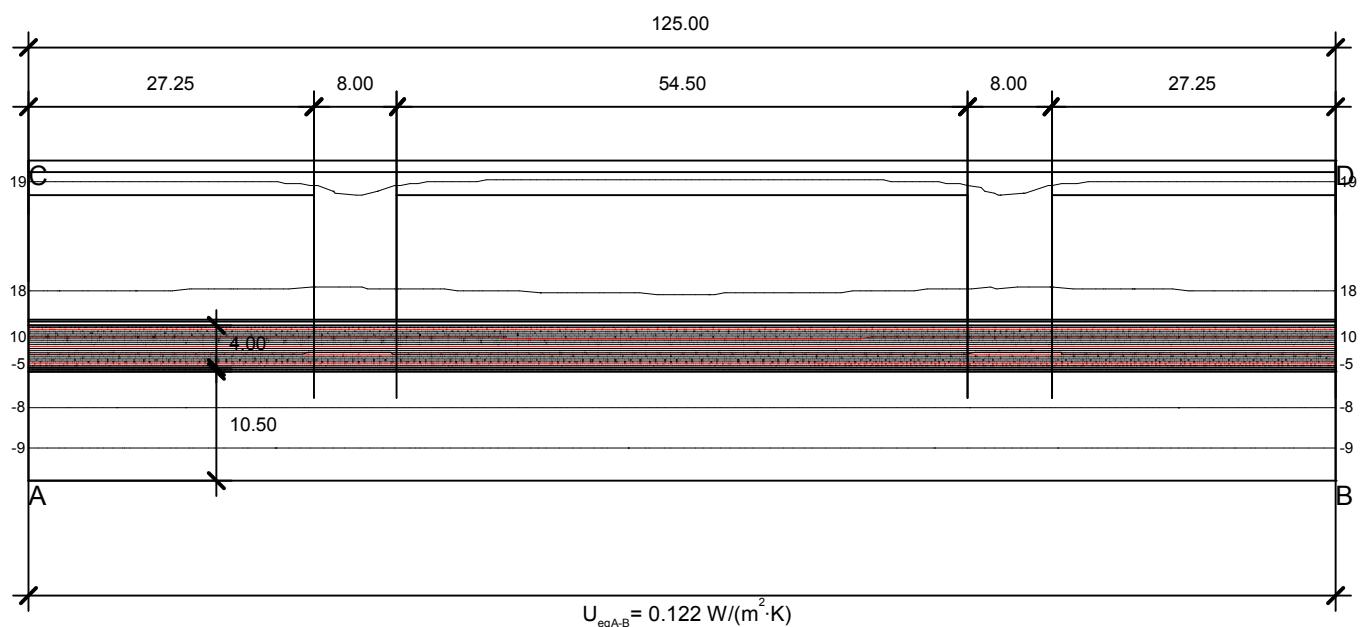
### Randbedingungen

|   | Name                       | q[W/m <sup>2</sup> ] | θ[°C]   | h[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|---|----------------------------|----------------------|---------|--------------------------|
| ■ | Aussen Standard            |                      | -10.000 | 25.000                   |
| ■ | Innen Standard             |                      | 20.000  | 7.700                    |
| ■ | Symmetrie/Perfekt isoliert | 0.000                |         |                          |

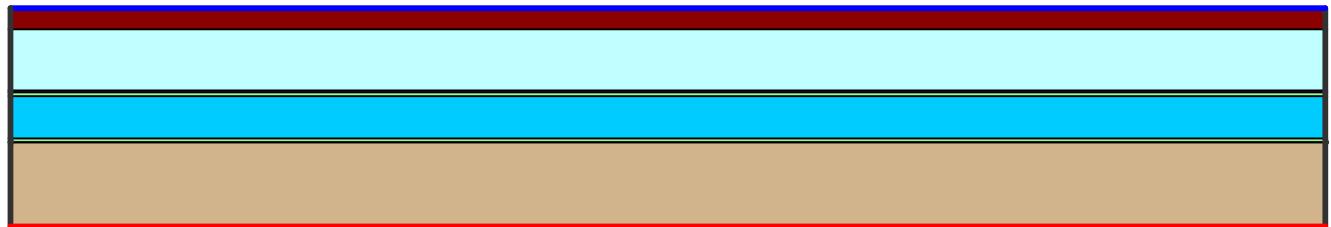
### Materialien

|   | Name                           | λ[W/(m·K)] |
|---|--------------------------------|------------|
| ■ | Aluminium                      | 160.000    |
| ■ | Holzwerkstoffe                 | 0.140      |
| ■ | PUR-Platte                     | 0.070      |
| ■ | Parkettboden                   | 0.140      |
| ■ | Unbelüftete Hohlräume, Eps=0.9 |            |
| ■ | VIP-Wärmedämmeschicht          | 0.006      |

## Temperaturen



## Konstruktion



### Randbedingungen

|   | Name                       | q[W/m <sup>2</sup> ] | θ[°C]   | h[W/(m <sup>2</sup> ·K)] |
|---|----------------------------|----------------------|---------|--------------------------|
| ■ | Aussen Standard            |                      | -10.000 | 25.000                   |
| ■ | Innen Standard             |                      | 20.000  | 7.700                    |
| ■ | Symmetrie/Perfekt isoliert | 0.000                |         |                          |

### Materialien

|   | Name                          | λ[W/(m·K)] |
|---|-------------------------------|------------|
| ■ | Aluminium                     | 160.000    |
| ■ | Durchlüftung 60 mm            | 0.750      |
| ■ | Holzwerkstoffe                | 0.140      |
| ■ | PUR-Platte                    | 0.070      |
| ■ | Unterlüftete Verlegeunterlage | 9999.000   |
| ■ | VIP-Wärmedämmeschicht         | 0.006      |

## Temperaturen

