



# DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

## „Entwicklung eines Außenwandziegels mit integriertem Vakuum-Isolations-Paneel“

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-  
Ingenieurs unter der Leitung von

**o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.DDr. Jürgen Dreyer**  
**Univ.Ass.Dipl.-Ing.Dr.techn. Azra Korjenic**

E206

Institut für Hochbau und Technologie  
Zentrum für Bauphysik und Bauakustik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Christoph Lang**

E610/ 0225979

Sturzgasse 29/2

A-1150 Wien

Wien, im Mai 2007

.....

## **KURZFASSUNG**

Die Diplomarbeit beinhaltet eine umfangreiche, einleitende Literaturrecherche zum allgemeinen Themengebiet der Dämmstoffe. Hierbei wird besonderes Augenmerk auf alternative, neuartige und vor allem innovative Dämmsysteme gelegt, was die Überleitung zum eigentlichen Hauptteil der Arbeit darstellt. Neben Calciumsilicat und transparenter Wärmedämmung wurde insbesondere auf Vakuumdämmungen und die hiermit bisher gesammelten Erfahrungen im Bauwesen detailliert eingegangen.

Eigentliches Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Hochlochziegels mit integrierten und dadurch geschützten Vakuum-Isolations-Paneelen im Inneren. Frühere Ergebnisse anderer Forschungseinrichtungen und Ziegelproduzenten waren entweder wenig erfolgreich hinsichtlich des erreichbaren Wärmedämmvermögens oder die Paneele waren nicht im Ziegel integriert, sondern nur zwischen zwei Ziegellagen als Sandwichelement eingelegt worden. Das widerspricht jedoch einer der wichtigsten Grundregeln bei der Verwendung von Vakuumdämmpaneelen am Bau: Nach Möglichkeit Produktion von Fertigteilen zum Schutz vor mechanischer Beschädigung beim Einbau auf der Baustelle.

Diese Arbeit stellt nun eine Untersuchung zur Machbarkeit und praktischen Anwendbarkeit eines Ziegels dar, der diese Forderung einhält. Besondere Beachtung kommt, neben der hygrothermischen Funktionalität, auch der baupraktischen Anwendung und Ausbildung von Details zu.

## **ABSTRACT**

This Master's Thesis contains comprehensive literary investigations about the general subject area of insulations. The attention is mainly directed to alternative, novel and especially innovative systems, which actually lead over to the main part of this thesis. In addition to calcium silicate and transparent insulations, vacuum insulations and its previous experiences at construction sites have been at the focus of attention.

Main goal of this investigation is the development of a brick that includes a vacuum insulation panel in a way that it is protected from mechanic damages. Former results found by other research institutes or brick producing companies have not been very successful because of the low insulation ability or missing integration into the brick. Panels have been put in between of two brick layers as a sandwich element without any protection, but that is inconsistent with one of the most important basic rules, used at constructions including vacuum insulations: Whenever possible, pre-fabricated elements should be used to avoid mechanic damages to the panels.

So this thesis is an analysis of possibility and practical application of a brick that considers this demand. Special importance is attached to hygrothermal function, practical use und design of construction details.

## **DANKSAGUNG**

Hiermit möchte ich o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.DDr. Jürgen Dreyer für die Möglichkeit danken, meine Diplomarbeit am Institut für Hochbau – Zentrum für Bauphysik und Bauakustik schreiben zu dürfen. Insbesondere darf ich mich bei meiner Betreuerin Univ.Ass.Dipl.-Ing.Dr.techn. Azra Korjenic für ihre Unterstützung bedanken. Sie hat sich oft, trotz diverser weiterer Verpflichtungen, Zeit genommen und ist mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

An dieser Stelle darf ich außerdem meinen Eltern und auch Großeltern danken. Sie haben mir in vielfacher Form dabei geholfen, mein Ziel – die Erlangung eines Hochschulabschlusses – zu erreichen.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Freundin, die, aufgrund meines sehr ausgeprägten Ehrgeizes und der damit verbundenen – oft kaum zu bewältigenden – Menge an vorgenommener Arbeit, viele moralische Tiefpunkte während unserer gemeinsamen Studienzeit aufgefangen hat und mir immer wieder die bereits erbrachten Leistungen vor Augen geführt hat.

# INHALTSVERZEICHNIS

|          |                                                                           |          |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>EINLEITUNG</b>                                                         | <b>1</b> |
| 1.1      | Zielsetzung                                                               | 1        |
| 1.2      | Problemstellung                                                           | 1        |
| <b>2</b> | <b>DÄMMSTOFFE UND -SYSTEME</b>                                            | <b>2</b> |
| 2.1      | Geschichtlicher Hintergrund                                               | 2        |
| 2.2      | Unterscheidung nach deren Lage im, bzw. am Bauteil                        | 3        |
| 2.2.1    | Außendämmung                                                              | 3        |
| 2.2.2    | Innendämmung                                                              | 5        |
| 2.2.3    | Kerndämmung                                                               | 7        |
| 2.3      | Einteilung der Dämmstoffe                                                 | 7        |
| 2.4      | Ein Überblick über konventionelle Dämmstoffe                              | 7        |
| 2.4.1    | Mineralwolle                                                              | 7        |
| 2.4.2    | Schaumglas                                                                | 9        |
| 2.4.3    | Blähton                                                                   | 10       |
| 2.4.4    | Perlite                                                                   | 11       |
| 2.4.5    | Vermiculit                                                                | 12       |
| 2.4.6    | Polystyrol                                                                | 12       |
| 2.4.7    | Polyurethan                                                               | 13       |
| 2.4.8    | Zellulose                                                                 | 14       |
| 2.4.9    | Holzwoleleichtbauplatten                                                  | 15       |
| 2.5      | Ein Überblick über alternative Natur-Dämmstoffe                           | 16       |
| 2.5.1    | Holzweichfaserplatten                                                     | 17       |
| 2.5.2    | Kokosfasern                                                               | 18       |
| 2.5.3    | Kork                                                                      | 18       |
| 2.5.4    | Baumwolle                                                                 | 20       |
| 2.5.5    | Schafwolle                                                                | 21       |
| 2.5.6    | Flachs/ Hanf                                                              | 22       |
| 2.5.7    | Schilfrohr                                                                | 23       |
| 2.5.8    | Ökologische Bewertung der bisher genannten Dämmstoffe                     | 24       |
| 2.6      | Detaillierte Betrachtung ausgewählter moderner Dämmstoffe und Dämmsysteme | 25       |
| 2.6.1    | Vakuumdämmung                                                             | 25       |
| 2.6.2    | Calciumsilikat (CaSi)                                                     | 54       |
| 2.6.3    | Transparente Wärmedämmung                                                 | 63       |

|             |                                                                                                        |            |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3</b>    | <b>ENTWICKLUNG EINES HOCHLOCHZIEGELS MIT INTEGRIERTEN VAKUUM-ISOLATIONS-PANEELEN</b>                   | <b>69</b>  |
| <b>3.1</b>  | <b>Funktionsprinzip des VIP-Ziegels</b>                                                                | <b>69</b>  |
| 3.1.1       | Grundidee                                                                                              | 69         |
| 3.1.2       | Problematik                                                                                            | 69         |
| 3.1.3       | Ziegel als Wandbildner                                                                                 | 71         |
| <b>3.2</b>  | <b>Bisherige Versuche von VIP-Ziegeln</b>                                                              | <b>73</b>  |
| <b>3.3</b>  | <b>Anforderungen an den VIP-Ziegel</b>                                                                 | <b>77</b>  |
| 3.3.1       | Grundsätze für die Verwendung von VIP                                                                  | 77         |
| 3.3.2       | Voraussetzungen für die Funktionalität des Bausystems in der Baupraxis                                 | 79         |
| <b>3.4</b>  | <b>Vor-/ Nachteile eines VIP-Ziegels im Vergleich zu VWS mit integriertem VIP</b>                      | <b>81</b>  |
| <b>3.5</b>  | <b>Simulation des Feuchtigkeitsverhaltens und der Wärmeströme im VIP-Ziegel</b>                        | <b>82</b>  |
| 3.5.1       | WUFI2D                                                                                                 | 82         |
| 3.5.2       | THERM 5                                                                                                | 84         |
| <b>3.6</b>  | <b>Der Entwicklungsprozess des VIP-Ziegels</b>                                                         | <b>87</b>  |
| 3.6.1       | Variante 1                                                                                             | 87         |
| 3.6.2       | Variante 1a                                                                                            | 94         |
| 3.6.3       | Variante 2                                                                                             | 98         |
| 3.6.4       | Variante 2a                                                                                            | 103        |
| 3.6.5       | Varianten 3, 4                                                                                         | 106        |
| 3.6.6       | Variante 5                                                                                             | 108        |
| 3.6.7       | Variante 5 – konstant 70% relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum                                       | 113        |
| 3.6.8       | Variante 6                                                                                             | 116        |
| <b>3.7</b>  | <b>Gegenüberstellung und Diskussion der Varianten</b>                                                  | <b>121</b> |
| <b>3.8</b>  | <b>Verbesserungsvorschläge</b>                                                                         | <b>125</b> |
| 3.8.1       | Verringerung des Wärmeverlustes durch größere Überlappung im Stoßstellenbereich                        | 125        |
| 3.8.2       | Verringerung des Wärmeverlustes durch mittige Paneele und Zusatzdämmung im Bereich des stumpfen Stoßes | 132        |
| <b>3.9</b>  | <b>Die praktische Verwendung des Mauersteins auf der Baustelle am Beispiel von Variante 5</b>          | <b>142</b> |
| 3.9.1       | Schritte 1 bis 6 – Rohbau                                                                              | 142        |
| 3.9.2       | Schritte 7 bis 9 – Ausbau                                                                              | 144        |
| 3.9.3       | Details                                                                                                | 146        |
| <b>3.10</b> | <b>Schlussfolgerung</b>                                                                                | <b>157</b> |
|             | <b>QUELLENVERZEICHNIS</b>                                                                              | <b>158</b> |

|                 |                                                                 |           |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Anhang A</b> | <b>Berechnungsergebnisse ausgewählter Varianten aus WUFI-2D</b> | <b>1</b>  |
| <b>A.1</b>      | <b>Variante 1</b>                                               | <b>1</b>  |
| <b>A.1.1</b>    | <b>Eingabe der Konstruktion</b>                                 | <b>1</b>  |
| <b>A.1.2</b>    | <b>Wassergehalte der einzelnen Materialschichten</b>            | <b>2</b>  |
| <b>A.1.3</b>    | <b>Temperaturverteilung der Monitorpositionen</b>               | <b>2</b>  |
| <b>A.1.4</b>    | <b>Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen</b>   | <b>4</b>  |
| <b>A.1.5</b>    | <b>Wassergehalt der Monitorpositionen</b>                       | <b>5</b>  |
| <b>A.2</b>      | <b>Variante 1a</b>                                              | <b>8</b>  |
| <b>A.2.1</b>    | <b>Eingabe der Konstruktion</b>                                 | <b>8</b>  |
| <b>A.2.2</b>    | <b>Wassergehalte der einzelnen Materialschichten</b>            | <b>8</b>  |
| <b>A.2.3</b>    | <b>Temperaturverteilung der Monitorpositionen</b>               | <b>8</b>  |
| <b>A.2.4</b>    | <b>Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen</b>   | <b>9</b>  |
| <b>A.2.5</b>    | <b>Wassergehalt der Monitorpositionen</b>                       | <b>10</b> |
| <b>A.3</b>      | <b>Variante 2a</b>                                              | <b>13</b> |
| <b>A.3.1</b>    | <b>Eingabe der Konstruktion</b>                                 | <b>13</b> |
| <b>A.3.2</b>    | <b>Wassergehalte der einzelnen Materialschichten</b>            | <b>14</b> |
| <b>A.3.3</b>    | <b>Temperaturverteilung der Monitorpositionen</b>               | <b>14</b> |
| <b>A.3.4</b>    | <b>Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen</b>   | <b>16</b> |
| <b>A.3.5</b>    | <b>Wassergehalt der Monitorpositionen</b>                       | <b>17</b> |
| <b>A.4</b>      | <b>Variante 5</b>                                               | <b>20</b> |
| <b>A.4.1</b>    | <b>Eingabe der Konstruktion</b>                                 | <b>20</b> |
| <b>A.4.2</b>    | <b>Wassergehalte der einzelnen Materialschichten</b>            | <b>21</b> |
| <b>A.4.3</b>    | <b>Temperaturverteilung der Monitorpositionen</b>               | <b>21</b> |
| <b>A.4.4</b>    | <b>Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen</b>   | <b>22</b> |
| <b>A.4.5</b>    | <b>Wassergehalt der Monitorpositionen</b>                       | <b>23</b> |

|                 |                                                                                                                       |           |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>A.5</b>      | <b>Variante 5 – konstant 70% relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum</b>                                               | <b>25</b> |
| <b>A.5.1</b>    | <b>Eingabe der Konstruktion</b>                                                                                       | <b>25</b> |
| <b>A.5.2</b>    | <b>Abweichende Randbedingungen an der Raumseite</b>                                                                   | <b>25</b> |
| <b>A.5.3</b>    | <b>Wassergehalte der einzelnen Materialschichten</b>                                                                  | <b>26</b> |
| <b>A.5.4</b>    | <b>Temperaturverteilung der Monitorpositionen</b>                                                                     | <b>26</b> |
| <b>A.5.5</b>    | <b>Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen</b>                                                         | <b>27</b> |
| <b>A.5.6</b>    | <b>Wassergehalt der Monitorpositionen</b>                                                                             | <b>28</b> |
| <b>A.6</b>      | <b>Variante 6</b>                                                                                                     | <b>30</b> |
| <b>A.6.1</b>    | <b>Eingabe der Konstruktion</b>                                                                                       | <b>30</b> |
| <b>A.6.2</b>    | <b>Wassergehalte der einzelnen Materialschichten</b>                                                                  | <b>31</b> |
| <b>A.6.3</b>    | <b>Temperaturverteilung der Monitorpositionen</b>                                                                     | <b>31</b> |
| <b>A.6.4</b>    | <b>Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen</b>                                                         | <b>33</b> |
| <b>A.6.5</b>    | <b>Wassergehalt der Monitorpositionen</b>                                                                             | <b>34</b> |
| <b>Anhang B</b> | <b>Berechnungsergebnisse ausgewählter Varianten aus THERM 5</b>                                                       | <b>1</b>  |
| <b>B.1</b>      | <b>Variante 3</b>                                                                                                     | <b>1</b>  |
| <b>B.2</b>      | <b>Variante 4</b>                                                                                                     | <b>2</b>  |
| <b>B.3</b>      | <b>Variante 7_3</b>                                                                                                   | <b>3</b>  |
| <b>B.4</b>      | <b>Variante 8_3</b>                                                                                                   | <b>4</b>  |
| <b>B.5</b>      | <b>Variante 10_16</b>                                                                                                 | <b>5</b>  |
| <b>Anhang C</b> | <b>Darstellungen der U- Werte und Schichtstärken der Varianten und Verbesserungsvorschläge in tabellarischer Form</b> | <b>1</b>  |

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Ökologische Bewertung [Hae96]                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 24 |
| Abbildung 2: Aufbau eines VIP [Bin05 von: va-Q-tec]                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 27 |
| Abbildung 3: Wärmebrückenwirkung durch den Randverbund der Hülle am Beispiel von zwei verschiedenen VIP- Dimensionen (Messung/Grafik EMPA) [Bin02]                                                                                                                                                                                            | 29 |
| Abbildung 4: Fassade mit vorfabrizierten Wärmedämmelementen in Binningen/ Schweiz                                                                                                                                                                                                                                                             | 29 |
| Abbildung 5: Wärmetransportprozesse von Dämmmaterialien mit Zellstruktur (Konvektion findet im betrachteten Zellgrößenbereich nicht statt) [Bin02]                                                                                                                                                                                            | 30 |
| Abbildung 6: Schematische Darstellung des Wärmebrücken- Randeffektes im Rand- bzw. Stoßbereich [Bin05]                                                                                                                                                                                                                                        | 31 |
| Abbildung 7: Numerisch ermittelter Einfluss der Paneeldicke $d$ auf den längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizienten $\psi_{VIP}$ [Bin05]                                                                                                                                                                                                        | 32 |
| Abbildung 8: Effektive Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{eff}$ in Abhängigkeit verschiedener angrenzender Materialien und unterschiedlicher Paneelgrößen [Bin05]                                                                                                                                                                                   | 33 |
| Abbildung 9: links: Alterungskenndaten für $SiO_2$ - VIP mit polymerbasierten, mehrfach metallisierten Hüllfolien (Werte auf sicherer Seite); rechts: Schweizerische Planwerte (Werte auf sicherer Seite) der center-of-panel Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{cop}$ für Aluminium und polymerbasierte, mehrfach metallisierte Hüllfolien [Vip06] | 34 |
| Abbildung 10: Beispiel für eine Hinweisplakette (VIP inside) [Bin05]                                                                                                                                                                                                                                                                          | 36 |
| Abbildung 11: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Kernmaterialien als Funktion des Zellgasdruckes [Bin02]                                                                                                                                                                                                                                        | 38 |
| Abbildung 12: Qualitätskontrolle durch va-Q-check [Vaq07a]                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 39 |
| Abbildung 13: Messung des Wärmestroms [Vaq07a]                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 39 |
| Abbildung 14: Einbau von VIP in Dachterrassen [Bin05]                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 40 |
| Abbildung 15: Konstruktionsskizze des vakuumgedämmten Fußbodens mit FB- Heizung [Zae03]                                                                                                                                                                                                                                                       | 41 |
| Abbildung 16: Vorfabrizierte Lukarnenkonstruktion [Bin05 von: Architekt Viriden + Partner, Zürich]                                                                                                                                                                                                                                            | 42 |
| Abbildung 17: Konstruktionsskizze des verwendeten VIP- WDVS mit Kunststoffschienen [Zae03]                                                                                                                                                                                                                                                    | 43 |
| Abbildung 18: Konstruktionsskizze der vakuumgedämmten Holzlattungskonstruktion [Zae03]                                                                                                                                                                                                                                                        | 45 |
| Abbildung 19: Konstruktionsskizze der austauschbaren Fassadenkonstruktion (Nordseite) [Zae03]                                                                                                                                                                                                                                                 | 47 |
| Abbildung 20: Konstruktionsskizze der austauschbaren Fassadenkonstruktion (Südseite) [Zae03]                                                                                                                                                                                                                                                  | 48 |
| Abbildung 21: Vergleich der Wirkkategorien für die Dämmmaterialien Glaswolle, Polystyrol EPS und VIP nach der Methode Eco-indicator 99 [Bin05 aus: Sch03]                                                                                                                                                                                     | 53 |
| Abbildung 22: Vergleich der Wirkkategorien für die Dämmmaterialien Glaswolle, Polystyrol EPS und VIP nach der Methode der ökologischen Knappheit mit Umweltbelastungspunkten UBP 97 [Bin05 aus: Sch03]                                                                                                                                        | 53 |
| Abbildung 23: links: ungedämmte Wand; rechts: gedämmte Wand [Dre06c]                                                                                                                                                                                                                                                                          | 59 |
| Abbildung 24: Detaillösung: Fugenbereich mit CaSi- Platten zwischen VIPs [Dre06c]                                                                                                                                                                                                                                                             | 59 |
| Abbildung 25: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit im Wand- QS direkt hinter der Vakuumdämmung unter Annahme einer hohen Regenbelastung auf die unverputzte Fassade [Dre06c]                                                                                                                                                 | 60 |
| Abbildung 26: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit im Wand- QS direkt hinter der Vakuumdämmung unter Annahme einer extrem geringen Regenbelastung (Ostfassade) auf die unverputzte Fassade [Dre06c]                                                                                                                          | 60 |
| Abbildung 27: Wärmegewinne bei einer konventionellen Wand mit VWS (links) und einer Wand mit TWD (rechts) [Ene07]                                                                                                                                                                                                                             | 65 |
| Abbildung 28: Funktionsweise des VIP-Ziegels [eigene Abb.]                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 71 |

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 29: Kombination von VIP mit Ziegel vom ZAE- Bayern (Messe BAU 2001) [Scu03], [Zae06]                                                                                                                  | 74  |
| Abbildung 30: Edelstahlklammer zur Verbindung der Ziegelscharen [Scu03]                                                                                                                                         | 75  |
| Abbildung 31: Zweischaliger Mauerstein mit Edelstahlklammern verbunden [Scu03]                                                                                                                                  | 76  |
| Abbildung 32: VIPs in Kammern eines Mauersteins integriert [Scu03]                                                                                                                                              | 76  |
| Abbildung 33: Großformatiger Ziegel mit VIP in Kammern [Scu03]                                                                                                                                                  | 77  |
| Abbildung 34: Innenklima [eigene Abb.]                                                                                                                                                                          | 83  |
| Abbildung 35: Außenklima [eigene Abb.]                                                                                                                                                                          | 84  |
| Abbildung 36: Randbedingungen innen und außen [eigene Abb.]                                                                                                                                                     | 85  |
| Abbildung 37: Variante 1 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]                                                                                                                                                          | 87  |
| Abbildung 38: Konstruktion Variante 1 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]                                                                                                                                       | 89  |
| Abbildung 39: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]                                                                                                                                                  | 90  |
| Abbildung 40: relative Luftfeuchtigkeit/ Temperatur Monitor 10 (Innenoberfläche) [eigene Abb.]                                                                                                                  | 91  |
| Abbildung 41: relative Luftfeuchtigkeit/ Temperatur Monitors 1, 8 (Außenseite der VIPs) [eigene Abb.]                                                                                                           | 92  |
| Abbildung 42: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]                   | 93  |
| Abbildung 43: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]                                                                                                                                                  | 95  |
| Abbildung 44: relative Luftfeuchtigkeit/ Temperatur Monitors 1, 8 (Außenseite der VIPs) [eigene Abb.]                                                                                                           | 96  |
| Abbildung 45: Variante 2 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]                                                                                                                                                          | 98  |
| Abbildung 46: Konstruktion Variante 2 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]                                                                                                                                       | 100 |
| Abbildung 47: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]                                                                                                                                                  | 101 |
| Abbildung 48: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]                   | 102 |
| Abbildung 49: Konstruktion Variante 2a mit Monitorpositionen [eigene Abb.]                                                                                                                                      | 103 |
| Abbildung 50: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]                                                                                                                                                  | 104 |
| Abbildung 51: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]                   | 105 |
| Abbildung 52: Varianten 3 und 4 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]                                                                                                                                                   | 106 |
| Abbildung 53: Variante 5 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]                                                                                                                                                          | 108 |
| Abbildung 54: Konstruktion Variante 5 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]                                                                                                                                       | 109 |
| Abbildung 55: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]                                                                                                                                                  | 110 |
| Abbildung 56: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]                   | 111 |
| Abbildung 57: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen und Ecktemperatur; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.] | 112 |
| Abbildung 58: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]                                                                                                                                                  | 114 |
| Abbildung 59: relative Luftfeuchtigkeit/ Temperatur Monitors 3, 7 (Innenoberfläche) [eigene Abb.]                                                                                                               | 115 |
| Abbildung 60: Variante 6 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]                                                                                                                                                          | 116 |
| Abbildung 61: Konstruktion Variante 6 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]                                                                                                                                       | 117 |
| Abbildung 62: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]                                                                                                                                                  | 118 |
| Abbildung 63: Temperatur Monitors 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 [eigene Abb.]                                                                                                                                             | 118 |
| Abbildung 64: Temperatur Monitors 13, 14 [eigene Abb.]                                                                                                                                                          | 119 |

|                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 65: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.] | 120 |
| Abbildung 66: Gegenüberstellung der Varianten 1 bis 3 [eigene Abb.]                                                                                                                           | 121 |
| Abbildung 67: Gegenüberstellung der Varianten 4 bis 6 [eigene Abb.]                                                                                                                           | 122 |
| Abbildung 68: U-Werte der Varianten lt.                                                                                                                                                       | 123 |
| Abbildung 69: Verbesserung des U-Wertes im Vergleich zu Ziegel ohne VIP                                                                                                                       | 124 |
| Abbildung 70: Beispielhafte Darstellung von                                                                                                                                                   | 125 |
| Abbildung 71: Gegenüberstellung der Varianten 7_1 bis 7_3 [eigene Abb.]                                                                                                                       | 127 |
| Abbildung 72: Gegenüberstellung der Varianten 8_1 bis 8_2 [eigene Abb.]                                                                                                                       | 128 |
| Abbildung 73: Gegenüberstellung der Variante 8_3 [eigene Abb.]                                                                                                                                | 129 |
| Abbildung 74: U-Werte der Varianten lt.                                                                                                                                                       | 130 |
| Abbildung 75: Verbesserung des U-Wertes im Vergleich zu Ziegel ohne VIP                                                                                                                       | 131 |
| Abbildung 76: Wärmeverlust über die Lagerfuge bei außermittiger Paneelanordnung [eigene Abb.]                                                                                                 | 132 |
| Abbildung 77: Konstruktion Variante 11_1 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]                                                                                                                  | 134 |
| Abbildung 78: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]                                                                                                                                | 135 |
| Abbildung 79: relative Luftfeuchtigkeit Monitors 4, 7, 8, 9 [eigene Abb.]                                                                                                                     | 135 |
| Abbildung 80: Gegenüberstellung der Varianten 10_10 und 10_13 [eigene Abb.]                                                                                                                   | 136 |
| Abbildung 81: Gegenüberstellung der Variante 10_16 [eigene Abb.]                                                                                                                              | 137 |
| Abbildung 82: Gegenüberstellung der Varianten 11_1 und 11_2 [eigene Abb.]                                                                                                                     | 138 |
| Abbildung 83: U-Werte der Varianten lt.                                                                                                                                                       | 139 |
| Abbildung 84: Verbesserung des U-Wertes im Vergleich zu Ziegel ohne VIP                                                                                                                       | 140 |
| Abbildung 85: Praktische Anwendung - Schritte 1-4 [eigene Abb.]                                                                                                                               | 142 |
| Abbildung 86: Versetzen des Ecksteins [eigene Abb.]                                                                                                                                           | 143 |
| Abbildung 87: Praktische Anwendung - Schritt 5 [eigene Abb.]                                                                                                                                  | 143 |
| Abbildung 88: Praktische Anwendung - Schritt 6 [eigene Abb.]                                                                                                                                  | 144 |
| Abbildung 89: Praktische Anwendung - Schritt 7 [eigene Abb.]                                                                                                                                  | 144 |
| Abbildung 90: Praktische Anwendung - Schritt 8 [eigene Abb.]                                                                                                                                  | 145 |
| Abbildung 91: Praktische Anwendung - Schritt 9 [eigene Abb.]                                                                                                                                  | 145 |
| Abbildung 92: Detail - Deckenanschluss [eigene Abb.]                                                                                                                                          | 147 |
| Abbildung 93: Minimale Oberflächentemperatur Detail - Deckenanschluss [eigene Abb.]                                                                                                           | 147 |
| Abbildung 94: Detail – Fensteranschluss Sturz, Parapet [eigene Abb.]                                                                                                                          | 149 |
| Abbildung 95: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Fensteranschluss Sturz, Parapet [eigene Abb.]                                                                                           | 150 |
| Abbildung 96: Detail – Fensteranschluss Sturz Variante [eigene Abb.]                                                                                                                          | 151 |
| Abbildung 97: Detail – Fensteranschluss Horizontalschnitt [eigene Abb.]                                                                                                                       | 151 |
| Abbildung 98: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Fensteranschluss horizontal [eigene Abb.]                                                                                               | 152 |
| Abbildung 99: Detail – Balkonanschluss [eigene Abb.]                                                                                                                                          | 153 |
| Abbildung 100: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Balkonanschluss [eigene Abb.]                                                                                                          | 153 |
| Abbildung 101: Detail – Sockel nicht unterkellert [eigene Abb.]                                                                                                                               | 154 |
| Abbildung 102: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Sockel nicht unterkellert [eigene Abb.]                                                                                                | 154 |
| Abbildung 103: Detail – Sockel unterkellert [eigene Abb.]                                                                                                                                     | 155 |
| Abbildung 104: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Sockel nicht unterkellert [eigene Abb.]                                                                                                | 155 |

## **TABELLENVERZEICHNIS**

|                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Tabelle 1: Kenndaten von CaSi aus zwei Herstellungsprozessen [Hec01 aus: Dre99].....</i> | <i>56</i>  |
| <i>Tabelle 2: Materialeigenschaften [eigene Abb.].....</i>                                  | <i>83</i>  |
| <i>Tabelle 3: Materialeigenschaften [eigene Abb.].....</i>                                  | <i>85</i>  |
| <i>Tabelle 4: Innenklima [eigene Abb.].....</i>                                             | <i>113</i> |

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

|                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| Abb.             | Abbildung                    |
| bzw.             | beziehungsweise              |
| ca.              | zirka                        |
| CaSi             | Calciumsilikat               |
| CSP              | Calciumsilikat- Platte(n)    |
| EPS              | expandiertes Polystyrol      |
| etc.             | et cetera                    |
| FCKW             | Fluorchlorkohlenwasserstoffe |
| ggf.             | gegebenenfalls               |
| HLZ              | Hochlochziegel               |
| i.d.R.           | in der Regel                 |
| PE               | Polyethylen                  |
| PET              | Polyethylenterephthalat      |
| PP               | Polypropylen                 |
| PU / PUR         | Polyurethan                  |
| SiO <sub>2</sub> | Siliziumoxid (Kieselsäure)   |
| TWD              | transparente Wärmedämmung    |
| VIP              | Vakuum-Isolations-Paneel     |
| VWS              | Vollwärmeschutz              |
| WDVS             | Wärmedämmverbundsystem       |
| XPS              | extrudiertes Polystyrol      |
| z.B.             | zum Beispiel                 |

# **1 Einleitung**

## **1.1 Zielsetzung**

Als eigentliches Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Hochlochziegels mit integrierten Vakuumdämmelementen anzusehen. Die Idee für einen derartigen Wandbaustein ist bereits einige Jahre bekannt und wurde mehrmals mit unterschiedlichem Erfolg aufgegriffen. Da diese Ansätze aus Sicht des vorhandenen Potentials jedoch noch verbesserbar erscheinen, wurde in dieser Diplomarbeit versucht, unter Berücksichtigung zusätzlicher Forderungen, ein „VIP- Ziegel-System“ zu entwickeln, das den Bauausführenden wie auch den Nutzern des Wohnraums möglichst geringe Einschränkungen auferlegt.

Den einleitenden Teil der Arbeit stellt der Vergleich konventioneller, wie auch biologischer Dämmstoffe dar. Hier sollen vor allem Vor- und Nachteile, sowie Einsatzbereiche und ökologische Aspekte beleuchtet werden. Im Anschluss daran folgt eine umfassendere Darstellung der vergleichsweise innovativen Wärmedämmsysteme - Vakuumdämmung, Calciumsilikat und transparente Wärmedämmung.

## **1.2 Problemstellung**

Der, im Vergleich zu anderen Dämmstoffen im Bauwesen, noch relativ wenig verbreitete Baustoff Vakuumdämmung, zeichnet sich insbesondere durch ein sehr hohes Wärmedämmvermögen aus. Somit entsteht die Möglichkeit, die erforderlichen Dämmstärken auf bis zu 10% konventioneller Dämmungen zu verringern. Anders ausgedrückt, ermöglicht diese Technologie eine enorme Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften bei gleicher Stärke der Wand- bzw. Deckenaufbauten.

Eine der Problemstellungen und somit Teil der Forschungsaufgabe dieser Arbeit ist das Baustoffverhalten eines Ziegels mit integrierten Vakuumpaneelen unter Betrachtung hygrischer Gesichtspunkte. Sind herkömmliche Baustoffe wie insbesondere Ziegel oder in gewissem Umfang auch Beton, verhältnismäßig wasserdampfdurchlässig, so geht diese Fähigkeit bei vollflächiger Applikation von Vakuumpaneelen an der Innen- oder Außenseite einer Konstruktion verloren. Diese

Eigenschaft entsteht durch die beinahe vollkommen gasdichte Hüllfolie, die es erst ermöglicht das hohe, erforderliche Vakuum zu erzeugen [Dre05].

Nun überzeugt viele Bauherren vor allem der Baustoff Ziegel gerade durch seine Diffusionsoffenheit, kombiniert mit einer hohen kapillaren Feuchtetransportfähigkeit. Dieser Effekt wird in diversen Reklamen oft als „Atmungsaktivität“ bezeichnet. Diese plakative Beschreibung mag zwar nach rein physikalischen Gesichtspunkten übertrieben anmuten, doch beschreibt sie auch dem Laien in verständlicher Form, die hervorragende Fähigkeit von Ziegelwerkstoffen wechselnde Feuchtezustände zu puffern und je nach klimatischen Umgebungsbedingungen Feuchtigkeit aufzunehmen oder an die angrenzende Luft abzugeben. Dieser Umstand ermöglicht den unproblematischen Feuchtehaushalt bei offenporigen Ziegelwerkstoffen.

In späteren Kapiteln dieser Arbeit werden nun verschiedene Varianten dargestellt und durch bauphysikalische Berechnungen untermauert, die es ermöglichen sollen, Vakuumelemente in Ziegeln zu integrieren um deren große Wärmedämmeigenschaft zu nutzen und trotzdem eine gewisse Diffusionsoffenheit zu gewährleisten.

Der zweite Schwerpunkt wurde bereits im letzten Satz angesprochen. Die Verwendung von Ziegelsteinen als Träger der Vakuumpaneele bedingt notwendigerweise die Ausbildung von Stößen in horizontaler und vertikaler Richtung. Daraus ergibt sich die Aufgabe der Minimierung der Wärmeverluste über diese unvermeidlichen Wärmebrücken und die damit verbundene Untersuchung der erzielbaren U-Werte.

## **2 Dämmstoffe und -systeme**

### ***2.1 Geschichtlicher Hintergrund***

Als Beginn der Verwendung von Dämmstoffen im Bausektor wird stets die Ölkrise 1973 genannt. Damals entstand bei einem Großteil der Menschen der Wunsch nach größerer energetischer Unabhängigkeit. Damit einhergehend wuchs der Wunsch nach Maßnahmen zur Energieersparnis und auch ein Kostenbewusstsein für Energie- und Betriebskosten kam schlagartig auf.

Die meisten der sogar heute noch verfügbaren Dämmstoffe wurden bereits in den Jahren vor 1950 entwickelt, aber erst nach 1973 tatsächlich standardmäßig

verwendet. 10cm Wärmedämmung aus Polystyrol, Mineralwolle oder PU- Schaum galten lange Jahre als gutes Dämmniveau. Nach heutigen Einschätzungen, werden in naher Zukunft U- Werte von ca.  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  an der Gebäudehülle dominieren, was mit konventionellen Dämmstoffen Stärken von ca. 20cm entspricht.

Da das, insbesondere bei der Sanierung, mit erheblichen Nutzflächeneinbußen verbunden ist, geht der Trend eindeutig Richtung möglichst hoher Dämmeigenschaft bei gleichzeitiger Minimierung der Konstruktionsstärken. [Bin05]

## ***2.2 Unterscheidung nach deren Lage im, bzw. am Bauteil***

### **2.2.1 Außendämmung**

Die Variante der Außendämmung ist aus vielfacher Sicht zu bevorzugen und stellt aus diesem Grunde die, mit Abstand, häufigste Maßnahme im Neubaubereich dar. Die wesentlichen Vorteile bei Verwendung eines Außendämmsystems sind:

- **Vermeidung von Oberflächenkondensat an der Bauteilinnenseite, sowie Minimierung der schädlichen Auswirkungen durch Kondensation im Bauteilinneren:** Kommt es durch gewisse klimatische Randbedingungen zur Kondensation in der Wärmedämmebene, bzw. zwischen Dämmung und äußerer Putzschicht, kann dieses ausgefallene Wasser sehr rasch an die Außenluft abgegeben werden, da der zurückzulegende Weg von nur wenigen mm bis cm, bei entsprechender Diffusionsoffenheit des Putzsystems, auch durch den Vorgang der Diffusion problemlos überwunden werden kann.
- **Schutz des tragenden Wandbildners vor hohen thermischen Schwankungen:** Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes, findet der Großteil der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft im Bereich der Dämmebene statt. Somit bleibt die tragende Schicht frei von hohen Temperaturschwankungen.
- **Schutz der tragenden Wandkonstruktion vor Durchfeuchtung:** Da die, heute meist verbreiteten, Fassadendämmplatten aus EPS-F oder Mineralwolle die durch Regenereignisse aufgenommene Feuchte nicht kapillar an die tragende

Wandebene weiterleiten, muss das äußere Putzsystem diese Schwankungen aufnehmen. Dieses Merkmal stellte sich, ebenso wie die zuvor genannte Eigenschaft, in der Anfangszeit der Wärmedämmverbundsysteme als große Schwierigkeit heraus. Damals konnten die Putzsysteme die hohen thermischen und hygrischen Schwankungen oftmals nicht aufnehmen und bildeten großflächig Risse. Moderne Wärmedämmverbundsysteme verfügen über eine Grundsicht mit eingearbeiteter Armierung, sowie einer Deckschicht als Witterungsschutz. Bei sachgemäßer Herstellung ist somit die Rissgefahr minimiert. [Dre06]

- **Einfacher Einbau:** Insbesondere bei der nachträglichen Altbausanierung hat die Außendämmung den positiven Nebeneffekt, die Baumaßnahme ohne nennenswerte Beeinträchtigung der Nutzer durchführen zu können.
- **Weitgehende Vermeidung von Wärmebrücken:** Durch vollständige Ummantelung der wärmeabgebenden Hülle des Gebäudes wird der Einfluss von Wärmebrücken in den meisten Fällen stark verringert.
- **Erhaltung der Wärmespeicherfähigkeit der Außenwand:** Da mit zunehmender Dämmstärke der erforderliche Kühlbedarf ansteigt, ist es umso wichtiger die speicherfähige Masse der Räume hoch zu halten, um die größtenteils durch Fenster eintreffende Wärmeenergie aufnehmen zu können. Diese kann dann während der Nachtstunden durch erhöhten Luftwechsel abgeführt werden. [Kol06]
- **Schutz vor Frostschäden:** Ein Schutz von Rohrleitungen im tragenden Wandbildner ist nicht erforderlich, da die größte Temperaturdifferenz in der Außendämmschicht auftritt und das tragende Element somit stets in Bereichen über dem Gefrierpunkt liegt. Bei reinen Innendämmungen kann dieser Fall jedoch durchaus eintreffen. [Hec01]

Eine Veränderung der Schalldämm- Eigenschaft eines Außenbauteils ist sowohl bei Außen- wie auch bei Innendämmung zu bemerken. Hier kann keine generelle Aussage abgegeben werden, ob eine positive oder negative Veränderung durch Anbringung einer Dämmschicht eintritt.

Die Veränderung des Schalldämm-Maßes  $R$  lässt sich durch den Wechsel von einer homogenen, einschaligen (ohne Dämmung), zu einer mehrschaligen Wand (mit Dämmung) erklären. Die zweischalige Wand besteht aus zwei unabhängig voneinander schwingenden Einzelschalen, die über eine Feder voneinander getrennt sind. Diese Feder kann beispielsweise aus Luft, oder hier aus Dämmstoff bestehen. Am Beispiel einer Außenwand, wirken der tragende Wandbildner und die äußere Putzschicht als die beiden angesprochenen Schalen.

Ausschlaggebendes Kriterium für die Schalldämmung einer zweischaligen Wand ist die Frequenz, bei der Resonanz eintritt – die so genannte Resonanzfrequenz. Ziel ist es diese so weit als möglich, jedoch mindestens unter 100Hz, zu senken um den Einbruch des Schalldämm-Maßes in einen, für das menschliche Gehör, nur mehr sehr schwer wahrnehmbaren Bereich zu verschieben.

Die Resonanzfrequenz kann grundsätzlich durch zwei Maßnahmen gesenkt werden. Einerseits durch Erhöhung der flächenbezogenen Massen der Schalen und andererseits durch eine möglichst geringe dynamische Steifigkeit der Feder (Dämmschicht). [Hec01]

Bei außenseitig angebrachten Wärmedämmverbundsystemen führen diese Randbedingungen dazu, dass Systeme mit Mineralwolle eine leichte Verbesserung und jene mit EPS (expandiertes Polystyrol) eine leichte Verschlechterung des Schalldämm-Maßes mit sich bringen. Dies resultiert vorwiegend aus der geringeren dynamischen Steifigkeit von Mineralwolle. [Dre06]

### **2.2.2 Innendämmung**

Ist es aus denkmalpflegerischer, oder schlicht gestalterischer Sicht, nicht möglich nachträglich eine Außendämmung vorzusehen, besteht ebenfalls die Möglichkeit an der Innenseite des Wandbildners eine Dämmebene aufzubringen. Bei Neubauten wird, aus oben genannten Gründen, meist der Außendämmung der Vorzug gegeben. Die derzeit gängigsten Varianten von Innendämmsystemen sind:

- **Vorsatzschalen mit Dämmschichten aus Mineralwolle und Verwendung einer Dampfsperre:**

Besonders erwähnenswert scheint hier die Notwendigkeit einer Dampfsperre, da ansonsten an der äußeren Seite der Mineralwolle Kondensat entsteht und dieses

mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer unzulässigen Feuchteanreicherung in dieser Schicht führt. Zusätzlich kommt es durch die fehlende luftdichte Schicht zu Schimmelpilzbefall, der bis an die innere Oberfläche durchschlagen kann und neben der optischen Beeinträchtigung, vor allem auch die Gefahr von Gesundheitsrisiken mit sich bringt. Werden die Bahnen der Dampfsperre nicht sachgemäß miteinander verklebt, oder beispielsweise durch Steckdosen und andere Einbauten zu oft durchdrungen, stellen sich unter Umständen auch die genannten Schadensbilder ein. Derartige Probleme treten sehr häufig im Leichtbau und Dachgeschoßausbau auf.

- **Calciumsilikat-Platten:**

Dieser Baustoff verfügt, neben einer hohen Wärmedämmeigenschaft, insbesondere über die Fähigkeit der kapillaren Leitfähigkeit. Das bedeutet, dass allenfalls anfallendes Kondensat nicht nur über den physikalischen Prozess der Diffusion an die an das Bauteil grenzende Luft abgegeben wird, sondern, dass CaSi diese Feuchtigkeit wesentlich schneller durch kapillare Leitung im Porensystem zur Innenseite transportiert und dort zur Verdunstung bringt. Somit entfällt bei dieser Bauweise, mit der Dampfsperre, ein sehr fehleranfälliger Teil eines Innenwärmedämmsystems. [Dre06]

Die Kombination aus Vakuumdämmung und Calciumsilikat- Platten ist eine weitere Variante zur nachträglichen Innendämmung von Altbauten und soll in dieser Arbeit ebenfalls beschrieben werden. Sie vereint die enorm hohe Dämmfähigkeit der Vakuumdämmung mit der bereits erwähnten Eigenschaft des CaSi, Feuchte in größeren Mengen rasch durch kapillare Leitung fortzuleiten.

Neben allen bis jetzt beschriebenen Nachteilen, ist die kurze Aufheizzeit, falls richtig eingesetzt, als positive Eigenschaft der Innendämmung anzusehen. Für Gebäude mit sehr unregelmäßiger Nutzung, beispielsweise klassische Wochenendhäuser, oder auch einzelne Räume mit einer derartigen Charakteristik, wie Hobby- Kellerräume, ist diese Eigenschaft vorteilhaft. Durch entsprechend kurzzeitige Nutzung können hier behagliche Raumtemperaturen erzielt werden, ohne langfristig das gesamte Bauteil mitzuerwärmen, wie es bei einer Außendämmung jedenfalls erforderlich ist. [Kol06]

### **2.2.3 Kerndämmung**

Eine Kerndämmung liegt vor, wenn die Dämmschicht zwischen zwei Wandschalen eingebettet ist oder in Hohlblocksteinen integriert ist. In klassischer Bauweise sind derartige Systeme eher von untergeordneter Bedeutung und meist im Einfamilienhausbau anzutreffen. Die Nachteile liegen, aus Gründen der Verträglichkeit zwischen Kernbeton und Kunststoffschäumen, vor allem in nachteiligen Auswirkungen auf die Haftung zwischen den Komponenten, aber auch im mangelnden Schallschutz. Weiters kommt hier noch die Gefahr von unzulässiger Feuchtigkeitsanreicherung im Bauteilinneren hinzu. [Kol06]

## **2.3 Einteilung der Dämmstoffe**

Nach heutiger Sichtweise unterscheidet man folgende sechs Kategorien von Dämmstoffen:

- künstliche Faserdämmstoffe
- künstliche Schaumstoffe
- mineralische Dämmstoffe
- natürliche Dämmstoffe
- recycelte Dämmstoffe
- transparente Dämmstoffe

[Dre06]

Im Folgenden werden einige Vertreter dieser Kategorien vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile erörtert. Hierbei soll auf alternative und innovative Dämmungen besonderes Augenmerk gelegt werden, da gerade diese, zur Bearbeitung der Forschungsaufgabe, von besonderer Bedeutung sind.

## **2.4 Ein Überblick über konventionelle Dämmstoffe**

### **2.4.1 Mineralwolle**

Mineralwolle ist der übergeordnete Begriff von Steinwolle, Glaswolle und Schlackenwolle, wobei letztere im Hochbau nicht mehr verwendet wird. Sie ist der Produktgruppe der künstlichen, mineralischen Faserdämmstoffe zuzuordnen.

Mineralwolleprodukte zählen zu den meist verwendeten Dämmstoffen, da sie verhältnismäßig preiswert sind, aber gute Dämmeigenschaften zeigen. [Hae96], [Ene07]

#### 2.4.1.1 Glaswolle

##### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Beim Herstellungsprozess wird geschmolzenes Glas durch eine Düse gepresst und dabei mit einem Luftstrom verwirbelt. Dabei entstehen feine Glasfasern, die mittels formaldehydhaltiger Zuschlagstoffe gebunden und in Form gebracht werden.

Sie ist alterungsbeständig, schwer brennbar (B1) bzw. nicht brennbar (A) und hat eine sehr geringe Rohdichte. Das Wärmedämmverhalten ist durch die geringe Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,035 - 0,040 \text{ W/(mK)}$  als gut zu bezeichnen. Wasserdampf kann durch Glaswolle beinahe ungehindert hindurch treten.

Glaswolle ist, bis auf Trittschalldämm- Platten, nicht auf Druck belastbar und verliert seine guten Wärmedämm- Eigenschaften bei Durchfeuchtung. Aus diesem Grund muss, bei Verwendung als Innendämmung, stets eine Dampfbremse oder - sperre zur Vermeidung von Kondensat verwendet werden. [Hae96], [Ene07]

##### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Heute erzeugte Glaswolle ist frei vom Verdacht der Krebserregung.
  - Teilweise Verwendung von Altglas bei der Produktion.
- Nachteile:
  - Bei der Verarbeitung werden dennoch Feinstäube frei.
  - Die Erzeugung ist mit sehr hohem Energieaufwand verbunden.
  - Es werden organische Zusatzstoffe verwendet.
  - Schlechte Recyclebarkeit.
  - Nicht kompostierbar.

[Hae96], [Ene07]

### 2.4.1.2 Steinwolle

#### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Die Produktion von Steinwolle basiert auf der Schmelzung von vulkanischem Gestein, Kalkstein und Koks und anschließendem, maschinellern Verspinnen zu feinen Fasern. Die Fasern werden, ebenso wie Glaswolle, verwirbelt, imprägniert und mit formaldehydhaltigen Zuschlägen geformt.

Steinwolle ist nicht brennbar (A), alterungsbeständig, wasserabweisend und nicht verrottbar. Mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,035 - 0,040 \text{ W/(mK)}$  ist die Wärmedämmeigenschaft gut. Das Diffusionsverhalten ist sehr gut, da Wasserdampf beinahe nicht am Durchgang gehindert wird. Steinwolle unterscheidet sich von Glaswolle vor allem durch seine Beanspruchbarkeit auf Druck. [Hae96], [Ene07]

#### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Heute erzeugte Steinwolle ist frei vom Verdacht der Krebserregung.
  - Ausreichende Verfügbarkeit der Rohstoffe.
- Nachteile:
  - Bei der Verarbeitung werden dennoch Feinstäube frei.
  - Die Erzeugung ist mit sehr hohem Energieaufwand verbunden.
  - Es werden organische Zusatzstoffe verwendet.
  - Schlechte Recyclebarkeit.
  - Nicht kompostierbar.

[Hae96], [Ene07]

### 2.4.2 Schaumglas

#### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Schaumglas ist ein künstlicher, mineralischer Dämmstoff. Bei der Erzeugung wird gemahlenes Glas mit Kohlendioxid bei ca.  $1000^\circ\text{C}$  geschäumt, in Blöcke gegossen und schließlich in die benötigte Größe gesägt.

Es ist maßhaltig, formstabil und besitzt mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,040 - 0,055 \text{ W/(mK)}$  eine gute bis mäßige Wärmedämmeigenschaft. Schaumglas zeichnet sich besonders durch seine Feuchteresistenz aus. Es ist sowohl wasser- als

auch diffusionsundurchlässig. Darüber hinaus ist es unverrottbar, chemisch beständig und druckfest. Die Hauptanwendungen sind Perimeterdämmungen und Flachdachdämmungen. [Hae96], [Ene07]

### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Die Verarbeitung ist gesundheitlich unbedenklich.
  - Teilweise Verwendung von Altglas bei der Produktion (hauptsächlich alte Autoscheiben).
  - Die Produkte sind FCKW- frei.
  - Nahezu unbegrenzt verfügbare Rohstoffe.
  - Kurze Transportwege.
  - Als Bauschutt deponierbar.
- Nachteile:
  - Die Erzeugung ist mit sehr hohem Energieaufwand verbunden, jedoch versichern die Hersteller, dass man heute bereits energiesparend produziert, da Wärmerückgewinnung betrieben und Strom aus erneuerbaren Energiequellen genutzt wird.
  - Schlechte Recyclebarkeit.

[Hae96], [Ene07]

## **2.4.3 Blähton**

### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Blähton ist Teil der Gruppe der natürlichen, mineralischen Dämmstoffe. Er besteht aus Tonkügelchen, die bei rund 1200°C gebrannt und aufgebläht werden. Die verbrannten organischen Bestandteile hinterlassen feine Poren.

Das Material ist unverrottbar, schädlingsresistent, unbrennbar (A) und weist ein hohes Schalldämmvermögen auf. Außerdem ist es frost- und feuchtebeständig, sowie diffusionsoffen. Als Wärmedämmstoff findet es nahezu keine Verwendung, da die Wärmedämmeigenschaften wesentlich schlechter als bei anderen, vergleichbaren Materialien sind. Bei einem  $\lambda$ - Wert von 0,10 – 0,25 W/(mK) wird es vorwiegend als Schüttung mit und ohne Zementbindung sowie als Zuschlagstoff für Leichtziegel und Leichtbetone genutzt. [Hae96], [Ene07]

**Bauökologie:**

- Vorteile:
    - Keine Umwelt und Gesundheitsgefährdung.
    - Einfache Verfügbarkeit des Rohstoffs.
    - Kurze Transportwege.
    - Problemlos deponierbar.
  - Nachteile:
    - Der Blähvorgang ist mit sehr hohem Energieaufwand verbunden
- [Hae96], [Ene07]

**2.4.4 Perlite****Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Auch Perlite gehören zu den natürlichen, mineralischen Dämmstoffen. Perlit ist ein Vulkangestein mit einem Anteil von 3-6% eingeschlossenem Wasser. Es wird bei der Erzeugung zerkleinert und auf ca. 1000°C erhitzt. Dadurch verdampft das eingeschlossene Wasser und das Material bläht sich auf.

Das Material kann unverändert, bituminiert, mit Naturharz ummantelt oder imprägniert werden. Bei der Verwendung in Innenräumen ist auf schädliche Ausgasungen von Schadstoffen dieser Beimengungen Rücksicht zu nehmen. Die Dämmeigenschaft ist mäßig ( $\lambda$ -Wert von 0,050 – 0,070 W/(mK)). Perlite sind weiters unverrottbar, nichtbrennbar (A) und je nach Ummantelung, wasserabweisend.

Anwendungsgebiete sind Zuschläge für Estrich-, Putz- und Mauermörtel sowie Schüttungen auf Fußböden zum Ausgleich von Unebenheiten. Neuerdings werden Perlite auch als Füllmaterialien für Außenwandziegel verwendet. [Hae96], [Ene07], [Wie07]

**Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Falls unbehandelt, keine Umwelt- und Gesundheitsgefährdung.
  - Natürlicher Rohstoff.
  - Falls unbehandelt, energie- und ressourcenschonender Baustoff.

- Nachteile:
  - Im bituminierten und imprägnierten Zustand sehr wohl ökologisch bedenklich.
  - Staubentwicklung bei unsachgemäßer Handhabung.
  - Begrenzte Verfügbarkeit durch Herstellung aus unterseeischen Vulkangesteinen.
  - Lange Transportwege.
  - Relativ energieintensive Herstellung.

[Hae96], [Ene07]

### 2.4.5 Vermiculit

#### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Vermiculit hat grundsätzlich dieselben Eigenschaften wie Perlite. Der Unterschied liegt im Rohmaterial – Glimmerschiefer. Dieser wird schockartig erhitzt, wobei eingeschlossenes Wasser den Stoff aufbläht. [Hae96]

**Bauökologie:** Siehe Perlite.

Als Unterscheidung ist jedoch eine bessere Verfügbarkeit des Rohmaterials anzuführen.

### 2.4.6 Polystyrol

#### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Polystyrol gehört zur Gruppe der künstlichen, organischen Dämmstoffe. Es wird aus Erdöl hergestellt. Erst nach einigen Zwischenschritten wird aus dem toxischen Styrol durch Polymerisation das ungiftige Polystyrol. Dabei unterscheidet man zwischen expandiertem (EPS) und extrudiertem (XPS) Polystyrol. EPS ist einfaches geschäumtes Polystyrol, während XPS unter Zugabe von Chlorethan erzeugt wird.

Die Materialien sind schwer entflammbar, wasser- und verrottungsresistent. Polystyrol muss jedoch vor UV- Strahlen und Nagetieren geschützt eingebaut werden und schwindet, was zur Ausbildung von Fugen führen kann. Die Dämmeigenschaften sind gut (EPS:  $\lambda = 0,035 - 0,040 \text{ W/(mK)}$ , XPS:  $\lambda = 0,030 \text{ W/(mK)}$ ).

EPS wird vor allem für Vollwärmeschutzfassaden, bzw. in Form von Granulat, zementgebunden für Schüttungen und als Trittschalldämm- Platte verwendet,

während XPS durch seine weitgehende Feuchtigkeitsbeständigkeit als Perimeterdämmung, lastabtragende Dämmung und Dämmung bei Umkehrdächern eingesetzt wird. Durch die relativ geringen Kosten ist Polystyrol sehr verbreitet. [Hae96], [Ene07]

### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Keine Gesundheitsgefährdung im eingebauten Zustand.
  - Falls mit CO<sub>2</sub> geschäumt, einigermaßen ökologisch vertretbar. Das ist jedoch bei Importprodukten oft nicht der Fall.
- Nachteile:
  - Starke Qualmbildung im Brandfall. Der Rauch ist teilweise sehr toxisch und führt zu Verätzungen der Atemwege und Lunge.
  - Begrenzte Verfügbarkeit der Rohstoffe (Erdöl).
  - Sehr energieintensive Herstellung.
  - Recyclebarkeit des einmal eingebauten Produkts ist fast nicht mehr möglich (nur bei sortenreinem Abfall).
  - Zwischenprodukte wie Styrol sind toxisch und umweltbelastend.

[Hae96], [Ene07]

## **2.4.7 Polyurethan**

### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Polyurethan (PU) wird ebenfalls aus Erdöl hergestellt. Katalysatoren und Treibmittel sind: Metallverbindungen, Pentan, CO<sub>2</sub> und sogar FCKW.

PU- Hartschäume haben bei einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,025 \text{ W/(mK)}$  sehr gute Dämmeigenschaften. Sie sind druckbelastbar, alterungsbeständig, unverrottbar und fäulnisfest. Die Brandschutzklasse beträgt B1-B2. Das Endprodukt ist nicht umwelt- oder gesundheitsschädigend, jedoch werden im Brandfall giftige Gase freigesetzt. Auch PU- Montageschäume sind während der Anwendung gesundheitsgefährdend.

Es wird bei konventionellen Aufbauten dort eingesetzt, wo mit geringen Stärken ein gutes Dämmniveau gefordert ist. PU ist relativ preiswert und wird

insbesondere in alukaschierten Platten oder als Montageschaum zur Abdichtung von Öffnungen eingesetzt. [Hae96], [Ene07]

### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Das Endprodukt ist nicht gesundheits- oder umweltgefährdend.
  - Falls mit CO<sub>2</sub> geschäumt, einigermaßen ökologisch vertretbar.
- Nachteile:
  - Starke Qualmbildung und Bildung von giftigen Gasen im Brandfall.
  - Begrenzte Verfügbarkeit der Rohstoffe (Erdöl)
  - Ökologisch bedenkliche Zwischenprodukte bei der Erzeugung.
  - Sehr energieintensive Herstellung.
  - Recyclebarkeit des einmal eingebauten Produkts ist fast nicht mehr möglich (nur bei sortenreinem Abfall). Kann ansonsten nur noch in Hausmüllverbrennungsanlagen verbrannt werden.
  - Nicht kompostierbar.
  - PU- Montageschaum ist auch bei der Verarbeitung gesundheitsschädigend.

[Hae96], [Ene07]

## **2.4.8 Zellulose**

### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Zur Herstellung von Zellulose wird Altpapier oder Rohzellulose zu feine Flocken zerkleinert und anschließend mit Borsalzen und Borsäuren versetzt, um ein günstigeres Brandverhalten sowie Schädlingsresistenz zu erhalten. Zusätzlich werden noch diverse Bindemittel beigegeben.

Bei einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,040 - 0,045 \text{ W/(mK)}$  ist die Dämmqualität als gut bis mäßig zu bezeichnen. Die verschiedenen Produkte reichen bezüglich deren Brandschutzanforderungen von B1 bis B2, sind schimmelresistent und nicht anfällig auf Befall von Ungeziefer, sowie antibakteriell. Zellulose ist diffusionsoffen, verliert aber bei Durchfeuchtung die guten Dämmeigenschaften.

Das Material ist zwar auch in Plattenform erhältlich, wird aber meist geschüttet oder eingeblasen. Der Vorteil liegt darin, dass es bis in die letzte Ecke vordringen kann, was aber vom Fachmann vorgenommen werden sollte. Die

Hauptanwendungen sind Dachschrägendämmungen und Wanddämmungen im Leichtbau. Gegebenenfalls sollte durch Kontrollöffnungen die vollständige Füllung überprüft werden. [Hae96], [Ene07]

### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Das Endprodukt ist nicht gesundheitsgefährdend.
  - Durch Recyclebarkeit ökologisch unbedenklich (nach Absaugung wieder verwendbar).
  - Der Energieaufwand bei der Herstellung ist gering.
  - Deponierung ist möglich.
- Nachteile:
  - Vorbehandlung vor Entsorgung wegen Borverbindungen erforderlich.
  - Feinstaubbelastung beim Einblasen (Schutzmaske erforderlich).
  - Kompostierung ist nicht möglich (Boranteile).

[Hae96], [Ene07]

## **2.4.9 Holzwolleleichtbauplatten**

### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Zur Herstellung werden langfaserige, längs gehobelte Holzwollspäne mit Bindemitteln aus Zement oder Magnesit verbunden. Bittersalz dient als Schutz vor Verrottung. Die Platten werden alternativ auch mit Kernen aus Polystyrol, Steinwolle oder Schafwolle angeboten.

Der hohe Anteil an erforderlichen Bindemitteln wirkt sich negativ auf die Wärmedämmeigenschaften aus ( $\lambda = 0,090 \text{ W/(mK)}$ ), jedoch haben sie eine gute schallabsorbierende Wirkung. Holzwolleleichtbauplatten sind diffusionsoffen, und normal bis schwer brennbar (B2, B1).

Sie werden wegen ihrer Eigenschaft als guter Putzträger meist als Verbundplatten genutzt. Außerdem sind sie verputzt höheren Belastungen gewachsen als ein konventioneller Vollwärmeschutz. Das Preisniveau ist relativ hoch. [Hae96], [Ene07]

**Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Ökologisch einwandfrei, Entsorgung problemlos.
  - Langlebigkeit, aber trotzdem Kompostierbarkeit gegeben.
  - Die Produkte werden aus Abfällen von heimisch wachsendem Rohstoff gewonnen.
  - Keine Gesundheitsgefährdung.
  - Deponiefähigkeit vorhanden.
- Nachteile:
  - Relativ energieintensive Herstellung.

[Hae96], [Ene07]

## ***2.5 Ein Überblick über alternative Natur-Dämmstoffe***

Der Marktanteil von Naturdämmstoffen zur Wärme- und Schalldämmung beträgt derzeit weniger als fünf Prozent. Dabei ist festzuhalten, dass diese Materialien in den Bereichen Feuchtigkeitsausgleich, sowie Wärme- und Schallschutz konventionellen Dämmstoffen meist ebenbürtig und teilweise sogar überlegen sind. Im Bereich Wärmeschutz bezieht sich die Aussage insbesondere auch auf die sommerliche Überwärmung.

Hauptsächlich werden Holz- und Recyclingprodukte verwendet, jedoch ist der Markt wesentlich umfangreicher. Auf die Ökologie von natürlichen Dämmstoffen wird in einem späteren Abschnitt näher eingegangen. Vorweg sei nur erwähnt, dass nachwachsende Dämmstoffe im Vergleich naturgemäß besser abschneiden. Das liegt an der Tatsache, dass vielfach weniger Zusatzstoffe enthalten sind und sie auch ein niedrigeres Treibhauspotential aufweisen, da sie CO<sub>2</sub> binden und auch die Herstellung einfacher und energieeffizienter vor sich geht. Außerdem können die Prozessketten durch regional verfügbare Rohstoffe kurz gehalten werden. [Müh06]

### 2.5.1 Holzweichfaserplatten

#### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Beim Herstellprozess werden Weichholzreste zerfasert, mit Wasser vermengt und bei ca. 350°C in Form gebracht. Anschließend folgt eine mehrere Tage andauernde Trocknungsphase auf einem Sieb. Sollen die Platten feuchtigkeitsbeständig sein, können sie auch hydrophobiert werden. Dazu werden sie mit Bitumen oder Paraffin imprägniert.

Holzweichfaserplatten weisen einen mäßigen Wärmeschutz auf ( $\lambda = 0,045 - 0,056 \text{ W/(mK)}$ ) und sind normal brennbar (B2). Durch gewisse Zusätze ist auch eine schädlingsresistente Ausführung denkbar. Holzfaserdämmplatten zeichnen sich außerdem durch ihre hohe spezifische Wärmekapazität aus. Sie erreicht fast den doppelten Wert von Mineralwolle oder Styropordämmungen. Weiters verfügen sie über die Fähigkeit Feuchtigkeit zu speichern und allmählich wieder abzugeben, was bedeutet, dass sie nicht, wie mineralische Dämmstoffe, ihre Dämmeigenschaften bei dauerhafter Durchfeuchtung verlieren.

Unbituminiert werden sie im Innenausbau verwendet, bituminierte Platten dienen als Unterdach und Schalung. Auch hier muss beim Einbau auf mögliche ausgasende Schadstoffe Rücksicht genommen werden. Als echter Dämmstoff werden die Platten selten eingesetzt, da eher kostengünstigeren Varianten der Vorzug gegeben wird. [Hae96], [Ene07], [Müh06]

#### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Falls nicht imprägniert, ökologisch einwandfrei.
  - Falls nicht imprägniert, in kleinen Mengen kompostierbar.
  - Recyclingfähigkeit vorhanden.
- Nachteile:
  - Bituminierte Platten können Schadstoffe ausgasen.
  - Relativ energieintensive Herstellung.
  - Die imprägnierten Platten sind nicht kompostierbar.

[Hae96], [Ene07]

## 2.5.2 Kokosfasern

### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Kokosfasern werden aus dem Bast (Fruchthülle) der Kokosnuss gewonnen. Die Fasern werden meist ohne Zusätze zu einem Filz (Vlies) vernadelt und zu Matten oder Platten weiterverarbeitet. Die Zugabe von Borsalzen oder Ammoniumsulfat dient einer Verbesserung des Brandschutzes. Auch eine Imprägnierung mit Bitumen ist möglich.

Das Wärmedämmverhalten ist mit einem  $\lambda$  von 0,045 W/(mK) gut. Weiters sind die Produkte unverrottbar, diffusionsoffen und gehören der Brandschutzklasse B2 (normal brennbar) an. Außerdem bietet das Material einen sehr guten Schallschutz und ist von Natur aus verrottungssicher. Weitere Eigenschaften sind: Diffusionsoffenheit, feuchtigkeitsausgleichend, feuchtebeständig und formbeständig.

Die Produkte werden vorwiegend als Trittschalldämmplatten eingesetzt. Auch ein Einsatz für Wärmeschutzaufgaben ist möglich. Dazu werden sie lose verlegt oder mit Mörtel an die Wand geklebt. [Hae96], [Ene07]

### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Entsorgung bei unbehandeltem Baustoff problemlos.
  - Der Energieaufwand bei der Herstellung ist gering.
  - Herstellung und Verarbeitung weder umwelt- noch gesundheitsschädigend.
  - Teilweise Kompostierung möglich.
- Nachteile:
  - Relativ energieintensiver, langer Transport.
  - Ökologische Bedenken bei Behandlung mit Insektiziden.
  - Anbau in Monokulturen.

[Hae96], [Ene07]

## 2.5.3 Kork

### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Kork ist ein reines Naturprodukt, das durch Schälen der Korkeiche gewonnen wird. Die reiche Tier- und Pflanzenwelt der Eichenhaine wird bereits vielerorts durch den

schnell wachsenden Australischen Eukalyptus verdrängt, was sich schädlich auf das ökologische Gleichgewicht der Region auswirkt. Durch Verwendung von Kork und damit verbundener Sicherung der Anbauflächen, kann dieser Entwicklung Einhalt geboten werden. Die Bäume werden erst nach 25 Jahren zum ersten Mal, ab dann alle 8-12 Jahre, geschält. Die gewonnene Rinde wird granuliert. Dieses Granulat kann für Naturkorkschüttungen verwendet, oder mit heißem Wasserdampf expandiert und ggf. zu Platten verarbeitet werden. Die verwendeten Bindemittel sind meist korkeigene Harze.

Die Wärmeleitfähigkeit ist mäßig ( $\lambda = 0,045 - 0,055 \text{ W/(mK)}$ ), jedoch ist Kork hoch druckbelastbar, diffusionsoffen, relativ unempfindlich gegen Feuchtigkeit, unempfindlich gegen Schädlingsbefall und normal brennbar (B2). Negativ ist die Neigung zu Setzungsverhalten bei Korkschrot.

Der Einsatz im Innenraum ist nicht ratsam, da die Produkte einen intensiven Eigengeruch aufweisen. Die häufigste Anwendung liegt in einer biologischen Alternative zum herkömmlichen Vollwärmeschutz. Im Vergleich zu Zellulose ist Kork relativ teuer, was auch durch die weiten Transportwege (Portugal) erklärbar ist. [Hae96], [Ene07], [Müh06]

### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Ökologisch einwandfrei, es sind keine Binde- oder Brandschutzmittel enthalten.
  - Nachwachsender Rohstoff.
  - Deponiefähigkeit vorhanden.
- Nachteile:
  - Relativ energieintensiver Transport durch große Entfernungen (meist Portugal).
  - Gesundheitliche Bedenklichkeit und fehlende Kompostierbarkeit durch Imprägnierung, bzw. bei sehr minderwertigen Produkten auch Anteile von Formaldehyd.

[Hae96], [Ene07]

## 2.5.4 Baumwolle

### Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:

Baumwolle wächst am malvenartigen Baumwollstrauch, der in tropischen und subtropischen Regionen gedeiht. Sie besteht zu 90% aus Zellulose und ist deshalb beinahe völlig resistent gegen Ungeziefer. Die Behandlung mit Borsalz oder Borsäure dient der Verbesserung des Brandschutzes und der Vermeidung der Schimmelgefahr. Laut Angaben der Hersteller bestehen Baumwoll- Dämmstoffe je zur Hälfte aus indischer Rohbaumwolle und Baumwollresten. Baumwolle wird als Matte, Filz oder Stopfwole hergestellt und vor allem zwischen Sparren und Ständern eingesetzt oder als Blaswolle verarbeitet.

Sie hat eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit, ist normal brennbar (B2) und weist gute Dämmeigenschaften auf ( $\lambda = 0,040\text{W}/(\text{mK})$ ). Eine Einschränkung der Nutzung durch Schadstoffe im Material ist nicht vorhanden.

Die Bahnen werden mit einem Messer geschnitten und zwischen Sparren geklemmt oder lose verlegt. Auch Baumwollflocken zum Einblasen (wie Zellulose) sind erhältlich. [Hae96], [Ene07], [Müh06]

### Bauökologie:

- Vorteile:
  - Verwendung und Recycling sind umweltverträglich.
  - Keine gesundheitlichen Belastungen.
  - Nachwachsender Rohstoff.
- Nachteile:
  - Große Umweltschäden durch Anbau in Monokulturen und die damit verbundene Notwendigkeit zum Einsatz von Pestiziden.
  - Lange Transportwege.
  - Enormer Wasserverbrauch bei der Herstellung.

[Hae96], [Ene07], [Müh06]

## 2.5.5 Schafwolle

### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Auch Schafwolle ist ein Naturprodukt, doch besteht es aus dem Eiweiß Keratin, das vor Mottenfraß geschützt werden muss. Dies geschieht teilweise durch ökologisch bedenkliche Chemikalien oder Borsalz. Das Mottenschutzmittel Mitin FF hat den Vorteil, dass es sich fest mit den Fasern verbindet und deshalb nicht ausgast, während Borsalz schlecht haftet und die Gefahr des Ausrieselns besteht. Schafwolle hat gegenwärtig als Dämmstoff nur untergeordnete Bedeutung.

Die Produkte sind schwer brennbar (B1), diffusionsoffen und gut wärmedämmend ( $\lambda = 0,040 \text{ W/(mK)}$ ). Ebenso weisen sie einen guten Schallschutz auf und wirken feuchtigkeitsregulierend. Labor- und Praxisversuche haben gezeigt, dass Schafwolle in der Lage ist, Formaldehyd aus der Raumluft zu binden. Der Preis liegt etwas höher als bei nicht ökologischen Produkten.

Schafwolle hat die herausragende Fähigkeit, ein Drittel des eigenen Gewichts an Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben zu können, ohne Schaden zu nehmen. Das macht Schafwolle zu einem sehr guten Füllmaterial für innenliegende Leichtbauwände. Bei Leichtbau- Außenwänden kann aber trotzdem keinesfalls auf eine luftdichte Ebene (Dampfbremse/ Dampfsperre) verzichtet werden. Negativ anzumerken ist der teils sehr intensive Eigengeruch der Wolle. Berichten zufolge wurden bei einzelnen Objekten, aus eben genanntem Grund, die Schafwolldämmplatten nach kurzer Zeit wieder entfernt und durch konventionelle Mineralwolle ersetzt. [Hae96], [Ene07], [Müh06]

### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Ökologisch empfehlenswert.
  - Natürlicher, nachwachsender Rohstoff, der auch in kleinen Unternehmen regional gewonnen werden kann.
  - Recyclebar und kompostierbar.
  - Keine gesundheitlichen Belastungen bei Herstellung, Verarbeitung und Entsorgung.

- Nachteile:
  - Erschwerte Kompostierung bei Zugabe von Borsalz.
  - Bei Importen, lange Transportwege.

[Hae96], [Ene07]

## 2.5.6 Flachs/ Hanf

### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Hanf ist eine Kulturpflanze der gemäßigten Breiten. Sie gilt als anspruchslos und bedarf kaum Pflanzenschutzmitteln. Dämmungen aus Flachs werden aus Flachsfaserabfällen und Stützfasern aus Polyester hergestellt oder mit Wasserglas gebunden. Die kurzen Flachsfasern stammen meist aus der Leinengewinnung. Die Behandlung mit Borsalz dient dem Brandschutz, als auch dem Schutz vor Ungeziefer. Nutzhanf ist frei von Eiweiß und beinhaltet natürliche Bitterstoffe, was ihn resistent gegen tierische und pflanzliche Schädlinge macht. Flachs und Hanf werden als Stopfmaterial, Platte oder Filz eingesetzt.

Flachs hat gute Wärmedämmeigenschaften ( $\lambda = 0,040 \text{ W/(mK)}$ ), ist normal brennbar (B2) und durchlässig für Wasserdampf. Das Material ist feuchtebeständig, schädlings- und schimmelresistent. Hanf hat ebenfalls gute Wärmedämmeigenschaften ( $\lambda = 0,041 \text{ W/(mK)}$ ), ist in die Brennbarkeitsklasse D nach ÖN EN 13501-1 einzuordnen und durchlässig für Wasserdampf.

Verwendung findet Flachs vor allem bei der Dämmung von Dachschrägen oder Leichtbauwänden. Die Bahnen werden zwischen Sparren geklemmt und befestigt oder lose in den Boden verlegt. Hanf wird als ökologische Variante von Wärmedämmverbundsystemen eingesetzt. Die Verarbeitung erfolgt ähnlich wie bei Mineralwolle- Dämmsystemen mit dem Unterschied, dass zum Dübeln und Schneiden Spezialwerkzeuge verwendet werden müssen. Wegen der leicht krümeligen Oberfläche wird zuerst eine Pressspachtelung aufgetragen. Eine Verdübelung ist unabhängig vom Untergrund immer auszuführen. [Hae96], [Ene07], [Müh06], [Mic06], [Iso07]

### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Keine gesundheitlichen oder Umweltbelastungen bei Herstellung und Verarbeitung.

- Kompostierbarkeit ist gegeben.
- Nachwachsender, einheimischer Rohstoff.
- Pestizidfreier Anbau möglich.
  
- Nachteile:
  - Bor- und Polyesterzusätze sind ökologisch nicht ganz unbedenklich.
  - Durch Bor- und Polyesterzusätze nur bedingt kompostierbar und recyclingfähig.

[Hae96], [Ene07]

### 2.5.7 Schilfrohr

#### **Herstellung, Eigenschaften, Verwendung:**

Dämmung aus Schilfrohren wird durch Pressen von zusammengebundenen Schilfrohrhalmen erhalten. Auf Imprägnierungsmittel und Bindemittel wird vollkommen verzichtet. Aus den einzelnen gepressten Lagen werden dann Platten mit bis zu 5cm Stärke gefertigt. Schilf wurde lange Zeit in historischen Aufbauten vorwiegend als Putzträger eingesetzt (unter Schalung einer Tramdecke).

Die Wärmedämmeigenschaft ist mit  $\lambda = 0,040\text{W}/(\text{mK})$  als gut zu bezeichnen. Die Brandschutzklasse - normal brennbar (B1) - erreicht es jedoch nur bei ausreichender Putzüberdeckung. Die Dauerhaftigkeit und Formbeständigkeit in größeren Stärken muss erst erprobt werden. Die Platten werden lose verlegt, angeschraubt oder angedübelt. Die Kosten sind im Vergleich zu gleichwertigen Dämmmaterialien als hoch anzusehen. [Hae96]

#### **Bauökologie:**

- Vorteile:
  - Kein Zusatz von Imprägnierungs- und Bindemitteln.
  - Keine gesundheitlichen oder Umweltbelastungen bei Herstellung und Verarbeitung.
  - Einfache Entsorgung, da kompostierbar.
  - Nachwachsender Rohstoff.

- Nachteile:
  - Ressourcen sind trotz nachwachsendem Rohstoff beschränkt.

[Hae96], [Ene07]

## 2.5.8 Ökologische Bewertung der bisher genannten Dämmstoffe

|                                                             | Rohstoffsituation | Energieaufwand und Gesundheitsverhalten in der Herstellung | Energieaufwand und Gesundheitsverhalten im Einbau | Energieaufwand und Gesundheitsverhalten in der Nutzung | Energieaufwand und Gesundheitsverhalten bei der Entsorgung | Gesamtwert |
|-------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------|
| Flachs                                                      | +                 | +                                                          | +                                                 | +                                                      | +                                                          | ++         |
| Schafwolle                                                  | +                 | +                                                          | +                                                 | +                                                      | +                                                          | ++         |
| Blähton                                                     | +                 | ○                                                          | +                                                 | +                                                      | +                                                          | ++         |
| Zellulose                                                   | +                 | +                                                          | +                                                 | ○                                                      | +                                                          | ++         |
| Perlite <sup>1</sup>                                        | +                 | ○                                                          | +                                                 | +                                                      | +                                                          | ++         |
| Schilfrohr                                                  | ○                 | +                                                          | +                                                 | +                                                      | +                                                          | ++         |
| Holzweichefaserplatte <sup>2</sup>                          | +                 | —                                                          | +                                                 | +                                                      | +                                                          | +○         |
| Holzwoolleichtbauplatte                                     | +                 | —                                                          | +                                                 | +                                                      | +                                                          | +○         |
| Kokosfasern                                                 | +                 | — <sup>3</sup>                                             | +                                                 | +                                                      | +                                                          | +○         |
| Kork                                                        | ○                 | ○ <sup>4</sup>                                             | +                                                 | +                                                      | +                                                          | +○         |
| Baumwolle                                                   | — <sup>2</sup>    | ○ <sup>4</sup>                                             | +                                                 | +                                                      | +                                                          | +○         |
| Schaumglas                                                  | +                 | —                                                          | +                                                 | +                                                      | —                                                          | ○○         |
| Mineralwolle                                                | +                 | —                                                          | ○                                                 | —                                                      | —                                                          | ○○         |
| Polystyrol                                                  | ○                 | —                                                          | —                                                 | +                                                      | —                                                          | ○—         |
| Polyurethan                                                 | ○                 | —                                                          | —                                                 | +                                                      | —                                                          | ○—         |
| <sup>1</sup> unbehandelte Perlite                           | +                 | gut                                                        | ○                                                 | mittelmäßig                                            | —                                                          | schlecht   |
| <sup>2</sup> nicht bituminierte Platten                     |                   |                                                            |                                                   |                                                        |                                                            |            |
| <sup>3</sup> Abwertung durch Monokultur und Pestizideinsatz |                   |                                                            |                                                   |                                                        |                                                            |            |
| <sup>4</sup> Abwertung durch Transportaufwand               |                   |                                                            |                                                   |                                                        |                                                            |            |

Abbildung 1: Ökologische Bewertung [Hae96]

Betrachtet man die Bewertung, gerät man schnell in einen Konflikt bei der Baustoffauswahl. „Ökologische“ Produkte sind leider oft nicht kompatibel mit Anwendungsgebieten bei denen sie hohen Druckbelastungen oder Feuchte ausgesetzt sind. Weitere Nachteile entstehen bei Erfordernis gewisser Brandschutzanforderungen oder der Notwendigkeit einer besonders wirtschaftlichen Konstruktion. [Hae96]

Kritiker übertreiben oft hinsichtlich der Risiken von Zusatzstoffen. Beispielsweise haben die oft verpönten Brandschutzmittel Borsalz, Aluminiumsulfat und Ammoniumphosphat gemäß diverser Untersuchungen keine negativen Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt. Dem gegenüber sind viele konventionelle Dämmstoffe aus nachweislich hochgiftigen Stoffen erzeugt. Dies sind unter anderem: Phenole, Styrole, Isocyanate, sowie bromhaltige Brandschutzmittel, die im Brandfall giftige Gase erzeugen. [Müh06]

## **2.6 Detaillierte Betrachtung ausgewählter moderner Dämmstoffe und Dämmsysteme**

### **2.6.1 Vakuumdämmung**

#### **2.6.1.1 Allgemeines, Vorteile und Nachteile**

Vakuumdämmungen zeichnen sich, wie bereits an anderer Stelle erwähnt, durch ein wesentlich höheres Dämmniveau als konventionelle Wärmedämmstoffe aus. Die Wärmeleitfähigkeit kann Werte von bis zu etwa 10% von Mineralwolle erreichen. Dadurch ist es möglich Gebäude von höchstem Dämmniveau mit nur wenigen Zentimetern Dämmebene zu errichten.

Die Technologie selbst ist schon einige Zeit bekannt und wurde, bereits lange vor bautechnischen Einsatzgebieten, überall dort eingesetzt, wo sehr geringe Wandstärken und Gewicht gefordert waren. Solche Einsatzgebiete sind beispielsweise Geräte wie Tiefkühltruhen oder Kühlschränke. [Dre05]

Insbesondere in der Schweiz wurden umfangreiche Studien zum Thema Vakuumdämmung initiiert. Laut einer Studie im Auftrag des Schweizerischen Bundesamtes für Energie, findet die Entwicklung dieser Produkte zwar viel Beachtung seitens der Planer, doch stößt man auf Schwierigkeiten bei der Frage der Haftung durch die relativ ungewisse Lebensdauer solcher Paneele. Selten sind Firmen bereit diese Produkte einzubauen, da oft nur eine einjährige Produktgarantie oder eine allenfalls fünfjährige Baugarantie abgegeben werden kann. Die potentiellen Käufer erwarten jedoch eine zumindest 20- jährige, wenn nicht wesentlich höhere Lebensdauer. [Bin05]

Um diese, für den Bausektor erforderliche, besonders lange Lebensdauer zu erreichen, war es notwendig extrem gasdichte Hüllfolien zu entwickeln, die einerseits die Erzeugung eines hohen Vakuums und dadurch eine hohe, dauerhafte Dämmeigenschaft gewährleisten, und andererseits einen gewissen Schutz vor mechanischen Einwirkungen bieten. [Dre05]

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) sind, durch den relativ hohen technologischen Aufwand und die derzeit noch niedrige Stückzahl, naturgemäß wesentlich teurer als

derzeit gängige Dämmstoffe, der Einbau rentiert sich jedoch vielfach trotzdem. Beispiele für sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten werden an späterer Stelle dieses Kapitels angegeben.

Vorweg sei nur erwähnt, dass VIP dort Vorteile bringt, wo Konstruktionshöhe minimiert und Nutzfläche geschaffen oder nicht vergeudet werden soll. Außerdem gibt es im Baubereich eine Vielzahl von Detailpunkten, die ohne den Einsatz von Vakuumdämmung erst gar nicht ausreichend gedämmt werden könnten, ohne größere Wärmebrückeneffekte in Kauf nehmen zu müssen. [Bin05]

Bezüglich des Preisniveaus darf wohl angenommen werden, dass dieses im Lauf der nächsten Jahre und Jahrzehnte sicherlich durch Weiterentwicklungen und Optimierungen bei der Herstellung sinken wird. Man muss bedenken, dass diese Produkte derzeit zwar allgemein bekannt sind, aber wie so oft am Beginn einer Entwicklung die Kosten und Unwägbarkeiten bei vielen Bauherren und Planern über den erwarteten Nutzen überwiegen. [Bin05]

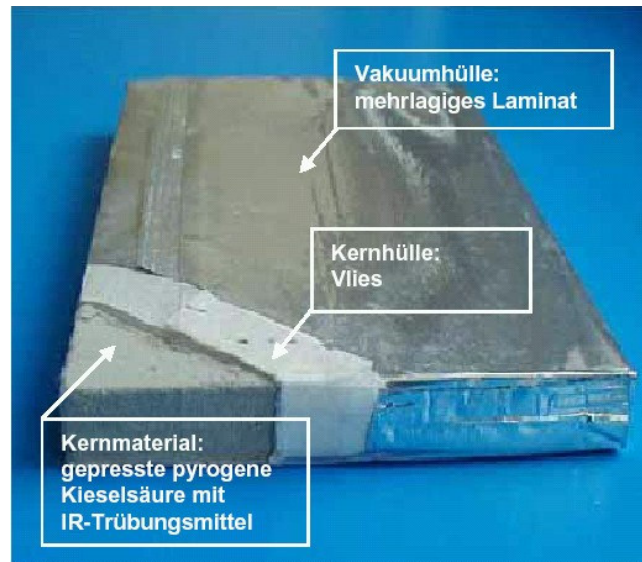
Der Einsatz von VIP setzt ein hohes Maß an Detailplanung voraus, da die Paneele vorfabriziert werden und nach Herstellung nicht mehr in ihrer Größe veränderbar sind. Dieser Umstand scheint zwar ein Nachteil zu sein, da hier ein gewisses Maß an Flexibilität verloren geht, man könnte jedoch ebenso argumentieren, dass dies den Vorteil mit sich bringt, in einer gewissen Planungsphase keine größeren Änderungen mehr zuzulassen und somit zeit- und kostenintensive Umplanungen zu verhindern. Außerdem ist fehlende Flexibilität im Bauwesen oft anzutreffen, man denke nur an jegliche Art von Fertigteilen, oder die Produktion von Fenstern. Hat die Produktion nach erfolgter Naturmaßaufnahme einmal begonnen, wird sich jeder Planer und Bauherr hüten Änderungen zu beschließen, die eine Neuproduktion aller, oder auch nur einzelner Fenster nach sich ziehen.

#### **2.6.1.2 Aufbau von Vakuum-Isolations-Paneelen**

Vakuumdämmsysteme werden i.d.R. in Form von Vakuum-Isolations-Paneelen eingesetzt. Dies sind flache, in verschiedenen Größen erhältliche, Elemente die aus offenporigem, porösem Kernmaterial bestehen, das von einem Vlies (Kernhülle) und einer gasdichten Hülle umgeben ist. Nun wird dieses Kernmaterial evakuiert,

schließlich versiegelt und erhält so seine außergewöhnlichen Eigenschaften. Für Vakuumdämmungen im Bauwesen hat sich pyrogene Kieselsäure (Siliziumoxid) als dominierendes Material für den Stützkörper (Kern) herausgestellt. Eine nähere Begründung hierfür wird unter Punkt „Lebensdauer von VIP“ angeführt. [Vip06]

Neben pyrogener Kieselsäure und Fällungs- Kieselsäure, könnten auch offenporiges PU und diverse Produkte aus Glasfaser als Kernmaterial verwendet werden. [Bin05]



**Abbildung 2: Aufbau eines VIP [Bin05 von: va-Q-tec]**

Vakuums Isolations Panels aktuellsten Standes beinhalten Kieselsäurepulver ( $\text{SiO}_2$ ) in gepresster Form, die bei Unterdrücken von 1 mbar in eine Hülle eingeschweißt werden. Somit wird die Wärmeleitung durch Gase und Infrarotstrahlung nahezu vernachlässigbar gering. Die Wärmeleitfähigkeit des Kernmaterials erreicht in trockenem Zustand einen Wert von  $0,004 \text{ W/(mK)}$ . [Sim04]

Das Vlies (Kernschale), zwischen Kernmaterial und Hüllfolie, ermöglicht eine gewisse mechanische Stabilität beim Herstellprozess und schützt die Umgebung beim Evakuierungsvorgang vor Verunreinigung durch Kieselsäurepulver. [Bin05]

Als Hüllstoff kommen verschiedene Materialien zur Verwendung. Lamierte Aluminiumfolie in einer Stärke von  $> 5 \mu\text{m}$  stellt eine sehr dichte Umhüllung dar. Besser geeignet um dem Wärmebrückenproblem am Paneelrand zu begegnen sind mehrfach laminierte Kunststofffolien mit zwei bis drei Metallisierungsschichten aus

Aluminium (Al- Schichtdicken von  $< 0,1 \mu\text{m}$ ). Die Ränder werden meist durch aufeinander liegende PE Schichten thermisch verschweißt. [Sim04]

Die Einbettung der gas- und wasserdampfdichten Barriere zwischen mehreren Kunststofffolien erfüllt den Zweck einer Träger- als auch Schutzschicht. In diesem Fall werden vorzugsweise Nylon oder PET verwendet. Andererseits dienen diese Funktionsschichten, wie eben erwähnt, als Schweißschicht, was die Anwendung von PE oder PP nahe legt. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die einzelnen Systeme nochmals einzeln aufgelistet und beschrieben:

- **Aluminium- Verbundfolien:**

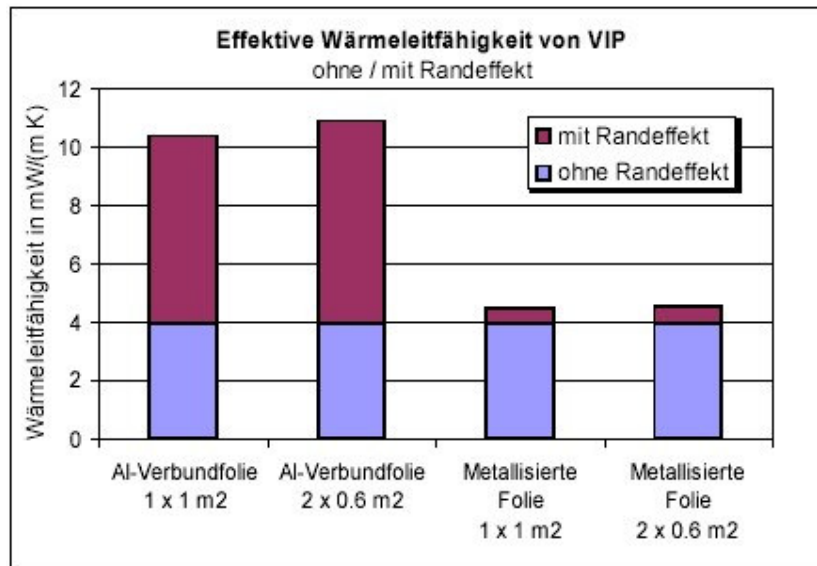
Die Stärke der Aluminiumschicht beträgt nur etwa  $6-8 \mu\text{m}$ , erreicht aber trotzdem eine sehr hohe Dichtheit. Sie neigen aber zu einem ausgeprägten Randeffect (Wärmebrückeneffect) bei kleinen Paneelen. Grund dafür ist der gut wärmeleitende Randverbund.

- **Metallbedampfte Folien:**

Hier wird eine Alu- Schicht mit einer Stärke von nur etwa  $200 \text{ nm}$  aufgedampft und ist somit 30- bis 40-mal dünner als die obige Aluminiumfolie. Der Randeffect wird zwar verringert, dies geschieht jedoch auf Kosten einer höheren Gasdurchlässigkeit. Der Preis ist vergleichbar mit guten Al- Verbundfolien.

- **SiO<sub>x</sub>- bedampfte Folien:**

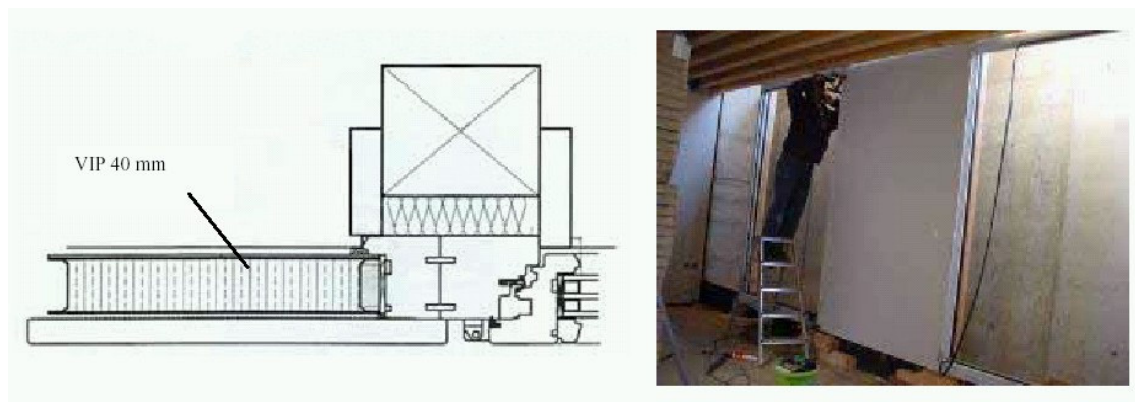
Diese neuere Foliengeneration ist ähnlich dicht wie metallbedampfte Folien, aber wesentlich preisgünstiger. Ein großer Vorteil liegt in einer ca. 200-mal geringeren Wärmeleitfähigkeit des SiO<sub>x</sub> verglichen mit Aluminium. Das entspricht in etwa der Wärmeleitfähigkeit von Glas. Als Konsequenz ist hier der Wärmebrückeneffect vernachlässigbar gering. [Bin02]



**Abbildung 3: Wärmebrückenwirkung durch den Randverbund der Hülle am Beispiel von zwei verschiedenen VIP- Dimensionen (Messung/Grafik EMPA) [Bin02]**

### 2.6.1.3 Aufbau von Vakuumdämm- Kassetten

Neben den folienumhüllten Vakuum-Isolations-Paneelen gibt es auch noch Vakuumdämmsysteme in Form von evakuierten Edelstahlkassetten. Auch hier findet Kieselsäure Verwendung als Kernmaterial. Solche Elemente werden z.B. als Fassadenplatten hergestellt und können Ausmaße von bis zu drei mal acht Metern erreichen. Außerdem gelten sie als robust und äußerst gasdicht. [Bin05]



**Abbildung 4: Fassade mit vorfabrizierten Wärmedämmelementen in Binningen/ Schweiz**

links: Horizontalschnitt durch die Konstruktion

rechts: Installation der raumhohen Vakuumelemente [Bin05 von: Architekt Feiner Pestalozzi, Basel;  
Fassadensystem: Häring AG, Schweiz]

#### 2.6.1.4 Funktionsweise und Wärmetransportprozesse im Dämmstoff

Die vier Wärmetransportanteile in Dämmstoffen sind bereits seit langem bekannt. Diese sind:

- Gasleitung ( $\lambda_{\text{gas}}$ )
- Konvektion ( $\lambda_{\text{con}}$ )
- Festkörperleitung ( $\lambda_{\text{solid}}$ )
- Strahlung ( $\lambda_{\text{rad}}$ )

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der einzelnen Wärmetransportprozesse vom Raumgewicht eines Dämmstoffes mit Zellstruktur. Es sei erwähnt, dass Konvektion im hier betrachteten Zellgrößenbereich nicht stattfindet.

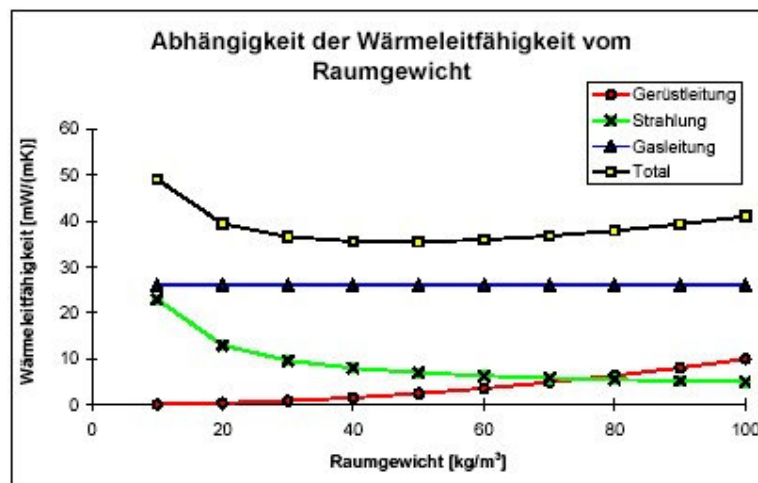


Abbildung 5: Wärmetransportprozesse von Dämmmaterialien mit Zellstruktur (Konvektion findet im betrachteten Zellgrößenbereich nicht statt) [Bin02]

Betrachtet man Dämmstoffe mit heute üblichen Wärmeleitfähigkeiten von ca.  $0,04 \text{ W}/(\text{mK})$  ( $= 40 \text{ mW}/(\text{mK})$ ), so zeigt sich, dass der Anteil der Gasleitung auch bei geringerem Raumgewicht stets einen Anteil von ca.  $25 \text{ mW}/(\text{mK})$  einnimmt. Der Anteil aus Strahlung ist nur ungefähr halb so groß und jener aus dem Prozess der Gerüstleitung (Festkörperleitung) vernachlässigbar gering.

Somit wird deutlich, dass zur Erreichung von extrem niedrigen Wärmeleitfähigkeiten, wie es bei Vakuumdämmungen der Fall ist, insbesondere der Anteil aus Gasleitung reduziert werden muss. Verringert man nun die Porengröße so sehr, dass diese geringer ist als die druckabhängige mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle, finden zwischen den Molekülen beinahe keine Stöße mehr statt und der Wärmetransport über das Zellgas wird weitgehend unterbunden.

Es bestehen also zwei Möglichkeiten um die Gasleitung ( $\lambda_{\text{gas}}$ ) zu verringern:

- Reduktion der Porengröße
- Reduktion des Druckes im Zellgas

[Bin02]

### 2.6.1.5 Wärmebrücken- Randeffekt

Die Wärmeleitfähigkeit ist im flächenhaften, ungestörten Bereich sehr niedrig. Durch den hohen Metallanteil an den Seiten, verschlechtert sich jedoch die Wärmeleitfähigkeit des gesamten Paneels. Da die Hüllschicht zusätzlich noch um die Platte herumläuft und somit eine Verbindung von warmer und kalter Seite darstellt, wird dieser Effekt noch verstärkt.

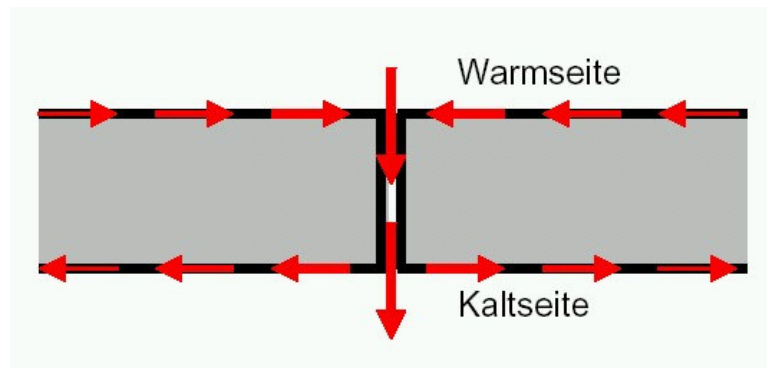


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Wärmebrücken- Randeffektes im Rand- bzw. Stoßbereich

[Bin05]

Auf die Einflüsse der verschiedenen Hüllmaterialien wurde bereits unter „Aufbau der VIPs“ näher eingegangen. Um die Randeffekte möglichst niedrig zu halten, sollen grundsätzlich folgende Punkte eingehalten werden:

- Wahl möglichst großer und quadratischer Paneele (mind. 50 x 50cm).
- Direkt an VIP angrenzende Materialien sollten eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Sie wirken ansonsten wie „Wärmekollektoren“.
- Werden Hüllmaterialien mit Metallfolien verwendet, empfiehlt es sich die Paneele doppelagig und mindestens 5cm überlappend zu verlegen. Zwei Lagen sind jedoch teurer als eine mit doppelter Stärke. [Bin05]

Zur wirklichkeitstreuen Abbildung des Dämmvermögens von VIP muss nun zwischen der Wärmeleitfähigkeit in der ungestörten Fläche  $\lambda_{\text{cop}}$  und der effektiven

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{\text{eff}}$  unterschieden werden. Der Wärmebrückenzuschlag im Randbereich wird vom unmittelbar angrenzenden Material bestimmt. Damit werden die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Materials selbst, etwaige Luftschichten und angrenzende Materialschichten miteinbezogen. Somit errechnet sich  $\lambda_{\text{eff}}$  zu:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_{\text{cop}} + \Psi_{\text{VIP}} \cdot d \cdot p / A \text{ mit:}$$

$\lambda_{\text{cop}}$  Wärmeleitfähigkeit ohne Randeffekt (cop = center-of-panel) [W/(mK)]

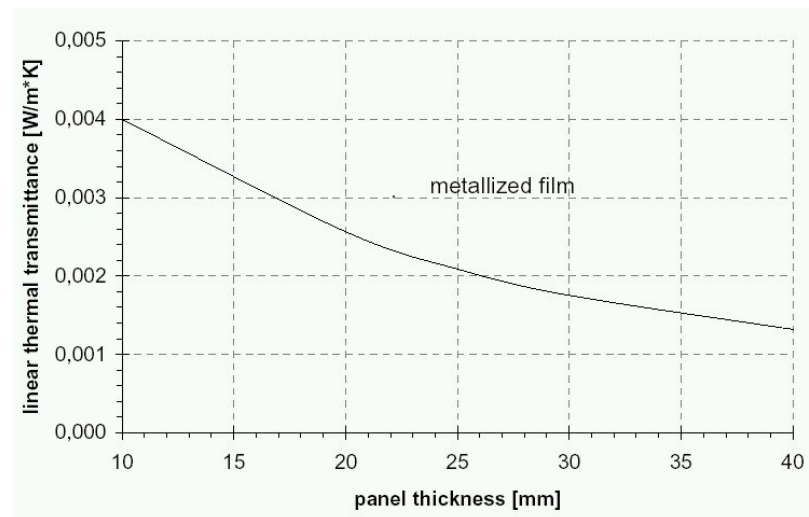
$d$  Dicke des VIP (in Richtung des Wärmeflusses) [m]

$A$  Fläche des VIP (senkrecht zur Richtung des Wärmeflusses) [m<sup>2</sup>]

$p$  Umfang der Fläche  $A$  [m]

$\Psi_{\text{VIP}}$  längenbezogener Wärmebrückenkoeffizient [W/(mK)]

$\Psi_{\text{VIP}}$  ist abhängig von  $d$ ,  $\lambda_{\text{cop}}$ , der Dicke des Hüllmaterials  $t_f$  und deren Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_f$ . Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft die Abhängigkeit des längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizienten von der Paneelstärke. Weiters ist zu bemerken, dass sich der Einfluss auch bei steigender Foliendicke, und damit einhergehender Zunahmen von gut leitendem Material, erhöht. Dieser Effekt tritt bei Verwendung von Aluminium-, wie auch Edelmetallschichten gleichermaßen auf. [Bin05]

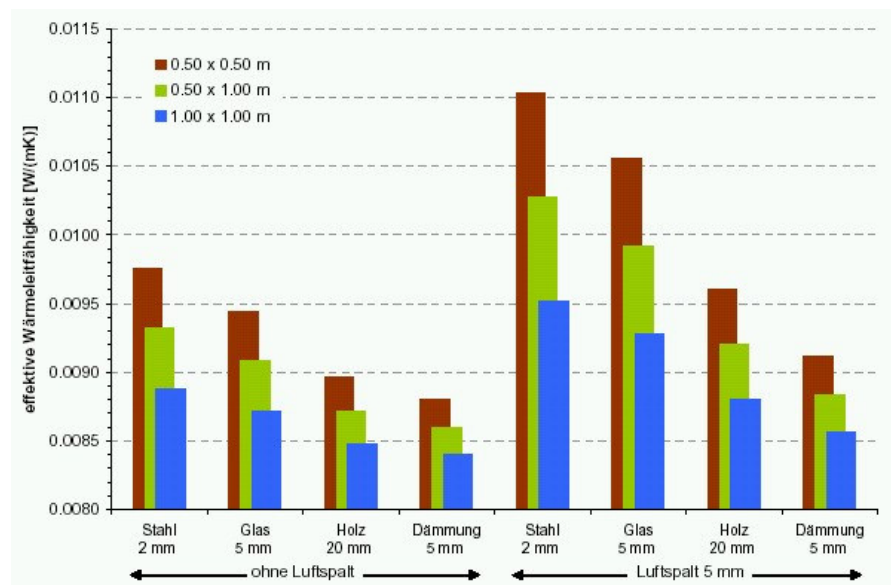


**Abbildung 7: Numerisch ermittelter Einfluss der Paneeldicke  $d$  auf den längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizienten  $\Psi_{\text{VIP}}$  [Bin05]**

An der EMPA (Forschungsinstitution im ETH-Bereich) wurden weiterführende Forschungen bezüglich des Wärmebrücken- Randeffekts von VIPs durchgeführt. Im

Zuge dessen wurde festgestellt, dass die eben gezeigten analytisch ermittelten  $\psi_{VIP}$ -Werte unter realistischer Einbeziehung der Schweißnähte eigentlich höher liegen. [Bin05] aus [Gha04]

Wie bereits erwähnt, haben auch direkt an das VIP grenzende Materialien starken Einfluss auf den längenbezogenen Wärmebrückenkoeffizienten  $\psi_{VIP}$ . Die folgende Abbildung zeigt die effektive Wärmeleitfähigkeit unter Berücksichtigung der angrenzenden Materialien: Stahl, Glas, Holz und Dämmstoff. Außerdem wird nach Größe des Panels unterschieden und die Auswirkung bei Vorhandensein eines 5mm großen Spalts untersucht. [Bin05]



**Abbildung 8: Effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{eff}$  in Abhängigkeit verschiedener angrenzender Materialien und unterschiedlicher Paneelgrößen [Bin05]**

Wie zu erwarten war, verringert sich der negative Einfluss und somit auch die effektive Wärmeleitfähigkeit mit sinkender Wärmeleitfähigkeit der angrenzenden Schichten, Anstieg der Plattengröße und Verkleinerung des Luftspalts.

### 2.6.1.6 Lebensdauer und Anwendbarkeit von VIP

In der Schweiz wurden Studien zur Lebensdauer von Vakuumdämm- Paneelen angestellt. Dabei wurde festgestellt, dass Gasteilchen durch mikroskopische Undichtigkeiten in der Hülle – so genannte „Pinholes“ – durch Hüllschicht und Schweißnähte treten. Je nach Qualität der Ausführung und Verhältnis von Paneelfläche zu Paneelumfang, dominieren die Fehlstellen der einen oder anderen

Art. Auch Kernmaterialien selbst können Gase freisetzen. Dies kann beispielsweise durch angelagerte Feuchtigkeit oder auch, im Fall von organischen Kernmaterialien, in Form von Kohlenwasserstoffverbindungen erfolgen. Dadurch entsteht ein stetiger Druckanstieg im Paneel, was mit dem Gasaustausch-Effekt bei Schaumdämmstoffen vergleichbar ist. Der Druckanstieg ist außerdem stark von Einflüssen wie Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur im Einbauzustand abhängig. [Bin02]

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der ansteigende Innendruck, wie auch die zunehmende Feuchte des Kernmaterials verantwortlich für den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und damit für die schwindende Dämmeigenschaft sind. Über Größe und Auswirkung dieser Effekte ist zum heutigen Zeitpunkt noch relativ wenig gesichert bekannt. [Sim04]

Die Vereinigung einiger unabhängiger F&E- Dienstleister – auch vip-bau.ch genannt – wurde im Jahr 2000 ins Leben gerufen und beschreibt die Frage der Lebensdauer von Vakuum-Isolations-Paneelen folgendermaßen: Unter der Annahme von, für unsere Breiten, typischen Umweltbedingungen, kann von einer annähernd linearen Druckzunahme in den Paneelen ausgegangen werden, jedoch könnte der Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes während der gesamten Periode die Größe der Sättigungsfeuchte von ca. 4 Massen- % erreichen. Dieser Umstand ist für den Baubereich als grundsätzlich akzeptabel zu bewerten, sollte aber in Form von höheren Anfangswärmeleitfähigkeiten berücksichtigt werden.

Anhand von Alterungsexperimenten wurden nachfolgende Werte für VIPs mit derzeit gängigen mehrfach metallisierten Polymerfolien erhalten. Diese Ergebnisse wurden aus Berechnungen und auch Messungen gewonnen.

|                                                                               | 50 x 50<br>x 2 cm <sup>3</sup> | 100 x 100<br>x 2 cm <sup>3</sup> |                                                      | $\lambda_{cop}$ |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Druckanstieg</b><br>[mbar/Jahr]                                            | < 2.0                          | < 1.0                            | <b>AF: Aluminium-Folien</b><br>[W/(m·K)]             | 0.006           |
| <b>Feuchteakkumulation</b><br>[Massen-%/Jahr]                                 | < 0.2                          | < 0.2                            | <b>MF: metallisierte Polymer-Folien</b><br>[W/(m·K)] | 0.008           |
| <b>Wärmeleitfähigkeit <math>\lambda_{core}</math> (25 Jahre)</b><br>[W/(m·K)] | < 0.008                        | < 0.007                          |                                                      |                 |

Abbildung 9: links: Alterungskenndaten für SiO<sub>2</sub>- VIP mit polymerbasierten, mehrfach metallisierten Hüllfolien (Werte auf sicherer Seite); rechts: Schweizerische Planwerte (Werte auf sicherer Seite) der center-of-panel Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{cop}$  für Aluminium und polymerbasierte, mehrfach metallisierte Hüllfolien [Vip06]

Die hier dargestellten Werte liegen bei Betrachtung des Langzeitverhaltens auf der sicheren Seite und Berücksichtigen die Verschlechterung der Wärmedämmqualität der Paneele im Lauf von 25 Jahren. [Vip06]

Durch Beachtung folgender Punkte können diese beiden Alterungserscheinungen klein gehalten werden:

- Dickere Paneele haben eine höhere Lebensdauer. Durch das günstigere Volumen-/ Oberflächenverhältnis ist die potenzielle Gefahr von Fehlstellen geringer.
- Hüllmaterialien mit höherer Gasdichtheit wirken sich positiv auf die Lebensdauer aus, weisen aber auch einen höheren Wärmebrücken- Randeffect auf (wegen höherem Metallanteil).
- VIPs sollen im eingebauten Zustand nicht dauerhaft hoher Luftfeuchtigkeit und hohen Temperaturen ausgesetzt sein, um deren Lebensdauer optimal auszunutzen. [Bin05]

Neben einwandfreier Herstellung und wechselnden Umgebungsbedingungen, kommt dem konstruktiv und handwerklich richtigen Einbau ebenfalls ein sehr hoher Stellenwert zu. Es muss dringend vermieden werden, dass Paneele durch Kratzer in der empfindlichen Hülle vor oder während dem Einbau beschädigt werden. Diese könnten bereits durch unachtsames Hantieren, scharfe Kanten oder Sandkörner verursacht werden. Das verdeutlicht, welcher Organisations- und Kontrollaufwand bei Verwendung von Vakuumdämm- Paneelen auf Baustellen erforderlich wird. Nicht zu vernachlässigen und vor allem wirtschaftlich von Bedeutung ist der Umstand, dass zur Verarbeitung von VIP nur speziell geschultes Personal eingesetzt werden sollte. [Sim04]

Zusätzlich muss bedacht werden, dass besonders bei langen Verweildauern von VIPs in Bauteilen, durch Kennzeichnung erkennbar sein soll, dass diese empfindlichen Paneele in der Konstruktion enthalten sind, um nicht im Zuge von weiterführenden Arbeiten oder Sanierungen beschädigt zu werden. [Bin02]

Um diese Beschädigung zu verhindern wurde von Fachleuten der FHBB– Schweiz und anderen Instituten der Vorschlag gemacht, Bauteile, in denen VIP nicht absolut beschädigungssicher eingebaut ist, mit einer Sicherheitsplakette zu kennzeichnen. Diese Methode sollte, in Anlehnung an die „handle with care“ - Aufkleber bei Postdiensten, durch einfache, bildhafte Sprache ebenso funktionieren. Aussehen könnte ein derartiges Schild folgendermaßen. [Bin05]



Abbildung 10: Beispiel für eine Hinweisplakette (VIP inside) [Bin05]

Ein direkter Vergleich der Lebensdauer von VIP in Kühlgeräten und solchen in Bauteilen ist nicht zulässig, da auf Bauteile wesentlich höhere, und vor allem auch rasch wechselnde, Temperaturdifferenzen wirken. Insbesondere außenliegende Paneele werden beispielsweise im Hochsommer sehr hohen Temperaturen ausgesetzt und durch Niederschlag schnell wieder abgekühlt. Durch das hohe Dämmniveau wird zusätzlich das Oberflächenkondensationsrisiko von Wärmebrücken tendenziell verschärft. [Bin02]

Zusammenfassend lassen sich folgende Grundregeln für die Verwendung von Vakuum-Isolations-Paneelen auf Baustellen definieren:

- **Industrielle Verarbeitung:**

Nach Möglichkeit sollten VIPs bereits in der geschützten Umgebung eines Betriebes in vorgefertigte Bauteile integriert werden.

- **Geschultes Personal:**

Die verarbeitenden Handwerker müssen über die Funktionsweise und Risiken aufgeklärt werden.

- **Minimale Exposition von VIP:**

Hier ist die Bauleitung und Bauablaufsplanung gefordert, Abläufe so zu gestalten, dass VIPs unverzüglich nach dem Einbau geschützt werden und vor allem zu einem späteren Zeitpunkt nicht wieder wegen vergessener Arbeitsschritte freigelegt oder gar entfernt werden müssen.

- **Geschützte Lage im Bauteil:**

Dies gilt sowohl für funktionsbedingte, wie auch für nicht gewollte Abläufe.

- **Ersetzbarkeit der VIP:**

Um Nutzer für die Verwendung von VIPs zu gewinnen, muss auch der mit verhältnismäßigem Aufwand verbundene Austausch einzelner Elemente möglich sein. [Bin02] Sie sollten so eingebaut sein, dass eine Überprüfung, besonders mit Infrarot- Thermografie, möglich ist. [Bin05]

Nachfolgende Abbildung veranschaulicht deutlich den Hauptgrund für die Anwendung von  $\text{SiO}_2$ . Insbesondere im Hinblick auf die Lebensdauer von Dämmpaneelen hat Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) einen entscheidenden Vorteil. Wie die Darstellung zeigt, bleibt beim Material Kieselsäure, sogar bei Steigerung des Gasdrucks um mehrere Zehnerpotenzen, die Wärmeleitfähigkeit beinahe unverändert gering und steigt auch dann nur vergleichsweise langsam an. Da im Laufe der Einsatzdauer eines Paneels, wie vorhin erwähnt, davon ausgegangen werden muss, dass sich der Gasdruck erhöht, kann durch entsprechend hohe Evakuierung für Sicherheit gegen Versagen gesorgt werden.

Der zweite herausragende Vorteil ist, im Vergleich zu allen anderen untersuchten Materialien, kann diese geringe Wärmeleitfähigkeit bereits bei wesentlich höheren Gasdrücken und damit mit wesentlich geringerem technischen Aufwand erzeugt werden. [Bin02]

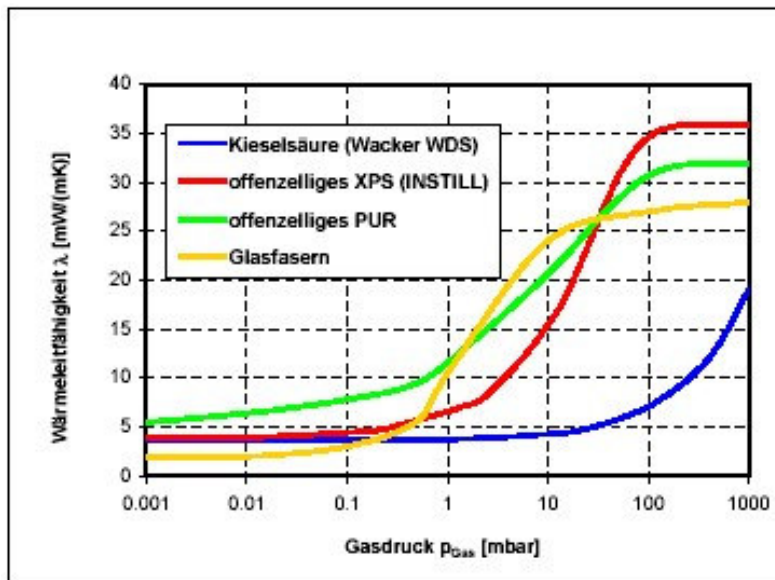


Abbildung 11: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Kernmaterialien als Funktion des Zellgasdruckes

[Bin02]

Im Bereich der Qualitätskontrolle von VIPs hat die Firma va-Q-tec AG ein wichtiges Verfahren entwickelt. Es trägt den Namen va-Q-check und stellt ein Innengasdruck-Kontrollsystem für Vakuumpaneele dar. Besonders bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Kontrolle mit diesem System sowohl bei der Herstellung, als auch auf der Baustelle vorgenommen werden kann. Dies wiederum kann direkt beim Einbau, oder als Langzeituntersuchung, wenn die Möglichkeit einer Zugänglichkeit geschaffen wird, auch im eingebauten Zustand erfolgen.

Bei diesem Verfahren wird über einen externen Sensor eine Temperaturdifferenz auf das VIP aufgebracht und dieser misst während einer Dauer von etwa 5 bis 10s den Wärmefluss vom externen Sensor über die Hüllfolie und die im Paneel befindliche Sensorschicht und Sensorscheibe. Da der Innengasdruck vom Wärmefluss abhängig ist, kann dieser somit einfach bestimmt werden. Durch wiederholte Messungen ist es möglich eine Aussage über die Lebensdauer der Paneele zu treffen. [Vaq07a]



Abbildung 12: Qualitätskontrolle durch va-Q-check [Vaq07a]

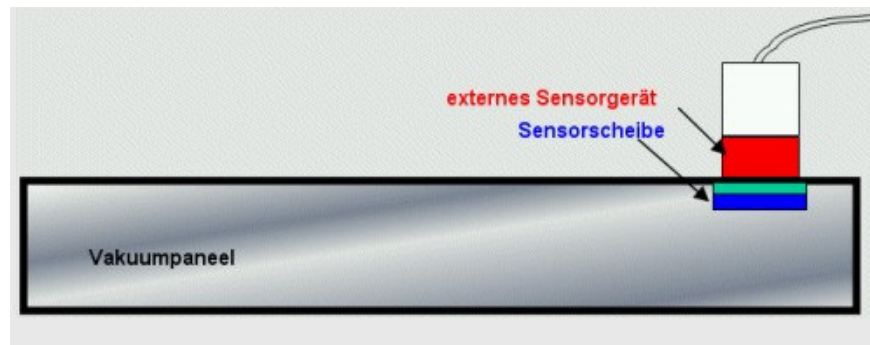


Abbildung 13: Messung des Wärmestroms [Vaq07a]

#### 2.6.1.7 Anwendungsmöglichkeiten mit Praxisbeispielen aus dem Bauwesen

VIPs werden sinnvollerweise überall dort eingesetzt, wo Platzgewinn und geringe Aufbauhöhe von besonderer Bedeutung sind. Wie erwähnt, sollte man mit Rücksicht auf die Lebensdauer der Paneele versuchen diese bereits in vorgefertigte Elemente zu integrieren. Zurzeit liegt der Schwerpunkt jedoch noch auf dem Einbau vor Ort. [Bin05]

Beispiele für Einbaumöglichkeiten sind:

- **Dämmung in Fußbodenaufbauten:**

- Terrassendämmung:**

- Spätestens seit Herausgabe der letztgültigen Vorschriften und Richtlinien über „Barrierefreies Bauen“ sind Planer und Ausführende angehalten Lösungen zu entwickeln, um auch Rollstuhlfahrern die Nutzung von Terrassen und Balkonen zu

ermöglichen. Vergleicht man die erforderlichen Aufbauten der Terrasse außen und der Fußbodenkonstruktion innen, erkennt man eine Höhendifferenz von zumindest einer Treppensteigung. Besteht die Möglichkeit eines Deckensprunges, kann die Höhendifferenz auf diesem Wege ausgeglichen werden, ist dies aber nicht möglich, weil beispielsweise im Geschoß darunter die zulässige Raumhöhe bereits ausgeschöpft ist, bietet sich die äußerst platz sparende Variante mit Vakuumpaneelen an. [Dre05]

Derzeit sind Terrassendämmungen die meist ausgeführten Anwendungen für VIP. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch die Anordnung und den Aufbau eines solchen Details. [Bin05]

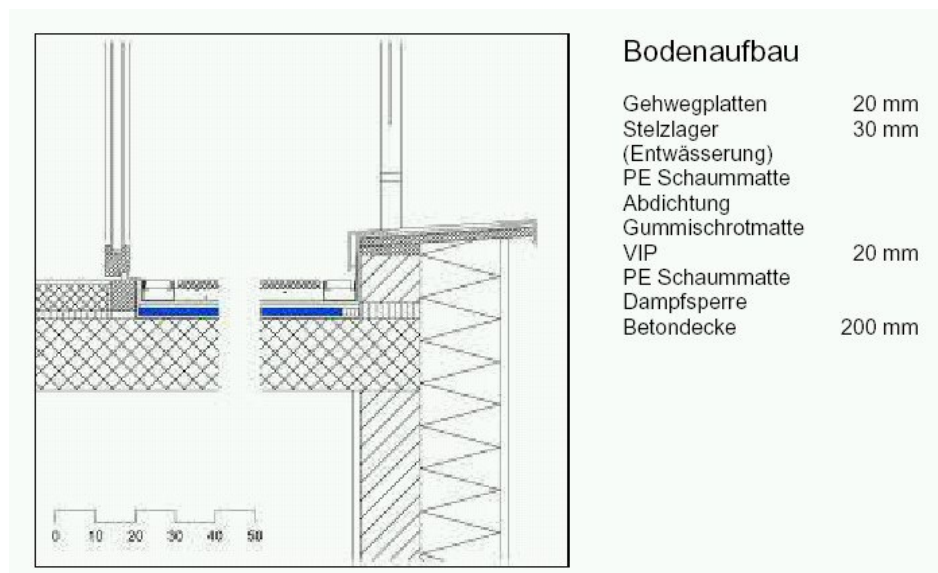


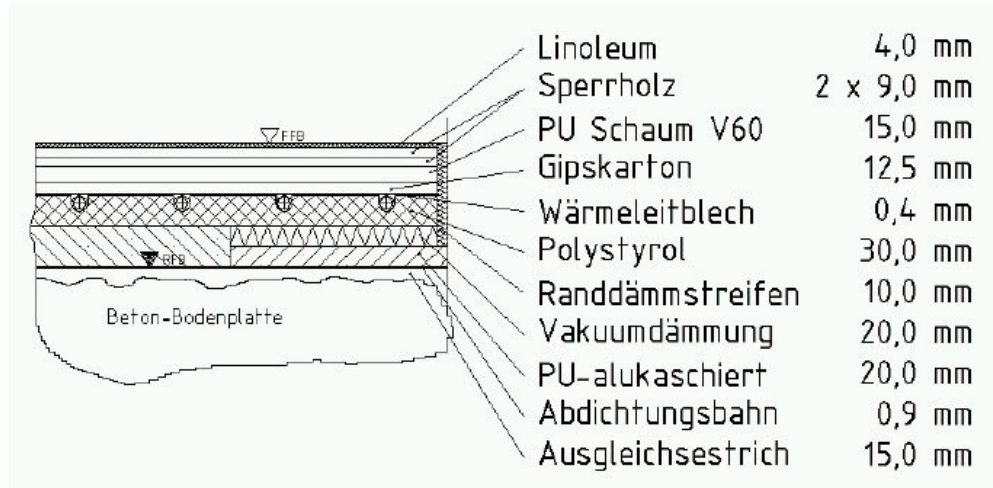
Abbildung 14: Einbau von VIP in Dachterrassen [Bin05]

**Dämmung in Fußbodenaufbauten zu unbeheizten Räumen** (Keller, Müllraum, Lager,...): Auch hier kann die Höhe des Aufbaus gering gehalten werden, falls dies gefordert ist.

#### **Dämmung in erdberührten Fußbodenaufbauten:**

Als Beispiel soll hier die Sanierung eines Turnhallenbodens mit zusätzlichem Einbau einer Fußbodenheizung angeführt werden. Da die Höhe des Fußbodenaufbaues im Zuge der Sanierung nicht verändert, aber der Wärmeverlust möglichst gering gehalten werden sollte, ist Vakuumdämmung aufgrund der geringen Dicke das optimale Baumaterial.

Da es sich hier um ein Testobjekt des ZAE- Bayern handelt, wurde nur ein Teilbereich mit VIP gedämmt. Die restliche Fläche wurde zu Vergleichszwecken konventionell isoliert. Die folgende Abbildung veranschaulicht die unterschiedlichen Aufbauten:



**Abbildung 15: Konstruktionsskizze des vakuumgedämmten Fußbodens mit FB- Heizung [Zae03]**

Nachdem die Unebenheiten der bestehenden Fundamentplatte mit einer Ausgleichsschicht beseitigt waren, wurde eine Abdichtungsbahn aus PE und darauf eine alukaschierte Polyurethan- Dämmschicht aufgebracht. Nun wurde die Vakuumdämmung aufgelegt und die Fugen zwischen den Paneelen durch Verkleben an den Rändern verschlossen. Auf dieser Schicht befindet sich eine Lage EPS mit vorgefrästen Rillen zur Montage der Heizschlangen. Nach der Montage folgte ein Wärmeleitblech zur besseren Verteilung der Wärme im darüber befindlichen Turnhallenfußboden.

Durch diese Maßnahme konnte eine Verbesserung der Dämmeigenschaft des Fußbodens um den Faktor 3 erreicht werden. Die größte Herausforderung bestand im beschädigungsfreien Einbau der Vakuumdämmelemente. Um die Beschädigung der VIPs zu verhindern, wurde streng darauf geachtet, den Untergrund besenrein und frei von gefährdenden Verunreinigungen zu halten.

Bei Einbau von VIP in Fußbodenkonstruktionen wird oft die Frage nach der zulässigen Belastbarkeit gestellt. Bedenkt man aber, dass die Paneele aufgrund der Evakuierung bereits durch den Atmosphärendruck einer Belastung von ca.  $100\text{kN/m}^2$  ausgesetzt sind, so kann davon ausgegangen werden, dass das Füllmaterial die geringen zusätzlichen Belastungen durch gewöhnliche Nutzlasten von bis zu  $5\text{kN/m}^2$  (+ 5%) und den darüber liegenden Aufbauten problemlos aufnehmen kann. [Zae03]

- **Dämmung von Dach- und Wandflächen von Gauben:** Gerade bei einzelnen, schmalen Gauben wird seitens der architektonischen Planung vielfach der Wunsch geäußert, die schlanke Erscheinungsform nicht durch starke Dämmschichten an den vertikalen Dreiecksflächen zu beeinträchtigen. Das führt häufig zur Ausführung dieser Flächen als Fenster. Die Nachteile liegen auf der Hand:
  - Wesentlich höherer U-Wert als umgebende Dachflächen
  - Teurere Ausführung durch Einbau von Fenstern (zusätzlich zumindest teilweise öffnenbar zu Reinigungszwecken)
  - Vielfach Undichtigkeiten durch schwierigere und deshalb mangelhaft ausgeführte Anschlüsse

All diese Nachteile verdeutlichen die sinnvolle Einsatzmöglichkeit in diesem Bereich.

Wie die folgende Abbildung zeigt, sind auch schon Lösungen für vorgefertigte Lukarnen- und Gaubenkonstruktionen entwickelt worden. Diese berücksichtigen den Grundsatz der Vorfertigung bei Verwendung von VIP im Bauwesen.

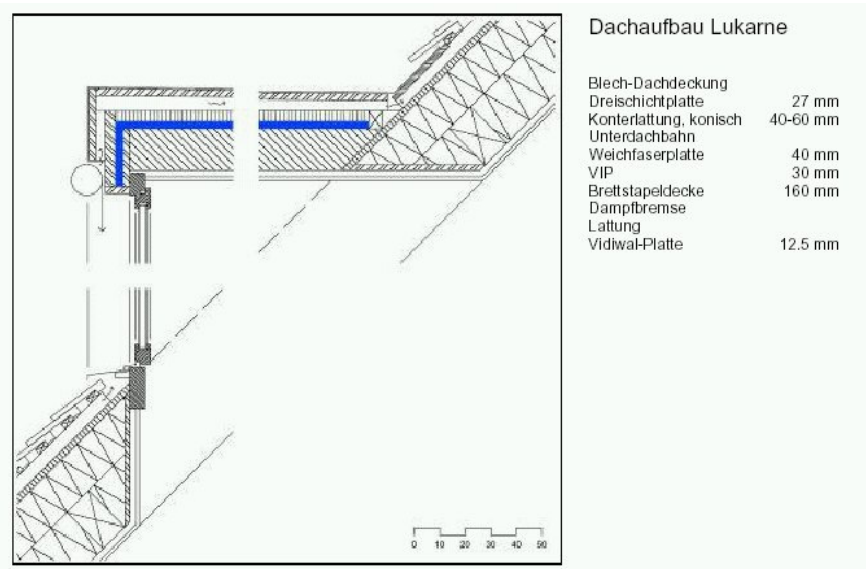


Abbildung 16: Vorfabrizierte Lukarnenkonstruktion [Bin05 von: Architekt Viriden + Partner, Zürich]

- **Dämmung hinter Rollladenkästen, Ortgang und sonstigen Wärmebrücken:** Insbesondere im Bereich von Wärmebrücken fehlt oft der notwendige Platz um Dämmung in erforderlicher Dicke aufbringen zu können und die

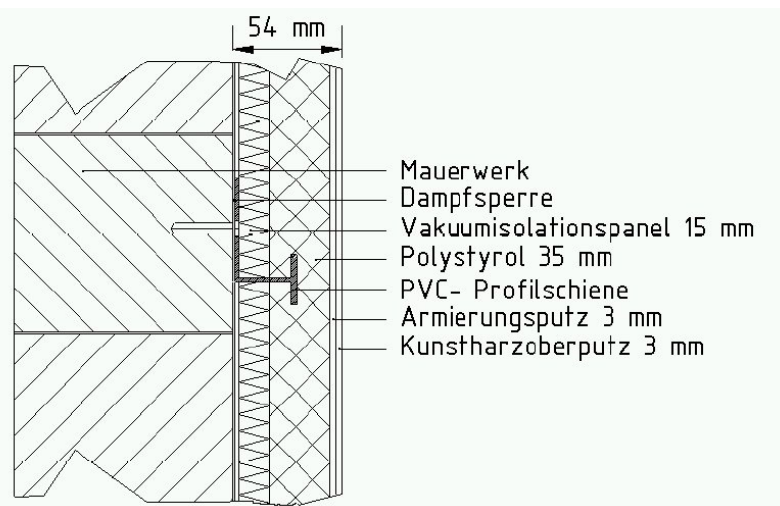
Oberflächentemperatur im Kantenbereich an der Innenseite ausreichend hoch zu halten. Hier ist die Anbringung von VIP für den Neubau, wie auch für die Sanierung eine zielführende Maßnahme.

- **Fassadendämmsysteme:** In speziellen Fällen werden VIPs selbst zur Dämmung ganzer Fassaden verwendet. Durch die derzeit noch sehr hohen Kosten, bleibt diese Maßnahme vorerst jedoch einzelnen, innovativen Projekten vorbehalten. Die Dämmung kann grundsätzlich, unter Berücksichtigung der speziellen Situation, sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite erfolgen. [Dre05]

### **Giebelwand mit VIP- WDVS:**

Das Bayerische Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE- Bayern) führte bis zum Jahr 2003 eine Studie zur Anwendbarkeit von Vakuumdämmplatten im Bauwesen durch. Dabei wurde eine Reihe von Demoobjekten mit VIP gedämmt und deren Praxistauglichkeit bewertet.

Im konkreten Fall handelt es sich um die thermische Sanierung einer Giebelfassade eines in Nürnberg errichteten Gebäudes mit einem WDVS, das Vakuumpaneele enthält. Da das Zweifamilienhaus unter Denkmalschutz steht und an der Giebelfassade nur ein geringer Dachüberstand vorhanden ist, ordnete das Denkmalschutzamt eine maximale Aufbaustärke von 6cm für den Vollwärmeschutz an, um das Erscheinungsbild zu wahren. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Konstruktion des WDVS:



**Abbildung 17: Konstruktionsskizze des verwendeten VIP- WDVS mit Kunststoffschienen [Zae03]**

Im ersten Schritt wurde der alte Außenputz ausgebessert um einen optimalen Untergrund für die selbstklebende Dampfsperre aus Aluminiumfolie zu schaffen. Anschließend wurden die Kunststoffschienen im erforderlichen Raster an der Fassade montiert. Die Vakuum-Isolations-Paneele wurden nun in die PVC-Schienen eingesetzt und zusätzlich am Mauerwerk punktuell mit einer geringen Menge Klebemörtel befestigt. Obwohl beim Einsetzen sehr auf die Vermeidung von Fugen zwischen den Paneelen geachtet wurde, ergaben sich Zwischenräume von 2 bis 4mm, was auf die unebenen Folienränder und die Maßhaltigkeit der Paneele zurückzuführen war. Die schützende Polystyrolschicht war mit Nuten versehen, um passgenau auf die Schienen aufgesetzt werden zu können. Auch sie wurde mittels Klebemörtel mit den VIPs verbunden.

Aufgrund der Form des Giebels mussten auch dreieckige Paneele eingesetzt werden. Insgesamt war es möglich immerhin ca. 95% der Giebelwand mit VIP zu dämmen. Überall wo dies nicht durchführbar war, wurden ersatzweise Polystyrolplatten eingesetzt. Auch die Fensterlaibungen wurden konventionell gedämmt.

Die thermischen Berechnungen wurden mit dem Programm Heat 2 durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

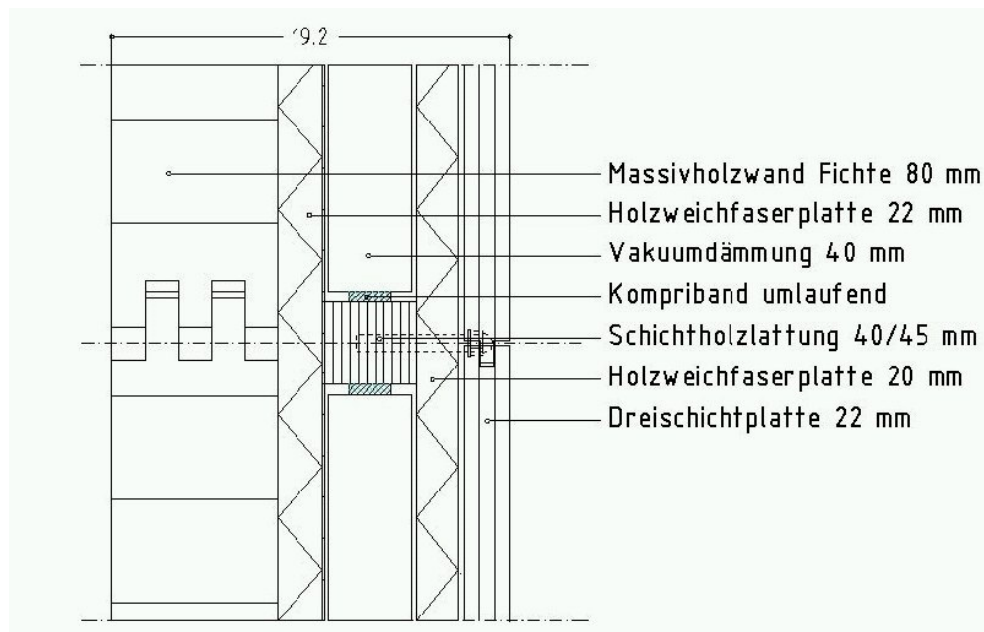
- Der U-Wert wurde um den Faktor drei verbessert ( $0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ )
- Der Einfluss der Wärmebrücke, PVC-Schiene, ist sehr gering. Die Temperaturdifferenz zwischen Monitorpositionen am Putz mitten über einem Paneel und über der Schiene beträgt nur 0,1 K.
- Da die Temperatur zwischen VIP und Mauerwerk ausreichend hoch ist tritt bei Außenlufttemperaturen von  $-10^\circ\text{C}$  keine Kondensation im Mauerwerk auf. Um Kondensation auch im kälteren Fugenbereich zu vermeiden wurde die Dampfsperre aufgebracht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Maßnahme als erfolgreich angesehen werden kann. Zwar war das Handling mit den VIPs vor allem zwischen Entladen und Einbau problematisch, doch waren die Paneele relativ einfach in das Schienensystem einzusetzen. Vorteilhafter wäre eine Anlieferung in kleineren Kartons, um die VIPs bereits direkt am Gerüst vom geschützten Karton aus einbauen zu können.

Im Anschluss an die Baumaßnahme, sowie in den Jahren danach, wurden Kontrollen mittels Infrarot- Thermografie durchgeführt. Dabei lässt sich erkennen, dass drei Paneele aus ungeklärter Ursache belüftet wurden. Was jedoch als wichtiger erscheint, ist der Umstand, dass im Laufe der nächsten Jahre keine weiteren Paneele undicht wurden und auch die Fassade keinerlei Risse oder Verfärbungen aufwies. [Zae03]

### Dämmung von Neubauten in Holzbauweise:

Ziel dieses Projektes war die Errichtung eines Gebäudes unter Verwendung von austauschbaren Vakuumpaneelen. Die Paneele wurden zur Dämmung der Fassade und der Pultdachfläche eingesetzt. Die Fassade besteht aus einer Holzvertäfelung, die auf einer neuartigen Unterkonstruktion mit VIPs aufgebracht wurde.



**Abbildung 18: Konstruktionsskizze der vakuumgedämmten Holzlattungskonstruktion [Zae03]**

Die tragende Konstruktion besteht aus einer 8cm Massivholzkonstruktion. An dieser ist eine horizontale Lattung angebracht in der Holzweichfaserplatten eingestellt sind. Auf dieser Lattung ist nun eine weitere senkrechte Konterlattung montiert, die Gewindestäbe zur Befestigung der Fassadenabdeckplatten enthalten. Die mit einer Lage Komtriband umringten VIPs werden in die Räume zwischen der Konterlattung geklemmt. Das Komtriband hält einerseits die Paneele zwischen der senkrechten Konterlattung und schützt diese andererseits

an den Rändern vor Beschädigung. Nun folgt eine weitere Lage Holzweichfaserplatten und schließlich die Fassadenendbeschichtung.

Die Vorteile dieser Konstruktion sind die Austauschbarkeit und die einfache Montage. Als Nachteil ist die breite Wärmebrücke (Konterlattung) zu sehen. Ihr Einfluss wird jedoch durch die zusätzlichen Dämmebenen vor und hinter den VIPs weitgehend verringert. Simulationsrechnungen mit WUFI2D für die Bereiche der Wärmebrücken haben ergeben, dass es im Winter zwar zu einer Feuchtanreicherung im Holz kommt, diese aber nicht als kritisch zu betrachten ist. Während der Errichtung sind folgende Schwierigkeiten aufgetreten:

- **Maßhaltigkeit der VIPs:**

Die unkomprimierte Dicke des Kompribandes von 10mm lässt eine Maßhaltigkeit der Paneele von  $\pm 5\text{mm}$  zu. Besonders kritisch sind hierbei zu groß dimensionierte Paneele, die unter Umständen gar nicht mehr eingebaut werden konnten. Die Ursache, der teilweise unzureichenden Maßhaltigkeit, lag einerseits im Zuschnitt des Füllkörpers, der durch die Evakuierung noch einem gewissen Schwinden unterworfen war, andererseits durch die mehrfach umgelegten Folienränder. Diese Abweichungen nehmen mit zunehmender Paneeldicke zu. Bei Verwendung dünnerer Paneele oder Anwendung einer besseren Faltungstechnik ist eine maximale Abweichung der Soll- Maße von 2 bis 3mm möglich.

- **Beschädigung der VIPs:**

Insbesondere die Kanten der Paneele sind besonders gefährdet durch mechanische Überbeanspruchung Schaden zu nehmen. Während der Baumaßnahmen wurde festgestellt, dass sich einige VIPs von der Kante aus belüftet haben. Die genaue Ursache konnte nicht festgestellt werden, was wiederum die Problematik der Haftung aufzeigt. Das Hauptproblem war der Transport von der Anlieferstelle auf das Gerüst und schließlich zum Ort des Einbaus. Insbesondere Paneele mit zu großen Abmessungen, die in die Konterlattung doch mit gewissem Druck eingepresst werden mussten, waren gefährdet. Interessant ist die Tatsache, dass die Belüftungszeit der schadhaften Paneele sehr unterschiedlich war. Je nach

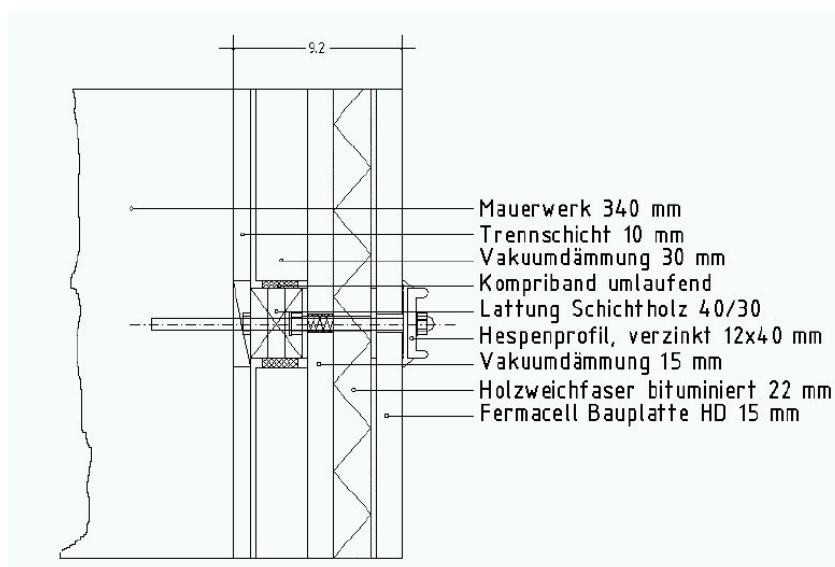
Größe der Fehlstelle trat die Belüftung binnen Minuten oder auch erst innerhalb von mehreren Tagen ein. [Zae03]

### **Fassadendämmung mit austauschbaren VIPs:**

Bei diesem Projekt wurde ein, im Jahre 1956 in München erbautes, Reihenhaus im Zuge einer thermischen Sanierung auf Niedrigstenergiehaus- Standard gebracht. Der Heizwärmebedarf sollte von 200 kWh/(m²a) auf 20 kWh/(m²a) reduziert werden. Neben der Dämmung mit Vakuumpaneelen war auch die Umrüstung auf eine mechanische Lüftung und Fassadenkollektoren vorgesehen.

Der Einsatz von Vakuumdämmung wurde bei diesem Projekt beschlossen, da durch die ansonsten sehr große Dämmstärke der optische Zusammenhang mit den Nachbargebäuden verloren gegangen wäre, und dadurch beispielsweise auch Änderungen am zu geringen Dachüberstand erforderlich geworden wären.

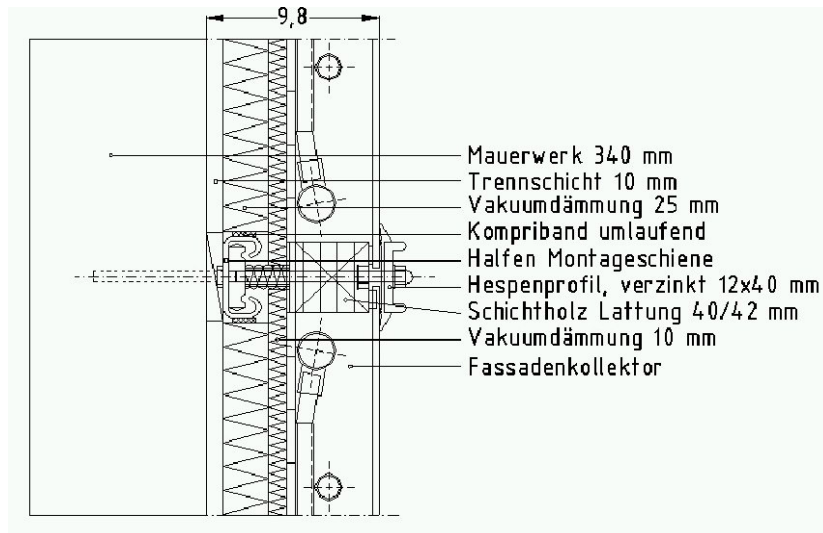
Die Außenwände bestehen aus verputzten Ziegelwänden mit Gesamtdicken von 34cm, die Decken sind in Stahlbetonbauweise gefertigt und das Dachgeschoß ist ausgebaut. Vakuumpaneele fanden nun bei der Sanierung der Fassaden, im Dachbereich und an der Kellerdecke Verwendung.



**Abbildung 19: Konstruktionsskizze der austauschbaren Fassadenkonstruktion (Nordseite) [Zae03]**

Die horizontale Lattung wurde mit einem Toleranzausgleich von 10mm direkt auf die Bestandsmauer aufgebracht. Zur Verringerung des Wärmebrückeneffektes im Bereich der Lattung wurden die Paneele zweilagig versetzt. Auch bei diesem Projekt wurden die VIPs umlaufend mit Kompriband versehen um einen

formschlüssigen Einbau zu gewährleisten und die Paneele in ihrer Lage zu sichern. Als Schutz und zusätzliche Dämmebene wurden Holzweichfaserplatten mit 20mm Stärke außenseitig vorgesehen. Die Fassadenoberfläche besteht aus Zement- Glasfaserplatten, die mit Stahlpressleisten an die Wand geklemmt werden.



**Abbildung 20: Konstruktionsskizze der austauschbaren Fassadenkonstruktion (Südseite) [Zae03]**

An der Südseite wurde an der Oberfläche der Fassade ein Solarabsorber vor der Vakuumdämmung eingebaut. Statt der Holzlattung wurde hier eine Stahlmontageschiene verwendet. Ansonsten wurde auch hier versucht den Einfluss der Wärmebrücken durch Aufteilung auf zwei VIP- Ebenen gering zu halten.

Im Dachbereich wurde als Zwischensparrendämmung Zellulose eingesetzt. Als Ergänzung dienten 20mm VIPs innenseitig unter den Sparren.

Die Kellerdecke wurde ebenfalls mit Vakuumpaneelen gedämmt. Auch hier sind die VIPs mit Kompriband in einem Lattenraster integriert und raumseitig durch eine Abdeckung geschützt. Folgende Schwierigkeiten galt es im Zuge des Projektes zu meistern:

- **Dämmung der Kellerdecke:**

Durch die große Anzahl an Versorgungsleitungen an der Unterseite der Kellerdecke, mussten viele Passstücke aus konventionellem Polystyrol

gefertigt werden. Das beeinträchtigt natürlich den mittleren U- Wert der Konstruktion.

- **Dämmung hinter den Solarkollektoren:**

Durch die hohe Temperatur am Absorberblech der Kollektoren war zu befürchten, dass die Hüllfolien der VIPs dahinter Schaden nehmen würden. Aus diesem Grund mussten Versuche durchgeführt werden, bei denen festgestellt wurde, mit welcher Variation von Absorberblech und Hüllfolie mit einer dauerhaften Funktionstüchtigkeit des Bauteils gerechnet werden konnte. Die Versuche zeigten, dass die maximalen Temperaturen bei Stillstand des Kollektors auftraten. Hierbei traten Temperaturen von ca. 160°C am Blech auf, was zu einem Versagen der direkt dahinter befindlichen Paneele binnen 6 Wochen führte. Dies liegt höchstwahrscheinlich an dem Umstand, dass die Paneele ungefähr in diesem Temperaturniveau versiegelt werden. Ein weiterer Versuch mit einem 5mm dicken Vlies zwischen VIP und Kollektor zeigte nach zehn Wochen noch keinerlei Belüftung der Paneele. Als Konsequenz dieser Versuche wurden die Paneele hinter den Kollektoren mit 30mm Stärke durch jeweils zwei mal 15mm ersetzt, um sichergehen zu können, dass trotz Hitzeeinwirkung mindestens eine Dämmebene intakt bleibt. [Zae03]

### **VIP als Innendämmung:**

Die Verwendung von VIP als Außendämmung wurde bereits vielfach untersucht und beinhaltet keine besonderen Schwierigkeiten, da durch die vollkommen dichten Paneele keine Feuchtigkeit aus Regenereignissen in die Wand eingetragen wird. Somit bleibt der Wassergehalt gering und die fehlende Verdunstungsmöglichkeit nach außen wirkt sich nicht negativ aus.

2003 wurde an der TU Wien eine Untersuchung zur Verwendung von VIP als Innendämmung und die Problematik der damit verbundenen Kondensation angestellt. Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Allgemein gültige Aussagen über die Funktionstüchtigkeit einer nachträglichen Innendämmung mit VIP lassen sich nicht treffen, da sie sehr von den

vorhandenen Materialien, Aufbauten und v. a. vom örtlichen Klima abhängig ist.

- Alle Berechnungen zeigen, dass eine Optimierung der Wärmebrücken besonders wichtig ist (Laibung, Parapet, Tramköpfe, etc.). Gerade bei Durchdringungen machen sich Wärmebrücken stark bemerkbar, da die Frostgrenze oft gleich hinter der Vakuum- Dämmschicht beginnt. Aber aufgrund der sehr geringen Stärke von VIP können diese Optimierungen ohne nennenswerte Erschwernis vorgenommen werden.
- Die Berechnungen haben gezeigt, dass VIP- Innendämmungen eigentlich nur bei stark regenbelasteten Wandkonstruktionen problematisch sind. Das bedeutet, bei derartigen Baumaßnahmen soll stets auch die Wasseraufnahmefähigkeit der äußeren Putzschicht untersucht und gegebenenfalls verbessert werden. Nur wenn diese Kenngröße ermittelt wird kann eine klare Aussage über eine eventuell zu hohe Feuchtelast im Wandquerschnitt getroffen werden. Mögliche Maßnahmen bei unzureichendem Schlagregenschutz sind:
  - Erneuerung der äußeren Putzschicht (wasserabweisend aber diffusionsoffen).
  - Hydrophobierung der äußeren Putzschicht.
  - Falls möglich, Vergrößerung des Dachüberstandes.

Gerade bei Gebäuden mit erhaltenswerten, prunkvollen Fassaden, die nur mit einer Innendämmung thermisch zu verbessern sind, könnte eine Sanierung im Inneren mit einer periodisch notwendigen Fassadenreinigung, baulicher Ausbesserung und anschließender Hydrophobierung verknüpft werden. Dabei ist aber selbstverständlich auf die Grundregel der nach außen hin diffusionsoffeneren Bauweise Rücksicht zu nehmen, um wenigstens die Trocknung eventuell vorhandener Feuchte nach außen zu ermöglichen. [Kor03]

#### **2.6.1.8 Der weltweite Markt für Vakuumdämmelemente**

Der heutige VIP- Weltmarkt wird von der rasch wachsenden japanischen VIP-Industrie beherrscht. Sie kontrolliert zurzeit etwa 50% des, noch sehr kleinen, globalen Marktes.

Neben der vergleichsweise geringen Nachfrage nach Vakuumpaneelen ist auch die Produktion von pyrogener Kieselsäure, dem gängigsten Kernmaterial für VIPs im Gebäudesektor, derzeit noch ein limitierender Faktor. Weltweit gibt es nur wenige Firmen die dieses Ausgangsprodukt herstellen. [Bin05]

#### **2.6.1.9 Ökologie von VIP**

Es kann angenommen werden, dass eine weit reichende Verbreitung von Vakuumdämmsystemen im Bauwesen einen maßgebenden Beitrag zur Erreichung des Klimaschutzziels zur Verringerung der Treibhausgase haben wird. [Bin05]

Das 1997 verfasste Kyoto Protokoll sieht eine Reduktion von sechs Treibhausgasen bis zum Jahre 2012 vor. Diese sind: CO<sub>2</sub> (Kohlendioxid), CH<sub>4</sub> (Methan), N<sub>2</sub>O (Lachgas, Distickoxid), FKW (Vollfluorierte Kohlen-Wasserstoffe), HFKW (Teilfluorierte Kohlen-Wasserstoffe) und SF<sub>6</sub> (Schwefelhexafluorid). Die EU verpflichtete sich zu einer Reduktion um 8%, Österreich sogar um 13%. Bei der gegenwärtigen Entwicklung wird Österreich sein ambitioniertes Ziel nicht nur weit verfehlen, sondern darüber hinaus wesentlich weiter davon entfernt sein als zum Beschlusszeitpunkt. [Dre06a]

Oftmals tritt die Frage auf, ob nicht der ökologische Nutzen hinsichtlich Energieeinsparung durch die aufwendige Produktion egalisiert werde. Genau dieser Fragestellung ist man an der FHBB – Institut für Energie (Schweiz) nachgegangen.

Dabei wurde das VIP mit den zwei sehr verbreiteten Dämmstoffen, Glaswolle und Polystyrol EPS, verglichen. Im Folgenden sollen hier nur noch die wesentlichen Annahmen und eine Zusammenfassung ausgeführt werden. Eine detaillierte Auskunft über die verwendeten Verfahren ist dem Text der angeführten Quelle zu entnehmen.

Wichtige Vorgaben der Ökobilanzstudie:

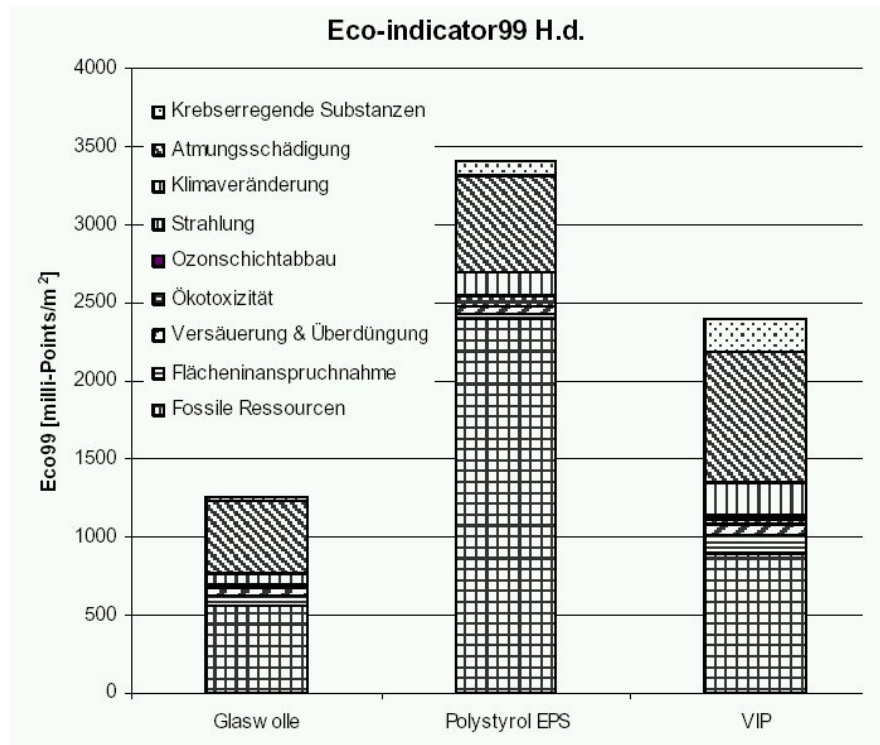
- Verglichen wurde eine Wandkonstruktion, bzw. die benötigte Dämmstoffmenge zur Erreichung eines U- Wertes von 0,15 W/(m²K).
- Es wurden VIPs ausschließlich mit pyrogener Kieselsäure, aber mit verschiedenen Hüllmaterialien untersucht.
- Pyrogene Kieselsäure wird als Koppelprodukt der Reinsilizium- Herstellung bei der Chip- Produktion gewonnen. Die Zuordnung der umweltbelastenden Vorprodukte wurde nach den Marktpreisen vorgenommen. Die Einbeziehung von Tetrasiliziumchlorid prägte dabei die Ergebnisse der Ökobilanz zu über 60%.
- Die Bewertung erfolgte nach allen drei, in der Schweiz üblichen, Umweltbewertungsmethoden. Diese sind: Eco- Indicator 99, Umweltbelastungspunkte UBP 97 und die Methode des kumulierten Energieaufwandes KEA (graue Energie).

Bei konventionellen Dämmstoffen zeigt sich in einer Ökobilanz, dass der Nutzen die ökologischen Beeinträchtigungen deutlich übersteigt. Das gilt ebenfalls noch, wenn durch viel Dämmmaterial ein hohes Dämmniveau erhalten wird.

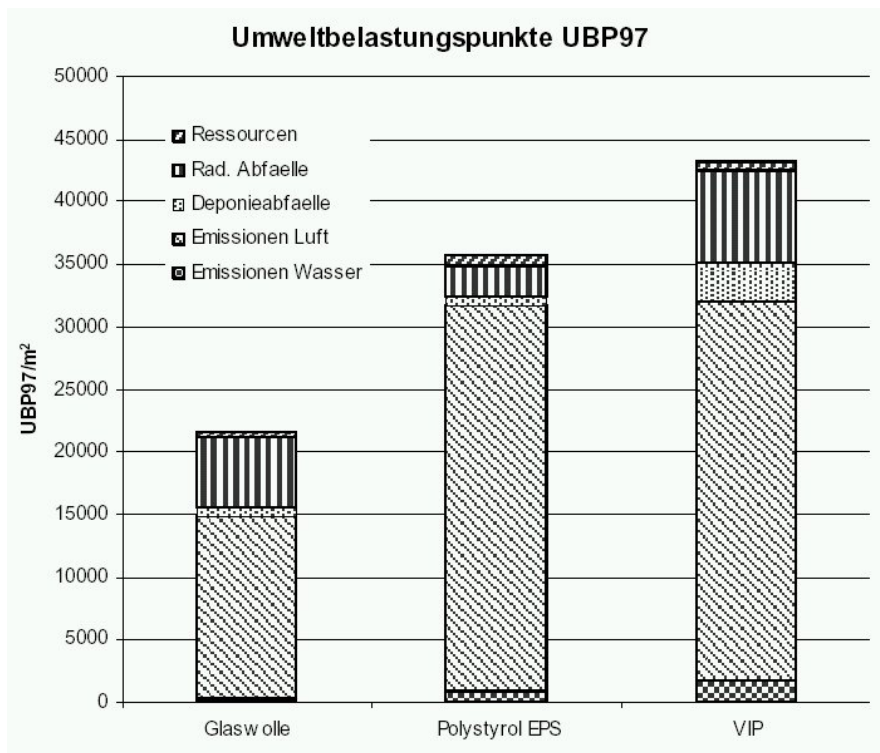
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auch wenn VIP im direkten Vergleich mit Glaswolle und EPS etwas schlechter bewertet wird, der Gesamteindruck des Überwiegens der positiven Effekte durch Dämmung an sich, auch bei Verwendung von Vakuumpaneelen, unverändert gilt. Die Überlegenheit der Vergleichsprodukte lässt sich auch durch den derzeitigen Status eines Vor-Serienprodukts erklären, das noch nicht hinsichtlich ökologischer Erzeugung optimiert wurde.

Es zeigte sich klar, dass der Hauptanteil der negativen Auswirkungen auf die energiereiche Herstellung entfällt und die Wahl der Materialien nur von untergeordneter Bedeutung ist. [Bin05 aus: Sch03]

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung mit den Methoden Eco-indicator 99 und Umweltbelastungspunkte UBP 97 dargestellt: [Bin05 aus: Sch03]



**Abbildung 21: Vergleich der Wirkkategorien für die Dämmmaterialien Glaswolle, Polystyrol EPS und VIP nach der Methode Eco-indicator 99 [Bin05 aus: Sch03]**



**Abbildung 22: Vergleich der Wirkkategorien für die Dämmmaterialien Glaswolle, Polystyrol EPS und VIP nach der Methode der ökologischen Knappheit mit Umweltbelastungspunkten UBP 97 [Bin05 aus: Sch03]**

Hier ist zwar ersichtlich, dass Glaswolle bei Betrachtung der Ökologie am besten zu bewerten ist, jedoch ist zu bemerken, dass sich die Ergebnisse aller drei untersuchten Dämmstoffe auf einem guten Niveau befinden. Ausschlaggebend für die teilweise schlechtere Reihung des VIP, ist die noch sehr energieintensive Herstellung und hier im Speziellen die Silizium verarbeitende Industrie.

Sensitivitätsanalysen haben jedoch ergeben, dass bei Ausschöpfung vorhandener und erkannter Prozessoptimierungspotentiale das VIP in den Bereich der Mineralwolle gerückt wird. Damit kann bei steigender Marktdurchdringung und damit verbundener Konkurrenz zukünftig sicherlich gerechnet werden. [Bin05 aus: Sch03]

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass das Kernmaterial Kieselsäure in der Natur weit verbreitet ist. Es kommt in pflanzlichen, wie tierischen Lebewesen vor und ist auch im Grundwasser enthalten. Pyrogene Kieselsäure, wie sie auch zur Herstellung von VIP in Verwendung ist, wird beispielsweise zur Verbesserung des Freisetzverhaltens von Tabletten und Kapseln eingesetzt, was verdeutlicht, dass Kieselsäure nicht gesundheitsgefährdend ist. [Wac07]

Das Kernmaterial – pyrogene Kieselsäure – ist ein wertvoller Rohstoff und kann nach einer Wiederaufbereitung erneut verwendet werden (z.B. wieder als VIP). Wird auf eine Wiederverwendung verzichtet, kann das Kernmaterial auf einer geeigneten Deponie entsorgt werden. Auch die hochwertige Umhüllung kann, wie jede andere Verpackungsfolie auch, entsorgt werden. [Vaq07]

## **2.6.2 Calciumsilikat (CaSi)**

### **2.6.2.1 Allgemeines, Vorteile und Nachteile**

Calciumsilikat ist ein synthetisch hergestellter Dämmstoff auf mineralischer Basis. Die wesentlichen Bestandteile sind: Kalk ( $\text{CaO}$ ), Quarz oder amorphe Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ), Wasser und Armierungsfasern. Durch das feine und mikroporöse Porengefüge erhält das Material seine geringe Rohdichte.

Das Material zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- nicht brennbar
- kapillaraktiv
- nicht wasserlöslich
- wärmedämmend
- formstabil
- alkalisch bei einem pH- Wert von ca. 10
- ökologisch
- gesundheitlich unbedenklich

Die Anwendungen reichen von Schmelzwannen- Dämmungen in der Glasindustrie, Hinterdämmung von Brennöfen, bis zu Anwendungen im Bereich des Brandschutzes. Dämmplatten aus Calciumsilikat werden im Baubereich bereits seit einigen Jahren erfolgreich als klassische Innendämmungen sowie als Sonderlösung in Form von so genannten Sanierplatten eingesetzt. Letztere vereinen die Fähigkeiten einer Dämmschicht mit der eines Sanierputzes.

Für den Einsatz als Innendämmung zeichnet sich das Material insbesondere durch die Eigenschaften, wärmedämmend, kapillaraktiv, diffusionsoffen und schimmelhemmend aus. [Hec01]

Wie im einleitenden Abschnitt „Innendämmung“ bereits eingehend erläutert wurde, sind für Dämmmaterialien, die auf der Innenseite von Außenbauteilen appliziert werden, die Diffusionsoffenheit und insbesondere die kapillare Leitfähigkeit von größter Bedeutung. Somit wird es ermöglicht, Feuchtigkeit die einerseits durch Regenbelastung und unzureichenden Witterungsschutz der äußeren Putzschichten und andererseits durch Kondensation an der Trennschicht von Innendämmung und Wandbildner auftritt rasch abzuleiten. Die Kondensationsebene liegt am beschriebenen Punkt, da dort die Temperatur stark abnimmt und der herrschende Dampfdruck die Größe des Sättigungsdampfdruckes annimmt.

Durch die beiden genannten Eigenschaften kann diese Feuchte nun nicht nur nach außen, sondern auch nach innen abgegeben werden, ohne durch eine Dampfsperre behindert zu werden. Zusätzlich verringert die Feuchtebewegung den Wasserdampfdruck und somit auch die Wahrscheinlichkeit von Kondensation. [Hec01]

### 2.6.2.2 Herstellung und bauphysikalische Eigenschaften von CaSi- Platten

Bei der Herstellung wird Calciumoxid und Siliziumdioxid in Wasser aufgeschlämmt und intensiv vermischt. Dabei kommt es zu einer chemischen Reaktion – einer Vorstufe des Endproduktes CaSi. In den späteren Poren ist zu diesem Zeitpunkt noch Wasser eingelagert. Nun reagiert dieses Zwischenprodukt unter Einwirkung von heißem Wasserdampf und erhöhtem Druck im Autoklaven zum Endprodukt, Calciumsilikat. Bei dieser Hydrothermalreaktion entstehen feine Kristalle. [Hec01]

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von CaSi- Platten, die sich durch einen geringen Unterschied bei der Herstellung auszeichnen. Die folgende Tabelle zeigt einige bauphysikalische Kenngrößen dieser Platten. [Hec01]

**Tabelle 1: Kenndaten von CaSi aus zwei Herstellungsprozessen [Hec01 aus: Dre99]**

|       | $\rho$            | $u_{45}$          | $u_{75}$          | $U_F$             | $\mu$ | $w$                                |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|------------------------------------|
|       | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | -     | kg/m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> |
| CaSiL | 260               | 2.3               | 4.2               | 900               | 3.2   | 100                                |
| CaSiW | 220               | 3.5               | 7.0               | 900               | 3.0   | 75                                 |

|          |                                                                          |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|
| $\rho$   | Trockendichte                                                            |
| $u_{45}$ | Sorptionsfeuchtegehalt bei 45 % relativer Luftfeuchte und Raumtemperatur |
| $u_{75}$ | Sorptionsfeuchtegehalt bei 75 % relativer Luftfeuchte und Raumtemperatur |
| $U_F$    | Sättigungsfeuchtegehalt                                                  |
| $\mu$    | Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl                                     |
| $w$      | Wasseraufnahmekoeffizient                                                |

Der Herstellungsprozess von Sorte W beinhaltet eine Pressung des Rohmaterials, somit ist der Wasseraufnahmekoeffizient geringer, da bei waagerechter Messung einige Schichten kapillarbrechend wirken. [Hec01]

Die Wärmeleitfähigkeit von Calciumsilikat- Dämmplatten liegt ca. zwischen 0,050 - 0,065W/(mK), die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  zwischen 5-20. Hinsichtlich des Brandverhaltens ist CaSi als nichtbrennbar (A1) einzustufen. [Pro07], [Wae02]

### 2.6.2.3 Die Sanierplatte

Die grundlegenden Anforderungen an eine Sanierplatte sind sehr ähnlich jenen von Sanierputzen, mit dem Unterschied der zusätzlichen Wirkung als leistungsfähige Dämmebene. Sanierplatten werden dort eingesetzt, wo Oberflächen durch Salzausblühungen, Absandungen und feuchte Stellen unansehnlich geworden sind und teilweise auch die gewünschte Nutzung in solchen Räumen nicht mehr möglich ist. [Dre06]

Eine Sanierplatte ist im Wesentlichen eine Platte aus CaSi, die durch verschiedene Behandlungen derart verändert wurde, dass Salze über einen längeren Zeitraum eingelagert werden und nicht bis an die Innenoberfläche durchdringen können. Das kann beispielsweise durch komplette Hydrophobierung, durch Teilbehandlung mit unterschiedlichen Konzentrationen, Verteilungen und Gradienten oder durch Verringerung der Wasseraufnahme und somit Reduktion des Feuchtetransports erreicht werden. Wichtig dabei ist natürlich, dass die Platte nicht durch die Salzanreicherung im Inneren geschädigt wird. [Dre06]

Auch die Funktionsweise ist ähnlich der eines Sanierputzes. Durch die hohe kapillare Transportfähigkeit des Calciumsilikats wird die Mauerfeuchte samt den gelösten Salzen in die CaSi- Platte eingetragen und kommt bis zur hydrophobierten, oberflächennahen Schichte. Nun kann die Feuchtigkeit durch Diffusion bis an die Oberfläche gelangen und dort verdunsten, während die Salze an der hydrophobierten Ebene zurückgehalten werden. Die Hydrophobierung sorgt für eine Kapillardepression, was die kapillare Leitfähigkeit und damit auch den Salztransport verhindert. Somit wird das Hauptziel erreicht, eine optisch einwandfreie Oberfläche ohne Salzausblühungen, bei gleichzeitiger Dauerhaftigkeit des CaSi. [Dre06]

Im Vergleich zu Sanierputzen ergeben sich folgende Vorteile durch CaSi-Sanierplatten:

- Garantierte Systemeigenschaften durch regelmäßige Qualitätskontrolle.
- Bei beinahe jedem Klima applizierbar (unabhängig von der Luftfeuchtigkeit). Einschränkungen ergeben sich höchstens durch das Kontaktmaterial.
- Minimierter Fehleranfälligkeit beim Herstellprozess.
- Vereinfachter Aufbau (einschichtig).

- Konstante Schichtstärke der Sanierplatte (Putze im Allgemeinen können nie in einheitlicher Stärke aufgebracht werden).
- Systemeigenschaften unabhängig vom Untergrund.

Folgende Zusatzfunktionen sind außerdem nutzbar:

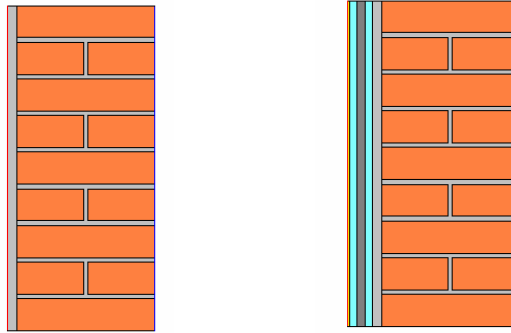
- Zusätzlicher Nutzen als Innendämmung und dadurch Verbesserung des Wärmeschutzes.
- Der Systemaufbau ist für alle Versalzungsgrade geeignet.
- Die Applizierung ist, sogar in verwinkelten Kellern, weniger aufwendig als das Aufbringen von Sanierputzen.

[Hec01]

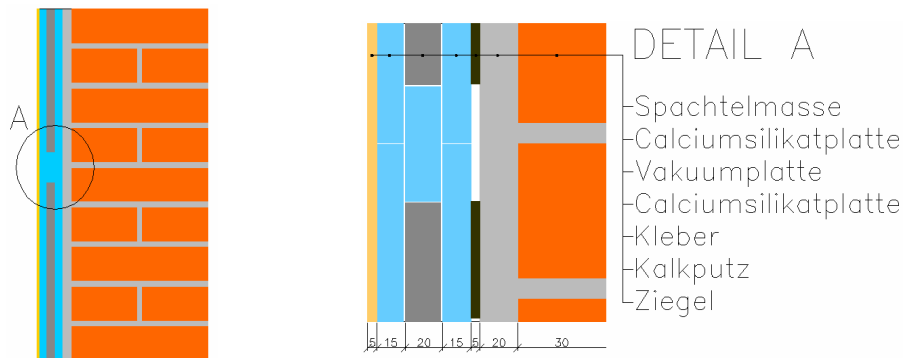
#### 2.6.2.4 CaSi/VIP- Kombiplatte

Am Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Bauphysik und Bauakustik an der TU Wien wurden bislang, zur Fragestellung der Einsetzbarkeit einer Kombinationsplatte aus CaSi und Vakuum-Isolations-Paneelen, nur Untersuchungen in Form von Simulationen vorgenommen. Es folgt eine kurze Beschreibung der bisherigen Forschung mit der Erläuterung der wichtigsten Ergebnisse.

Im konkreten Fall handelt es sich beim untersuchten Objekt um eine Feuermauer an der Grundstücksgrenze. Im Krieg wurde das Nachbargebäude zerstört und seitdem kein neues Gebäude errichtet, somit wurde die einst als schlankes Trennbauteil zwischen zwei Wohnhäusern konzipierte Wand zur Außenwand ohne Dämmung. Da hier nur die Sanierung einer einzelnen Wohneinheit mit einer Außenwandfläche von ca. 20m<sup>2</sup> vorzunehmen war und der Grundstückseigentümer der Nachbarliegenschaft die Absicht geäußert hat, in fernerer Zukunft ein Gebäude zu errichten, blieb hier nur die Variante einer Innendämmung zur Verbesserung des Wärmeschutzes. Der Aufbau wurde wie folgt mittels Simulationen untersucht:



**Abbildung 23: links: ungedämmte Wand; rechts: gedämmte Wand [Dre06c]**

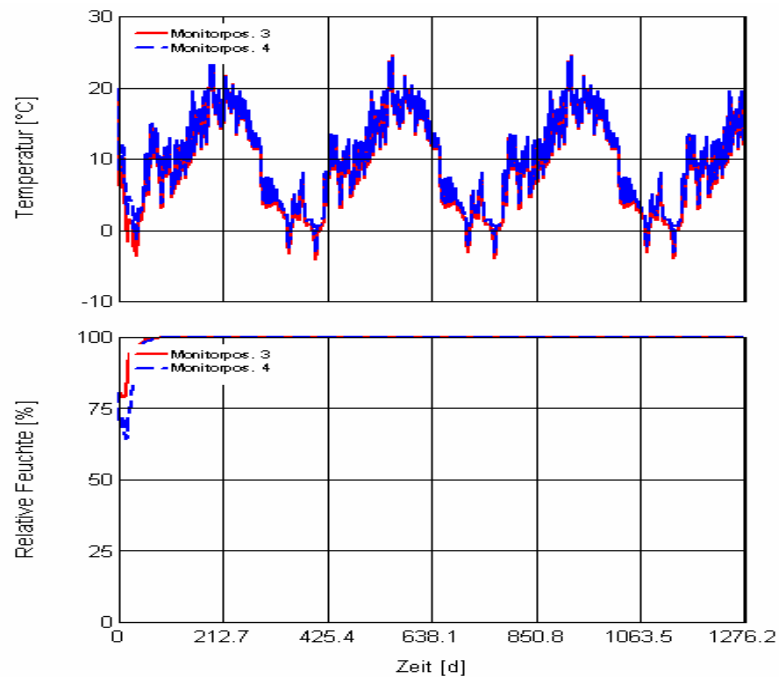


**Abbildung 24: Detaillösung: Fugenbereich mit CaSi- Platten zwischen VIPs [Dre06c]**

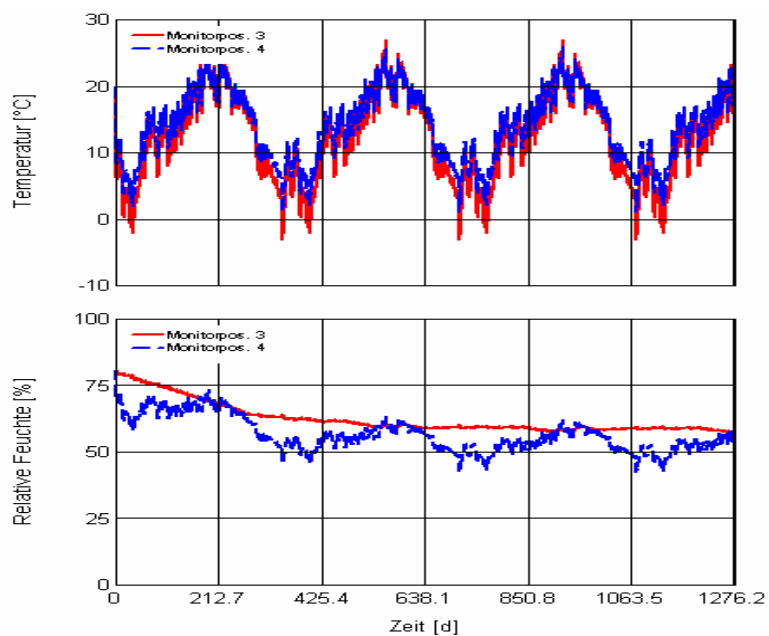
Wie die obigen Abbildungen zeigen, ist das VIP zwischen zwei 15mm starken CaSi-Platten eingebettet und somit auch beim Einbau geschützt. Darunter befindet sich der Bestand, bestehend aus ca. 2cm Kalkputz und einem 30cm Ziegel- Mauerwerk. Die Außenseite ist in der Simulation, wie auch in der Realität, vorerst unverputzt verblieben. An den Stößen der 20mm starken VIPs ist ebenfalls eine großzügige Auswechslung mit Calciumsilikat angedacht. Dies ist zur Feuchteregulierung des Bauteils erforderlich. Da die VIPs beidseitig in eine dünne Lage CaSi eingebettet sind, können etwaige Feuchtelasten durch die Kapillaraktivität des CaSi schneller abtransportiert werden.

Betrachtet man nun die Simulation hinsichtlich des Feuchtehaushalts des Wandquerschnitts, so zeigt sich, dass man eine realistische Annahme hinsichtlich der Schlagregenereignisse treffen muss. Hierbei ergeben sich sehr große Unterschiede in der Feuchtebelastung zwischen normaler Regenbelastung und einer geringeren Regenbelastung an der hier betrachteten Ostwand. Ist die relative Luftfeuchte im Wandquerschnitt direkt hinter dem VIP bei standardisierter Schlagregenbelastung unzulässig hoch, so nimmt sie bei Wahl einer realistischeren

Belastung vergleichsweise schnell ab und pendelt sich bei einem durchaus unproblematischen Wert von ca. 60% ein.



**Abbildung 25: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit im Wand- QS direkt hinter der Vakuumdämmung unter Annahme einer hohen Regenbelastung auf die unverputzte Fassade [Dre06c]**



**Abbildung 26: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit im Wand- QS direkt hinter der Vakuumdämmung unter Annahme einer extrem geringen Regenbelastung (Ostfassade) auf die unverputzte Fassade [Dre06c]**

Grundsätzlich gelten, bei Anwendung einer CaSi/VIP- Kombiplatte in Form einer Innendämmung, ebenso ähnliche Bedingungen wie bei einer reinen Innendämmung aus VIP, die an anderer Stelle thematisiert wurde. Auch hier müsste bei tatsächlicher Realisierung dieser Maßnahme für einen ausreichenden Feuchteschutz durch Schlagregen von der äußeren Bauteiloberfläche gesorgt werden, um eine zufrieden stellende Sicherheit gegen Feuchtigkeitsschäden zu erreichen. Dies könnte im betrachteten Fall durch Aufbringen eines wasserabweisenden, aber diffusionsoffenen Putzsystems oder einer Kombination aus einem weniger abweisenden Putz mit Hydrophobierung erreicht werden.

Auch die Herabsetzung der Temperatur des Wandquerschnittes während der kalten Jahreszeit darf nicht vernachlässigt werden. Unterliegt die Wand im Bestandszustand noch einer relativ linearen, unkritischen Temperaturverteilung, so findet nach Applikation einer Innendämmung beinahe der gesamte Temperatursprung von Außen- zur Innentemperatur im Bereich der VIPs statt, was dazu führt, dass bei negativen Außentemperaturen, die tragende Konstruktion der erhöhten Gefahr von Frost-/Tau- Schäden ausgesetzt ist. [Dre06c]

#### **2.6.2.5 Ökologie von Calciumsilikat**

Um die ökologischen Auswirkungen von CaSi- Dämmstoffen von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung darstellen zu können, werden exemplarisch die wichtigsten Erkenntnisse aus der Umweltdeklaration nach ISO 14025 bezüglich der mikroporösen Calciumsilikat- Wärmedämmstoffe der deutschen Fa. CALSITHERM Silikatbaustoffe GmbH aufgezeigt.

##### **Produktherstellung:**

- Grundstoffe: Die Calciumsilikat- Platten (CSP) werden aus den Rohstoffen Kalkhydrat, Sand, Flugasche und silikatischen Zuschlägen hergestellt. Die Anmischung erfolgt mit einer 0,2%igen Wasser/Zellstoff Suspension.
- Rohstoffgewinnung und Stoffherkunft: Sand und Kalkstein werden im Tagebau aus oberflächennahen Gesteinsschichten gewonnen. Kalkhydrat wird durch Brennen von natürlichem Kalkstein hergestellt. Steinkohle- Flugasche ist ein hochwertiges Recyclingprodukt. Zellstoff stammt aus dem nachwachsenden

Rohstoff Holz. Die silikatischen Zuschläge sind ebenfalls speziell gemahlene Recyclingprodukte.

### **Produktverarbeitung:**

- Arbeitnehmerschutz: Beim händischen Schneiden der Platten ist eine Staubmaske erforderlich. Wird im Betrieb maschinell geschnitten, sollte der entstehende Staub abgesaugt werden. Durch den Einbau der Calciumsilikatplatten werden keine Umweltbelastungen verursacht.
- Restmaterial: Verschnitt und Reste werden als Bauschutt regional entsorgt.
- Verpackung: Diese besteht aus recyclebaren PE- Schrumpffolien.

### **Nutzungszustand:**

- Inhaltsstoffe: Calciumsilikathydrate entsprechen den in der Natur vorkommenden Mineralien Tobermorit und Xonolit.
- Wirkungsbeziehungen: Emissionen sind aufgrund des festen Gefüges nicht möglich. Auch Gesundheitsbeeinträchtigungen können bei zweckbestimmter Nutzung nicht auftreten.
- Umweltbeeinträchtigungen: Bei bestimmungsgemäßer Anwendung besteht keine Gefahr für Wasser, Luft und Boden.

### **Außergewöhnliche Einwirkungen:**

- Brand: Die Produkte sind lt. DIN der Klasse A1 – nicht brennbar – zuzuordnen. Durch den kleinen Anteil von Zellstoff, können bei großer Hitzeeinwirkung geringe Mengen von Verbrennungsgasen freigesetzt werden.
- Wasser: Die Produkte sind nicht wasserlöslich und unterliegen keiner Formveränderung durch Wassereinwirkung oder Trocknung.

### **Nachnutzungsphase:**

- Rückbau: CSP können problemlos selektiv rückgebaut werden.

- Wieder- und Weiterverwendung: Wurden die Produkte selektiv rückgebaut können sie, je nach verbleibender Dauerhaftigkeit, gemäß ihrem ursprünglichen Verwendungszweck wieder eingesetzt werden.
- Wieder- und Weiterverwertung: Im zermahlten Zustand können die sortenreinen Produkte z.B. noch als Füllstoff für Hochtemperaturschüttdichtungen oder -dämmungen eingesetzt werden. Aufgrund des hohen Kalkanteils können sie auch der Verwendung als landwirtschaftlicher Abfallkalk zugeführt werden.
- Entsorgung: Sind die beschriebenen Recyclingmöglichkeiten nicht erwünscht, kann das Material als Bauschutt ohne außergewöhnliche Belastung für die Umwelt entsorgt werden.

All diese Punkte verdeutlichen, dass Dämmplatten aus Calciumsilikat ökologische Baustoffe mit geringen negativen Auswirkungen auf die Umwelt sind. [Bau06]

## **2.6.3 Transparente Wärmedämmung**

### **2.6.3.1 Allgemeines, Vorteile und Nachteile**

Konventionelle Wärmedämmung hat die Aufgabe den Wärmestrom von innen nach außen zu verringern. Transparente Wärmedämmung (TWD) dient zusätzlich zur Nutzung solarer Gewinne. Analog den Sonnenfenstern, die auch zur Nutzung solarer Gewinne in der kalten Jahreszeit herangezogen werden, ist als optimale Ausrichtung eine Südorientierung zu wählen. Die Palette der Systeme reicht von transparenten Kunststoffplatten aus Granulat, bis hin zu Papierwabenstrukturen, die mit Glas abgedeckt sind. [Ene07]

Insbesondere bei Altbauten sind oft hohe Wandstärken vorhanden. Das wirkt sich zusätzlich positiv auf die Nutzung der solaren Energie aus. Durch die hohe Masse des Mauerwerks hat die Wand ein eher träges thermisches Verhalten, was bedeutet, dass die zur Mittagszeit am stärksten eingetragene Energie verzögert wird und somit erst in den Abendstunden und über einen längeren Zeitraum hinweg den Wohnraum

hinter dem Fassadenelement erwärmt. Somit wird der Energieeintag von Sonnenfenstern und TWD hintereinander und nicht gleichzeitig genutzt, was sehr zu begrüßen ist, da ansonsten die Gefahr der Überhitzung gegeben wäre. In diesem Fall müsste die gewonnene und durch hohe Anschaffungskosten der Bauteile teuer erkaufte Wärmeenergie wieder abgelüftet werden, was sicher nicht im Interesse des Nutzers ist. [Ene07]

Problematisch ist unter Umständen eine mögliche Überhitzung in den Sommermonaten. Dies tritt besonders bei ost- bzw. westorientierten Fassaden auf, da in diesen Himmelsrichtungen die Sonne am tiefsten und somit beinahe in einer Senkrechten auf die Oberfläche der TWD steht. Die Problematik kann durch echte Südorientierung mit ausreichendem Dachvorsprung oder auch durch aufwendige Verschattungseinrichtungen vermieden werden. [Ene07]

Eine weitere Möglichkeit stellt eine Beschichtung an der Außenseite der TWD, die sich je nach Sonneneinstrahlung und Temperatur verfärbt, dar. Somit nimmt die Beschichtung ab gewissen Klimarandbedingungen die Farbe weiß an. Diese Beschichtungen bestehen in der Regel aus Gelen, die diese speziellen Eigenschaften aufweisen. Bei höheren Temperaturen koagulieren Gruppen von Molekülen. Dabei bewirken sie zum einen eine Lichtstreuung und damit eine weiße Verfärbung, zum anderen werden die Sonnenstrahlen durch unterschiedliche Lichtbrechung abgelenkt und reflektiert. [Dre06b]

Eine andere Lösung der Steuerung der Energiezufuhr, beruht auf der Zwischenschaltung von schaltbaren Wärmedämmungen. Diese wird zwischen Wand und transparenter Abdeckung eingesetzt und im Falle von solarem Überangebot zwischengeschaltet. Somit kann je nach Bedarf das Dämmniveau reguliert werden. Kern dieses Systems ist ein evakuiertes Vakuumdämmpaneel, das seine Wärmeleitfähigkeit mittels Wasserstofftechnologie reversibel um den Faktor 50 und mehr verändern kann. [Dre06b]

Modernste Systeme nutzen die überschüssige Energie an der Rückseite der TWD sogar schon zur Warmwasserbereitung während der Sommermonate. Dazu wird zwischen dem Wandbildner und der transparenten Wärmedämmung eine Ebene mit

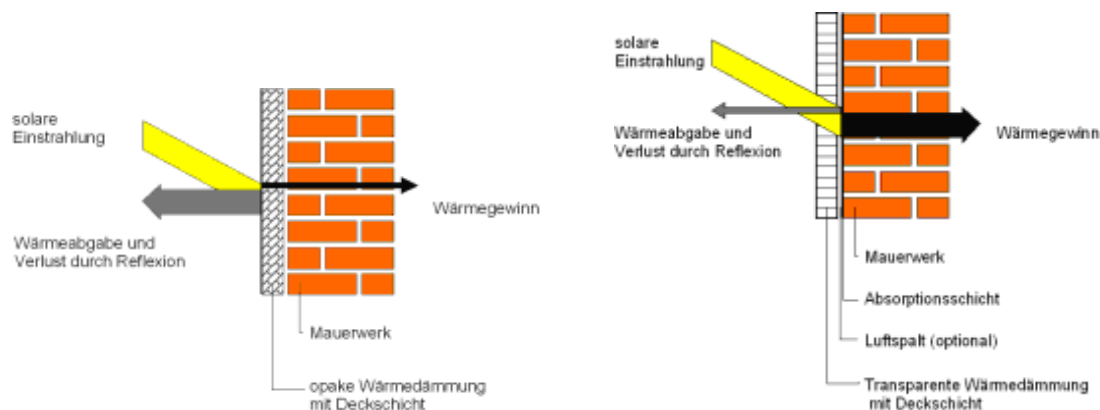
brauchwasserdurchströmten Rohrleitungen installiert. Somit kann die, ansonsten ungenutzte, Wärmeenergie einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden und gleichzeitig wird dem Wandquerschnitt hinter der TWD Wärme entzogen. [Dre06b]

Als Problem kann die Gefahr von Rissbildungen durch stark abweichende thermische Dehnungen genannt werden. Dies tritt insbesondere bei der oftmals empfohlenen Applizierung von Fassadenteilflächen auf. Die hohe Temperatur hinter der TWD beschleunigt den Trocknungsprozess des Mauerwerks und verursacht in manchen Fällen Risse, die sogar bis zur Innenoberfläche reichen. [Ene07]

Vor allem bei Neubauten sind die hohen Kosten oft der Grund für den Verzicht auf TWD- Elemente. Ist man auf die Nutzung solarer Gewinne bedacht, ist dies durch Anordnung von Sonnenfenstern wesentlich preiswerter erreichbar. Auch die Langlebigkeit mancher Produkte stellt in einigen Fällen noch Schwierigkeiten dar. [Ene07]

### 2.6.3.2 Funktionsweise der TWD

Die Funktionsweise der TWD beruht darauf, dass die einfallende Strahlung durch das transparente Material (Glasvlies, Glasschaum, sehr enge Kunststoffkapillaren) transmittiert und erst an der Rückseite von einer strahlungsundurchlässigen Schichte absorbiert wird. In der dahinter liegenden Wand wird die Wärme zwischengespeichert und erst allmählich an den Raum abgegeben. Ein kleiner Teil fließt auch als ungenutzte Verlustwärme wieder nach außen ab. Die nachfolgenden Abbildungen verdeutlichen die Wärmeströme. [Dre06]



**Abbildung 27: Wärmegewinne bei einer konventionellen Wand mit VWS (links) und einer Wand mit TWD (rechts) [Ene07]**

Während bei einer herkömmlichen Wandkonstruktion die Erträge aus solarer Strahlung vernachlässigbar sind, können durch transparente Wärmedämmungen Energiegewinne von bis zu 120kWh/(m<sup>2</sup>a) erzielt werden. [Ene07]

### 2.6.3.3 Arten von TWD

Funktionstechnisch lassen sich die transparenten Wärmedämm- Systeme nach folgenden Typen unterscheiden:

- **Direktgewinnsysteme:**

Dabei erfolgt eine Erwärmung des gesamten Raumes über die Sonneneinstrahlung und die Innenraumtemperatur schwankt mit der Oberflächentemperatur der TWD. Die Gewinne hängen von der Masse der speicherfähigen Materialien im Raum ab. Der Wärmetransport erfolgt über Konvektion und Wärmestrahlung.

- **Solarwandsysteme:**

Solarwandsysteme unterscheiden sich von den Direktgewinnsystemen durch die Anordnung einer raumabgewandten Absorptionsfläche. An dieser wird die solare Strahlung in Wärmeenergie umgesetzt. Der Transport der Wärme durch die Speicherwand erfolgt durch Transmission. Bei diesem System wird die Wärme der Wand bereits phasenverschoben an die Innenluft abgegeben, was durch Wahl der Wandstärke und Materialien auch steuerbar ist. Je nach Größe der TWD- Fläche kann es sinnvoll sein Rissbildungen durch Anordnung von Dehnfugen vorzubeugen.

- **Abgekoppelte Gewinnsysteme:**

Abgekoppelte Gewinnsysteme benötigen ein eigenes Medium zur Wärmeübertragung bzw. -speicherung. Man unterscheidet:

- Luftkollektorsysteme: Die Energieübertragung erfolgt meist über konvektiv erwärmte Luft. Mögliche Speichermedien sind Gebäudeteile oder auch beispielsweise Schotterspeicher.

- Wasserkollektorsysteme: Die Energieübertragung wird hier durch das solar erwärmte Wasser gewährleistet. Pufferspeicher dienen als Speichermedien. Sie sind mit ähnlichem Aufwand wie Geröll- oder Schotter Speicher herzustellen.

Hier hat die TWD die Funktion eines Verstärkers. Der Aufwand hinsichtlich der Gebäudekonzeption ist derartig groß, dass sie meist nur bei Neubauten sinnvoll angewendet werden können.

#### ▪ **Sondersystem Solar- Pond:**

Der Energiegewinn erfolgt hier durch TWD- Paneele, die über einer mit Wasser bedeckten Absorberfläche positioniert sind. Die „Abdeckung“ erwärmt sich und gibt die Wärme an das Wasser ab. Die Wärme wird über Transmission oder Wärmetransportsysteme abgeleitet. [Föt97 aus: Ker96]

#### 2.6.3.4 **Einsatzgebiete der TWD**

Neuartige Entwicklungen eignen sich auch zur thermischen Sanierung von Altbauten. Insbesondere bei diesen Bauten sind die Fensterflächen generell kleiner, da der Wärmeverlust über Fenster früherer Bauart wesentlich höher als die erzielbaren Gewinne war. Ist es nicht möglich oder unerwünscht im Zuge einer Sanierung die Fensterflächen Richtung Süden zu vergrößern, ist die Anbringung von transparenter Wärmedämmung an einem Teilbereich der Fassade eine sinnvolle Alternative. [Dre06]

#### 2.6.3.5 **Ökologie der TWD**

Aus wirtschaftlicher Sichtweise ist die Anwendung transparenter Wärmedämmungen heute noch selten sinnvoll. Die Material- und Arbeitskosten sind meist noch zu hoch um sich gegen andere Maßnahmen behaupten zu können. Gerade bei Sanierungen und Einzelfällen kann die Anwendung jedoch durchaus Sinn machen. [Ene07]

Aus der Sichtweise der Umweltverträglichkeit sind die Materialien wie Glas oder Aerogele sicherlich den Kunststoffen vorzuziehen. Es gibt sogar Entwicklungen auf pflanzlicher Basis, die aber nicht ganz ausgereift sind. Darunter fallen z.B.

Zellulosediacetate. Papierwaben- TWD fallen eigentlich nicht unter die transparenten Wärmedämmungen, da ihnen dazu die Transluzenz fehlt, dennoch sind mit ihnen Energiegewinne möglich, die jedoch auf Absorption am Rand des Wabenmaterials zurückzuführen sind. [Föt97]

## **3 Entwicklung eines Hochlochziegels mit integrierten Vakuum-Isolations-Paneelen**

### ***3.1 Funktionsprinzip des VIP-Ziegels***

#### **3.1.1 Grundidee**

Die vollflächige Applikation von VIP als Außendämmung, sowie für gewisse Anwendungen auch als Innendämmung, wurde bereits eingehend untersucht und kann als grundsätzlich funktionstüchtig angesehen werden.

Die Grundidee dieser Arbeit besteht nun darin, einen Hochlochziegel (HLZ) zu entwickeln, in dem Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) integriert sind. Somit könnte die hervorragende Wärmedämmeigenschaft der VIPs genutzt werden, ohne die schadensanfälligen Paneele den Gefahren einer Bearbeitung vor Ort auszusetzen.

Wie bereits in vorangegangenen Kapiteln eingehend erläutert wurde, sollte das Ziel bei Verarbeitung von Vakuumdämmung im Baubereich stets die Herstellung von kompletten oder zumindest teilweisen Fertigteilen sein. Im Betrieb gefertigte Elemente bieten eine weitaus höhere Sicherheit vor Beschädigung der Paneele und erlauben außerdem, falls erforderlich, eine umfassende Qualitätskontrolle vor Verlassen des Werks. Werden VIPs erst auf der Baustelle verarbeitet, ist eine kontinuierliche Überwachung der Funktionstüchtigkeit nur mehr erschwert möglich und allfällige Schäden (belüftete VIPs) werden meist erst bei einer abschließenden Thermografie oder überhaupt nicht festgestellt.

#### **3.1.2 Problematik**

Die Herausforderung liegt vor allem in der Anordnung der VIPs im Ziegel. Um die herausragenden Dämmeigenschaften von Vakuumpaneelen tatsächlich nutzen zu können, sollten sie im, rein thermisch betrachteten, Idealfall wie eine Außendämmung positioniert sein um das beheizte Volumen optimal einzuhüllen. Die Nachteile einer derartigen Verarbeitung sind im Kapitel „Vakuumdämmung“, und den darin enthaltenen Praxisreporten, hinreichend erläutert worden. Befindet sich nun die Dämmebene im Wandbildner (Ziegel) führt dies bei Verwendung konventioneller,

relativ diffusionsoffener Dämmstoffe unweigerlich zu einer Kondensationsproblematik im Bauteilinneren. Durch das große Temperaturgefälle in der Dämmung kommt es in oder hinter der Dämmebene zur Kondensation und somit zu einer Feuchteanreicherung im Ziegel, falls das Wasser nicht durch Kapillaraktivität und Diffusion abgeführt werden kann. VIPs hingegen sind durch beinahe vollkommen dampfdichte Folien umhüllt und stellen somit eine Barriere für Wasserdampf dar. Durch die Verhinderung des Durchtritts von Wasserdampf, ist auch die Kondensation nennenswerter Wassermengen und eine daraus resultierende Feuchtelast nicht zu befürchten, jedoch kommt es durch den Eintritt einzelner Wasserdampfmoleküle in das Paneel zu einem, über die Jahre entstehenden, geringen Druckanstieg in den VIPs, der zu einer Verschlechterung der Dämmeigenschaft führt. Dieses spezielle Problem kann mit der hier verwendeten Software nicht nachgebildet werden und wurde bereits im Kapitel „Lebensdauer von VIPs“ ausführlich behandelt.

Nun könnte es aber durch erhöhte Feuchtelasten zu problematischen Feuchtigkeitszuständen im Bauteil und an dessen Innenoberfläche kommen. Die Paneele selbst stellen ja eine Trennschicht dar, die jegliche Verdunstung des Kondensats nach außen unterbindet.

Ziel ist also eine derartige Anordnung der Paneele, dass einerseits Wasserdampf, der zufolge außergewöhnlicher innerer Feuchtelasten, nicht mehr vom umhüllenden Ziegel gepuffert werden kann, durch Bereiche ohne VIP nach außen strömt.

Andererseits soll eine Konstruktion geschaffen werden, die auch bei Feuchtelasten im Ziegelmauerwerk aus verschiedenen anderen Quellen, wie beispielsweise Wasserrohrbrüchen, weitgehend selbstregulierend funktioniert, ohne dass Zusatzmaßnahmen erforderlich werden. Ist der Transportweg nach außen unterbunden, müsste die gesamte Feuchtigkeit an den Innenraum abgegeben werden, was sich auf die Dauer bis zum Erreichen des ursprünglichen Feuchtigkeitszustandes erheblich auswirkt.

Natürlich sollen, neben Betrachtung der hygrischen Funktionalität, auch die Einbußen hinsichtlich des Wärmestroms nicht zu groß werden. Das erfordert eine detaillierte Untersuchung möglicher Paneelanordnungen und Stoßausführungen. Die nächste Abbildung zeigt schematisch die Funktionsweise des VIP-Ziegels.

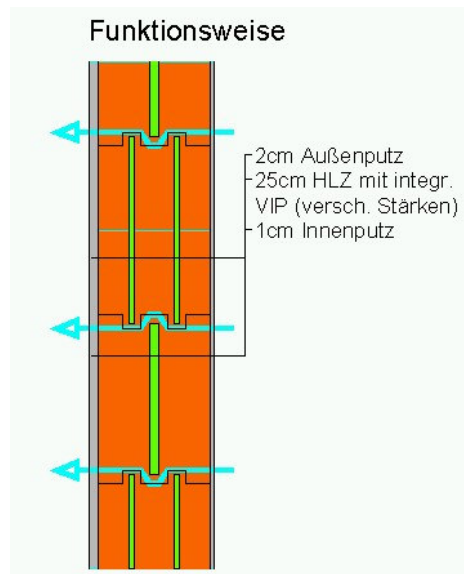


Abbildung 28: Funktionsweise des VIP-Ziegels [eigene Abb.]

Wie die Abbildung verdeutlicht, soll Wasserdampf (blaue Pfeile), der aufgrund außergewöhnlicher Feuchtelasten nicht durch den Ziegel gepuffert werden kann, an den Stoßstellen von Nut und Feder die undurchdringbaren Vakuumdämmplatten (grün) umwandern.

### 3.1.3 Ziegel als Wandbildner

Selbstverständlich stellt sich die Frage, warum Vakuumpaneele ausgerechnet mit Ziegel kombiniert werden sollen. Als Antwort sind hier in kurzer Form die wichtigsten positiven Eigenschaften des Baumaterials Ziegel aufgelistet:

- **Belastbarkeit:**

Ziegel haben, im Vergleich zu anderen Baustoffen zur Herstellung von tragenden Wänden und vergleichbar geringer Rohdichte, die größte zulässige Flächenpressung. Außerdem besitzt Ziegel eine hohe Formbeständigkeit.

- **Wärmeschutz:**

Ziegelmauerwerk hat ausgezeichnete Fähigkeiten hinsichtlich der Wärmespeicherung. Diese Eigenschaft schützt vor rascher Abkühlung im Winter und vor allem vor übermäßiger Überhitzung im Sommer. Moderne Ziegel sind hochporöse Baustoffe die durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit einen hohen Wärmeschutz gewährleisten können, dabei sind derzeit Wärmeleitfähigkeiten von

bis zu 0,11 W/(mK) erreichbar. Ziegel trocknet durch seine Offenporigkeit und Kapillaraktivität rasch aus und verbleibt dann, bei ausreichendem Schutz vor Schlagregen, auf einer sehr geringen Gleichgewichtsfeuchtigkeit. Die geringe Feuchte in der Wand verhindert einen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit und sichert somit einen konstant hohen Wärmeschutz.

- **Brandschutz:**

Ziegel werden aus gebranntem Ton hergestellt und sind in die Klasse der unbrennbaren Baustoffe (A) einzureihen. Beispielsweise weist eine Wand aus Poro-therm- Ziegeln ab einer Dicke von nur 8cm die Bauteilklassifikation F90 (brandbeständig) auf. Im Vergleich zu manch anderem Baustoff gibt Ziegel im Brandfall keinerlei giftige Dämpfe frei.

- **Schallschutz:**

Die geforderten Schalldämm- Maße für Außen- oder Trennbauteile werden entweder durch das Ziegelmauerwerk selbst oder durch geringe Zusatzmaßnahmen erfüllt.

- **Raumklima/ gesundes Wohnen:**

Ziegelmauerwerk ist diffusionsoffen und kapillaraktiv, somit können Schwankungen der klimatischen Bedingungen ausgeglichen werden. Weiters hat Ziegel den geringsten praktischen Feuchtegehalt aller Wandbaustoffe.

- **Wertbeständigkeit:**

Mauerwerk aus Ziegeln hat eine sehr hohe Lebensdauer und behält seine Festigkeit und Tragfähigkeit bei ausreichendem Feuchtigkeitsschutz über einen sehr langen Zeitraum.

- **Formbeständigkeit:**

Ziegel weist die geringsten Verformungen aller gängigen Wandbaustoffe auf. Verformungen durch statische Belastung oder aus Schwinden, Kriechen und Temperaturänderungen stellen meist kein Risiko für Schäden dar.

- **Wind- (Luft)dichtigkeit:**

Sachgerecht ausgeführt sind Gebäude aus Ziegelmauerwerk wind- und luftdicht. Dies ist die Voraussetzung für ein hohes Wärmeschutzniveau, da ansonsten der Lüftungswärmeverlust wesentlich vergrößert würde und es sogar zu Zugerscheinungen an den Fehlstellen kommen könnte. Dadurch besteht zusätzlich die Gefahr von Feuchtigkeitsschäden und Schimmelbildung. Dies wird bei einer Wand aus Ziegel allein durch Aufbringen von Innen- und Außenputz verhindert. Im Leichtbau übernimmt die innere luftdichte Schicht eine Dampfbremse, die jedoch allzu oft mangelhaft verschlossen oder ganz vergessen wird. In einem derartigen Fall tritt bei großen inneren Feuchtelasten mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Bauschaden ein.

- **Wirtschaftlichkeit:**

Die Planziegel- Technologie garantiert einen raschen Baufortschritt und trägt somit zur Reduktion des heute im Bauwesen größten Kostenfaktors bei – Lohnkosten. Diese Bauweise zeichnet sich auch durch günstigen Materialverbrauch aus. Der hohe Wärmeschutz und die winddichte Ausführung von Ziegel- Mauerwerk tragen zur Einsparung von Heizenergie und somit direkt zur Verringerung der Betriebskosten bei.

- **Ökologie:**

Der Baustoff Ziegel wird aus dem natürlichen Rohstoff Ton hergestellt. Zur Porosierung werden beispielsweise Sägespäne eingesetzt, die beim Brennvorgang Poren hinterlassen. Im Produktionsprozess werden Nachverbrennungs- und Rauchgasreinigungsanlagen verwendet, außerdem wird hierbei versucht möglichst wenig Primärenergie einzusetzen.

[Wie07 ], [Scu03]

### **3.2 Bisherige Versuche von VIP-Ziegeln**

Auf der Messe BAU 2001 in Hannover wurde erstmals vom Bayerischen Zentrum für angewandte Energieforschung (ZAE- Bayern) ein erster Ansatz zum Einbau von Vakuumdämmung in Ziegelsteinen vorgestellt.



**Abbildung 29: Kombination von VIP mit Ziegel vom ZAE- Bayern (Messe BAU 2001) [Scu03], [Zae06]**

Wie aus den Bildern erkennbar, wird hier aus Vakuumpaneelen und herkömmlichen Innenwandziegeln ein Außenwandmauerstein gefertigt. Der Verbund zwischen Ziegeln und VIP wird durch zwei umlaufende Packbänder sichergestellt. Die rechte Abbildung zeigt, dass die Packbänder entweder außen umlaufend oder im Kammersystem der Ziegel verlaufen können.

Folgende Anforderungen wurden seitens der Entwickler an das System gestellt:

- **Sicherheit und Stabilität:**

Dies sollte für die Herstellung, den Transport, wie auch die Verarbeitung auf der Baustelle gelten.

- **Gebrauchstauglichkeit:**

Derartige Anforderungen sind in vorhandenen Normen weitgehend geregelt und etwaige Abweichungen können ggf. durch bauaufsichtliche Zulassungen berücksichtigt werden.

Auch in diesem Projekt wurden bereits zwei Lösungswege zur Integration der VIPs untersucht:

1. **Sandwichlösung**

Das VIP wird als Schicht **zwischen zwei Ziegelschalen** eingebracht (siehe obige Bilder)

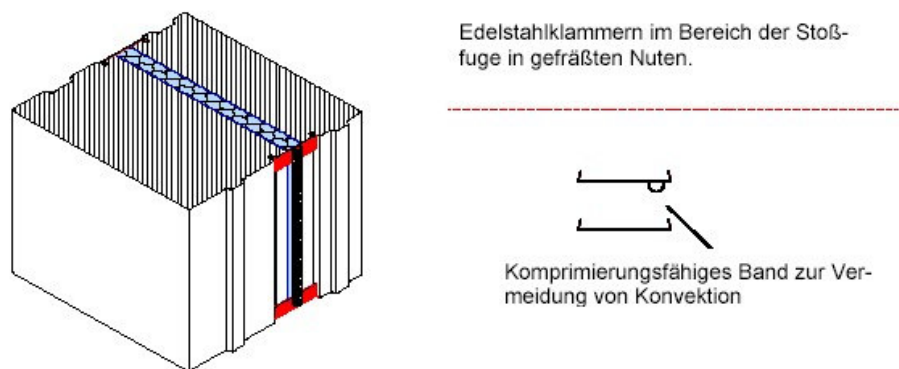
2. **Monolithische Lösung**

Das VIP wird in einer Kammer **in einem Ziegel** integriert.

### ad 1.:

Die Anforderungen bezüglich der Stabilität können beispielsweise durch Verklebung des VIPs mit den Ziegeln erreicht werden. Da das Produkt in Deutschland entwickelt wurde, ist für den Zustand der Gebrauchstauglichkeit die Norm DIN 1053-1:11-1996 maßgebend. Der hier beschriebene Mauerstein wäre als zweischaliger Außenwandstein mit Kerndämmung zu klassifizieren.

Problematisch ist hierbei die Vorgabe, die nichttragende Außenschale durch Edelstahlanker mit der tragenden Innenschale zu verbinden. Selbst alternativ dazu untersuchte kleinere Stahlquerschnitte haben den Nachteil einer erhöhten Wärmeleitung über das Paneel hinweg, unabhängig ob diese Verbindungsmittel im Stoß- oder Lagerfugenbereich angebracht sind.

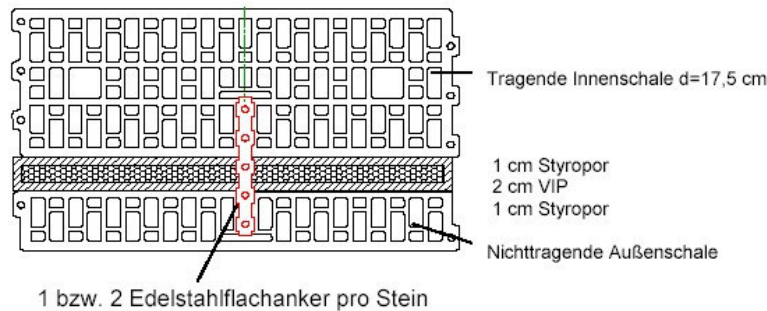


**Abbildung 30: Edelstahlklammer zur Verbindung der Ziegelschalen [Scu03]**

Klammern aus Kunststoff mit wesentlich geringerer Wärmeleitfähigkeit können aus Gründen der Langlebigkeit und des Brandschutzes aus den weiteren Überlegungen ausgeschlossen werden.

Weiters wurde der Schutz vor Tauwasserbildung und möglicher Wasserdampfkongvektion im Stoßfugenbereich als kritisch betrachtet. Im Bereich der Lagerfuge wird die Kongvektion durch eine flächige Mörtelschicht unterbunden, im Stoßfugenbereich könnte dies durch Applikation eines Komprimbandes (siehe obige Abbildung) erreicht werden.

Als möglicher Lösungsansatz wurde die Verringerung der Edelstahlverbundteile auf das geforderte Minimum genannt. Ein derartiger Mauerstein könnte folgendermaßen aussehen:



**Abbildung 31: Zweischaliger Mauerstein mit Edelstahlklammern verbunden [Scu03]**

## ad 2.:

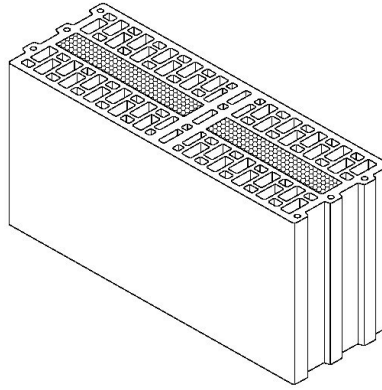
Variante 2 versucht Vakuum-Isolations-Paneele in Kammern eines Ziegels zu integrieren. Erste Versuche, VIPs in ein bereits bestehendes Ziegelformat einzupassen, waren wenig erfolgreich und ließen an der Funktionalität der Maßnahme Zweifel aufkommen.



**Abbildung 32: VIPs in Kammern eines Mauersteins integriert [Scu03]**

Der dargestellte Mauerstein weist ohne Integration der Vakuumpaneele einen Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit von  $0,11 \text{ W/(mK)}$  auf. Durch Füllung der Hohlräume mit VIPs konnte dieser Wert nur um 8% verbessert werden.

Als Weiterentwicklung wurde nun ein Ziegel mit größerem Format untersucht. Nachfolgende Skizze soll einen Eindruck vermitteln. Auch hier stellen die Bereiche der Stoßfugen zwischen den mit VIP gefüllten Kammern nicht zu vernachlässigende Wärmebrücken dar.



**Abbildung 33: Großformatiger Ziegel mit VIP in Kammern [Scu03]**

Bereits bei diesen früheren Beispielen wurde von den Verfassern darauf hingewiesen, dass einerseits ein gewisses Sortiment von Pass- und Ergänzungssteinen zur Verfügung stehen und andererseits die Planung der zu errichtenden Gebäude auf Basis der zur Verfügung stehenden Mauersteine erfolgen muss. [Scu03], [Zae06]

### **3.3 Anforderungen an den VIP-Ziegel**

Hier wird zwischen Voraussetzungen hinsichtlich der allgemeinen Verwendung von Vakuum-Isolations-Paneelen und der speziellen Anforderungen für die Praxistauglichkeit des Bausystems unterschieden.

#### **3.3.1 Grundsätze für die Verwendung von VIP**

Wie im Kapitel „Anwendbarkeit und Lebensdauer von VIPs“ bereits beschrieben wurde, sind gewisse Rahmenbedingungen für die Anwendbarkeit von Vakuumdämmsystemen im Bauwesen unerlässlich. Diese Anforderungen sollen an dieser Stelle in adaptierter Form erneut dargestellt werden:

- **Industrielle Verarbeitung:**

Nach Möglichkeit ist eine industrielle Verarbeitung, im Sinne von vorgefertigten Elementen, anzustreben. Im Bezug auf die Entwicklung eines Ziegelsteins mit integrierten VIPs bedeutet das, die Produktion von Formsteinen, die auf der Baustelle ohne weitere Nachbearbeitung versetzt werden. Im Gegensatz zu konventionellen Ziegelbauten darf hier auf der Baustelle kein Stein durch Hacken

oder Sägen angepasst werden. Das erscheint zwar als Schwäche des Systems, ist aber durch rechtzeitige und genaue Planung kompensierbar.

- **Detaillierte Planung:**

Die Entscheidung über den Einsatz von Vakuumdämmungen muss frühzeitig in der Planungsphase gefällt werden, um mögliche Wärmebrücken und Schwierigkeiten im Bauablauf rechtzeitig erkennen zu können. Dies sollte keine Probleme bereiten, da spätestens zur baubehördlichen Einreichung Pläne mit entsprechenden Aufbauten und den zugehörigen bauphysikalischen Berechnungen abgegeben werden müssen. Weiters darf, unter Beachtung der doch wesentlich geringeren Konstruktionsstärken bei Verwendung von Vakuumdämmung und den damit möglichen Nutzflächengewinnen, davon ausgegangen werden, dass bereits in einem sehr frühen Stadium der Planungstätigkeit die Verwendung eines derartigen Systems bekannt ist.

- **Schulung des Personals:**

Das verarbeitende und im weiteren Baufortschritt involvierte Personal muss über die Risiken einer in der Wandkonstruktion befindlichen Vakuumdämmung aufgeklärt werden, um Schäden zu vermeiden. Dies sollte in mündlicher und, zur Beweissicherung, auch schriftlicher Form durch das leitende Personal der Baustelle erfolgen. Es ist unvermeidbar, dass Maurer die Vakuumdämm-Ziegel verarbeiten über die Funktionsweise, sowie den richtigen und sorgfältigen Umgang mit dem Produkt unterrichtet werden.

- **Minimale Exposition von VIP:**

Die Abläufe müssen so gestalten werden, dass die VIPs unverzüglich nach Einbau geschützt werden und vor allem zu einem späteren Zeitpunkt nicht wieder wegen vergessener Arbeitsschritte freigelegt oder gar entfernt werden müssen. Dieser Punkt ist durch Integration der Paneele in einem Ziegel hinfällig.

- **Dauerhaft geschützte Lage im Bauteil:**

Die Paneele müssen derart im Ziegel positioniert sein, dass sie keiner Gefahr durch mechanische Beschädigungen ausgesetzt sind.

- **Ersetzbarkeit der VIP:**

Im Optimalfall sollten der Austausch einzelner Elemente, sowie eine Überprüfung z.B. mit Infrarot- Thermografie, möglich sein. Bei Anwendung von Vakuumdämmungen in Form von VIP- Ziegeln kann diese Forderung nicht vollständig erfüllt werden, da es nach erfolgtem Einbau eines Ziegels mit erhöhten Schwierigkeiten verbunden wäre, ein im Stein enthaltenes Paneel auszutauschen. Da aber im Gegenzug die Paneele während der gesamten Verarbeitung geschützt sind, scheint es akzeptabel auf Einhaltung dieses Kriteriums zu verzichten.

### **3.3.2 Voraussetzungen für die Funktionalität des Bausystems in der Baupraxis**

Durch die Verwendung sehr leistungsfähiger, aber auch empfindlicher Bauteile wie Vakuumdämmpaneele, müssen einige grundsätzliche Anforderungen an den Ziegel formuliert werden:

- **Einfachheit des Systems:**

Der „Bausatz“ darf nicht aus zu vielen Einzelteilen (Sonderziegelformen) bestehen. Das reduziert Herstellungskosten und ermöglicht erst die sinnvolle und unkomplizierte Anwendbarkeit auf der Baustelle.

Wie aus der nachfolgenden Beschreibung der Varianten hervorgeht, ist ein Einsatz eines solchen Systems nur dann sinnvoll, wenn die Anzahl der Steinformen gering gehalten werden kann. Es gilt nun zwischen zwei Fällen zu unterscheiden:

**Fall 1:** Es wird im Raster der Steingröße gebaut.

**Fall 2:** Es wird *nicht* im Raster der Steingröße gebaut.

**ad Fall 1:** In diesem Fall vereinfacht sich die Situation für den Planer und den Ausführenden erheblich. Die Notwendigkeit der Einhaltung eines Rastermaßes erscheint zwar auf den ersten Blick als massiver Nachteil, ist aber denkbar, da das Rastermaß immerhin nur die Größe eines Halb- oder Viertelformat-Mauersteins beträgt. Hat der Planer zumindest die Lage der Öffnungen auf das

Rastermaß abgestimmt, beschränkt sich die Auswahl der erforderlichen Ziegelformate auf: Normalstein, Eckstein, Halbstein und unter Umständen, Viertelstein.

**ad Fall 2:** Ist es nicht möglich oder erwünscht das Raster einzuhalten, muss der zwangsläufig auftretende Spalt im Verband durch VIP- und Ziegel- Passstücke überbrückt werden. Da diese Maßnahme jedoch nicht dem Grundsatz der Vorfertigung im Werk bei Verwendung von Vakuumdämmungen entspricht, ist davon abzuraten.

- **Vorgefertigte Detaillösungen:**

Es müssen zumindest Lösungen für die wichtigsten Detailknoten erarbeitet werden und diese sollen hinsichtlich ihrer Funktionalität im Bezug auf Wärmebrückeneffekte und Feuchtigkeitsschutz überprüft werden. Da die einzelnen Ziegel aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nur in Standardabmessungen erhältlich sind, müssen Lösungen kreiert werden, die es erlauben, Räume mit beliebigen Höhen und Längen zu errichten.

- **Schutz vor Beschädigung der VIPs:**

Auch wenn es denkbar wäre ein Außenwandsystem zu entwickeln, das keine Installationen in der tragenden Konstruktion enthält, sollen im Sinne einer möglichst vielfältigen Anwendbarkeit Möglichkeiten entwickelt werden um dies zu gestatten.

Wie nachfolgend beschrieben, ist in der Entwicklung der Varianten ein Wechsel vom 25cm-Ziegel zum 30cm-Ziegel zu verzeichnen. Das ist hauptsächlich dadurch zu begründen, dass der Stein mit 30cm Dicke und ungefähr mittig angeordnetem VIP ausreichend Platz für Installationen bietet. Wie bereits erwähnt, wäre es anzustreben den tragenden Wandquerschnitt frei von Installationen zu halten, doch ist es bei diesem „Sicherheitsabstand“ denkbar, dass beispielsweise E-Leitungen und Steckdosen im unbedingt erforderlichen Ausmaß vorgesehen werden können. Die Position der Paneele im Ziegel gestattet generell den Einsatz von Nägeln und Schrauben bei Wahrung eines gewissen Abstandes zu den VIPs. Da die Paneele in diesem Fall durch mindestens 10cm

Ziegel von Außen- oder Innenwandoberfläche getrennt sind, sollten Schrauben bis zu einer Länge von 6-7cm mit entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen bei der Herstellung des Bohrlochs (Abstandhalter für maximale Bohrlochtiefe) verwendbar sein.

### ***3.4 Vor-/ Nachteile eines VIP-Ziegels im Vergleich zu VWS mit integriertem VIP***

Hier werden noch einmal die wichtigsten Aussagen pro und kontra stichwortartig zusammengefasst:

#### **▪ Vorteile:**

- Verarbeitung der VIPs bereits im „sicheren“ Herstellerwerk. Kein umständliches und riskantes Handling mit Paneelen auf der Baustelle.
- Die Qualitätskontrolle des fertigen Ziegels mit integriertem VIP kann bereits im Herstellerwerk durchgeführt werden. Dies wäre beispielsweise durch einseitige Erwärmung und gleichzeitige Infrarotthermografie denkbar. Somit wäre auch die Frage der Haftung des Herstellers für fehlerhafte Paneele einfacher zu klären.
- Schraubungen und Nagelungen in der Fassade sind möglich, da die Paneele tief im Stein integriert sind. Insbesondere im städtischen Gebiet und bei Mehrfamilienhäusern ist dies von besonderer Bedeutung (z.B. Befestigungen von Straßenbeleuchtungen, Fahnenmasten, Vordächern, usw.).
- Wasserdampf zufolge hoher innerer Luftfeuchtigkeit und sonstige Feuchtelasten im Wandquerschnitt können auch nach außen abgeführt werden.

#### **▪ Nachteile:**

- Aufwendigere Versetzarbeit und detailliertere Planung durch Verwendung des Bausatzes „VIP-Ziegel“.
- Kein problemloser Austausch der VIPs nach dem Versetzen des Ziegels.

- Höhere Kosten durch einen größeren Materialverbrauch der VIPs bei Wahl einer Variante mit überlappenden Paneelen. Außerdem sind kleinere VIPs in Relation teurer und weniger langlebig.

### ***3.5 Simulation des Feuchtigkeitsverhaltens und der Wärmeströme im VIP-Ziegel***

#### **3.5.1 WUFI2D**

Die Simulationen und die Auswertung der Feuchtigkeits- Transportprozesse wurden mit der Software WUFI2D V2.0 durchgeführt. Sie wurde vom Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen entwickelt und stellt eine Weiterentwicklung der eindimensionalen WUFI – Reihe dar. Die Abkürzung WUFI bedeutet **W**ärme- und **F**euchtetransport **I**nstationär.

Die Notwendigkeit, Neubauten wie auch Sanierungen einer hygrothermischen Untersuchung zu unterziehen, zeigt sich eindeutig in den vielen, durch Baufeuchte verursachten, Bauschäden. Um Schimmel und andere ungewollte Nebenerscheinungen von Feuchtigkeitsschäden zu vermeiden, ist es oftmals erforderlich Verfahren anzuwenden, die über das stationäre Glaser- Diagramm hinausreichen. Folgende Gründe und Einschränkungen sind hierfür ausschlaggebend:

- Berechnungen nur mit stationären Randbedingungen.
- Nur Berücksichtigung des winterlichen Tauwasseranfalls zufolge Wasserdampfdiffusion im Bauteil.
- Keine Erfassung von Speichervorgängen und Flüssigkeitstransporteffekten.
- Keine Betrachtung des Einflusses der Feuchtigkeit auf Wärmedurchgang und Temperaturgradienten.

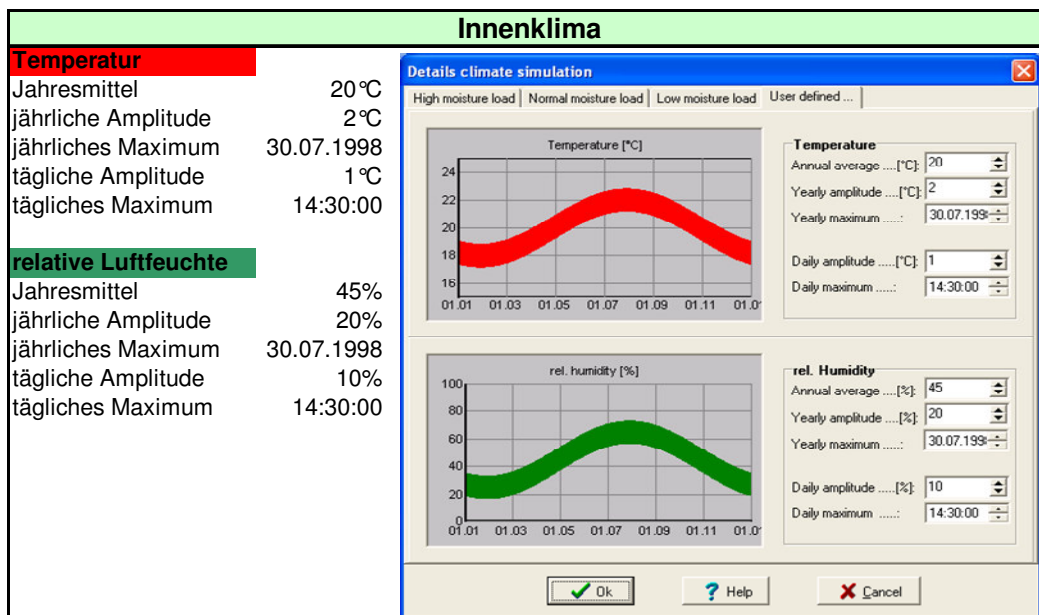
Aus wissenschaftlicher Sicht ist die hygrothermische Modellierung als weitgehend gelöst zu betrachten, was eine stetig wachsende Akzeptanz des Verfahrens innerhalb der letzten Jahre bewirkt hat.

Derartige Programme sind in der Lage den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport zweidimensional, unter Berücksichtigung der entsprechenden Witterungsvoraussetzungen, realitätsnah wiederzugeben. [Fra01]

Die nächsten Darstellungen zeigen die Eingabeparameter in WUFI2D. Etwaige Abweichungen davon werden bei den Simulationsergebnissen der einzelnen Varianten gesondert angeführt.

**Tabelle 2: Materialeigenschaften [eigene Abb.]**

| Materialeigenschaften                    |                      |                            |                    |                                      |
|------------------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Material                                 | Rohdichte            | spezifische Wärmekapazität | Wärmeleitfähigkeit | Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl |
|                                          | $\rho$               | $c$                        | $\lambda$          | $\mu$                                |
|                                          | [kg/m <sup>3</sup> ] | [J/(kgK)]                  | [W/(mK)]           | [-]                                  |
| Hochlochziegel                           | 856                  | 1466                       | 0,208              | 10                                   |
| Vakuumdämm-paneel                        | 100                  | 850                        | 0,004              | 10.000                               |
| Außenputz wasserabweisend (Sanierputz)   | 1.150                | 850                        | 0,130              | 12                                   |
| Außenputz stark saugend (Kalkzementputz) | 1.900                | 850                        | 0,800              | 19                                   |
| Innenputz (Gipsputz)                     | 1.721                | 850                        | 0,200              | 13                                   |
| EPS                                      | 15                   | 1.500                      | 0,040              | 30                                   |



**Abbildung 34: Innenklima [eigene Abb.]**

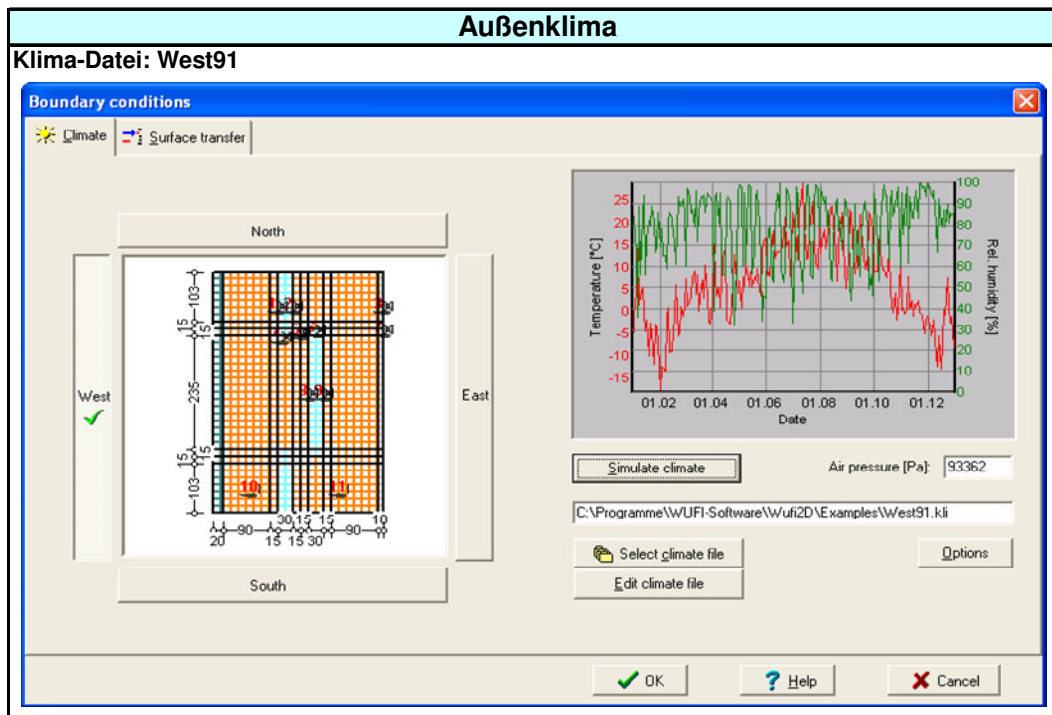


Abbildung 35: Außenklima [eigene Abb.]

### 3.5.2 THERM 5

Die Software THERM 5 dient im Rahmen dieser Arbeit zur Modellierung der Wärmeströme der einzelnen VIP-Ziegelvarianten und der daraus resultierenden Bestimmung der U- Werte.

Die Software THERM arbeitet auf Basis eines Finite Elemente Simulators und wurde an der Universität von Kalifornien entwickelt. Folgende Eingabeparameter wurden für die Simulationen verwendet:

Tabelle 3: Materialeigenschaften [eigene Abb.]

| Materialeigenschaften                    |                    |                     |                    |
|------------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Material                                 | Wärmeleitfähigkeit | Material            | Wärmeleitfähigkeit |
|                                          | $\lambda$          |                     | $\lambda$          |
|                                          | [W/(mK)]           |                     | [W/(mK)]           |
| Hochlochziegel                           | 0,208              | Bitumenbahn         | 0,190              |
| Vakuumdämmpaneel                         | 0,004              | Estrichbeton        | 1,400              |
| Außenputz wasserabweisend (Sanierputz)   | 0,130              | Parkett (Hartholz)  | 0,160              |
| Außenputz stark saugend (Kalkzementputz) | 0,800              | Isokorb (Edelstahl) | 0,350              |
| Innenputz (Gipsputz)                     | 0,200              | Isomörtel           | 0,170              |
| Fensterrahmen                            | 0,074              | EPS                 | 0,040              |
| Fensterglas                              | 0,024              | XPS                 | 0,040              |
| PU-Schaum                                | 0,025              | Marmor              | 3,400              |
| CaSi W                                   | 0,050              | Mineralwolle        | 0,042              |
| Perlite                                  | 0,053              | Sand naturfeucht    | 1,400              |
| Stahlbeton                               | 2,330              |                     |                    |

**Boundary Conditions**

innen

Model Simplified

Convection/Linearized Radiation

Temperature 20 C

Film Coefficient 8.14 W/m2-K

**Boundary Conditions**

außen

Model Simplified

Convection/Linearized Radiation

Temperature -10 C

Film Coefficient 23.26 W/m2-K

Abbildung 36: Randbedingungen innen und außen [eigene Abb.]

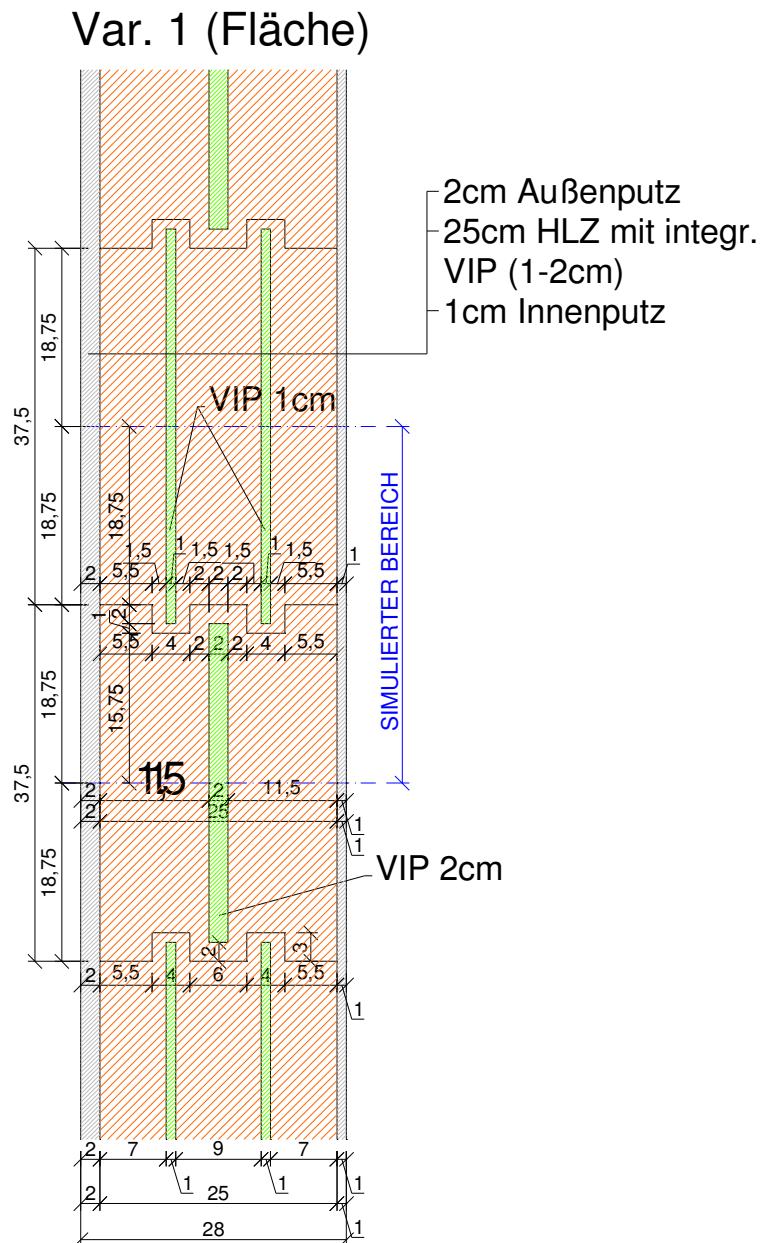
Für die Randbedingungen, zur Ermittlung der U-Werte, wurden eine Innentemperatur von 20°C und eine Außentemperatur von -10°C gewählt. Die Wärmeübergangswiderstände entsprechen jenen Werten für einen horizontalen Wärmedurchgang durch ein Außenwandbauteil. Für den Nachweis der Vermeidung von Tauwasser und Schimmel an den Bauteiloberflächen wurde der in der ÖNORM EN ISO 13788 definierte Temperaturfaktor und die damit verbundenen Wärmeübergangswiderstände verwendet ( $R_{se} = 0,04\text{m}^2\text{K/W}$ ,  $R_{si} = 0,25\text{m}^2\text{K/W}$  bzw.  $R_{si} = 0,13\text{m}^2\text{K/W}$  (Verglasungen und Rahmen)).

Im folgenden Kapitel werden unter anderem nur die wesentlichen Ergebnisse der Simulationen mit WUFI2D und THERM 5 wiedergegeben. Eine komplette Aufstellung der Ergebnisse kann in den Anhängen eingesehen werden.

Es folgt die Beschreibung der verschiedenen Entwicklungsstadien mit Erläuterungen ihrer Vorzüge und Nachteile.

### 3.6.1 Variante 1

### 3.6.1.1 Aufbau



**Abbildung 37: Variante 1 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]**

Das System besteht aus Ziegeln mit einer Stärke von 25cm und integrierten Vakuumpaneelen von bis zu 2cm Dicke. Es stellt eine erste Annäherung an die Wärmebrücken- Problematik im Bereich von Nut und Feder dar. Wie in der Abbildung ersichtlich, wurde hier versucht durch den Wechsel von einem auf zwei Paneele eine Überlappung im Stoßbereich zu gewährleisten, was aber zur baupraktisch unvorteilhaften Ausbildung von zwei verschiedenen Standard-Ziegeln führt.

Zwar erreichen die Paneele eine gewisse Größe, was sich positiv auf die effektive Wärmeleitfähigkeit auswirkt, doch sind sie in verschiedenen Dicken erforderlich, was für die Produktion nachteilig wäre.

Weiters ist der minimale Abstand zwischen äußerstem Paneel und der Außenseite des Steins mit rund 7cm zwar groß genug um beispielsweise Elektroinstallationsleitungen mit gebotener Vorsicht anzuordnen, jedoch nicht ausreichend um auch Steckdosen unterzubringen. Somit wäre eine eigene Installations- Vorsatzschale erforderlich, die aber wiederum dem Hauptkriterium, Nutzflächengewinn, widerspricht.

### 3.6.1.2 Ergebnisse der Simulationen mit WUFI

#### Eingabe der Konstruktion:

Die Abbildung zeigt die, in das Simulationsprogramm eingegebene, Konstruktion mit allen betrachteten Monitorpositionen. Für diese Positionen wurden Temperatur, relative Luftfeuchte und Wassergehalt bestimmt.

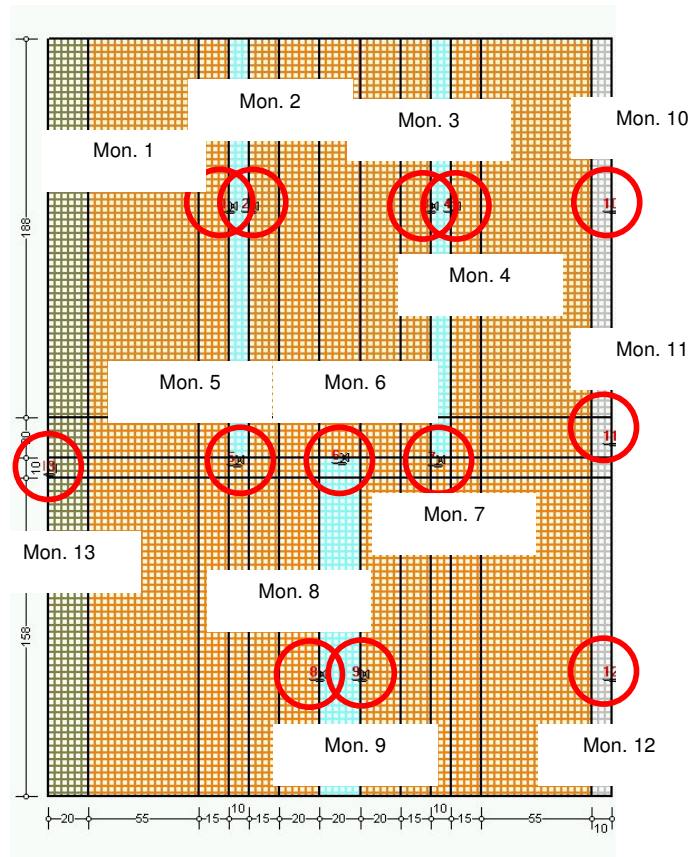
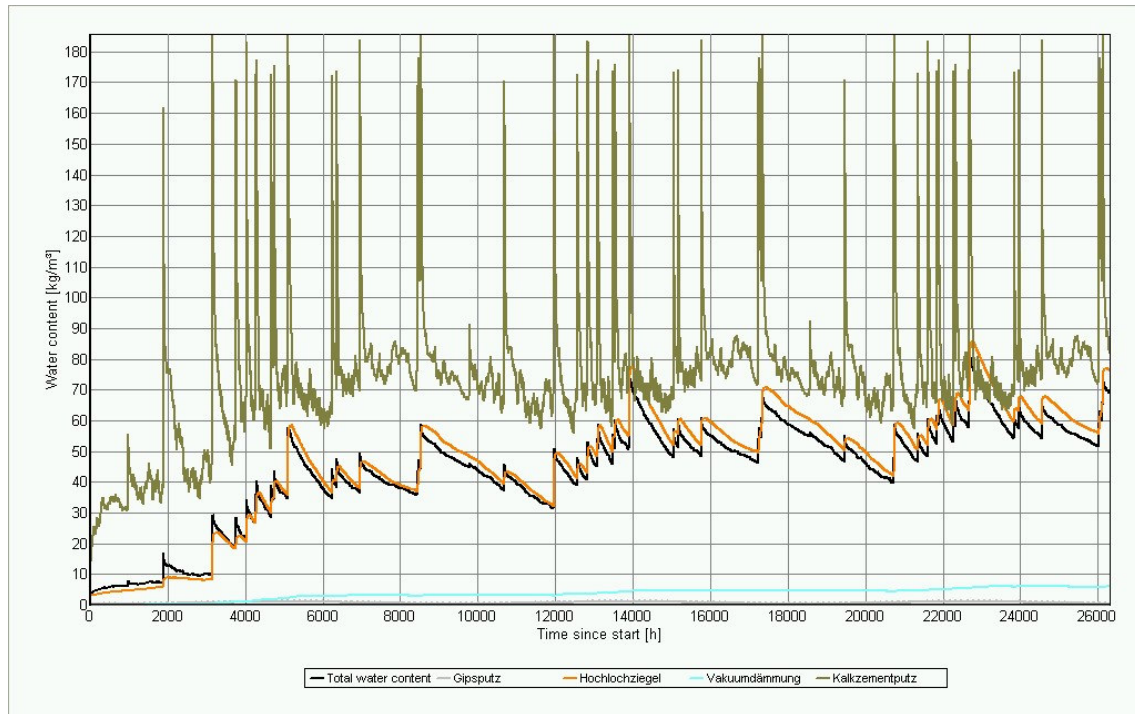


Abbildung 38: Konstruktion Variante 1 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]

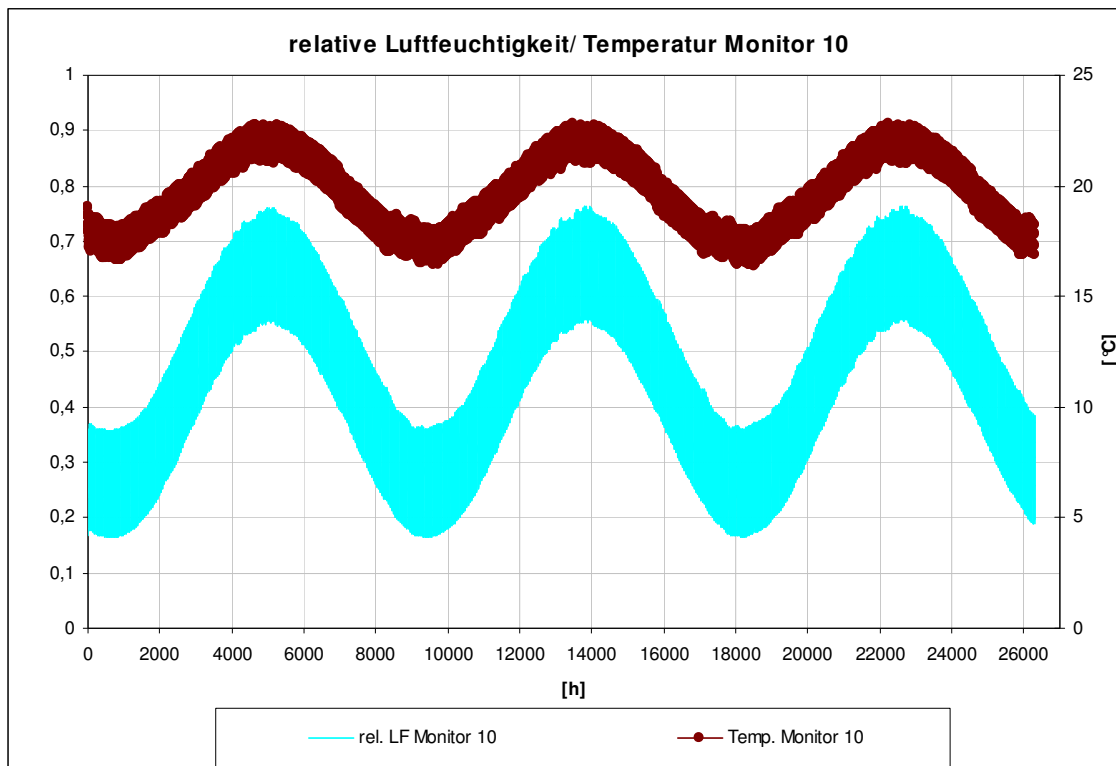
### Simulationsergebnisse:



**Abbildung 39: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]**

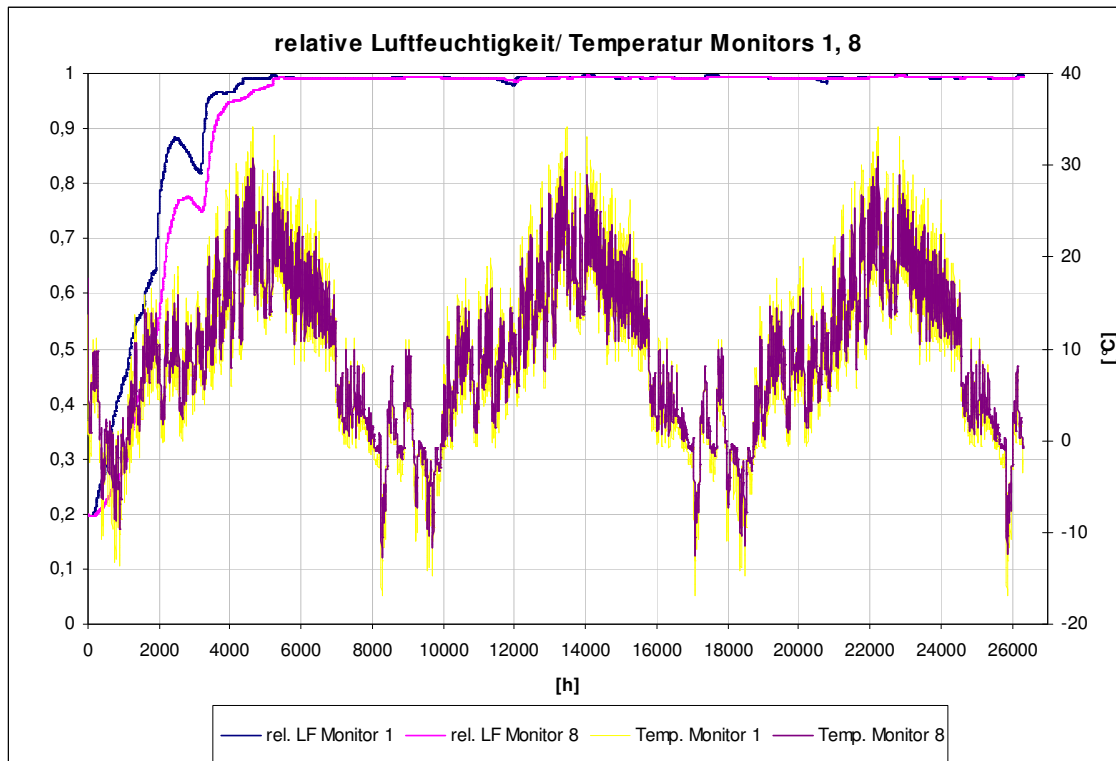
Wie erwartet, folgt der Wassergehalt des Außenputzes der Witterung. Man erkennt deutlich, dass der Putz die aufgenommene Feuchte rasch an den Ziegel und die Außenluft abgibt und somit selbst wieder austrocknet. Der Ziegel kann die Feuchtigkeit jedoch nur langsam durch Kapillarttransport und Diffusion abtransportieren. Aus diesem Grund zeichnet sich eine zunehmende Feuchteanreicherung im Ziegel (orange), wie auch in der Gesamtkonstruktion (schwarz), deutlich ab. Einzig der Innenputz behält über die Laufzeit von drei Jahren seine Gleichgewichtsfeuchte bei.

Abgesehen von der Anreicherung der Feuchtelast im Ziegelmauerwerk, ist hier auch die Höhe des Wassergehaltes bedenklich. Nimmt man für den Ziegel nach drei Jahren (ca. 26.000h) einen mittleren Wassergehalt von ca. 60kg/m<sup>3</sup> an, so entspricht das einem Volumen von 0,06m<sup>3</sup> Wasser pro 1m<sup>3</sup> Ziegel und somit einem Wassergehalt von ca. 6 Vol.-%. Dieser Wert ist etwas höher als der praktische Feuchtigkeitsgehalt nach Cammerer [Dre06d], der bei Werten von bis zu 4 Vol.-% im Normalfall keine Schädigungen vermuten lässt.



**Abbildung 40: relative Luftfeuchtigkeit/ Temperatur Monitor 10 (Innenoberfläche) [eigene Abb.]**

Wie auch schon der gleich bleibende Wassergehalt des Innenputzes vermuten lässt, bildet sich an den innenliegenden Monitorpositionen nur das, über die Eingabeparameter vorgegebene, Raumklima ab und es kommt zu keiner Feuchtigkeitsanreicherung.



**Abbildung 41: relative Luftfeuchtigkeit/ Temperatur Monitors 1, 8 (Außenseite der VIPs) [eigene Abb.]**

Die Bereiche des Ziegelmauerwerks an der Außenseite des VIP weisen vielfach während des Winters negative Temperaturen auf. Somit könnte es einerseits durch Frost, bedingt durch den doch relativ hohen Wassergehalt, andererseits durch den hohen Temperaturunterschied im Ziegel zu unzulässigen Spannungen und somit Schäden kommen.

Wie die Abbildung „Wassergehalt der einzelnen Materialschichten“ bereits verdeutlicht hat, überlagern sich die, bei den einzelnen Witterungsereignissen eingetragenen, Feuchtelasten. Das lässt sich auch an den rasch steigenden relativen Luftfeuchtigkeiten erkennen. Sie liegen innerhalb nur eines halben Jahres bei konstanten Werten weit über 90%.

Wurde vorhin im Mittel für das Material Ziegel ein Wassergehalt von ca. 6 Vol.-% abgelesen, so zeigen einige Monitorwerte Spitzenwerte von bis zu 19 Vol.-%, was eindeutig als zu hoch anzusehen ist (siehe Anhang A).

### 3.6.1.3 Ergebnisse der Simulationen mit THERM

#### Simulationsergebnisse:

- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (25cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

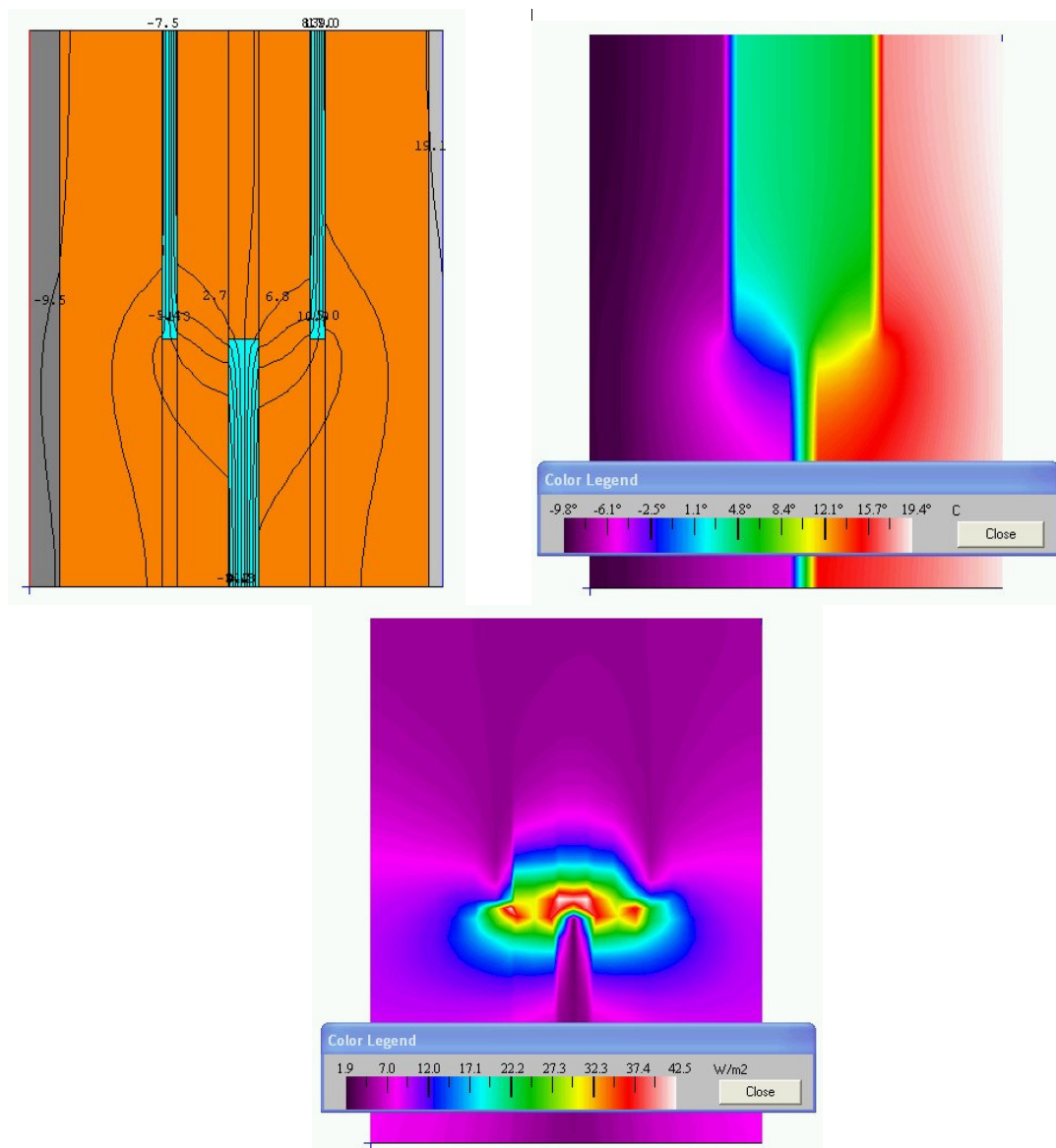


Abbildung 42: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]

### **3.6.2 Variante 1a**

#### **3.6.2.1 Aufbau**

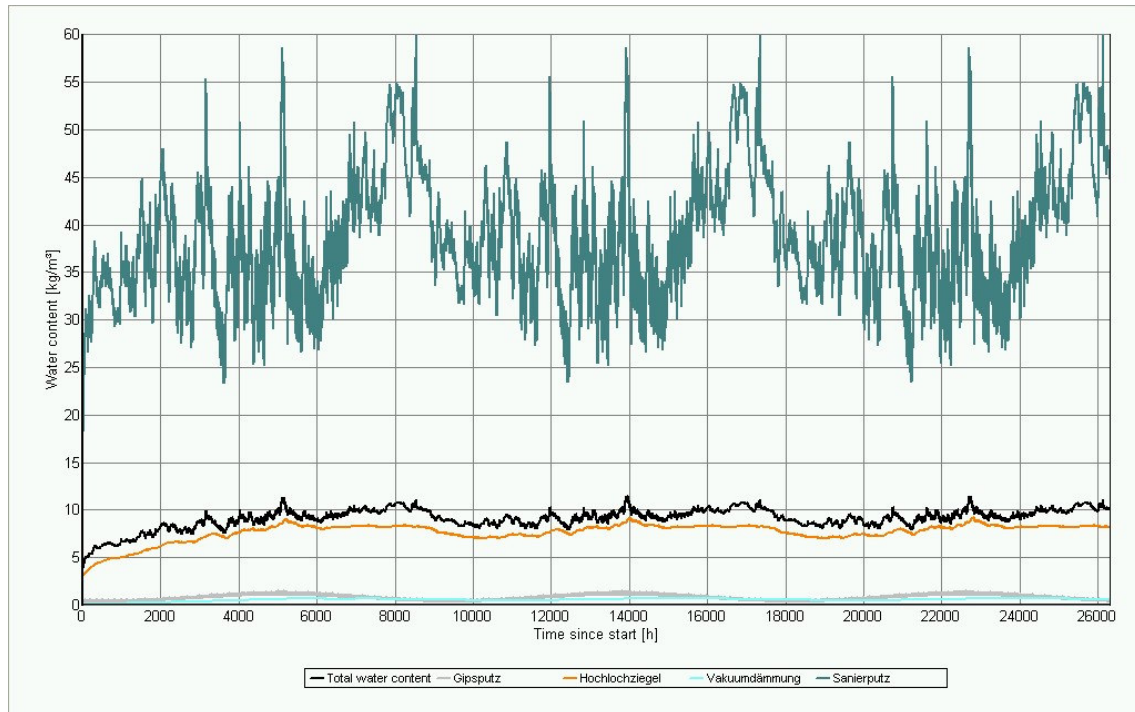
Variante 1a unterscheidet sich von Variante 1 nur durch Wahl eines erhöht feuchteabweisenden Außenputzes. Insbesondere direkt an der Außenseite der Vakuumdämmpaneele ist bei Variante 1 eine sich anreichernde Feuchtelast zu beobachten. Die relative Luftfeuchtigkeit liegt hier bereits nach dem ersten Halbjahr im Bereich von über 90%. Die Monitorpositionen an der Raumseite der VIPs zeigen jedoch einen wechselnden Verlauf von Feuchtigkeitszu- und -abnahme analog dem vorgegebenen Innenklima. Das lässt darauf schließen, dass der unzufriedenstellende Feuchtigkeitszustand an der Außenseite der Paneele durch eine zu große Fechteaufnahme bei Regenereignissen ausgelöst wird. Als Gegenmaßnahme wird ein Außenputz mit geringerer Wasseraufnahme gewählt.

### 3.6.2.2 Ergebnisse der Simulationen mit WUFI

#### Eingabe der Konstruktion:

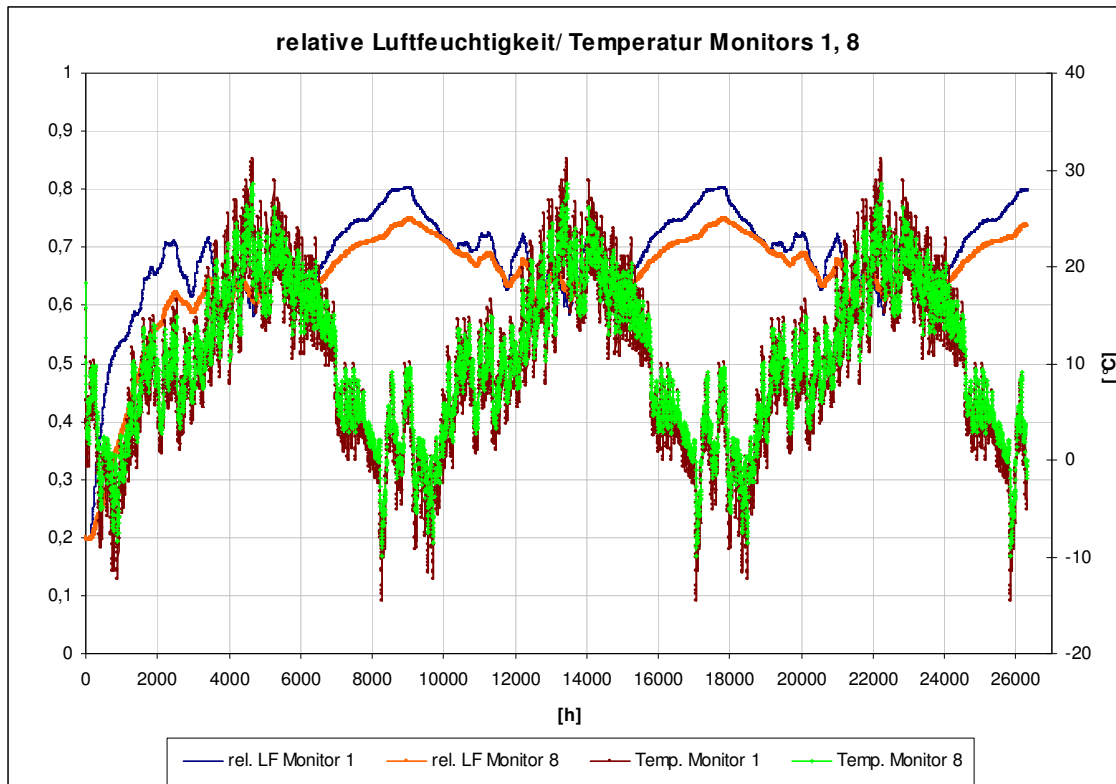
Siehe Variante 1.

#### Simulationsergebnisse:



**Abbildung 43: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]**

Die obige Grafik zeigt eindeutig den Erfolg durch Wahl eines wasserabweisenden Außenputzes. War bei Variante 1 noch eine Anreicherung des Feuchtigkeitsgehalts im Ziegelmauerwerk, wie auch in der Gesamtkonstruktion zu verzeichnen, so bleibt hier das Niveau des Wassergehalts in allen Baustoffen konstant tief.



**Abbildung 44: relative Luftfeuchtigkeit/ Temperatur Monitors 1, 8 (Außenseite der VIPs) [eigene Abb.]**

Auch die Verteilungen der relativen Luftfeuchten zeigen deutliche Verbesserungen. Waren hier bei Variante 1 nach kurzer Zeit bereits relative Luftfeuchten von beinahe 100% zu verzeichnen, erkennt man durch den besseren Witterungsschutz jetzt nur mehr den jahreszeitlichen Wechsel. Dabei ist zu bemerken, dass die Messpunkte im Inneren der Konstruktion, direkt an den VIPs den Wert von 80% nur sehr kurzfristig und geringfügig übersteigen und alle Monitorpositionen an der inneren Oberfläche rein den Einfluss des Innenklimas widerspiegeln.

Die Wassergehalte nehmen im Lauf der betrachteten drei Jahre nicht zu und bleiben generell in einem unkritischen Bereich. Beispielsweise entspricht der Maximalwert von ca. 12kg/m<sup>3</sup> im Ziegelmauerwerk nur einem Wassergehalt von ca. 1,2 Vol.-%, was einen vollkommen unkritischen und gewöhnlichen Wert darstellt.

### 3.6.2.3 Ergebnisse der Simulationen mit THERM

#### Simulationsergebnisse:

- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,63 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (25cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

Da die Darstellungen der Simulationsergebnisse mit sehr hoher Genauigkeit mit Var. 1 übereinstimmen, werden sie hier nicht erneut dargestellt.

### 3.6.3 Variante 2

#### 3.6.3.1 Aufbau

#### Var. 2 (Fläche)

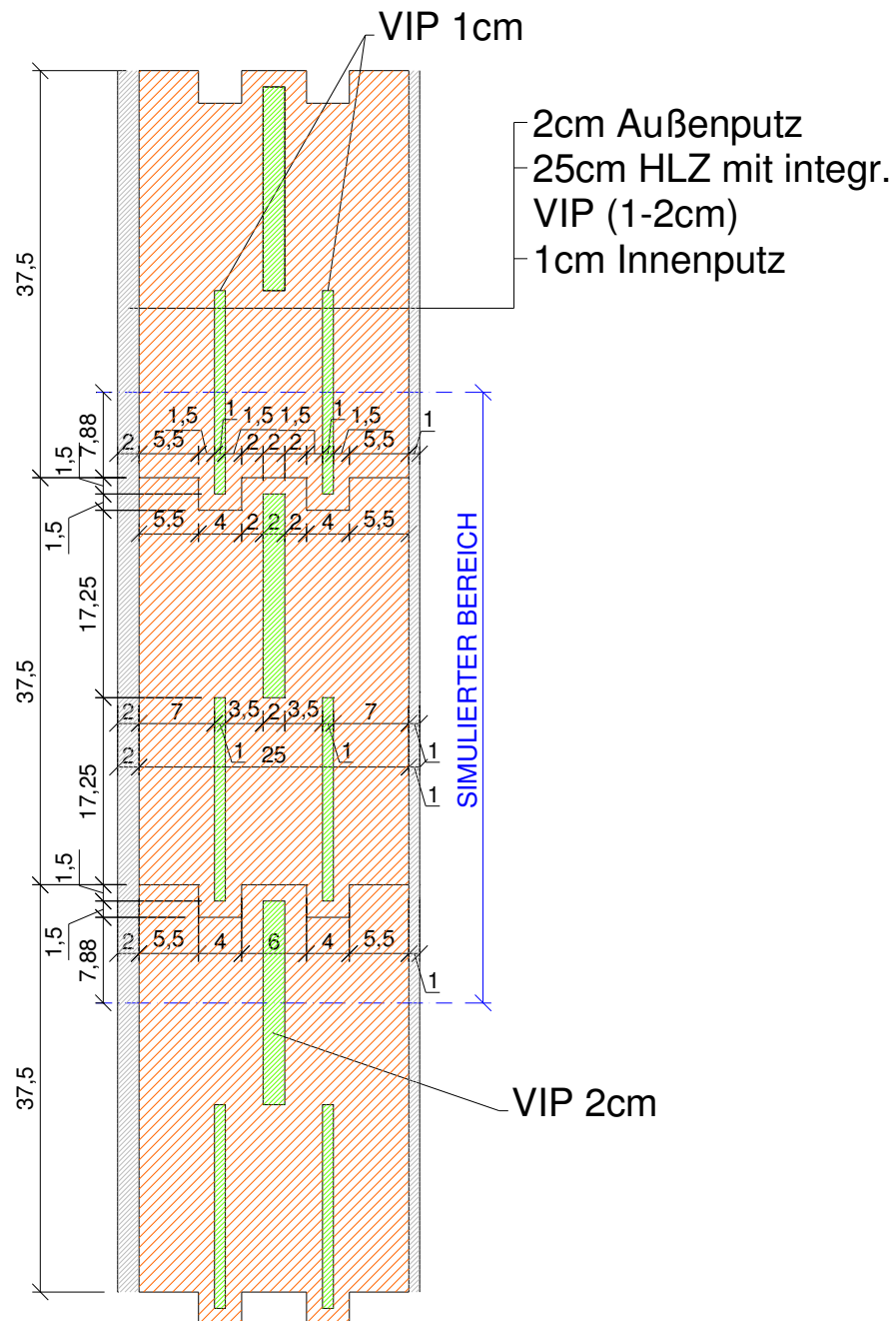


Abbildung 45: Variante 2 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]

Variante 2 zeichnet sich dadurch aus, dass hier kleinere Vakuumpaneele verwendet werden, wodurch sich folgende Abweichungen zu Variante 1 ergeben:

- Die Notwendigkeit zwei Arten von Standard- Ziegeln zu verwenden, wie dies bei Variante 1 noch erforderlich war, entfällt hier. Es gibt, abgesehen von eventuell erforderlichen Pass- und Sondersteinen, nur mehr eine Art von regulären Ziegeln.
- Die Überlappung der VIPs erfolgt hier wie gehabt im Stoßfugenbereich mit Nut und Feder und ein weiteres Mal im Ziegel selbst, im Bereich des Wechsels von einem stärkeren auf zwei schmalere Paneele.
- Außerdem soll somit das Dampfdurchlässigkeitsvermögen verbessert werden, da bei dieser Variante auch in der Mitte jedes Ziegels eine Möglichkeit zum Wasserdampfdurchtritt geschaffen wurde.

Negativ anzumerken ist hier der Umstand, dass die Vakuum- Paneele wesentlich kleiner sind, wodurch der Wärmebrücken- Randeffekt an Bedeutung gewinnt. Ebenso verhält es sich mit dem zu geringen Seitenabstand von VIP zur Ziegel- Außenseite, wodurch kein ausreichender Platz für Installationen vorhanden ist.

### 3.6.3.2 Ergebnisse der Simulationen mit WUFI

#### Eingabe der Konstruktion:

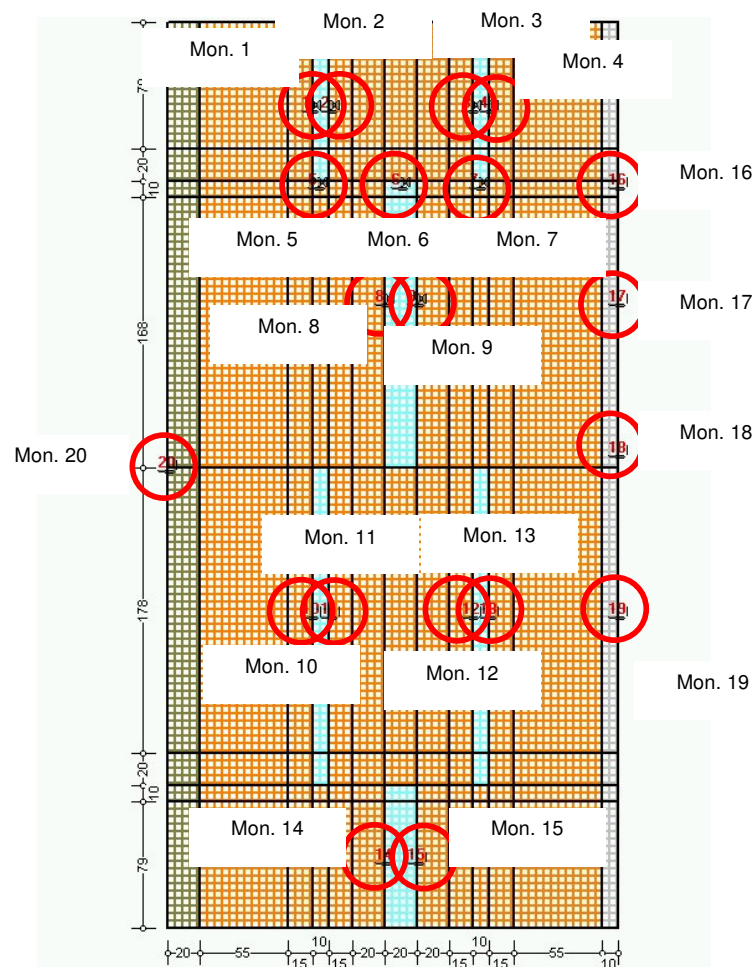
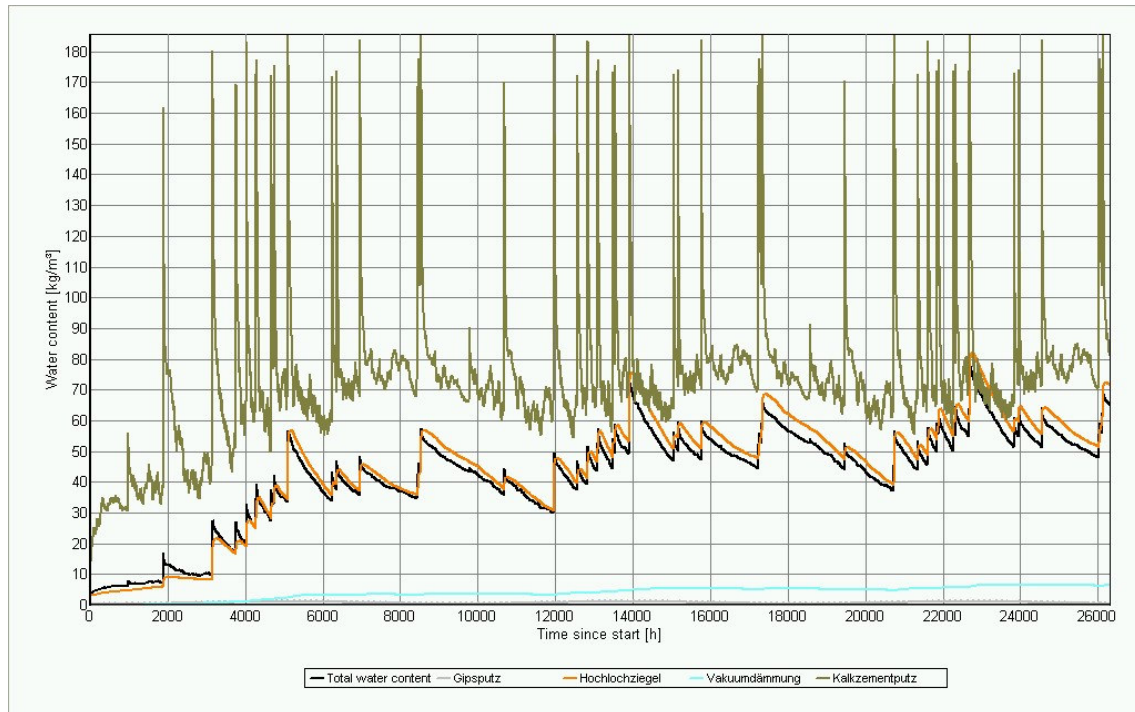


Abbildung 46: Konstruktion Variante 2 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]

### Simulationsergebnisse:



**Abbildung 47: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]**

Auch hier wurde zuerst ein gewöhnlicher Kalkzementputz als Außenputz vorgesehen, jedoch sieht man schon an der Darstellung des Wassergehalts der einzelnen Materialien, dass hier durch den mangelnden Schutz vor übermäßiger Wasseraufnahme auch bei dieser Variante eine Anreicherung der Feuchtigkeit im Bauteil stattfindet und darüber hinaus die Wassergehalte für die Baupraxis als zu hoch anzusehen sind. Da bereits an dieser Stelle der Zusammenhang zwischen der Wasseraufnahmefähigkeit des Putzsystems und der hygrischen Funktionalität der einzelnen Systeme klar zu erkennen ist, wird bei den folgenden Varianten nur noch das wasserabweisende Putzsystem untersucht.

Da sich hier an den Monitorpositionen für alle Bereiche (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Wassergehalt) beinahe analoge Werte zu Variante 1 ablesen lassen, wird auf eine detaillierte Darstellung im Weiteren verzichtet und, nach der nun folgenden thermischen Betrachtung, mit Variante 2a fortgefahren.

### 3.6.3.3 Ergebnisse der Simulationen mit THERM

#### Simulationsergebnisse:

- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (25cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

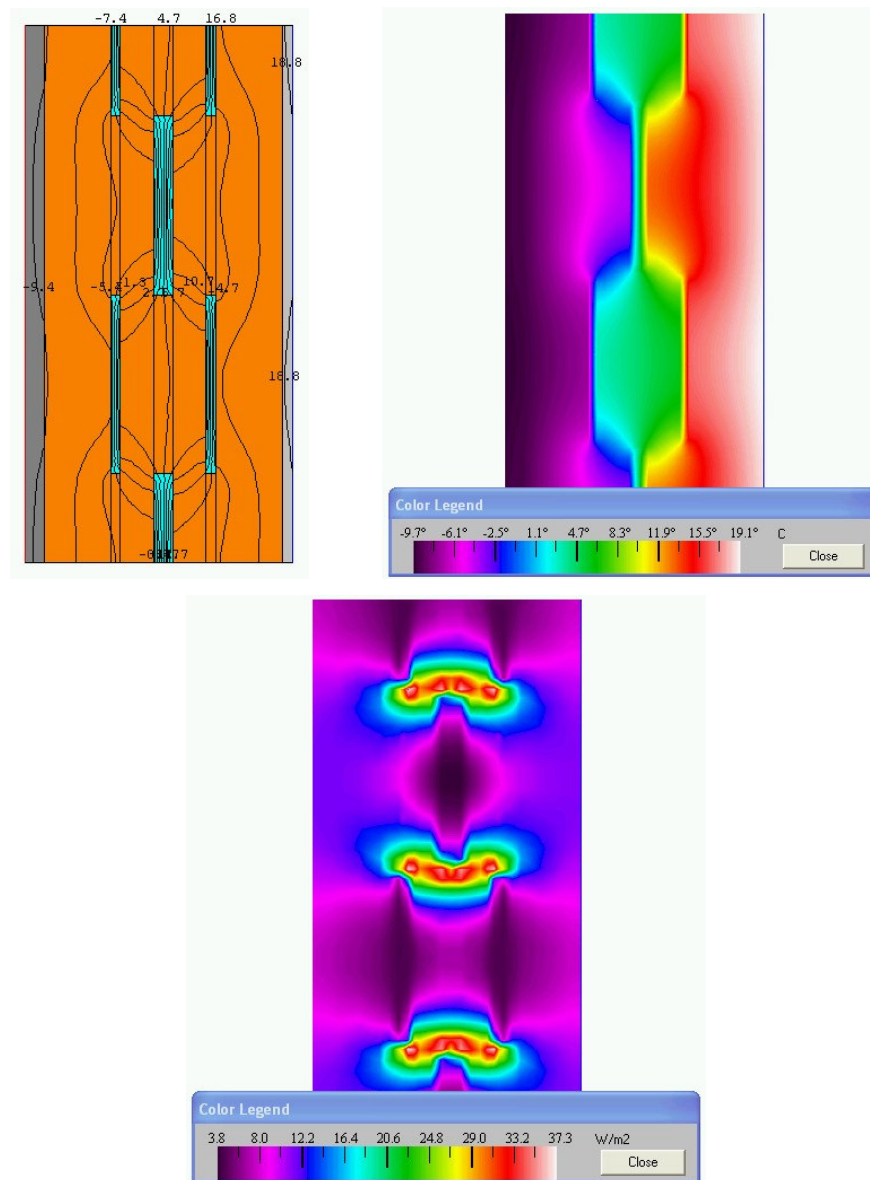
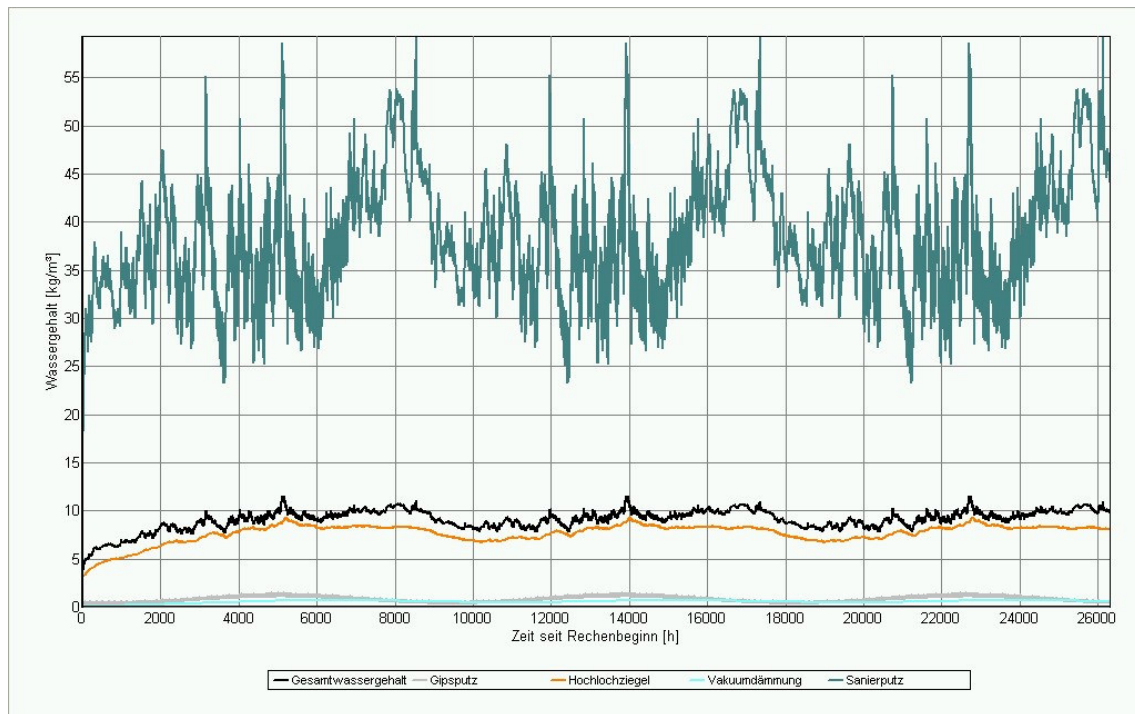


Abbildung 48: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]



### Simulationsergebnisse:



**Abbildung 50: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]**

Auch Variante 2a zeigt fast das gleiche Feuchtigkeitsverhalten wie Variante 1a. Die Wassergehalte in den einzelnen Materialschichten bleiben unbedenklich gering. Es lässt sich somit feststellen, dass hinsichtlich des hygrischen Verhaltens, bei ausreichendem Schutz vor Feuchtigkeitseintrag durch Schlagregen, keine Bedenken der Funktionstüchtigkeit bestehen.

### 3.6.4.3 Ergebnisse der Simulationen mit THERM

#### Simulationsergebnisse:

- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (25cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

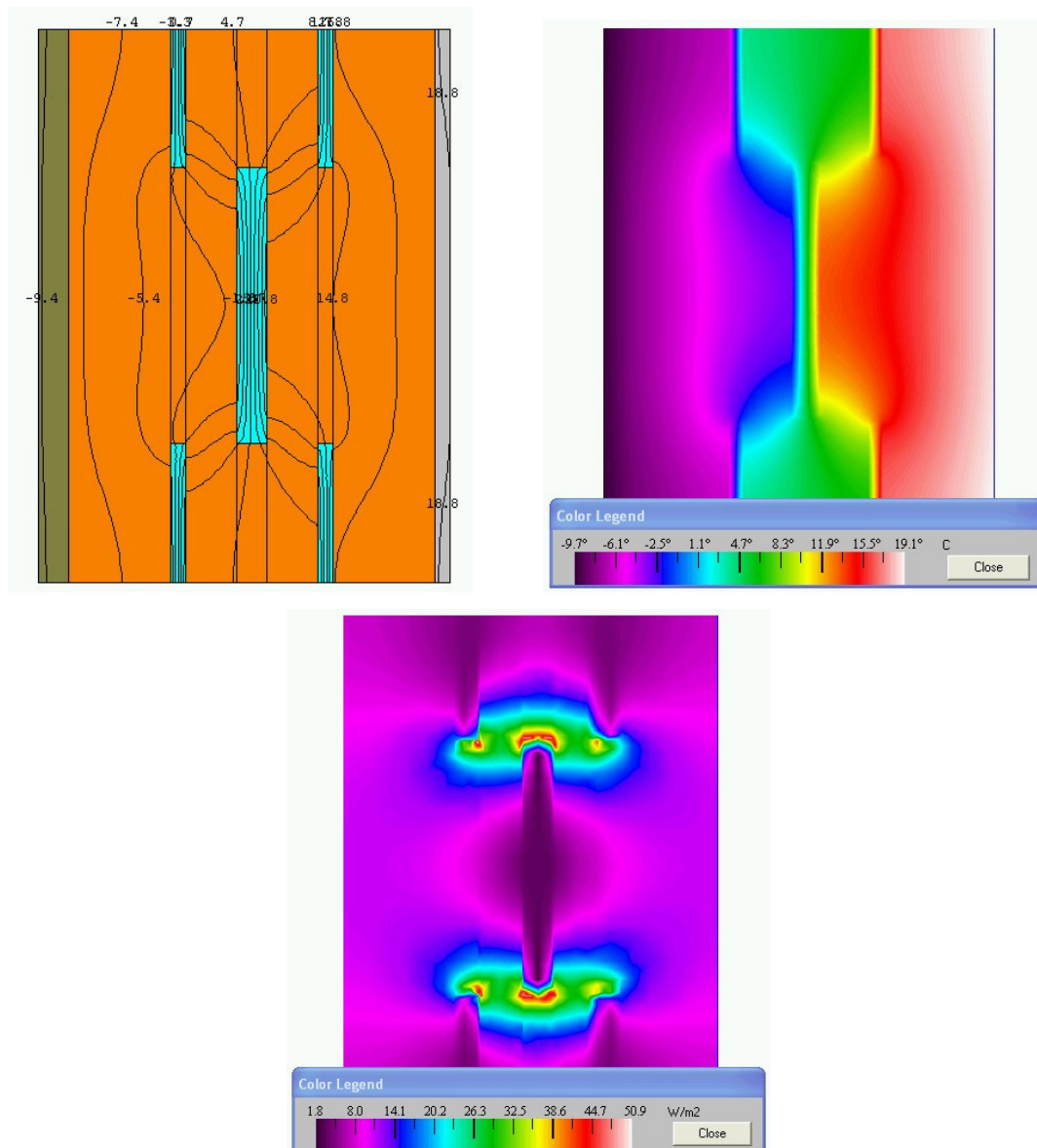


Abbildung 51: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]

### 3.6.5 Varianten 3, 4

Die Varianten 3 und 4 stellen zwar Weiterentwicklungen dar, werden hier aber, aufgrund der ähnlichen Simulationsergebnisse, nur kurz als Zwischenstadien beschrieben.

#### 3.6.5.1 Aufbauten

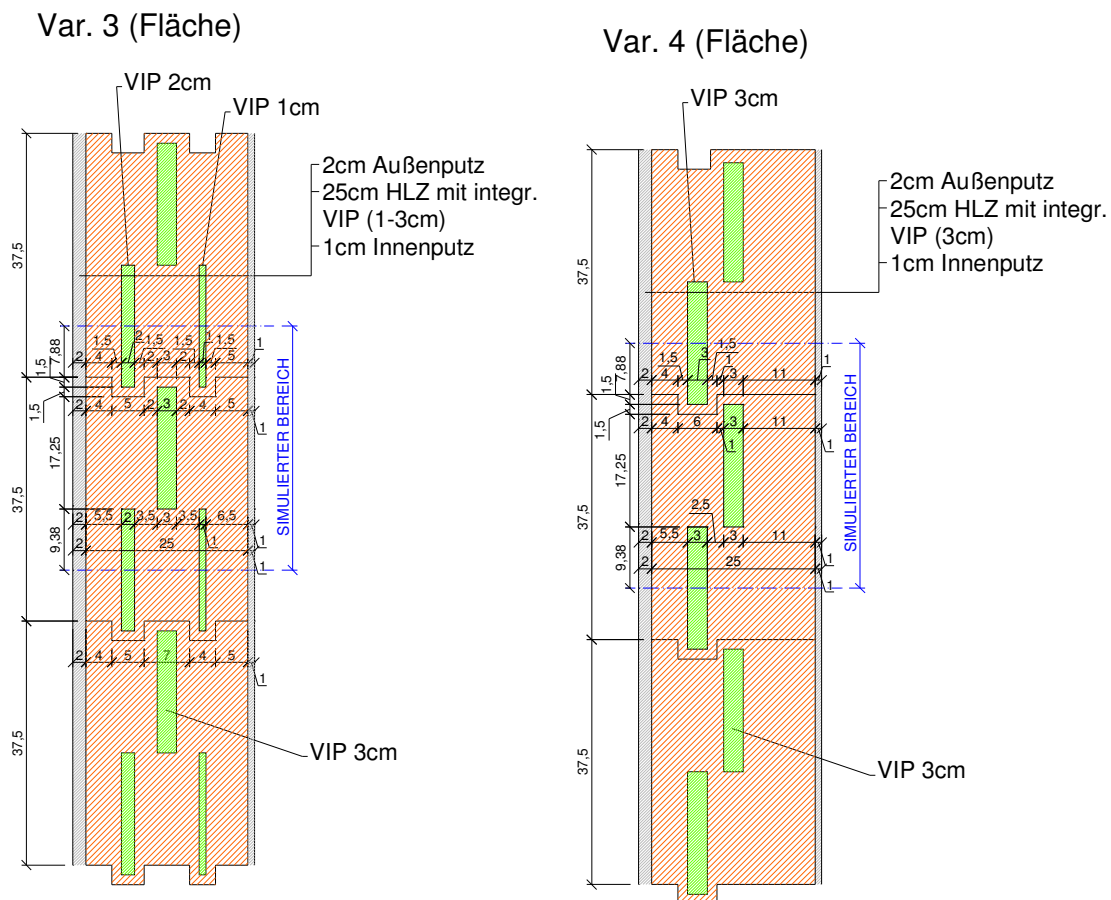


Abbildung 52: Varianten 3 und 4 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]

#### Variante 3:

Variante 3 unterscheidet sich von Variante 2 nur durch den Wechsel auf Paneele von bis zu 3cm Stärke. Nachteilig ist hier eine noch größere Vielfalt an Paneeldicken zu bemerken. Bei diesem Ziegel sind VIPs mit 1, 2 und 3cm Stärke enthalten. Ansonsten gelten die gleichen Aussagen wie für Variante 2.

**Variante 4:**

Variante 4 besteht ebenfalls aus einem Ziegel mit 25cm Stärke, versucht aber mehr Flexibilität im Bezug auf Installationen, sowie ausreichend Platz für Schrauben und Nägel an der Rauminnenseite zu bieten. Durch die Aufteilung auf zwei Paneele mit je 3cm und deren Versatz kommt das System mit je einer Nut und einer Feder pro Ziegel aus. Positiv fällt hier die einheitliche Größe und Dicke der Paneele auf.

Da die hier zusammengefassten Varianten 3 und 4 als Zwischenstadien angesehen werden können, werden an dieser Stelle keine detaillierten bauphysikalischen Simulationsergebnisse dargestellt.

### 3.6.6 Variante 5

#### 3.6.6.1 Aufbau

##### Var. 5 (Fläche)

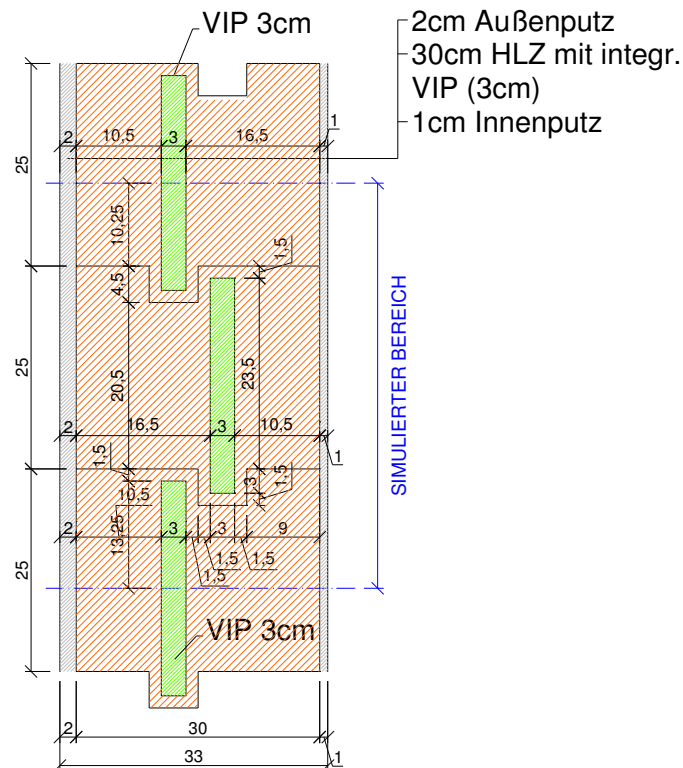


Abbildung 53: Variante 5 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]

Um maximale Flexibilität hinsichtlich der möglichen Installationen sowie Schutz vor Beschädigung der Paneele zu bieten, wurde die Wandstärke auf 30cm erhöht. Als Vorlage für die Steingröße diente hier der 30cm Porotherm- Außenwandstein. Jeder Ziegel beinhaltet aufgrund der geringen Steinlänge nur ein Paneel. Um trotzdem einen Versatz im Stoßbereich zu erhalten sind Nut und Feder nicht in einer Flucht angeordnet. Dies würde wiederum zwei Standard-Ziegelformate fordern, was aber durch einen simplen Trick vermieden werden kann. Die Steine sind als Planziegel gefertigt und an Ober- und Unterseite identisch. Somit können sie auch um die Wandachse gedreht eingebaut werden und es ist kein zweites Steinformat erforderlich. Die Vergrößerung der Wandstärke um 5cm wirkt sich hinsichtlich des Wärmeschutzes zusätzlich positiv aus.

### 3.6.6.2 Ergebnisse der Simulationen mit WUFI

#### Eingabe der Konstruktion:

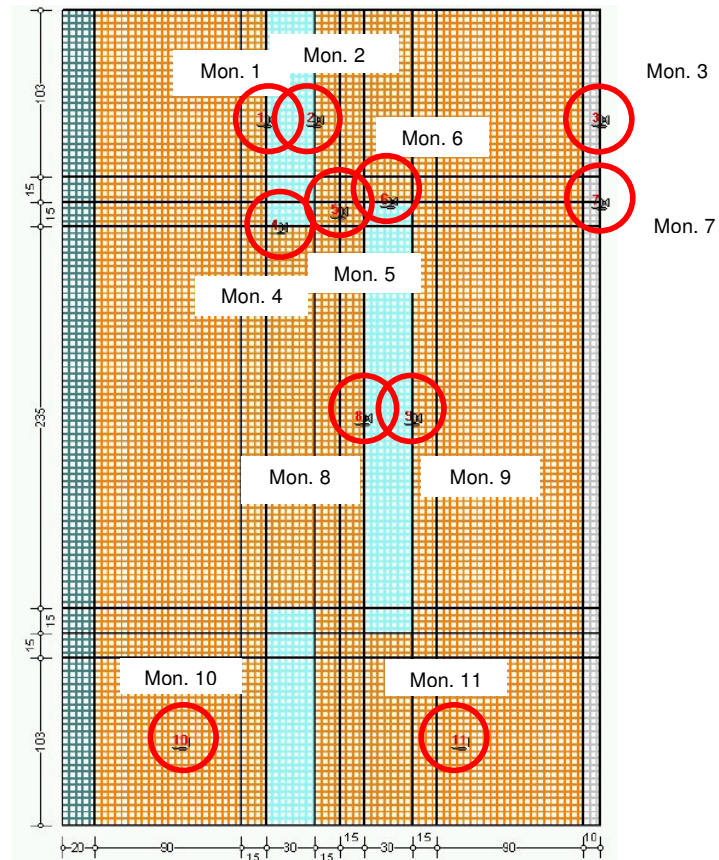
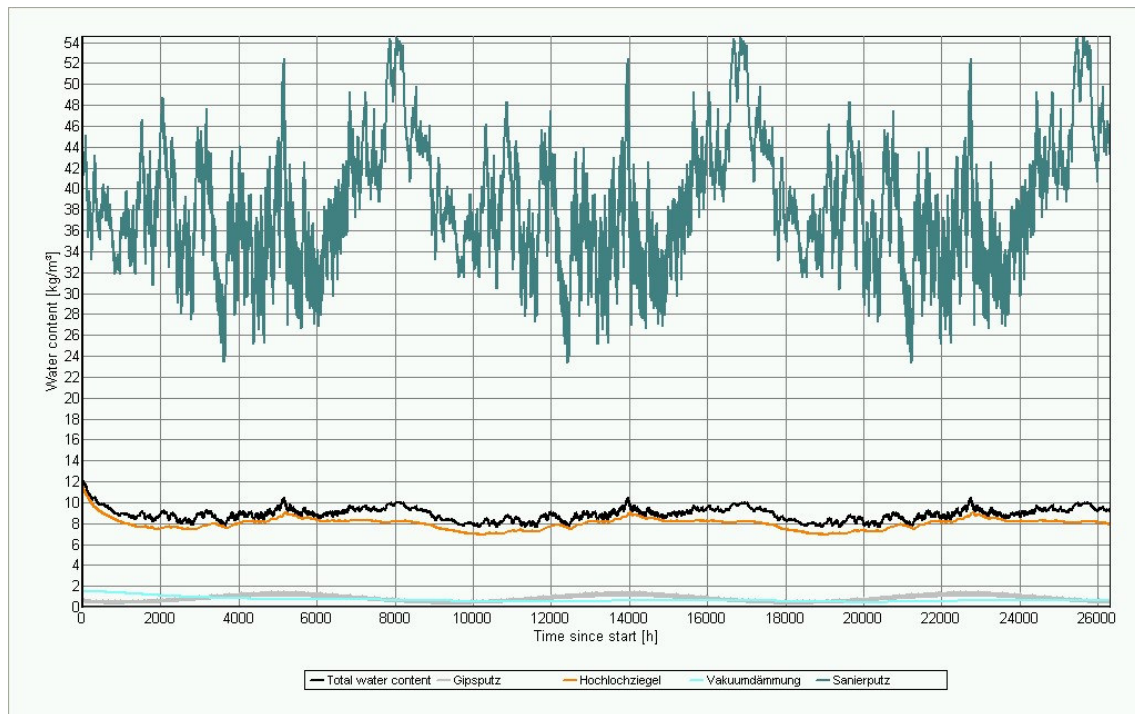


Abbildung 54: Konstruktion Variante 5 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]

### Simulationsergebnisse:



**Abbildung 55: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]**

Wie schon bei den vorangegangenen Varianten, zeigt sich ein unkritisches Bild der Wassergehalte, es kann also auch hier von der hygrischen Funktionstüchtigkeit ausgegangen werden.

Bei der folgenden Darstellung der thermischen Ergebnisse wurde auch beispielhaft für Variante 5 die Ecksituation mit Nachweis der Kondensat- und Schimmelfreiheit überprüft.

### 3.6.6.3 Ergebnisse der Simulationen mit THERM

#### Simulationsergebnisse (Fläche):

- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (30cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

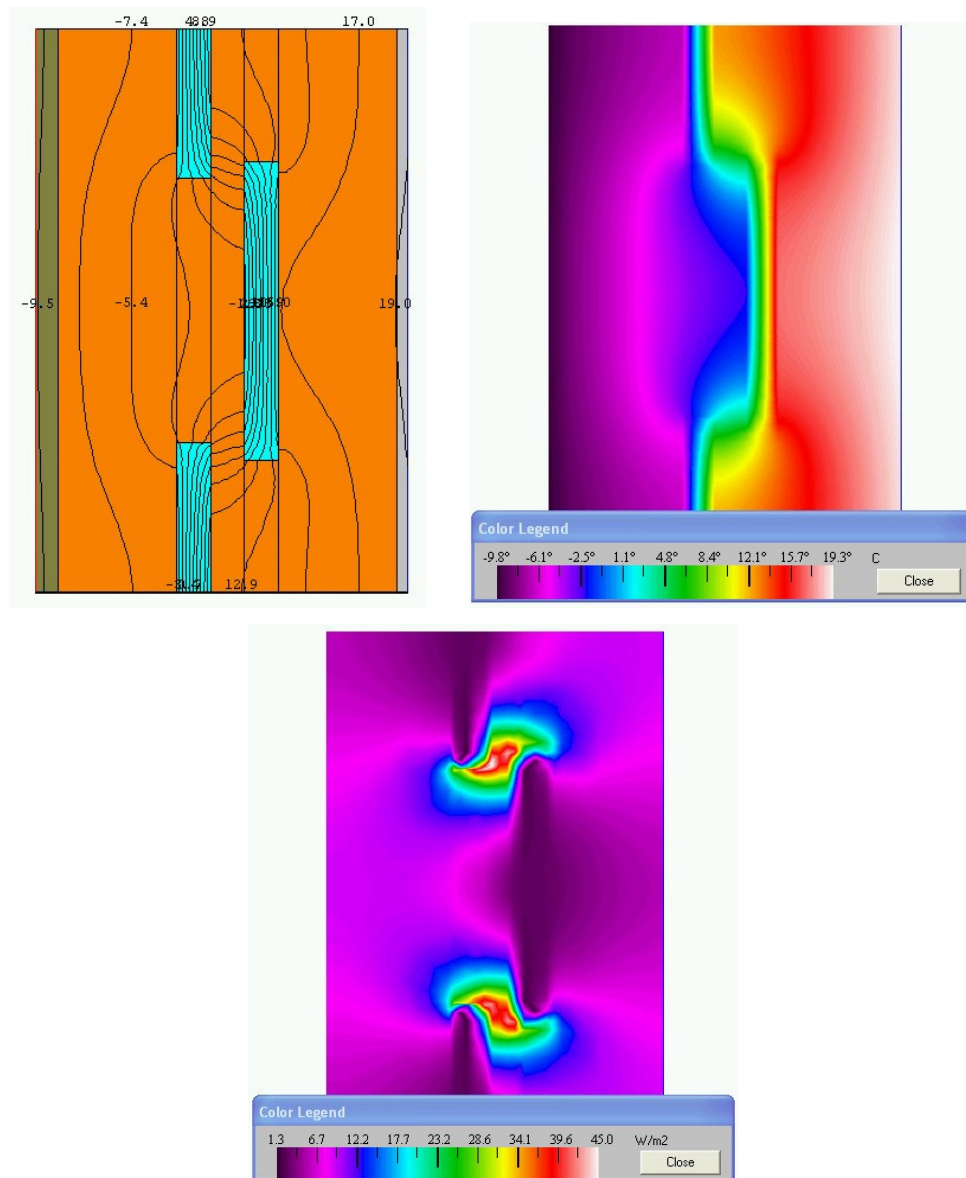


Abbildung 56: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]

### Simulationsergebnisse (Eckbereich):

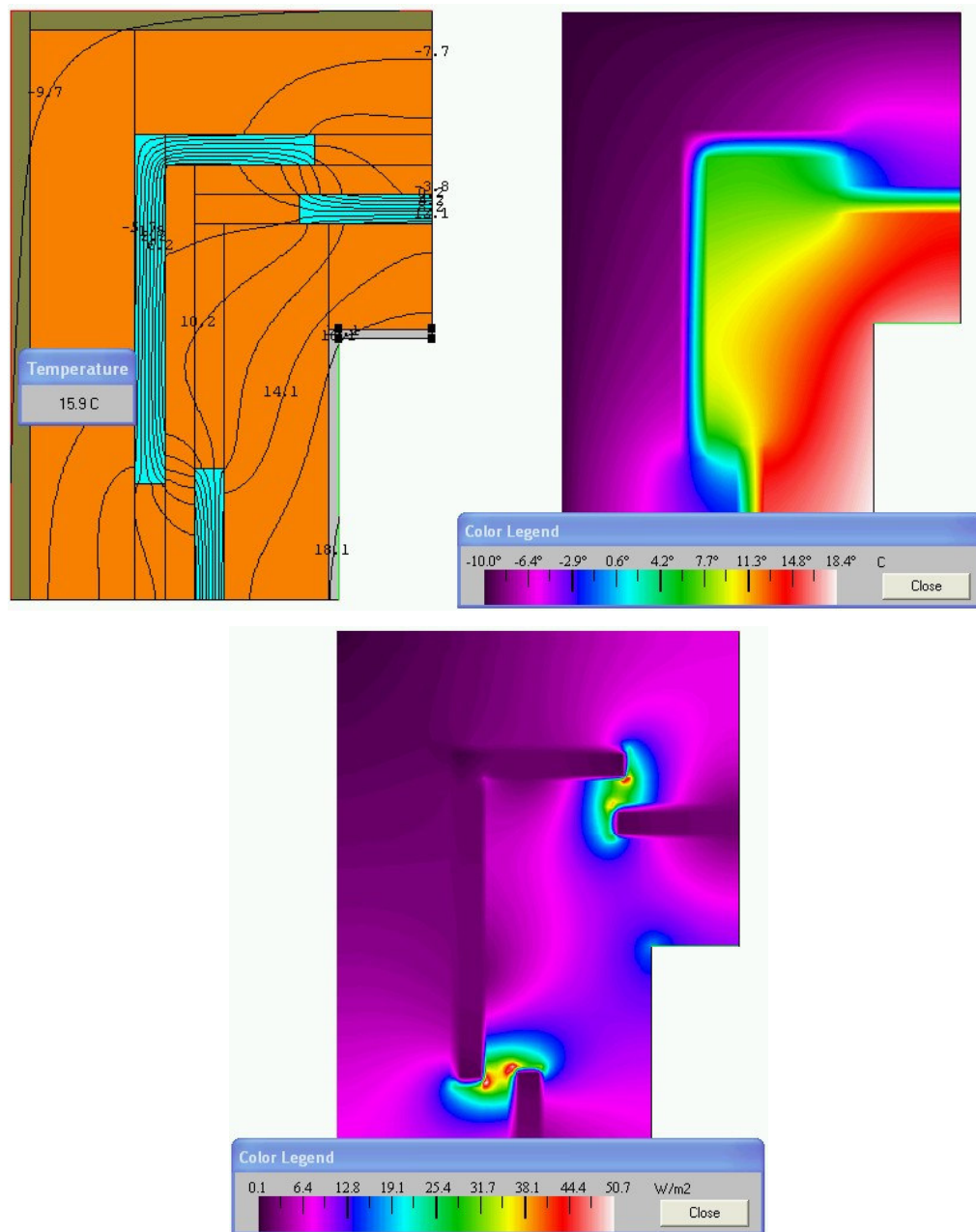


Abbildung 57: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen und Ecktemperatur; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung  
[eigene Abb.]

Der Nachweis der Vermeidung von Kondensation und Schimmelbildung an der Innenoberfläche wird anhand des, in der ÖNORM EN ISO 13788 definierten, Temperaturfaktors erbracht:

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e} = \frac{15,9^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})} = 0,86$$

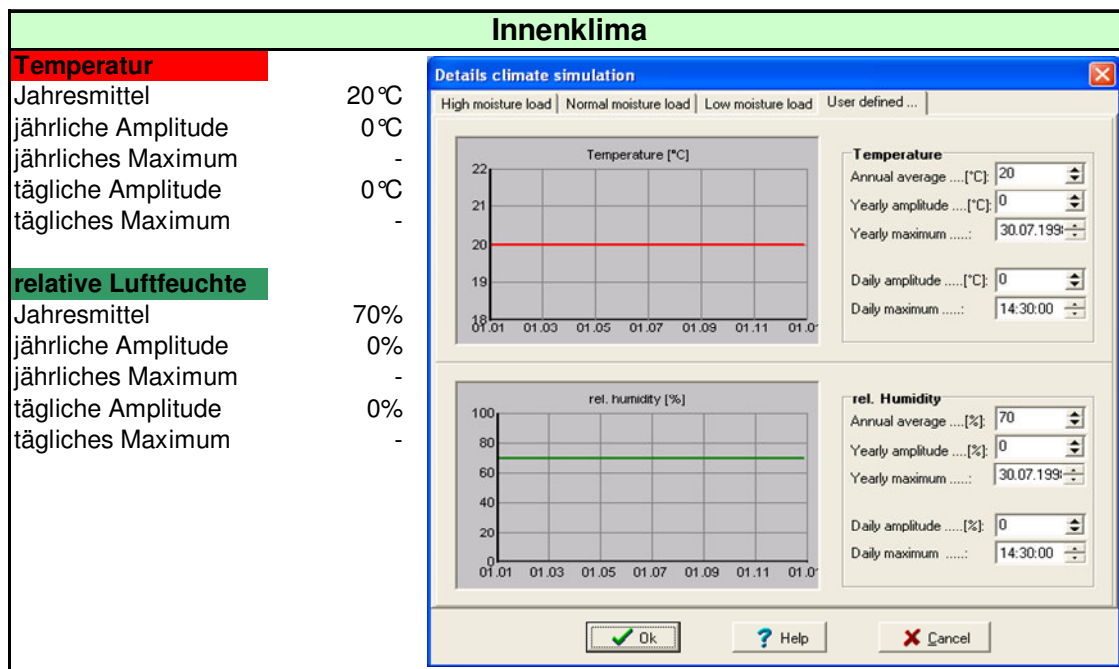
0,86 > 0,69 → **kein Kondensat**; 0,86 > 0,71 → **keine Schimmelbildung**

### 3.6.7 Variante 5 – konstant 70% relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum

Diese Variante dient zur Untersuchung, ob die Konstruktion die geforderte Eigenschaft besitzt, konstant hohe Feuchtelasten im Innenraum aufzunehmen und ggf. durch die Konstruktion nach außen abzuführen ohne einer Feuchtigkeitsanreicherung zu unterliegen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die gewählten Randbedingungen:

#### Abweichende Randbedingungen an der Raumseite:

Tabelle 4: Innenklima [eigene Abb.]



#### 3.6.7.1 Aufbau

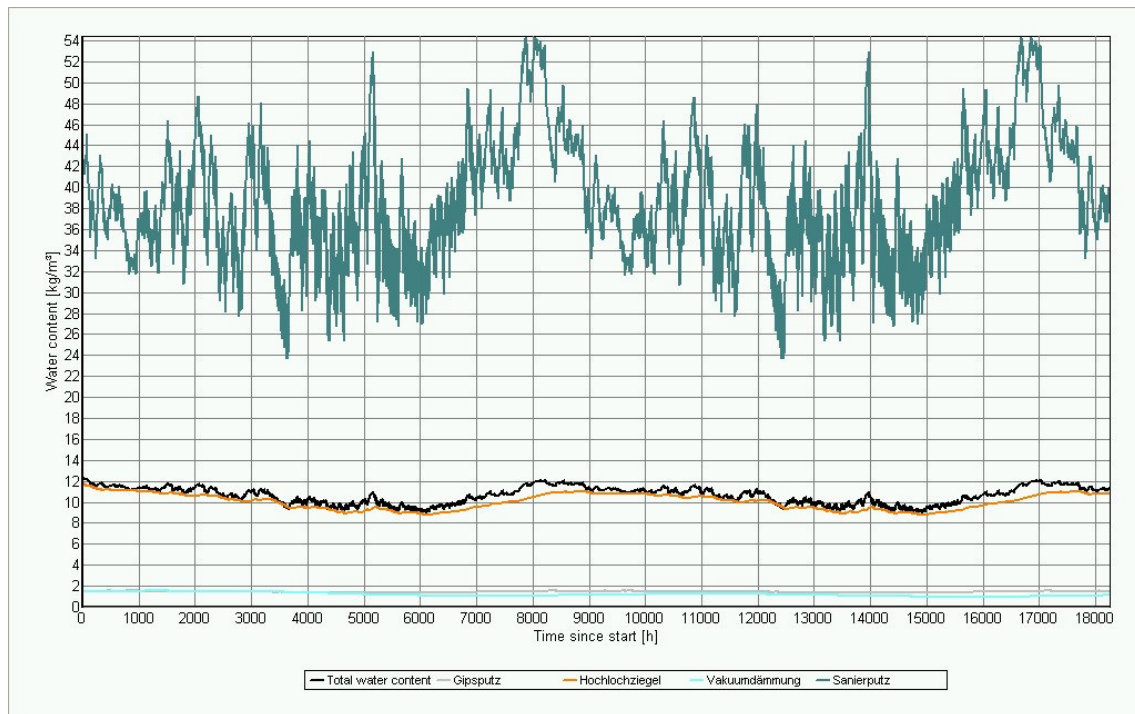
Siehe Variante 5.

#### 3.6.7.2 Ergebnisse der Simulationen mit WUFI

##### Eingabe der Konstruktion:

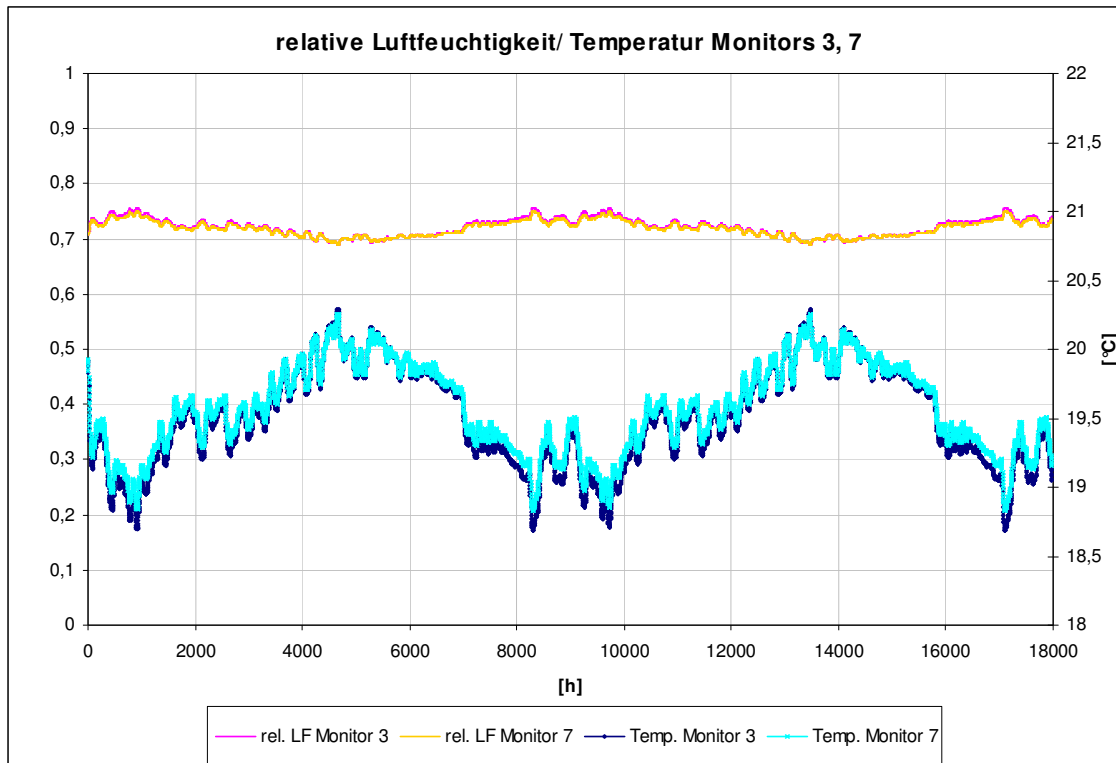
Siehe Variante 5.

### Simulationsergebnisse:



**Abbildung 58: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]**

Die mittleren Wassergehalte der einzelnen Materialien und der Gesamtkonstruktion bleiben auch bei dieser Variante im Bereich der Gleichgewichtsfeuchte. Es kommt zu keiner nennenswerten Feuchtigkeitsanreicherung einzelner Schichten oder der Gesamtkonstruktion.



**Abbildung 59: relative Luftfeuchtigkeit/ Temperatur Monitors 3, 7 (Innenoberfläche) [eigene Abb.]**

Man erkennt, dass die relative Luftfeuchtigkeit an den beiden Monitorpositionen, unmittelbar an der inneren Wandoberfläche, nur unwesentlich über der ständig herrschenden Luftfeuchtigkeit der Innenluft von 70% liegt. Dies liegt hauptsächlich an der meist etwas niedrigeren Oberflächentemperatur der Außenwand. Es kommt also nicht einmal bei dieser extremen Variante zu einer schädigenden Anreicherung mit Feuchtigkeit in der Konstruktion und an deren Oberfläche.

### 3.6.8 Variante 6

#### 3.6.8.1 Aufbau

#### Var. 6 (Fläche)

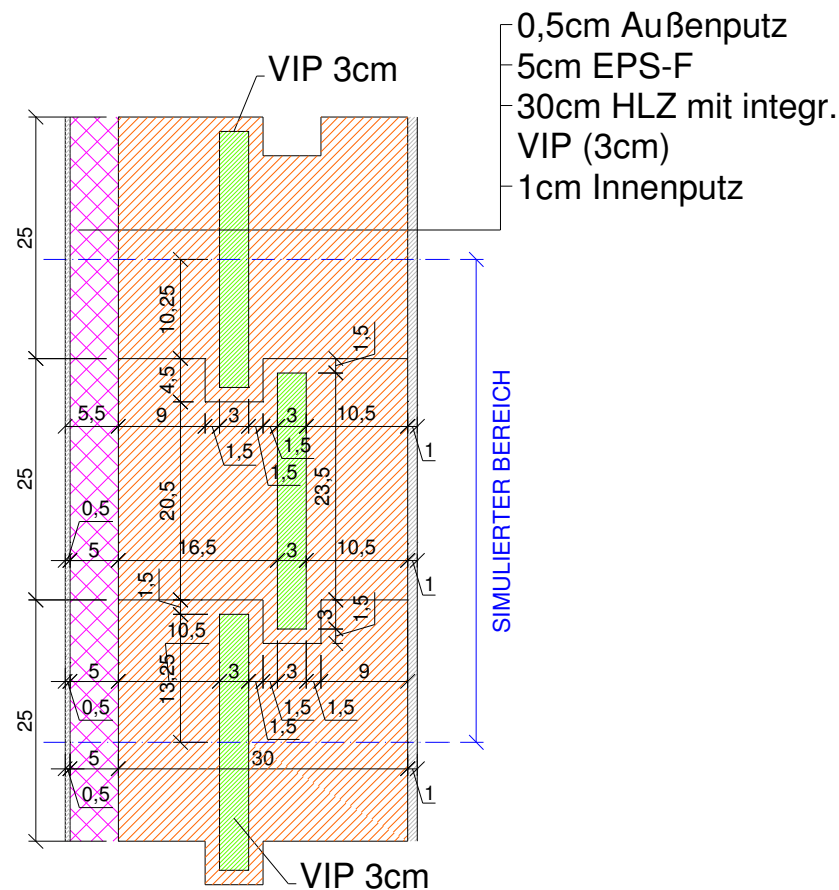


Abbildung 60: Variante 6 des VIP-Ziegels [eigene Abb.]

Variante 6 ist vom Ziegel- System analog zu Variante 5, doch wird hier noch eine zusätzliche Außendämmung aufgebracht. Das hat folgende Vorteile:

- Da bei den vorangegangenen Varianten die Dämmebene ausschließlich im Kern des Wandbildners angeordnet ist, treten teilweise sehr hohe Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenseite des Steins auf. Außerdem liegt im Winter vielfach die Hälfte der Wand im negativen Temperaturbereich, was sich eventuell nachteilig auf die Lebensdauer des Ziegels auswirkt. Mit Hilfe dieser, hier z.B. 5cm starken, EPS- F- Dämmschicht

treten nur sehr vereinzelt und kurzzeitig Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes auf.

- Der Vollwärmeschutz ist zwar diffusionsoffen, stellt aber dennoch einen Feuchtigkeitsschutz von der Außenseite her dar.
- Der Wärmeschutz verbessert sich durch diese Maßnahme zusätzlich. Auch die Wärmebrücken im Stoßbereich der Platten verlieren etwas an Einfluss.

### 3.6.8.2 Ergebnisse der Simulationen mit WUFI

#### Eingabe der Konstruktion:

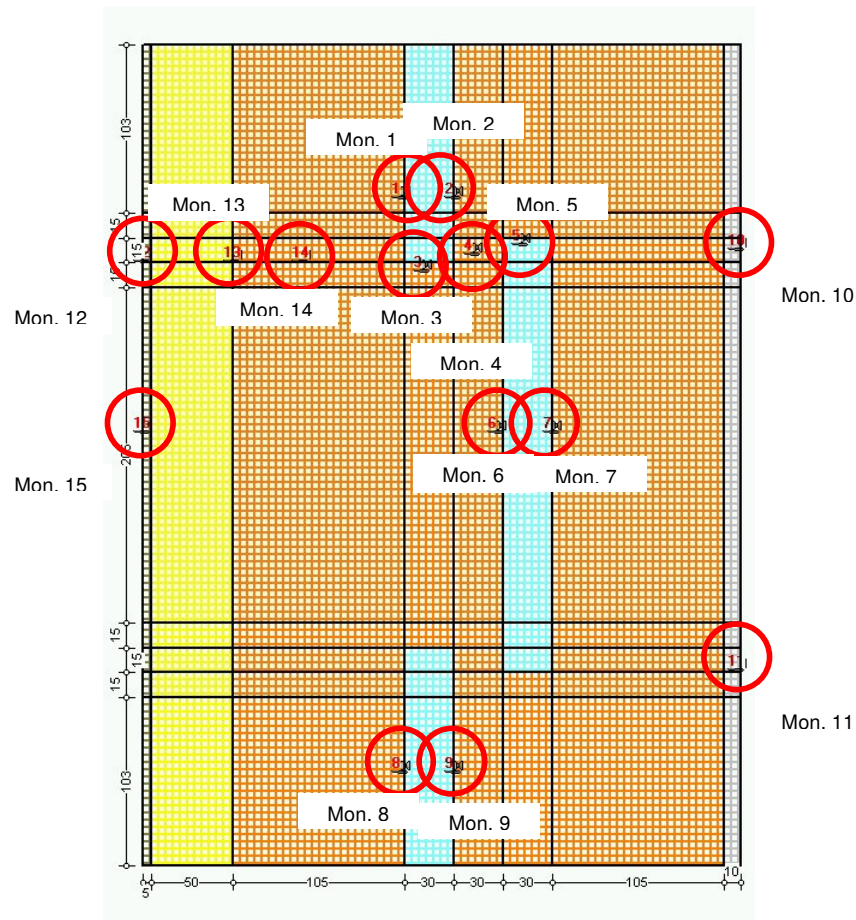


Abbildung 61: Konstruktion Variante 6 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]

## Simulationsergebnisse:

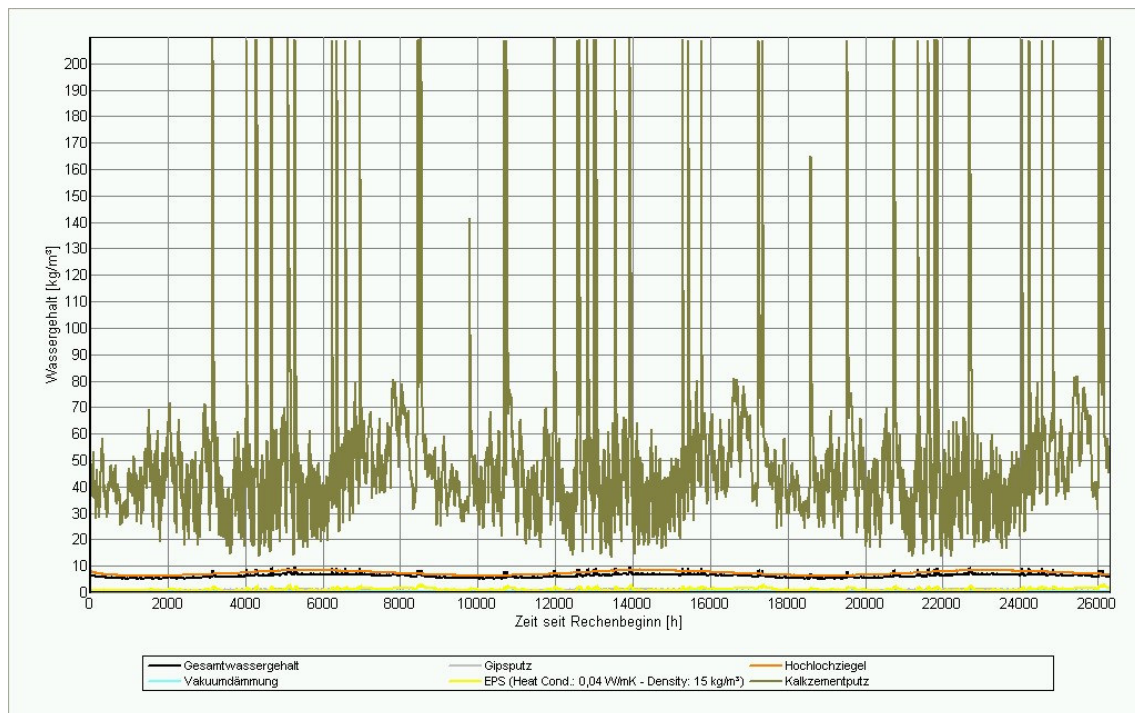


Abbildung 62: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]

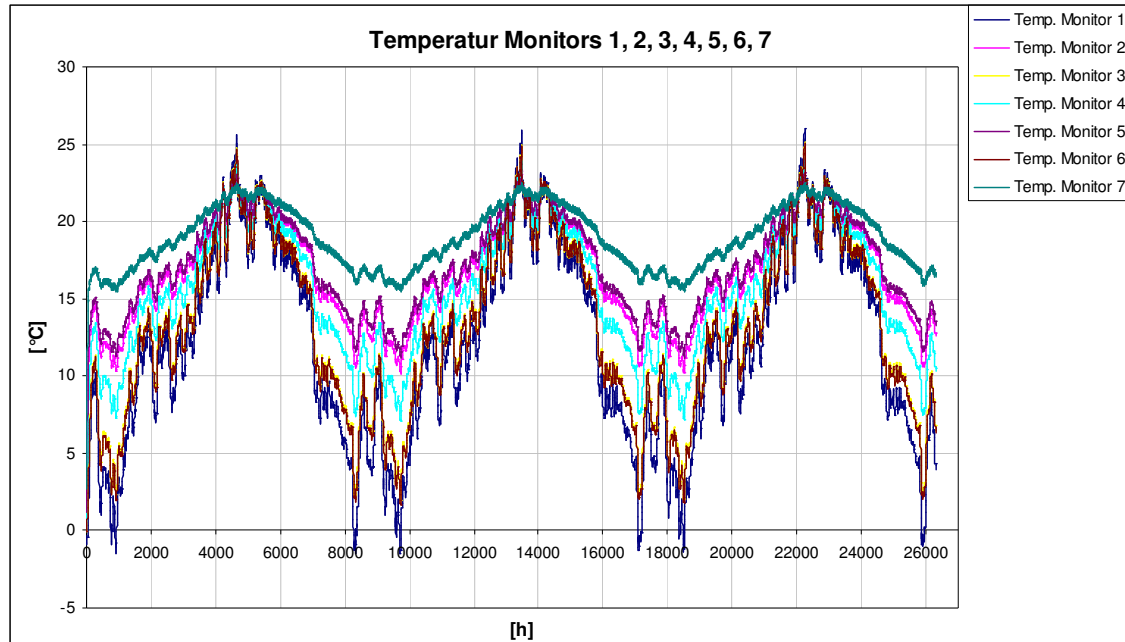
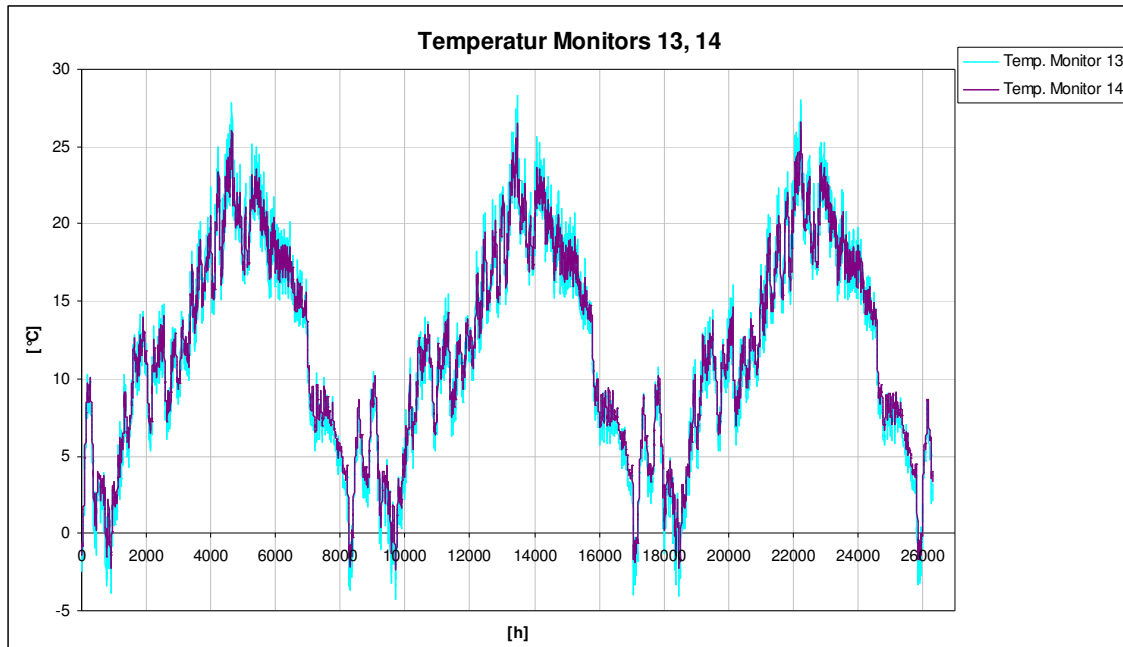


Abbildung 63: Temperatur Monitors 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 [eigene Abb.]



**Abbildung 64: Temperatur Monitors 13, 14 [eigene Abb.]**

Man erkennt, dass an der kritischen Monitorposition 13 – zwischen Vollwärmeschutz und Ziegel – nur vereinzelt Minustemperaturen auftreten. Somit sind die Gefahren von Frost und unterschiedlichen Temperaturdehnungen im Ziegel mit hoher Wahrscheinlichkeit gebannt.

### 3.6.8.3 Ergebnisse der Simulationen mit THERM

#### Simulationsergebnisse:

- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (30cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

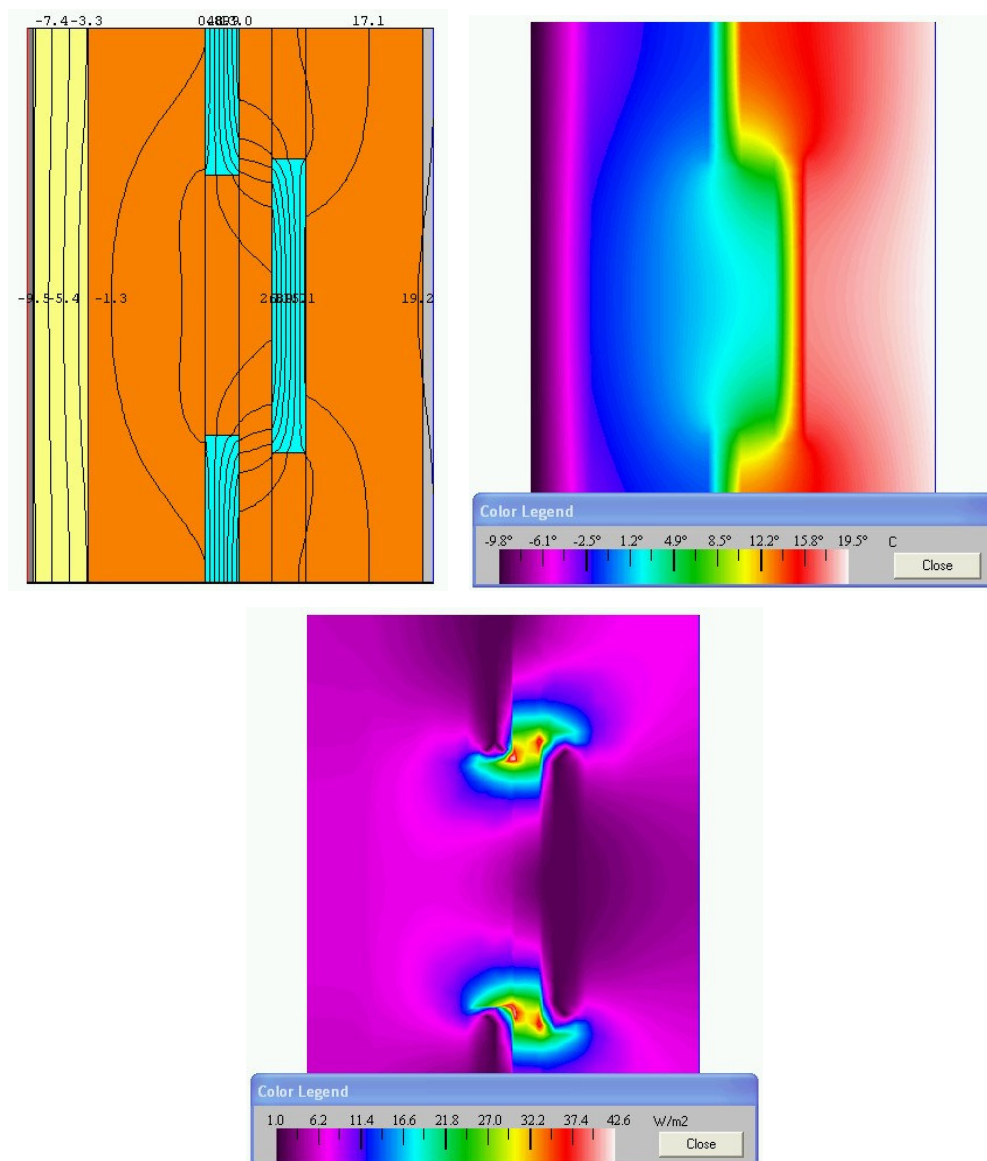


Abbildung 65: o. links: Eingabe des simulierten Ausschnittes mit Isothermen; o. rechts: Temperaturverteilung als farbige Infrarotdarstellung; unten: Wärmestromdichteverteilung [eigene Abb.]

### 3.7 Gegenüberstellung und Diskussion der Varianten

In den folgenden Darstellungen sollen der Nutzflächengewinn und die Ergebnisse der thermischen Berechnungen diskutiert werden.

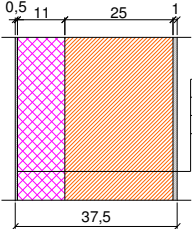
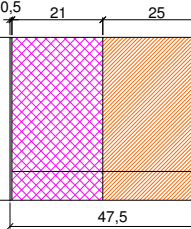
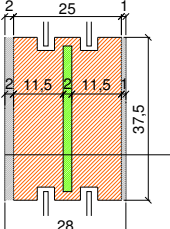
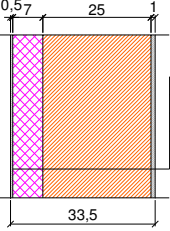
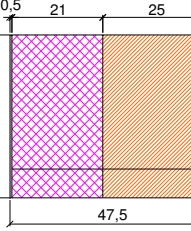
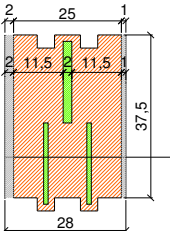
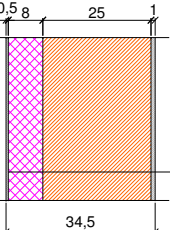
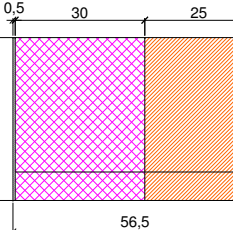
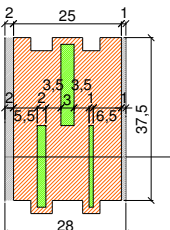
| entspricht<br>MIT Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                       | entspricht<br>OHNE Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Konstruktion                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>11cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  |  <p>0,5cm Außenputz<br/>21cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>   | <p><math>U = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(25cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 375/250mm</li> <li>- 1 bis 2cm VIP</li> <li>- keine Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>25cm HLZ mit integr. VIP (1-2cm)<br/>1cm Innenputz</p>   |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>7cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  |  <p>0,5cm Außenputz<br/>21cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  | <p><math>U = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(25cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 375/250mm</li> <li>- 1 bis 2cm VIP</li> <li>- keine Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>25cm HLZ mit integr. VIP (1-2cm)<br/>1cm Innenputz</p>  |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>8cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><math>U = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(25cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 375/250mm</li> <li>- 1 bis 3cm VIP</li> <li>- keine Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>25cm HLZ mit integr. VIP (1-3cm)<br/>1cm Innenputz</p> |

Abbildung 66: Gegenüberstellung der Varianten 1 bis 3 [eigene Abb.]

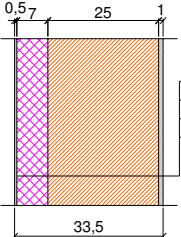
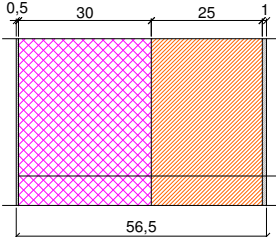
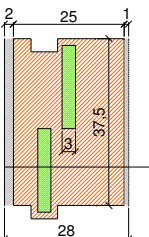
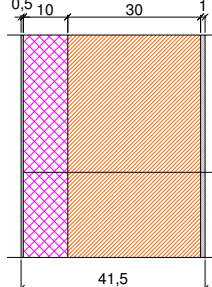
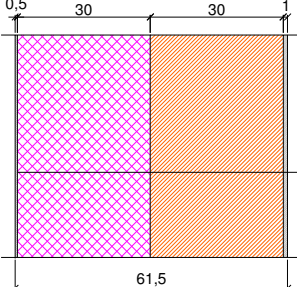
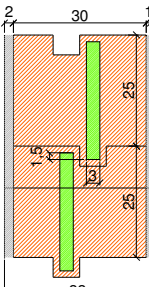
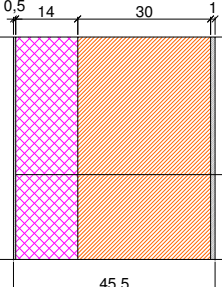
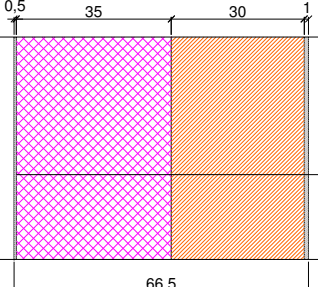
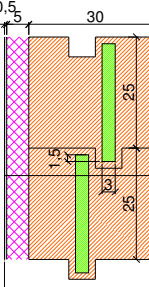
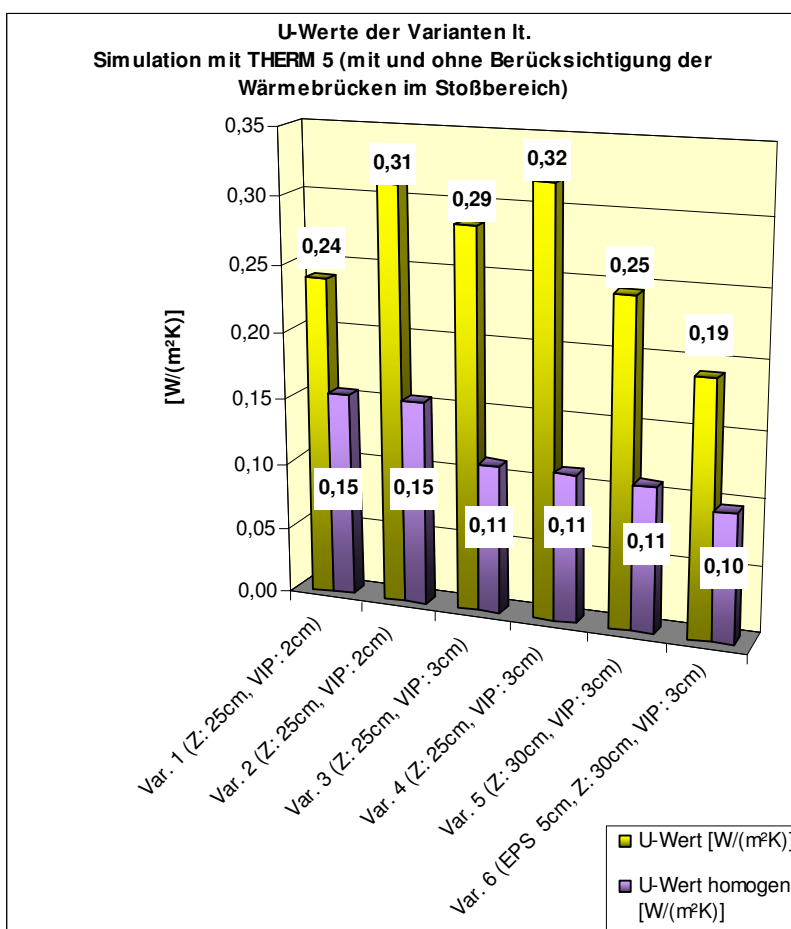
| entspricht<br>MIT Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                       | entspricht<br>OHNE Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Konstruktion                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>7cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>   |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  | <p><math>U = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(25cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 4</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 375/250mm</li> <li>- 3cm VIP, 2 Paneele</li> <li>- keine Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>25cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>1cm Innenputz</p>                             |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>10cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  | <p><math>U = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(30cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 5</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 250/300mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- 1,5cm Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>30cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>1cm Innenputz</p>                                        |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>14cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> |  <p>0,5cm Außenputz<br/>35cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><math>U = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(30cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 6</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 250/300mm</li> <li>- 3cm VIP + 5cm AD</li> <li>- 1,5cm Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>0,5cm Außenputz<br/>5cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>1cm Innenputz</p> |

Abbildung 67: Gegenüberstellung der Varianten 4 bis 6 [eigene Abb.]

Die linke Darstellung zeigt einen konventionellen Wandaufbau mit EPS-F unter Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßstellenbereich (Überlappung mit Nut und Feder) der, laut thermischer Simulation mit THERM, als äquivalent (mit gleichem U- Wert) zur ganz rechts abgebildeten VIP-Ziegelkonstruktion anzusehen ist.

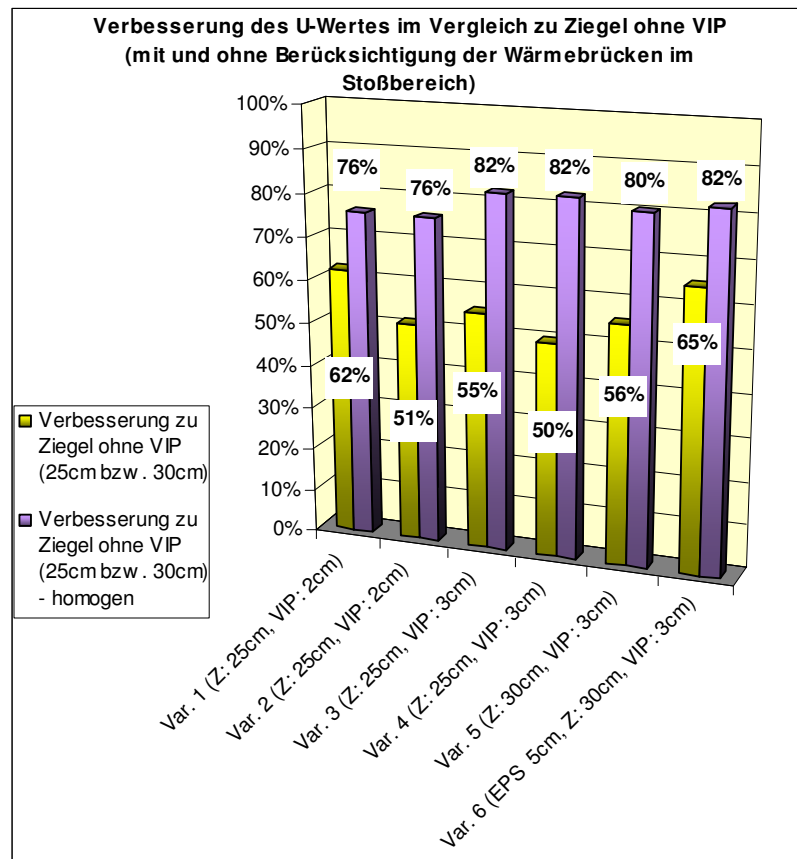
Die mittlere Darstellung veranschaulicht den, unter Vernachlässigung aller Wärmebrücken, äquivalenten Wandaufbau. Dieser Aufbau entspricht also dem, durch jedenfalls auftretende Wärmebrückenrandeffekte, nicht zu erreichenden Idealfall. Der Vergleich der linken und der mittleren Darstellung zeigt also, in grafischer Form, die Ausschöpfung des vorhandenen Dämmpotentials.

Hier wird erst ersichtlich welches Einsparungspotential bzgl. der Wandstärke die Verwendung von Vakuumdämmung in sich birgt. Die errechneten U- Werte und Wandstärken beinhalten jedoch den Wärmeverlust über die Lagerfuge noch nicht. Auf diese Problematik wird bei der Beurteilung der Varianten näher eingegangen.



**Abbildung 68: U-Werte der Varianten lt.**  
Simulation mit THERM 5 (mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßbereich)  
[eigene Abb.]

Die Abbildung verdeutlicht, dass bei den derzeit diskutierten Varianten sehr große Mengen an Wärmeenergie über die Stoßstellen der Paneele verloren gehen. Die mit U- Wert- homogen gekennzeichneten Balken stellen das, mit dem angegebenen Aufbau theoretische, maximal erzielbare Dämmniveau dar. Keine der hier aufgezeigten Varianten erreicht diesen Wert auch nur annähernd.



**Abbildung 69: Verbesserung des U-Wertes im Vergleich zu Ziegel ohne VIP  
(mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßbereich)**  
[eigene Abb.]

Diese Darstellung zeigt die Verbesserung des U- Wertes durch Integration eines Vakuumpaneels in der Konstruktion. Auch hier unterscheiden sich die Werte mit Berücksichtigung der Wärmebrücken sehr stark von jenen mit deren Vernachlässigung.

Da die Ergebnisse, bei Verwendung eines ausreichend wasserabweisenden Putzsystems, zwar keinerlei Beeinträchtigung durch Feuchtigkeit vermuten lassen, aber hinsichtlich der Wärmedämmeigenschaften noch nicht als befriedigend anzusehen sind, werden im nächsten Abschnitt verschiedenste Varianten und Lösungsansätze präsentiert.

### 3.8 Verbesserungsvorschläge

#### 3.8.1 Verringerung des Wärmeverlustes durch größere Überlappung im Stoßstellenbereich

Wie sich gezeigt hat, sind größere Überlappungen der VIPs notwendig, um die Wärmeverluste gering zu halten. Nachfolgend werden einige Varianten mit unterschiedlichen Überlappungen diskutiert, um einen Eindruck über dessen Einfluss zu erhalten.

Alle Verbesserungsvorschläge der Serie Var. 7 sind Weiterentwicklungen von Var. 5.

##### ▪ Variante 7\_1

- Überlappung: 3,5cm
- Paneelabstand: 2cm

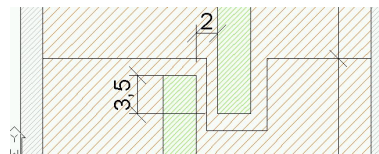


Abbildung 70: Beispielhafte Darstellung von Überlappung und Paneelabstand [eigene Abb.]

##### ▪ Variante 7\_2

- Überlappung: 5cm
- Paneelabstand: 1,2cm

##### ▪ Variante 7\_3

- Überlappung: 8cm
- Paneelabstand: 1,2cm

Bei den Varianten der Reihe 8 wurde eine Verringerung der Häufigkeit der Stoßstellen durch Verlängerung des Mauersteins untersucht. Der Ziegel wurde von 25cm auf 40cm Länge vergrößert.

##### ▪ Variante 8\_1

- Überlappung: 6cm
- Paneelabstand: 3cm

##### ▪ Variante 8\_2

- Überlappung: 8cm
- Paneelabstand: 3cm

- **Variante 8\_3**

- Überlappung: 10cm
- Paneelabstand: 3cm

Hier wurde auf eine weitere Verringerung der Paneelabstände verzichtet, da ansonsten die Stabilität des Ziegels, durch die Vergrößerung und der damit einhergehenden Zunahme der Masse, nicht mehr gegeben scheint.

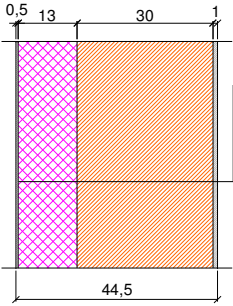
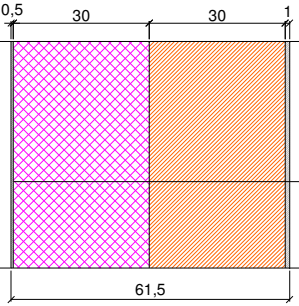
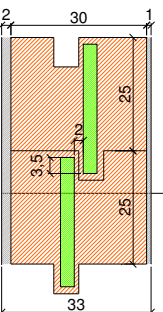
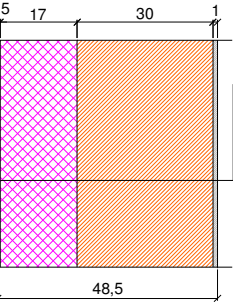
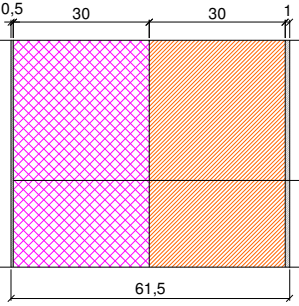
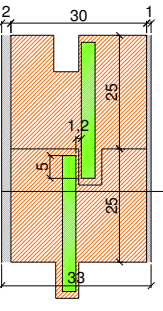
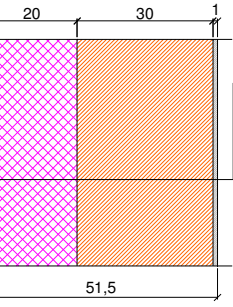
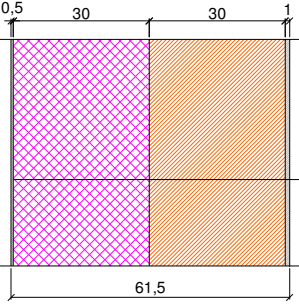
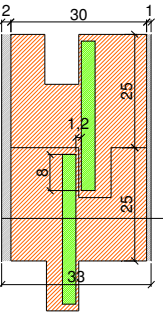
| entspricht<br>MIT Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                                  | entspricht<br>OHNE Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Konstruktion                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>-13cm Außendämmung EPS-F<br/>-30cm HLZ<br/>-1cm Innenputz</p> <p><b><math>U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>   |  <p>0,5cm Außenputz<br/>-30cm Außendämmung EPS-F<br/>-30cm HLZ<br/>-1cm Innenputz</p> <p><b><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>   | <p><b><math>U = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(30cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><b><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><b><math>U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 7_1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 250/300mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- 3,5cm Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>-30cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>-1cm Innenputz</p> |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>-17cm Außendämmung EPS-F<br/>-30cm HLZ<br/>-1cm Innenputz</p> <p><b><math>U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>   |  <p>0,5cm Außenputz<br/>-30cm Außendämmung EPS-F<br/>-30cm HLZ<br/>-1cm Innenputz</p> <p><b><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>   | <p><b><math>U = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(30cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><b><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><b><math>U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 7_2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 250/300mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- 5cm Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>-30cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>-1cm Innenputz</p>   |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>-20cm Außendämmung EPS-F<br/>-30cm HLZ<br/>-1cm Innenputz</p> <p><b><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> |  <p>0,5cm Außenputz<br/>-30cm Außendämmung EPS-F<br/>-30cm HLZ<br/>-1cm Innenputz</p> <p><b><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b><math>U = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(30cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><b><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><b><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math></b><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 7_3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 250/300mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- 8cm Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>-30cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>-1cm Innenputz</p> |

Abbildung 71: Gegenüberstellung der Varianten 7\_1 bis 7\_3 [eigene Abb.]

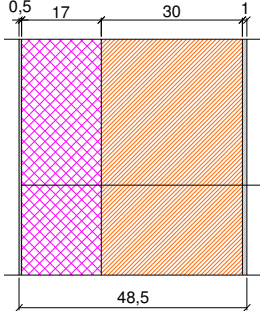
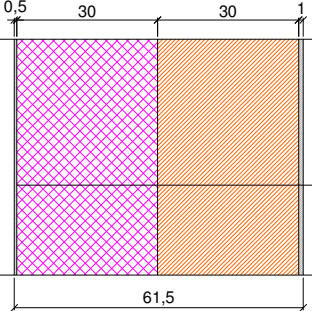
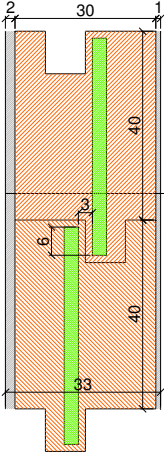
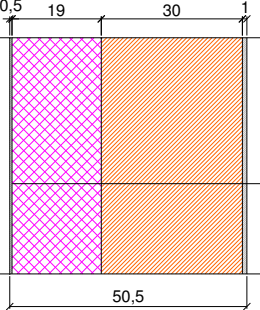
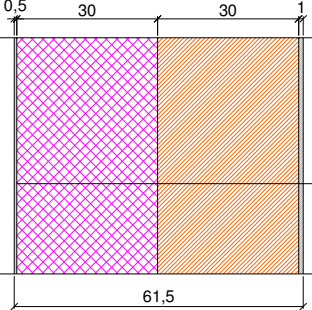
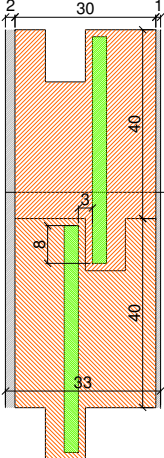
| entspricht<br>MIT Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                       | entspricht<br>OHNE Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Konstruktion                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>17cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  | <p><math>U = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(30cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 8_1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 400/300mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- 6cm Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2cm Außenputz</li> <li>- 30cm HLZ mit integr. VIP (3cm)</li> <li>- 1cm Innenputz</li> </ul>  |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>19cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>30cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><math>U = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(30cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 8_2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 400/300mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- 8cm Überlappung an Stoßstelle</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2cm Außenputz</li> <li>- 30cm HLZ mit integr. VIP (3cm)</li> <li>- 1cm Innenputz</li> </ul> |

Abbildung 72: Gegenüberstellung der Varianten 8\_1 bis 8\_2 [eigene Abb.]

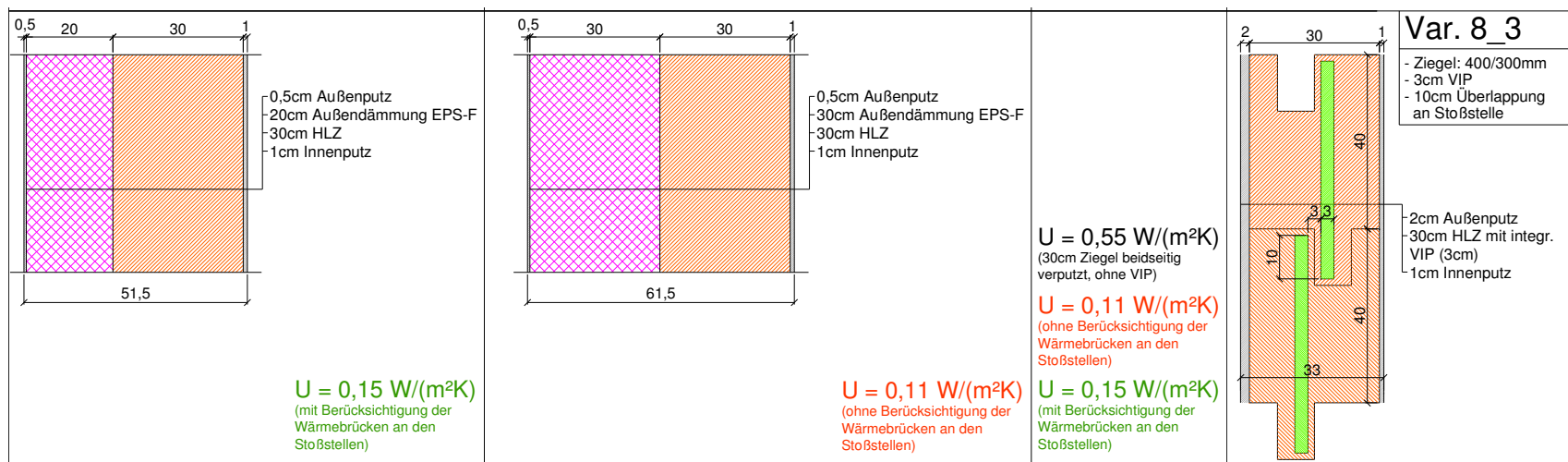
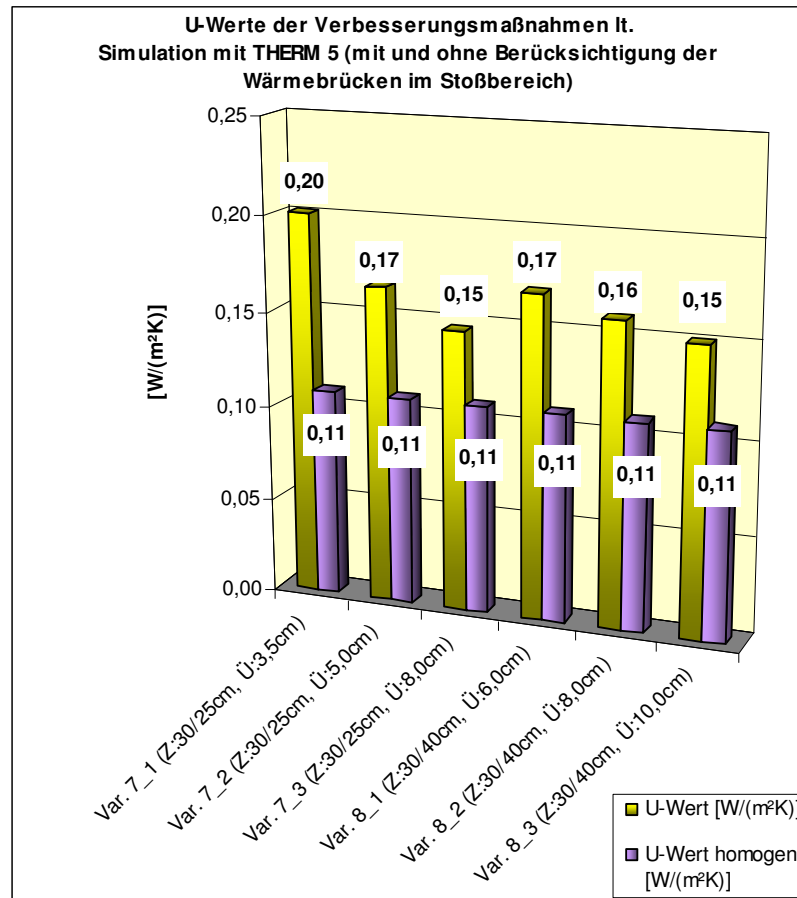
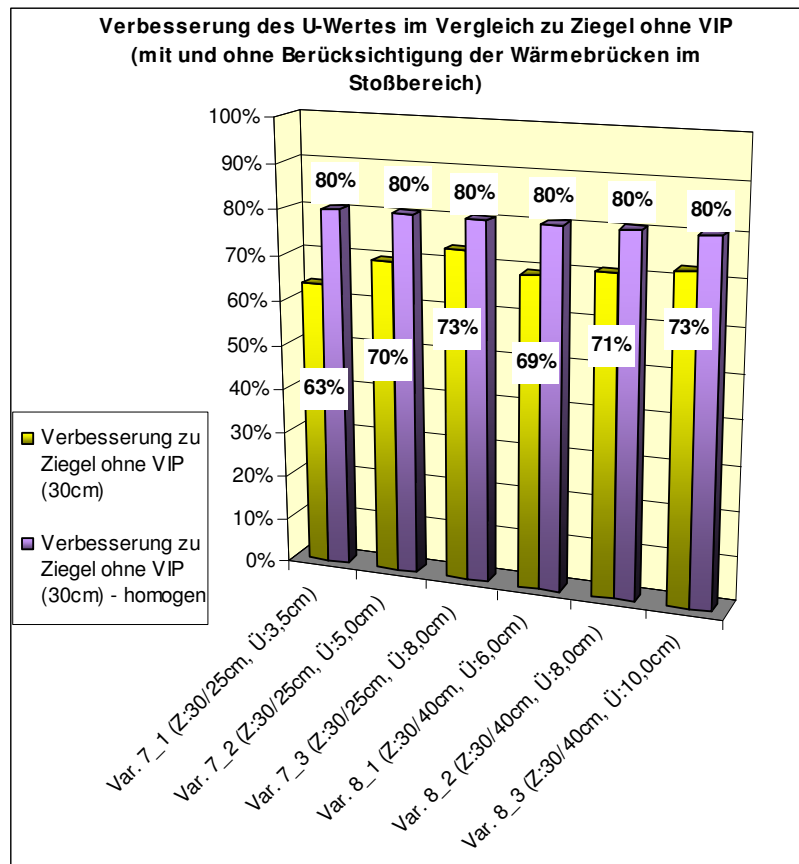


Abbildung 73: Gegenüberstellung der Variante 8\_3 [eigene Abb.]

### 3.8.1.1 Bewertung dieser Verbesserungsmaßnahmen



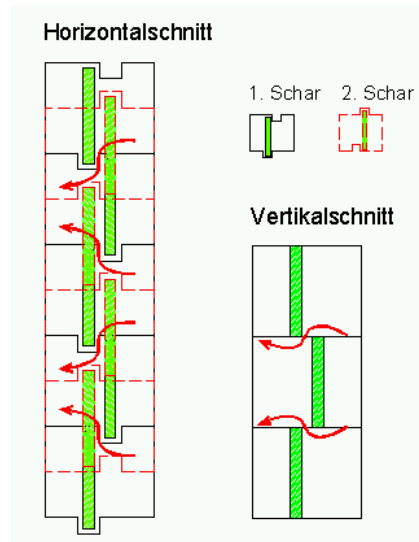
**Abbildung 74: U-Werte der Varianten lt. Simulation mit THERM 5 (mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßbereich)**  
[eigene Abb.]



**Abbildung 75: Verbesserung des U-Wertes im Vergleich zu Ziegel ohne VIP  
(mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßbereich)**  
[eigene Abb.]

Die beiden vorangegangenen Abbildungen verdeutlichen anschaulich, dass durch Wahl eines größeren Ziegelformates und entsprechend große Überlappung der Vakuumpaneele der Wärmeverlust über die Stoßstellen sehr gering gehalten werden kann und somit der tatsächliche U- Wert bereits nahe am Ideal (violett) liegt.

Negativ zu bemerken ist der Umstand, dass durch die außermittige Anordnung der Paneele auch über die Lagerfuge ein erhöhter Wärmeenergieverlust zu erwarten ist. Zusätzlich kritisch ist die Tatsache, dass hier keine Überlappung vorhanden ist. Bei einer angenommenen Ziegelhöhe von 25cm würde auf diesem Weg mehr Wärme entweichen, als dies im Bereich der überlappenden Stöße im Horizontalschnitt der Fall wäre. Die nächste Darstellung veranschaulicht diesen Sachverhalt:



**Abbildung 76: Wärmeverlust über die Lagerfuge bei außermittiger Paneelanordnung [eigene Abb.]**

Es kann also abschließend festgehalten werden, dass diese Verbesserungsmöglichkeit aufgrund des eben beschriebenen Wärmeverlustes und durch die, sogar ohne Berücksichtigung dieses negativen Umstandes, große erforderliche Ausbildung von Nuten und Federn nicht zielführend ist. Weiters ist der Materialverbrauch hinsichtlich der Vakuumpaneele durch die benötigte Überlappung um vieles höher als bei einer vergleichbaren Applikation als Vollwärmeschutz. Aufgrund der derzeitigen Kostensituation sollte aber nach Möglichkeit versucht werden die Fläche der VIPs gering zu halten. Nach Betrachtung dieser Auswertung wird deutlich, dass noch weitere Verbesserungsmaßnahmen zu untersuchen sind.

### **3.8.2 Verringerung des Wärmeverlustes durch mittige Paneele und Zusatzdämmung im Bereich des stumpfen Stoßes**

Die folgenden Maßnahmen beschreiben Ziegel mit nur mehr einem einzigen VIP im Zentrum. Dabei wird nicht länger versucht die Wärmedämmung mittels Überlappung der Paneele zu verbessern, stattdessen werden andere Maßnahmen zur Verringerung der Wärmeleitfähigkeit im Stoßbereich untersucht.

#### **▪ Variante 10\_10**

Hier wurden versuchsweise Kammern im Stoßbereich mit Perlite verfüllt. Selbstverständlich wäre es auch denkbar im gesamten Ziegel Perlite zu integrieren. Der Stoß selbst beträgt bei dieser Variante nur 16mm, entspricht also einer Ziegelüberdeckung von je 6mm mit 2mm Luftraum, um das VIP ohne

Beschädigung in die dafür vorgesehene Kammer einbringen zu können. Die Scherbendicke von 6mm scheint, aus Gründen der Stabilität des gesamten Ziegels, wie auch zum Schutz des VIPs, die Untergrenze darzustellen.

- **Varianten 10\_13 und 10\_16**

Diese beiden Varianten weichen erstmals von der Idee eines Systems ohne Zusatzmaßnahmen geringfügig ab. Diese Ziegel weisen nur mehr Nuten und keine Federn auf, wodurch sich im Stoßbereich je zwei Kammern bilden, die nun auf der Baustelle, nach dem Ansetzen des Ziegels beispielsweise mit XPS-Blöcken verfüllt werden sollen. Diese sollten bereits in der richtigen Größe produziert und gemeinsam mit den Ziegeln ausgeliefert werden. So müssen sie vor Ort nur mehr eingesetzt werden, was nur einen minimalen Zusatzaufwand darstellt.

- **Variante 11\_1**

Variante 11\_1 stellt eine robustere Bauweise der Serie 10 dar. Die Scherbendicke wird hier rund um das Paneel auf 12mm erhöht und die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Wärmedämmverhalten studiert. Es zeigt sich, auch hier sind, durch entsprechende Anpassung der Größe des Dämmstoff-Blockes, ausgezeichnete U- Werte erreichbar.

- **Variante 11\_2**

Sollte selbst Var. 11\_1 keine ausreichende Tragfähigkeit und Stabilität des Ziegelsteins bieten, ist es auch denkbar das Paneel zu teilen und somit einen weiteren, verbindenden Ziegelscherbensteg anzuordnen. Hier werden die Wärmeverluste aber schon derart hoch, dass ein ebenso geringer U- Wert wie in Var. 11\_1 nicht mehr möglich scheint.

### 3.8.2.1 Ergebnisse der Simulationen mit WUFI

Um zu zeigen, dass auch durch Verwendung von Polystyrol- Blöcken im Inneren der Konstruktion keine unzulässigen Feuchtigkeitszustände auftreten, werden hier beispielhaft die Ergebnisse der Simulation von Variante 11\_1 mit WUFI angeführt.

#### Eingabe der Konstruktion:

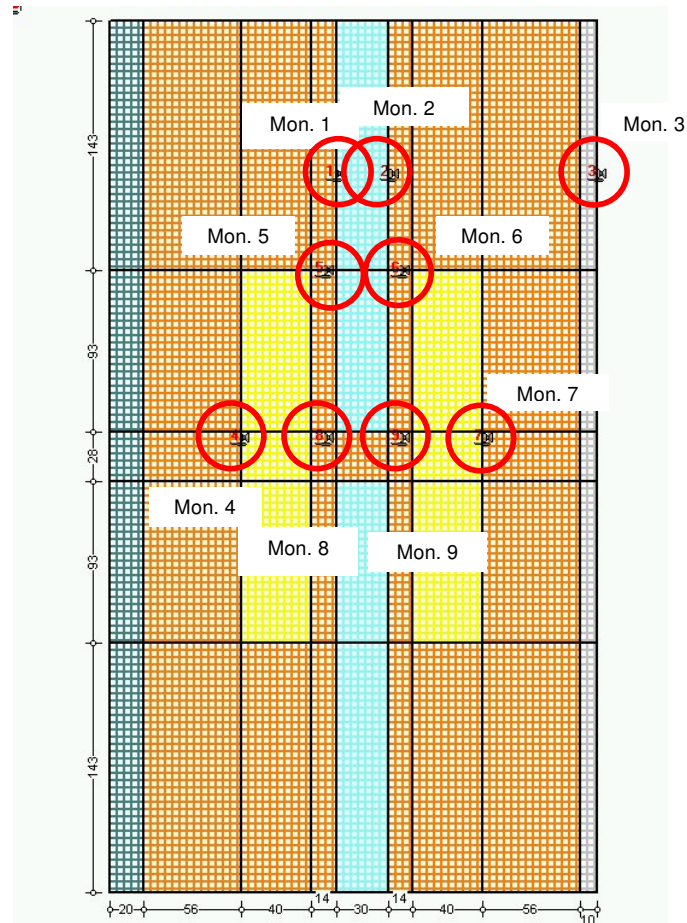


Abbildung 77: Konstruktion Variante 11\_1 mit Monitorpositionen [eigene Abb.]

## Simulationsergebnisse:

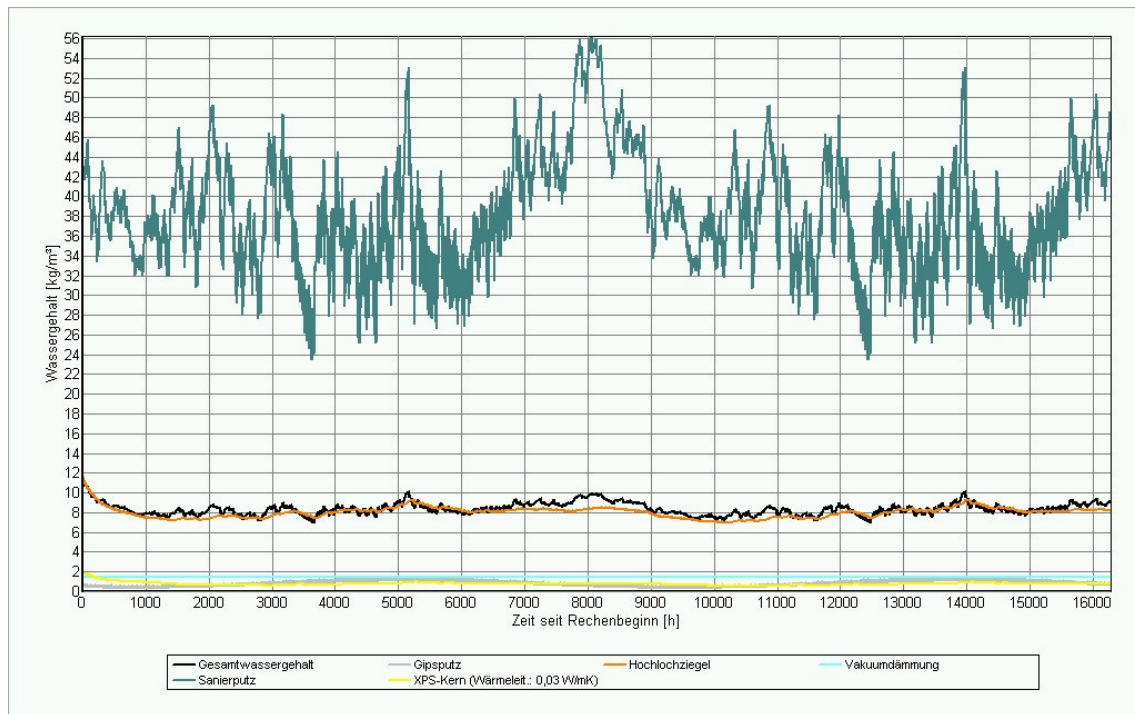


Abbildung 78: Wassergehalt der Materialschichten [eigene Abb.]

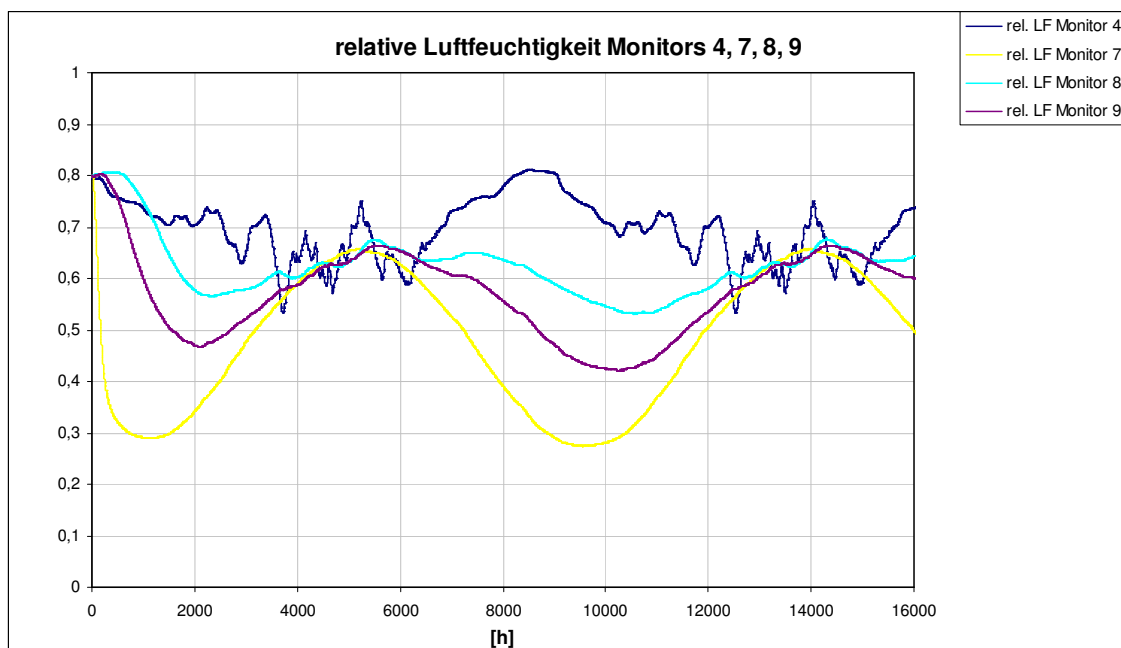


Abbildung 79: relative Luftfeuchtigkeit Monitors 4, 7, 8, 9 [eigene Abb.]

Die Darstellungen veranschaulichen, dass es zu keiner Feuchteanreicherung im Jahresverlauf kommt.

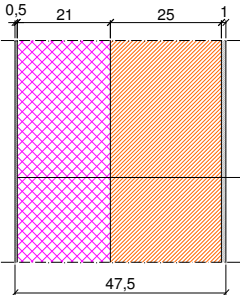
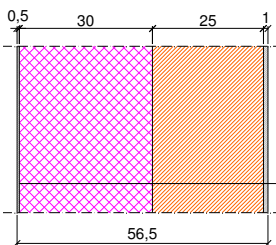
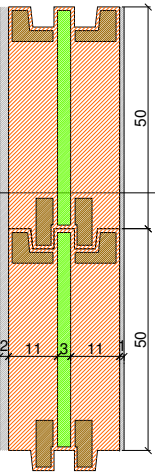
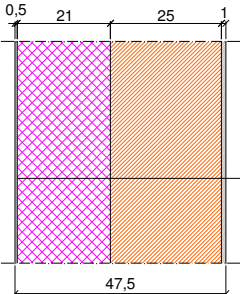
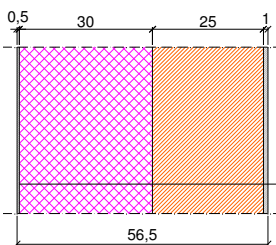
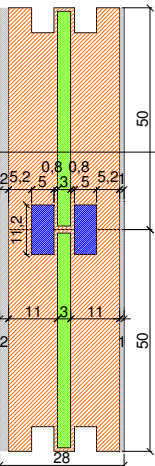
| entspricht<br>MIT Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                       | entspricht<br>OHNE Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Konstruktion                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>21cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  | <p><math>U = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(25cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 10_10</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 500/250mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- Kammer an Stoßstelle mit Perlite gefüllt</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>25cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>1cm Innenputz</p> |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>21cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><math>U = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(25cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 10_13</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 500/250mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- Kammer an Stoßstelle mit XPS gefüllt</li> </ul>  <p>2cm Außenputz<br/>25cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>1cm Innenputz</p>    |

Abbildung 80: Gegenüberstellung der Varianten 10\_10 und 10\_13 [eigene Abb.]

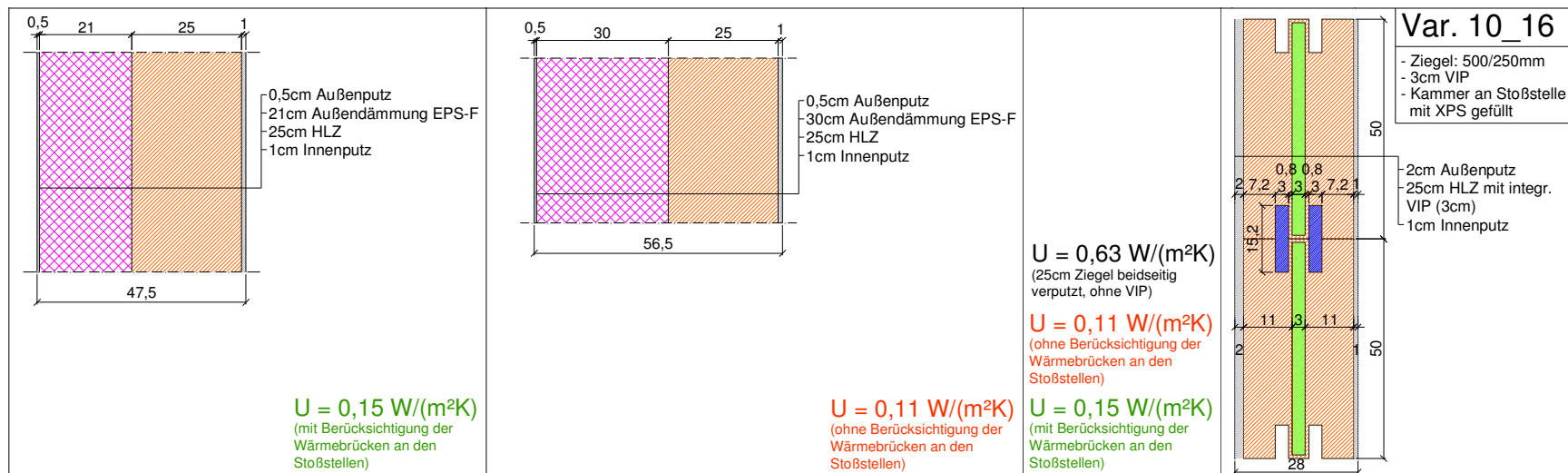


Abbildung 81: Gegenüberstellung der Variante 10\_16 [eigene Abb.]

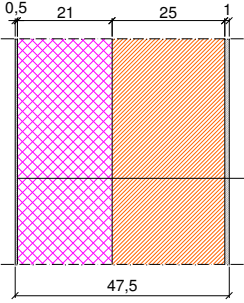
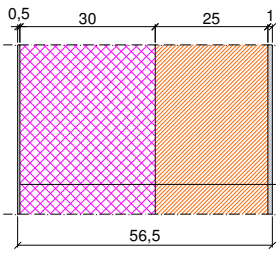
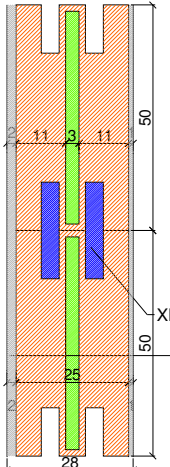
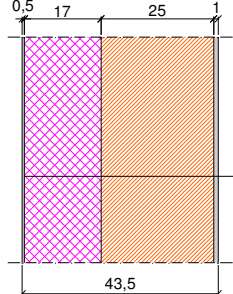
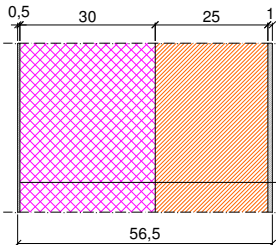
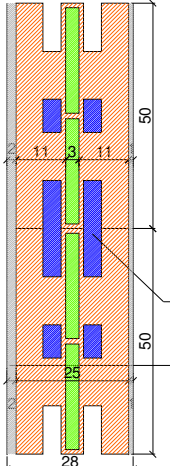
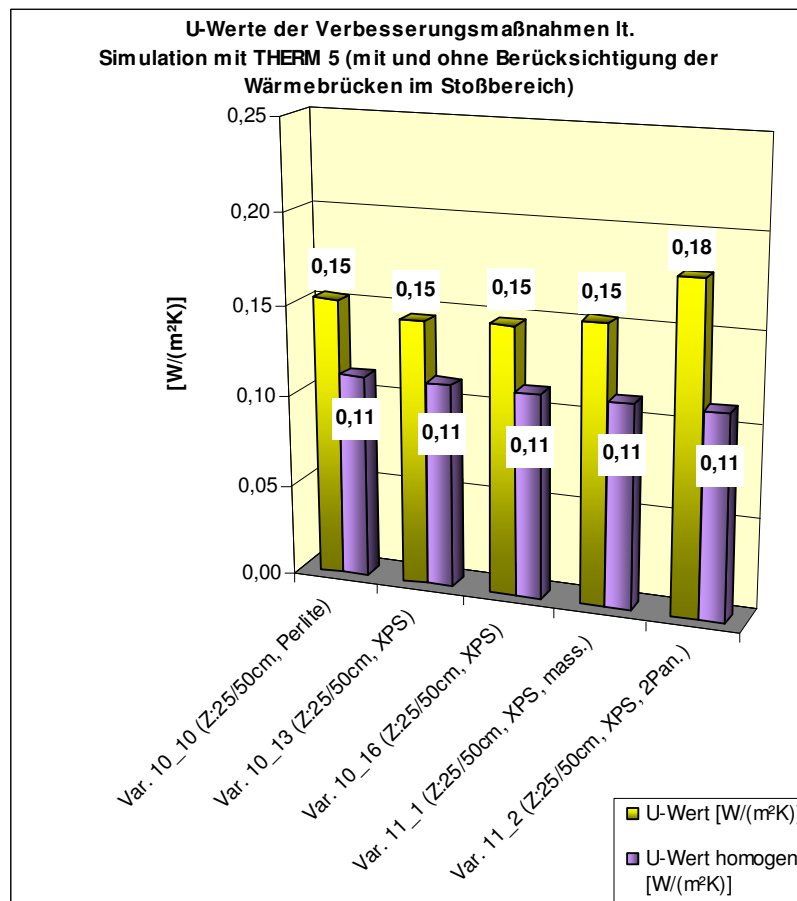
| entspricht<br>MIT Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                       | entspricht<br>OHNE Berücksichtigung der Wärmebrücken<br>an den Stoßstellen                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Konstruktion                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>21cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p>  | <p><math>U = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(25cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 11_1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 500/250mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- Kammer an Stoßstelle mit XPS gefüllt, massivere Bauweise</li> </ul>  <p>XPS</p> <p>2cm Außenputz<br/>25cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>1cm Innenputz</p>   |
|  <p>0,5cm Außenputz<br/>21cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> |  <p>0,5cm Außenputz<br/>30cm Außendämmung EPS-F<br/>25cm HLZ<br/>1cm Innenputz</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><math>U = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(25cm Ziegel beidseitig verputzt, ohne VIP)</p> <p><math>U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> <p><math>U = 0,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})</math><br/>(mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)</p> | <p><b>Var. 11_2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ziegel: 500/250mm</li> <li>- 3cm VIP</li> <li>- Kammer an Stoßstelle mit XPS gefüllt, Teilung der Paneele</li> </ul>  <p>XPS</p> <p>2cm Außenputz<br/>25cm HLZ mit integr. VIP (3cm)<br/>1cm Innenputz</p> |

Abbildung 82: Gegenüberstellung der Varianten 11\_1 und 11\_2 [eigene Abb.]

### 3.8.2.2 Bewertung dieser Verbesserungsmaßnahmen

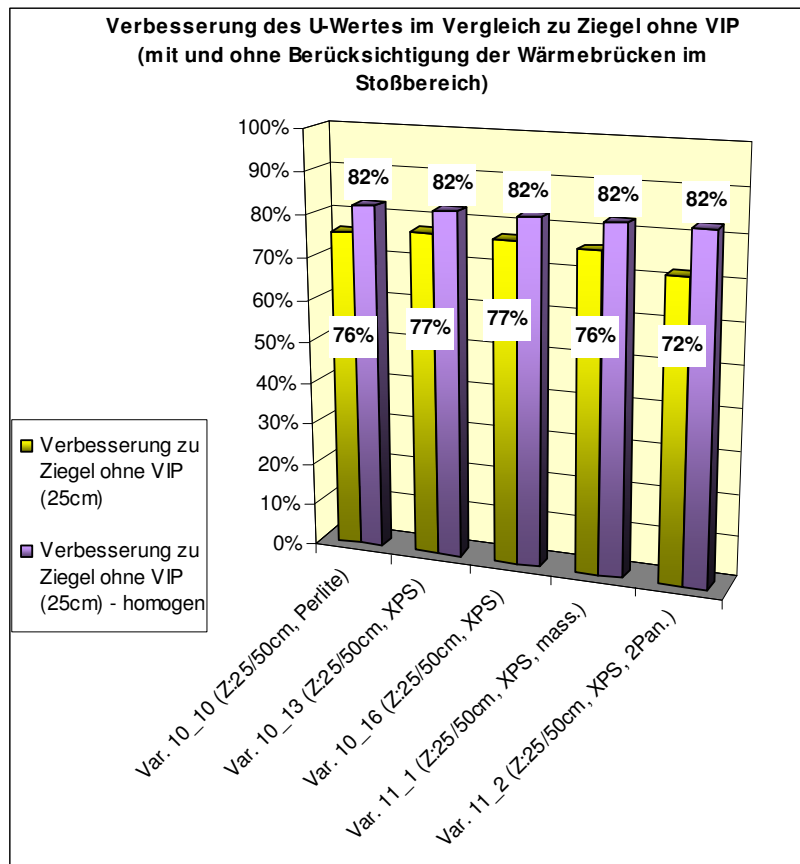


**Abbildung 83: U-Werte der Varianten lt.**

**Simulation mit THERM 5 (mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßbereich)**

[eigene Abb.]

Wie zu erkennen ist, sind die Varianten mit mittigem Paneel bereits sehr nahe an das violett gekennzeichnete maximal erreichbare Ideal einer wärmebrückenfreien Konstruktion herangekommen. Bis auf die sehr robust ausgeführte Variante 11\_2, sind alle Verbesserungsvorschläge, sogar ohne zusätzliche Dämmschicht, im Bereich des Passivhaus- Standards.



**Abbildung 84: Verbesserung des U-Wertes im Vergleich zu Ziegel ohne VIP  
(mit und ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßbereich)**  
[eigene Abb.]

Die Abweichungen zwischen idealer Verbesserung des Dämmniveaus und den Berechnungsergebnissen der realen Varianten sind, wie ersichtlich, nur noch sehr gering.

Das Einsetzen der Polystyrolelemente bedeutet zwar einen zusätzlichen Arbeitsschritt im Zuge der Herstellmaßnahmen, verbessert aber den Wärmebrückeneffekt des Stoßes so erheblich, dass der geringe Mehraufwand vernachlässigbar erscheint.

Besonders erwähnenswert ist der Umstand, dass durch die zentrische Anordnung der Vakuumdämmpaneele keine nennenswerten, zusätzlichen Wärmeverluste über die Lagerfuge auftreten.

Als Anmerkung zur praktischen Umsetzung sei an dieser Stelle nur erwähnt, dass die Paneele an Ober- und Unterseite des Ziegels durch geeignete Maßnahmen vor mechanischen Beschädigungen zu schützen sind. Dies könnte beispielsweise durch die Verkleidung des Paneels mit einer sehr dünn-schichtigen, aber dennoch

isolierenden, Spachtelmasse erreicht werden. Auch eine aufgeklebte Abdeckung aus einem ca. 1-2mm starken Schaumstoff- Vlies wäre zu diesem Zweck denkbar.

Hauptaufgabe dieser Maßnahme ist die Verhinderung von Schäden am VIP, die ansonsten bereits am Transportweg zwischen Palette und Einbauort durch unvorsichtiges Handling oder das bloße Abstellen auf einem verunreinigten Baustellenboden auftreten könnten. Trotz besonderer Sorgfalt im Umgang mit VIP, ist mit derartigen Bedingungen am Bau stets zu rechnen und bei der Planung des Systems darauf Rücksicht zu nehmen.

Es folgen nun einige Überlegungen zur baupraktischen Funktionalität des VIP-Ziegelsystems. Diese sind hier beispielhaft für Variante 5 dargestellt. Für die Varianten 10 und 11 ist eine derartige Darstellung nicht erforderlich, da sich durch die unkompliziertere Ziegelform und die mittigen Paneele kaum Änderungen zum gewöhnlichen Mauerwerksbau ergeben.

### 3.9 Die praktische Verwendung des Mauersteins auf der Baustelle am Beispiel von Variante 5

Im Weiteren wird die richtige Verwendung des Systems anhand von Grafiken beschrieben. Hierbei soll insbesondere auf Detailknoten besonderes Augenmerk gelegt werden.

#### 3.9.1 Schritte 1 bis 6 – Rohbau

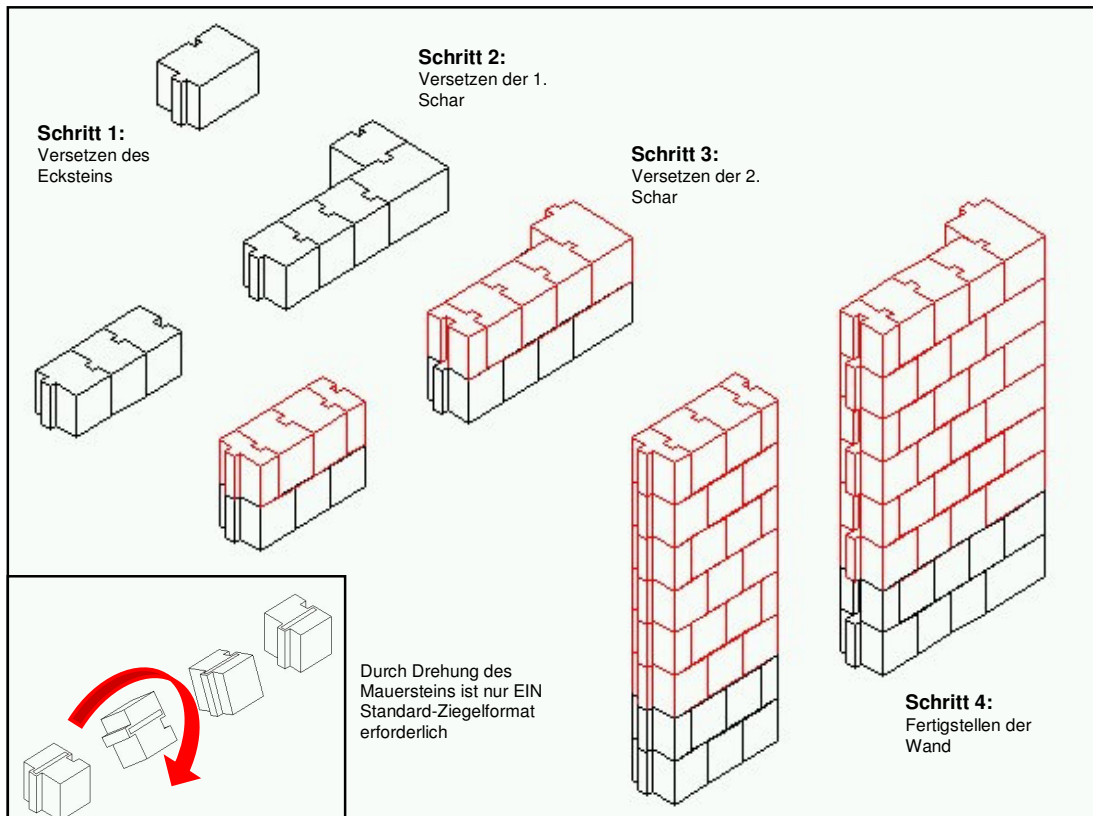


Abbildung 85: Praktische Anwendung - Schritte 1-4 [eigene Abb.]

Da das System aus Gründen der Praktikabilität nur jeweils aus einer Art von Standard-Mauerstein, Halbstein und Eckstein besteht, wird auch der Eckstein in jeder zweiten Schar spiegelverkehrt eingebaut (siehe Abbildung unten links). Das führt in Mauerabschnitten, die einen Eckstein enthalten, zwangsläufig zu einem Wechsel der Orientierung von Nut und Feder der Ziegel, was wiederum eine uneinheitliche Laibungsfläche zur Folge hat. Im Abschnitt „Ausbau“ werden die daraus resultierenden zusätzlichen Arbeitsschritte erläutert.

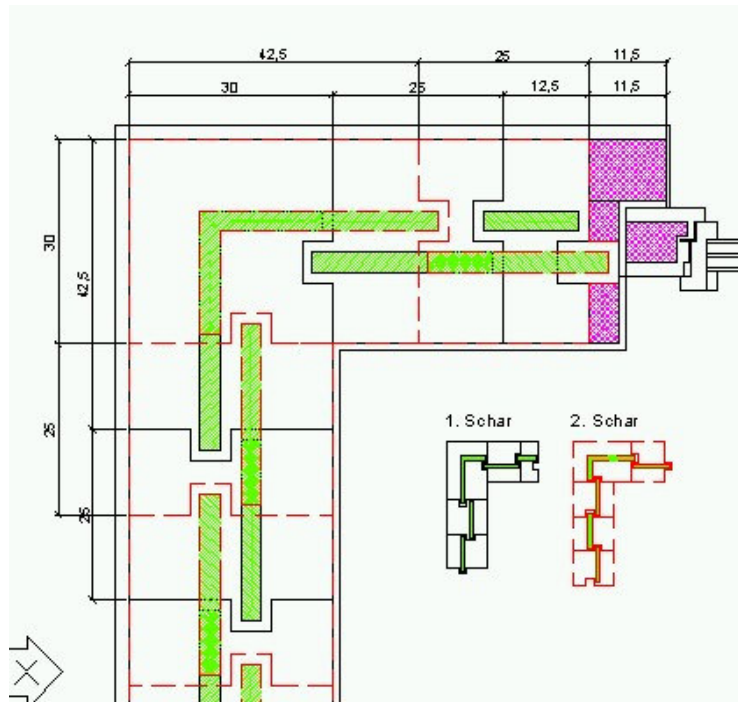


Abbildung 86: Versetzen des Ecksteins [eigene Abb.]

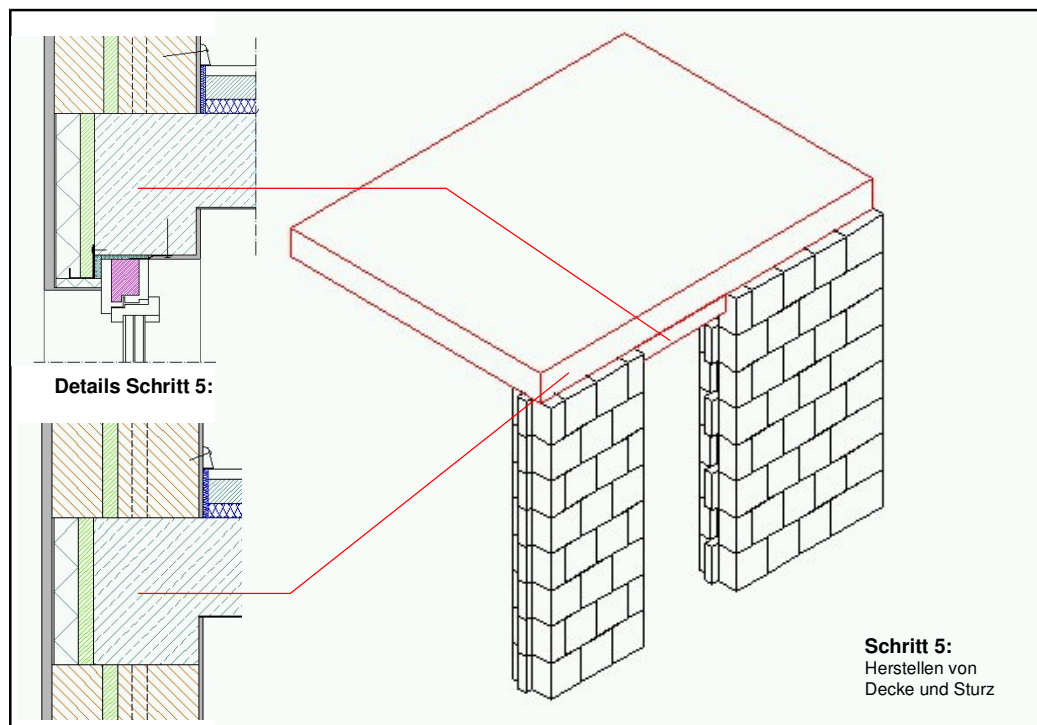


Abbildung 87: Praktische Anwendung - Schritt 5 [eigene Abb.]

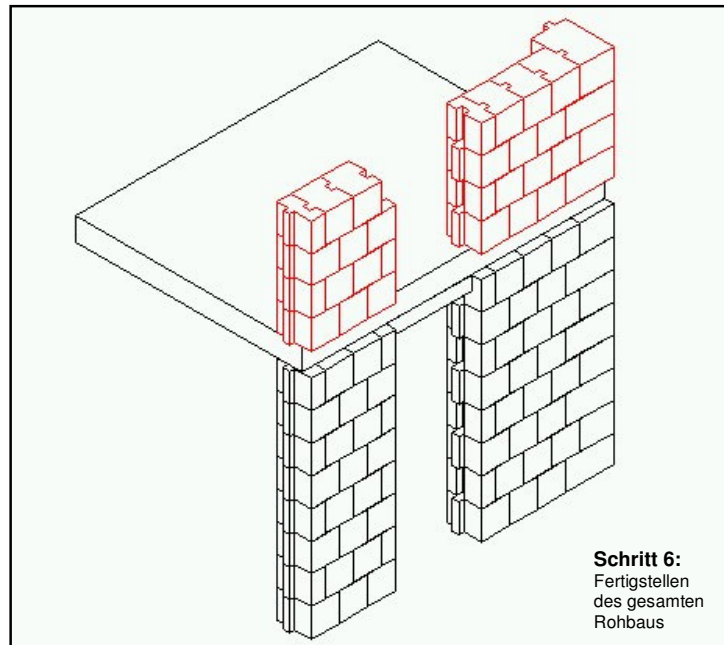


Abbildung 88: Praktische Anwendung - Schritt 6 [eigene Abb.]

### 3.9.2 Schritte 7 bis 9 – Ausbau

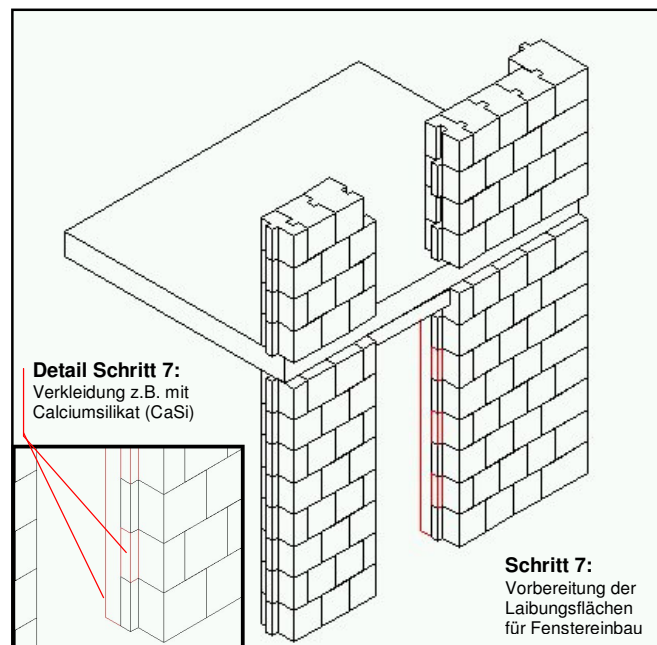
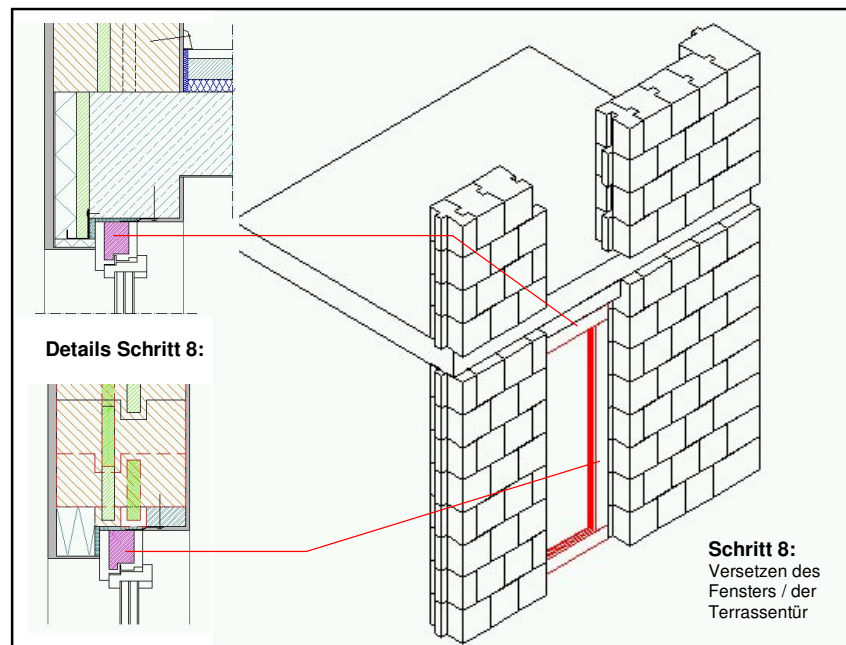


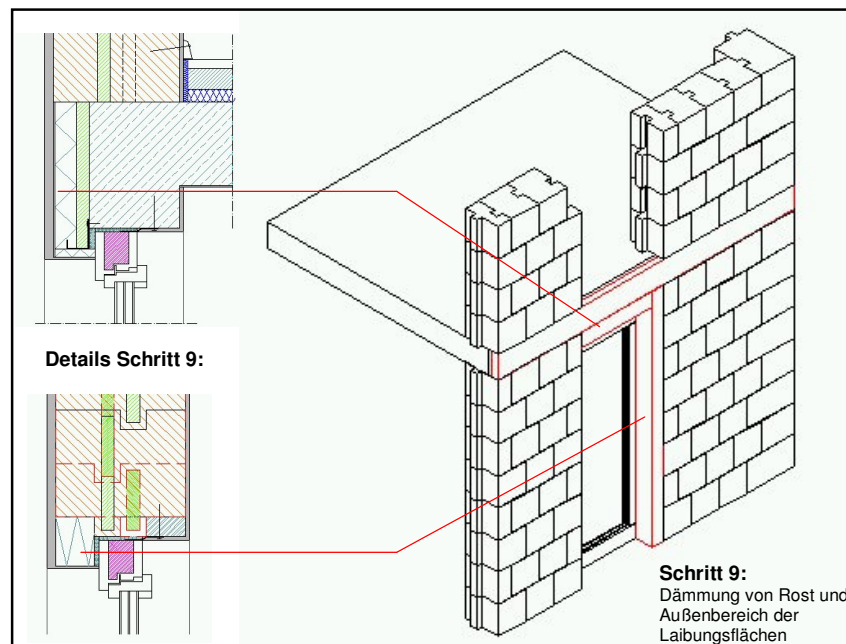
Abbildung 89: Praktische Anwendung - Schritt 7 [eigene Abb.]

Nun werden die Laibungsflächen zunächst an der Innenseite für den Einbau der Fenster vorbereitet. Dabei werden die hier rot gekennzeichneten Flächen der Laibung z.B. mit Calciumsilikat- Platten verkleidet um eine einheitliche Fläche, zur

Montage der Fensterstöcke, zu gewährleisten. Schließlich werden die Fenster eingebaut.



**Abbildung 90: Praktische Anwendung - Schritt 8 [eigene Abb.]**



**Abbildung 91: Praktische Anwendung - Schritt 9 [eigene Abb.]**

Als letzter Schritt folgt noch eine Außendämmung im Laibungs- und Sturzbereich, um die Wärmebrückenwirkung des Fensteranschlusses zu verringern. Insbesondere der Deckenrost sollte ebenfalls mit VIP gedämmt werden. Dies kann zwar nur vor Ort geschehen, ist aber aufgrund der großen Fläche erforderlich, da nicht genügend

Platz vorhanden ist um konventionelle Dämmmaterialien in erforderlicher Stärke aufzubringen.

### **3.9.3 Details**

Es folgt eine Ausarbeitung ausgewählter Detailknoten. Die verwendeten Aufbauten und Dämmstärken sind nur beispielhaft gewählt und nicht als Empfehlung zu verstehen. Somit sind auch die berechneten Temperaturfaktoren nur für die hier angegebenen Aufbauten zutreffend und im Bedarfsfall zum Nachweis der Kondensat- und Schimmelfreiheit separat zu bestimmen.

#### **3.9.3.1 Deckenanschluss/ Rost**

Wie eingangs bereits erläutert wurde, ist nach Möglichkeit darauf zu achten im Raster eines Halb- oder Viertelsteinformats zu planen. Ist diese Grundvoraussetzung, zumindest weitgehend, erfüllt, kann der Rohbau wie bei jedem anderen Gebäude errichtet werden. Da die Ziegel, aufgrund ihrer Füllung mit Vakuumpaneelen, selbstverständlich nicht geschnitten oder in irgendeiner sonstigen Form verkleinert werden dürfen, ist der Raum zwischen Maueroberkante und Deckenunterkante ggf. im Zuge der Deckenherstellung zu ergänzen. Dies ist erforderlich um jede geforderte Raumhöhe herstellen zu können. Um die VIPs der letzten Schar vor Beschädigung während der Arbeiten der Deckenherstellung (Schalen, Bewehren, Betonieren) zu schützen, wäre es denkbar im Bereich der VIPs eine dünne Mörtelschicht aufzutragen oder sie durch Auflage einer Trennschicht zu schützen.

Im Bereich des Rostes werden im Vorfeld der Außenputzarbeiten Vakuum-Isolutions-Paneele und eine Schutzschicht aus Wärmedämmung (z.B. EPS-F, Holzwolleleichtbauplatten, etc.) durch Klebung appliziert.

## Deckenanschluss

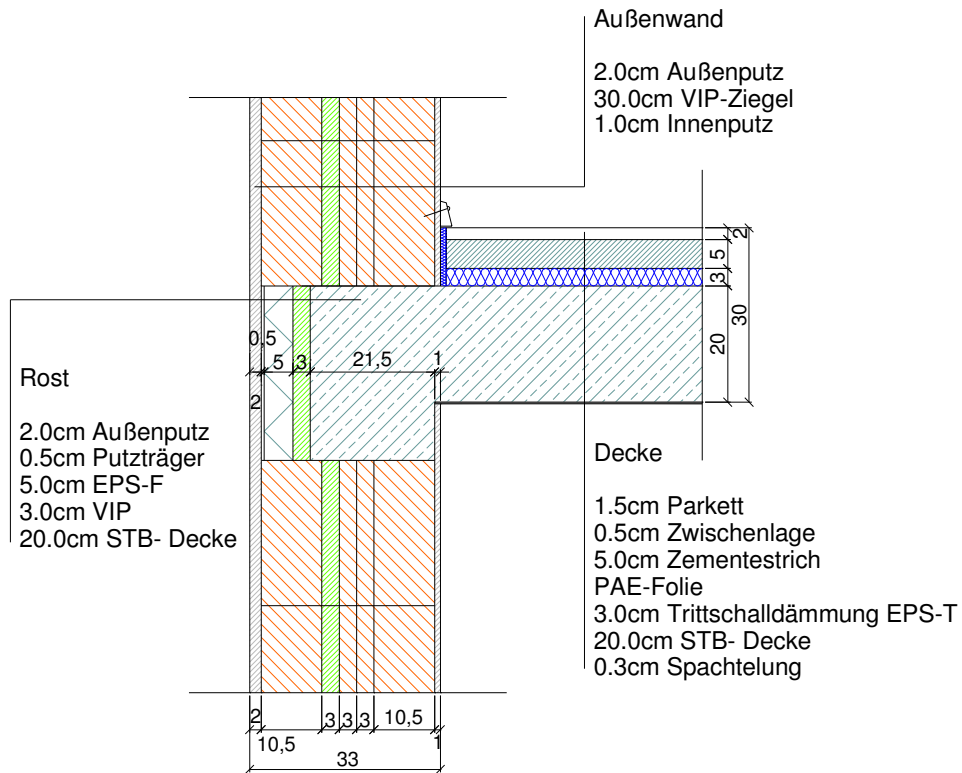


Abbildung 92: Detail - Deckenanschluss [eigene Abb.]

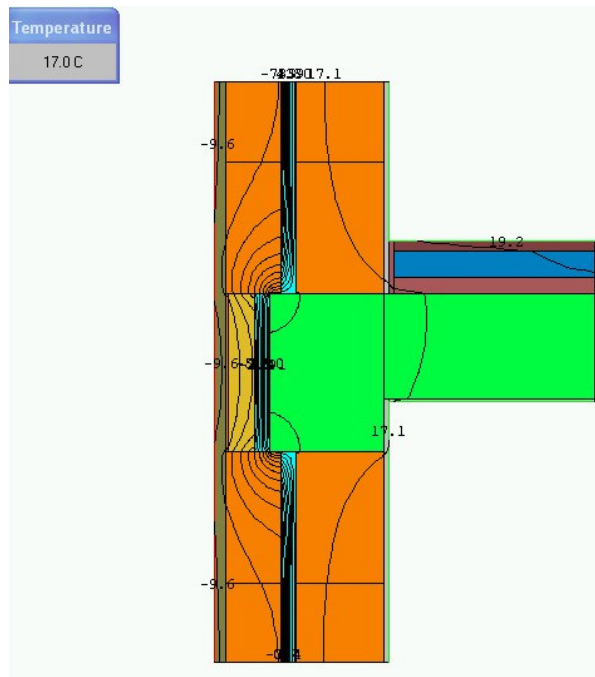


Abbildung 93: Minimale Oberflächentemperatur Detail - Deckenanschluss [eigene Abb.]

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e} = \frac{17,0^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})} = 0,90$$

0,90 > 0,69 → **kein Kondensat**; 0,90 > 0,71 → **keine Schimmelbildung**

### 3.9.3.2 Fensteranschluss/ Sturz/ Parapet

Auch der Bereich des Sturzes wird mit VIPs gedämmt um den Wärmeverlust gering zu halten. Da das Vakuumpaneel in diesem Bereich nicht an Ober- und Unterseite aufliegt, erscheint es sinnvoll eine Kunststoffschiene vorzusehen, auf der das VIP aufgelagert und zusätzlich eine Fassadendämmplatte mit eingearbeiteter Nut aufgesetzt wird. Das Paneel sollte weiters mit Klebemörtel am Sturz befestigt werden.

Da die VIP-Ziegel nicht in ihrer Höhe veränderbar sind, wird die geforderte Parapethöhe ggf. durch einen Höhenausgleich mit Iso- Mörtel oder Normalformatmauerziegeln erreicht. Die Minimierung des Wärmeverlustes wird hier ebenfalls durch eine außenseitige Zusatzdämmung erreicht. Je nach Dicke dieser Dämmung, kann das Fenster mit einer Stockaufdopplung ausgeführt werden um die optische Erscheinung des Fensters zu wahren.

# Fensteranschluss Sturz, Parapet

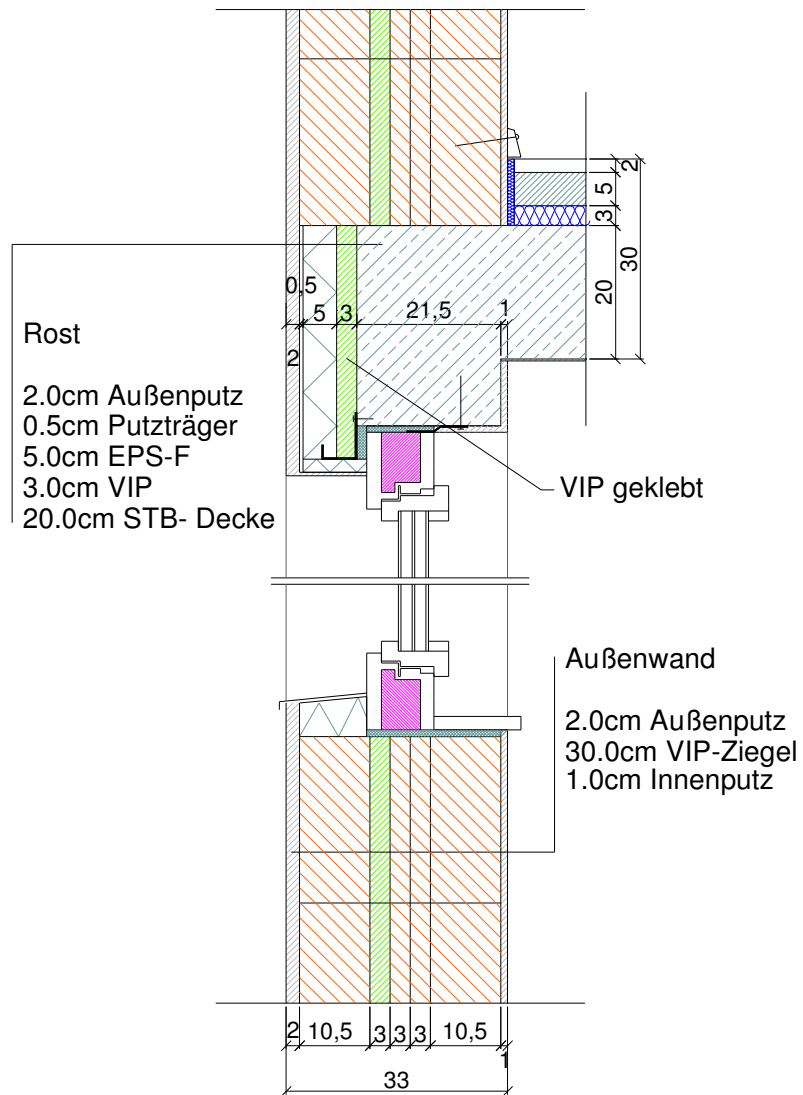


Abbildung 94: Detail – Fensteranschluss Sturz, Parapet [eigene Abb.]

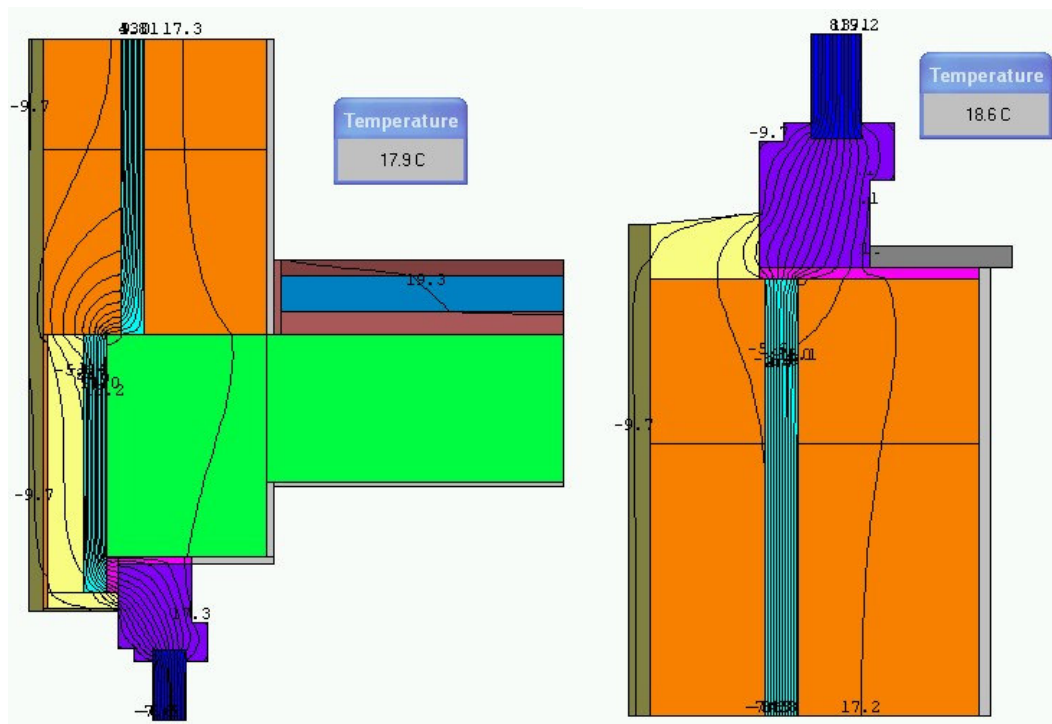


Abbildung 95: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Fensteranschluss Sturz, Parapet [eigene Abb.]

▪ **Sturz:**

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e} = \frac{17,9^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})} = 0,93$$

$0,93 > 0,69 \rightarrow$  **kein Kondensat**;  $0,93 > 0,71 \rightarrow$  **keine Schimmelbildung**

▪ **Parapet:**

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e} = \frac{18,6^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})} = 0,95$$

$0,95 > 0,69 \rightarrow$  **kein Kondensat**;  $0,95 > 0,71 \rightarrow$  **keine Schimmelbildung**

## Fensteranschluss Sturz Variante

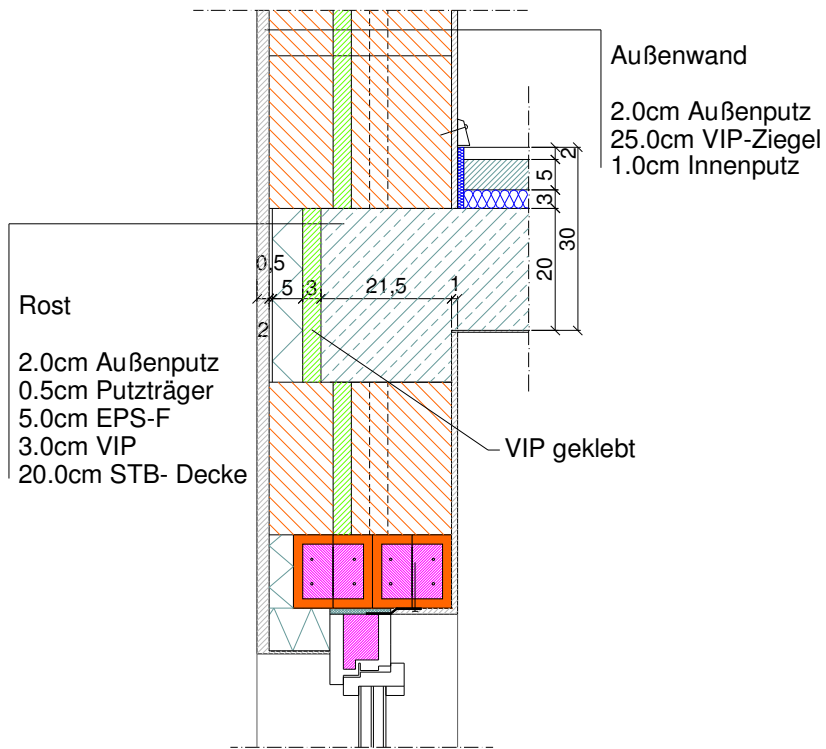


Abbildung 96: Detail – Fensteranschluss Sturz Variante [eigene Abb.]

## Fensteranschluss Horizontalschnitt

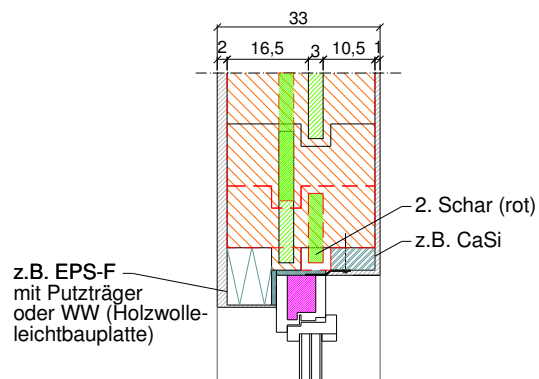


Abbildung 97: Detail – Fensteranschluss Horizontalschnitt [eigene Abb.]

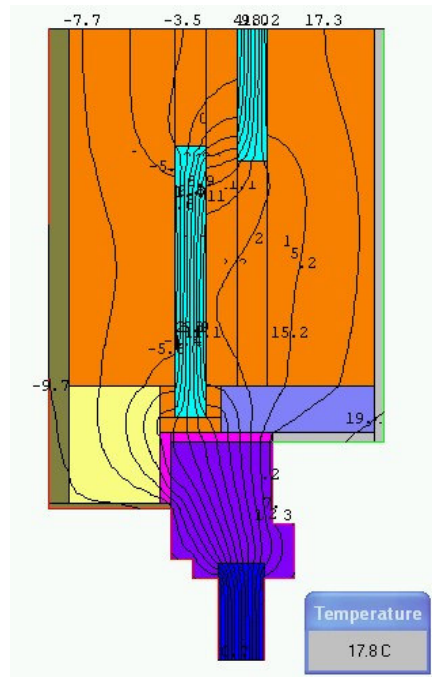


Abbildung 98: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Fensteranschluss horizontal [eigene Abb.]

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e} = \frac{17,8^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})} = 0,93$$

0,93 > 0,69 → **kein Kondensat**; 0,93 > 0,71 → **keine Schimmelbildung**

### 3.9.3.3 Balkonanschluss

Die thermische Trennung von Balkon- und Deckenplatte erfolgt durch einen gewöhnlichen Isokorb mit Edelstahlbewehrung. Die Wärmeleitfähigkeit eines solchen Elements beträgt unter Berücksichtigung des Stahls ca. 0,35W/(mK). Falls vorhanden, wird der Sturz wie vorhin beschrieben ausgeführt.

## Balkon

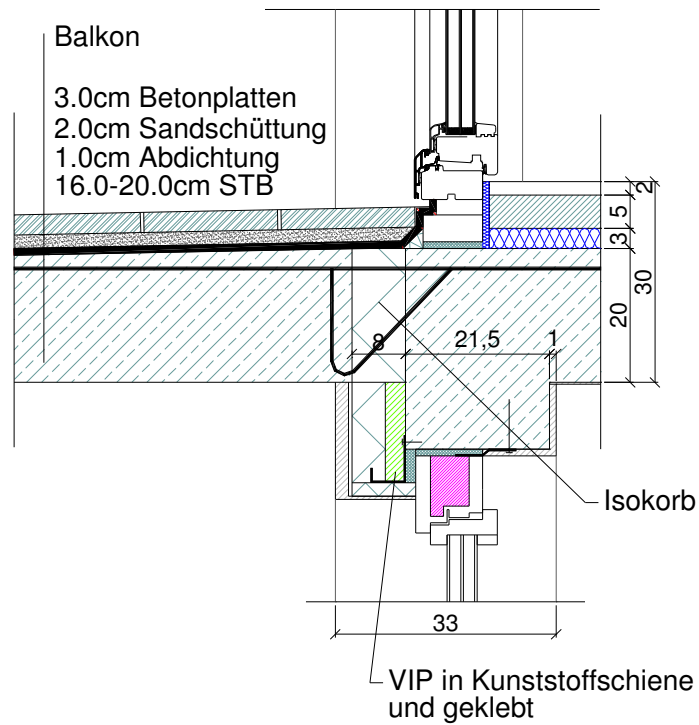


Abbildung 99: Detail – Balkonanschluss [eigene Abb.]

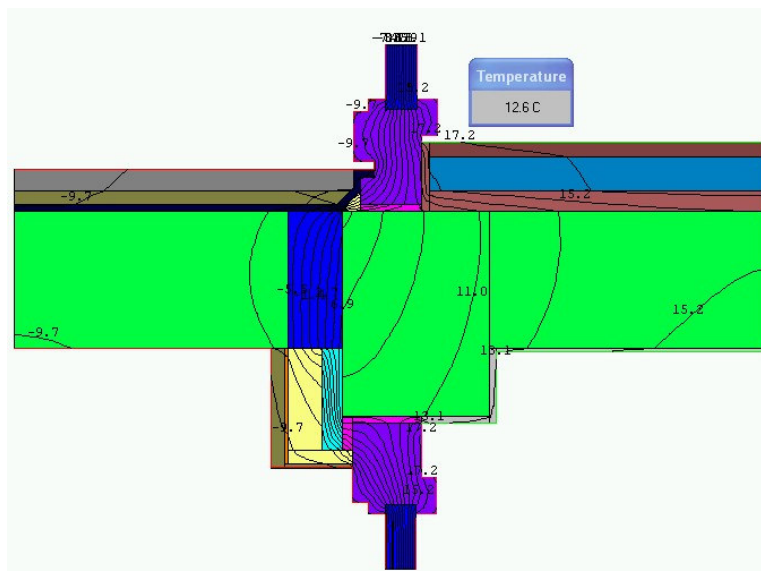


Abbildung 100: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Balkonanschluss [eigene Abb.]

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e} = \frac{12,6^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}} = 0,75$$

0,75 > 0,69 → **kein Kondensat**; 0,75 > 0,71 → **keine Schimmelbildung**

### 3.9.3.4 Sockelbereich

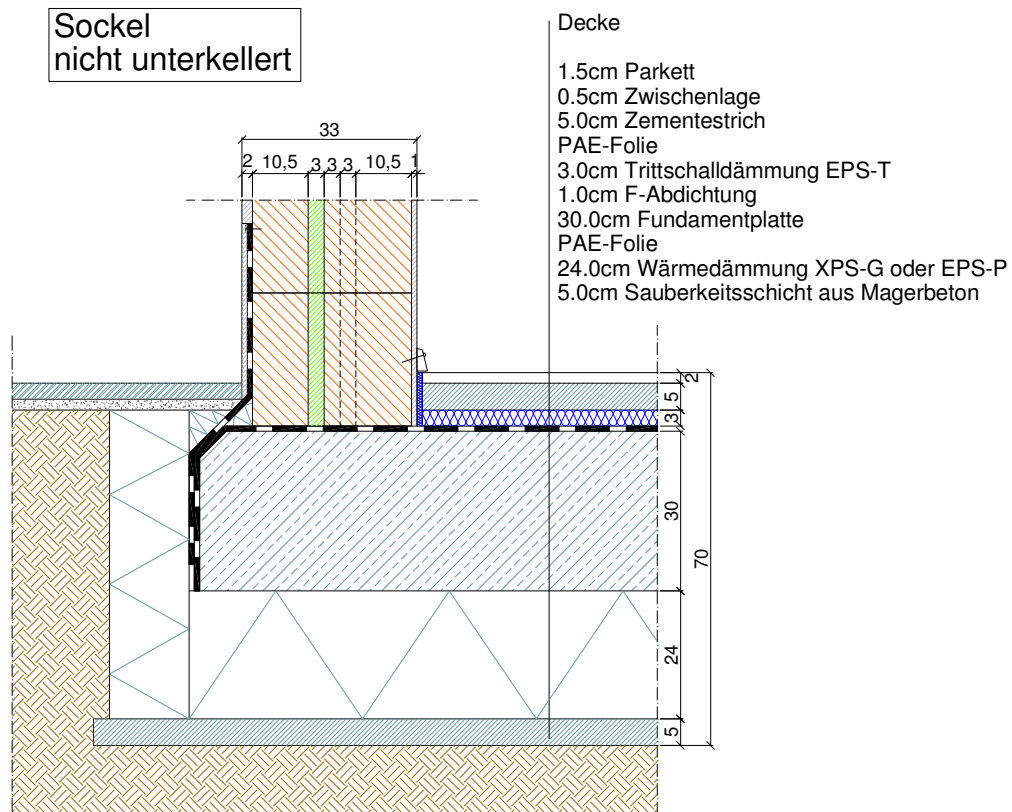


Abbildung 101: Detail – Sockel nicht unterkellert [eigene Abb.]

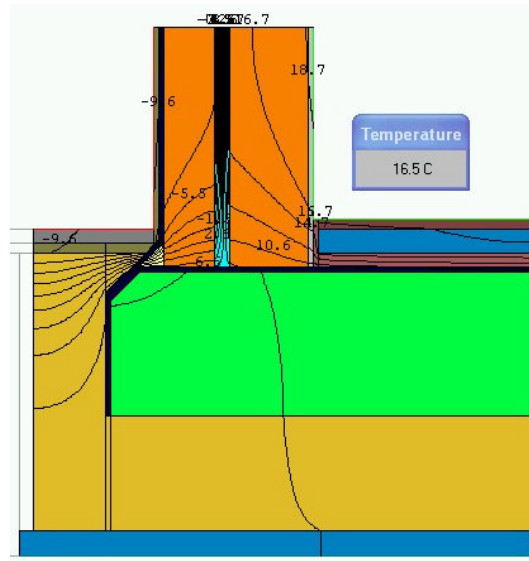
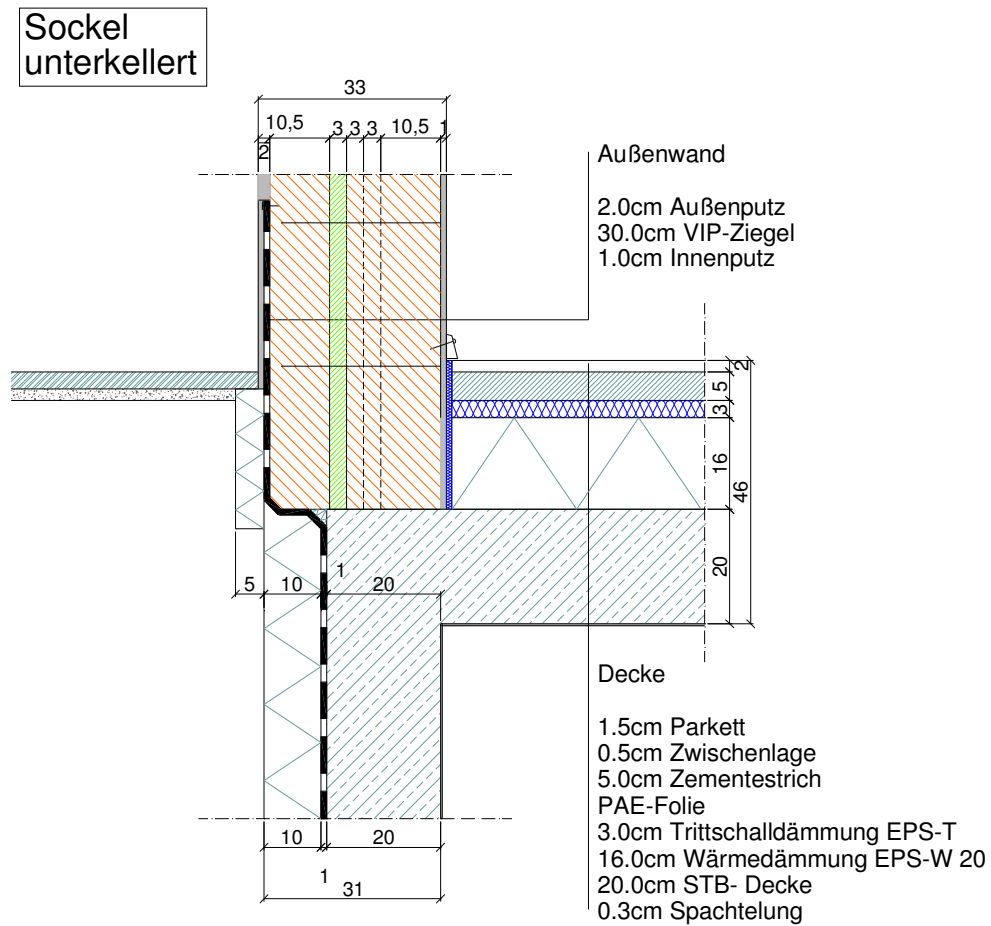


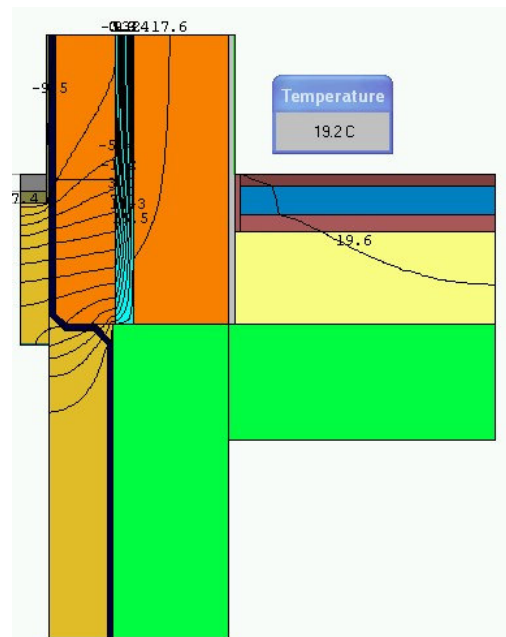
Abbildung 102: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Sockel nicht unterkellert [eigene Abb.]

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e} = \frac{16,5^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})} = 0,88$$

0,88 > 0,69 → **kein Kondensat**; 0,88 > 0,71 → **keine Schimmelbildung**



**Abbildung 103: Detail – Sockel unterkellert [eigene Abb.]**



**Abbildung 104: Minimale Oberflächentemperatur Detail – Sockel nicht unterkellert [eigene Abb.]**

$$f_{Rsi} = \frac{\vartheta_{si} - \vartheta_e}{\vartheta_i - \vartheta_e} = \frac{19,2^{\circ}\text{C} - (-10)^{\circ}\text{C}}{20^{\circ}\text{C} - (-10^{\circ}\text{C})} = 0,97$$

0,97 > 0,69 → **kein Kondensat**; 0,97 > 0,71 → **keine Schimmelbildung**

Um den Wärmeverlust im Anschlussbereich zwischen Kelleraußenwand und Erdgeschoßaußenwand klein zu halten, ist die Perimeterdämmung möglichst weit nach oben zu ziehen. Falls möglich, wenn das Gebäude nicht unmittelbar an einer Baulinie angeordnet ist, kann im Sockelbereich auch bis auf Höhe des Spritzwasserschutzes (mind. 30cm über Niveau) eine zusätzliche Sockeldämmung aus XPS oder einer EPS- Sockelplatte vorgesehen werden.

Die Dämmung zwischen EG und dem unbeheizten Keller kann, wie hier gezeigt, im Fußboden integriert oder an der Unterseite der Deckenkonstruktion befestigt werden.

### **3.10 Schlussfolgerung**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass insbesondere die Verbesserungsvorschläge der Serien 10 und 11 sehr positive Ergebnisse liefern und auch das Potential für zusätzlichen Nutzflächengewinn, hinsichtlich der geringen erforderlichen Wandstärken, beträchtlich ist. Genauere Ergebnisse zum hygrothermischen Verhalten sind den jeweiligen Kapiteln zu entnehmen.

Aus Sicht des Verfassers sind alle Varianten mit stumpfem Stoß und mittig positioniertem Paneel eindeutig jenen mit Überlappungen vorzuziehen. Das lässt sich hauptsächlich durch den verringerten Wärmeverlust über die Lagerfuge und die praktikablere Ziegelform begründen.

Zukünftige Untersuchungen zu diesem Themengebiet sollten sich vor allem mit den Fragestellungen der mechanischen und thermischen Belastbarkeit, sowie den Schallschutz- Eigenschaften eines derartigen Ziegelsystems befassen.

Würden weiterführende Studien zeigen, dass die Stabilität des Ziegels, aufgrund der Kammer mit eingeschobenem VIP, nur mit sehr hohen Scherbendicken realisierbar wäre, müsste das System durch den somit höheren Wärmeverlust neu durchdacht, oder höhere U-Werte in Kauf genommen werden.

Auch der Schallschutz ist bei einem Außenwandbauteil von besonderer Bedeutung. Können die geforderten Schalldämm- Maße aus Normen und Bauordnungen nicht eingehalten werden, sollten Optimierungen hinsichtlich der Kammerausbildung und eventuell auch Vergrößerungen der Ziegeldicke untersucht werden.

# QUELLENVERZEICHNIS

## Literaturquellen:

- Dre99: J. Dreyer, C. Hecht: „Entwicklung einer Innendämmplatte für salz- und nässegeschädigte Bauteile“, WTA – Schriftenreihe, Heft 20 „Nachhaltige Instandsetzung“, S. 187-197, 1999
- Dre05: J. Dreyer, T. Bednar, C. Hecht: Skriptum zur Vorlesung „Bauphysikalische Konstruktionslehre“, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Bauphysik und Bauakustik, WS 2005/ 2006
- Dre06: J. Dreyer: Skriptum zur Vorlesung „Bauphysikalische Bewertung von Sanierungskonzepten“, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Bauphysik und Bauakustik, WS 2006/ 2007
- Dre06a: J. Dreyer, A. Korjenic: Skriptum zur Vorlesung „Bauphysikalische Projektierung- Ausgewählte Nachweisverfahren“, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Bauphysik und Bauakustik, WS 2006/ 2007
- Dre06b: J. Dreyer: Skriptum zur Vorlesung „Bauphysik II“, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Bauphysik und Bauakustik, WS 2006/ 2007
- Dre06c: J. Dreyer, A. Korjenic: Initialprojekt: „Anwendung der Vakuumwärmedämmung zur nachträglichen Verbesserung des Wärmeschutzes von Altbauten“, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Bauphysik und Bauakustik, 2006
- Dre06d: J. Dreyer: Skriptum zur Vorlesung „Bauphysikalische Diagnose“, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Bauphysik und Bauakustik, WS 2006/ 2007

- Föt97: C. Fötschl: „Transparente Wärmedämmung – Bewertung von TWD – Wandkonstruktionen“, TU Wien, Institut für Hochbau für Architekten – Abteilung Bauphysikalische und Humanökologische Grundlagen des Hochbaus, 23. Jänner 1997
- Gha04: K. Ghazi Wakili, R. Bundi, B. Binder: “Effective thermal conductivity of vakuum insulation panels.”, Building Research and Information 32(4), 2004
- Hae96: G. Haefele, W. Oed, B. M. Sambeth: ”Baustoffe und Ökologie”, Ernst Wasmuth Verlag GmbH & Co, Tübingen/ Berlin, 1996
- Hec01: C. Hecht: „Bauphysikalische Bewertung ausgewählter Sanierungsverfahren unter besonderer Berücksichtigung von Paraffinen und kapillar leitfähigen Dämmstoffen“, TU Wien, Institut für Hoch- und Industriebau – Fachbereich Hochbau, 25. Mai 2001
- Ker96: A. Kerschberger: „Solares Bauen mit transparenter Wärmedämmung“, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, 1996
- Kol06: A. Kolbitsch: Skriptum zur Vorlesung „Hochbaukonstruktionen“, Band 1, Schriftenreihe des Ordinariats für Hochbau, TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung, Februar 2006
- Kor03: A. Korjenic: „Vakuumdämmung“, TU Wien, Institut für Werkstoffe, Bauphysik und Brandschutz – Fachbereich Bauphysik, Vortrag: 5. Fachkonferenz des Doktoratsstudiums FAST, Brno, 12.02.2003 – 13.02.2003, in „Tagungsband der 5. Fachkonferenz für Doktoranden“, S. 79-90, 2003
- Mic06: W. Michel: „Nutzhanf an der Fassade spart Heizkosten“. In: „Bauthema 02 – Naturdämmstoffe“, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006

- Müh06: B. Mühlethaler, S. Haas: „Stärken, Hürden und Chancen von Naturdämmstoffen“. In: „Bauthema 02 – Naturdämmstoffe“, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006

#### **Sonstige Quellen:**

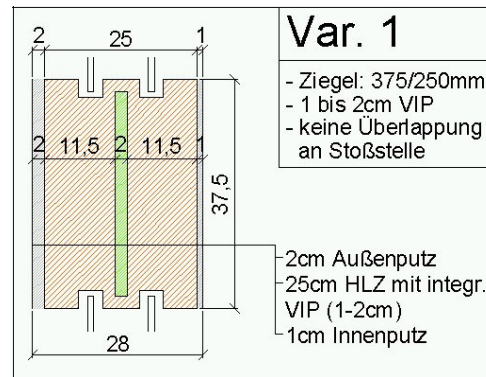
- Bau06: [http://www.bau-umwelt.de/fileadmin/user\\_upload/Deklarationen/AUB-Deklaration\\_CSP-10106-D.pdf](http://www.bau-umwelt.de/fileadmin/user_upload/Deklarationen/AUB-Deklaration_CSP-10106-D.pdf); Stand: 20. Jänner 2006
- Bin02: A. Binz, Institut für Energie FHBB, Muttenz  
M. Erb, Hp. Eicher, Dr. Eicher+Pauli AG, Liestal  
H. Simmler, K. Ghazi Wakili, EMPA, Dübendorf:  
„Vakuumdämmung im Baubereich vip-bau.ch“  
[http://www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/22564/---/l=1](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/22564/---/l=1); Stand: 2002
- Bin05: A. Binz, G. Steinke, A. Moosmann, U. Schonhardt, F. Fregnan, Institut für Energie FHBB – Schweiz  
H. Simmler, S. Brunner, K. Ghazi, R. Bundi, EMPA – Schweiz  
U. Heinemann, H. Schwab, ZAE-Bayern – Deutschland  
H. Cauberg, M. Tenpierik, TU Delft – Niederlande  
M. Erb, B. Nussbaumer, Dr. Eicher+Pauli AG - Schweiz:  
„Vakuum-Isolations-Paneele im Gebäudesektor – Systeme und Anwendungen“:  
[http://www.fhbb.ch/tools/projekte/pdf/0204\\_100949\\_vip\\_systeme+anwendungen\\_bericht\\_deutsch\\_kompr.pdf](http://www.fhbb.ch/tools/projekte/pdf/0204_100949_vip_systeme+anwendungen_bericht_deutsch_kompr.pdf); Stand: Dezember 2005
- Ene07: <http://www.energiesparhaus.at/gebaeudehuelle/daemmstoffe.htm>,  
Stand: März 2007
- Fra01: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen,  
[http://www.ibp.fhg.de/presse/presse\\_9.html](http://www.ibp.fhg.de/presse/presse_9.html), Stand: 2001
- Iso07: Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH,  
<http://typo3.isover.at/fileadmin/downloads/prospekte/Fassade.pdf>, Stand: März 2007

- Pro07: Promat GmbH,  
<http://members.inode.at/promat/masterclima/masterclima.htm>; Stand: März 2007
  
- Sch03: U. Schonhardt, A. Binz, M. Wohler, R. Dott, Fachhochschule bei der Basel, Institut für Energie – Schweiz:  
„Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP)“  
[http://www.empa-ren.ch/ren/Projekte\\_Gebaeudehuelle/Pdf%20Gebaeudehuelle/SB\\_VIP.pdf](http://www.empa-ren.ch/ren/Projekte_Gebaeudehuelle/Pdf%20Gebaeudehuelle/SB_VIP.pdf);  
Stand: Dezember 2003
  
- Scu03: H. B. Schupp, Tagungsbeitrag zur 1. Fachtagung VIP-Bau 10. bis 11. Juli 2003, Rostock- Warnemünde: „VIP im Mauerwerksbau – Vakuumgedämmter Mauerstein, Vakuumgedämmter Mauerziegel“,  
<http://www.vip-bau.de/pdf/Warnemuende/O%20schupp.pdf>; Stand: 10. bis 11. Juli 2003
  
- Sim04: H. Simmler, S. Brunner, EMPA Abteilung Bauphysik: "Kann die Lebensdauer von Vakuumisulationspaneelen vorausgesagt werden?"  
[http://www.vip-bau.ch/fileadmin/user\\_upload/downloads/Statusseminar04\\_%20Alterung\\_EMPA.pdf](http://www.vip-bau.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Statusseminar04_%20Alterung_EMPA.pdf); Stand: 2004
  
- Vaq07: va-Q-tec AG,  
[http://www.va-q-tec.de/deutsch/infos/faqs\\_d.html](http://www.va-q-tec.de/deutsch/infos/faqs_d.html); Stand: April 2007
  
- Vaq07a: va-Q-tec AG,  
[http://www.va-q-tec.de/deutsch/vips/va-q-check\\_d.html](http://www.va-q-tec.de/deutsch/vips/va-q-check_d.html); Stand: April 2007
  
- Vip06: vip-bau.ch,  
<http://www.vip-bau.ch/>; Stand: 11. September 2006

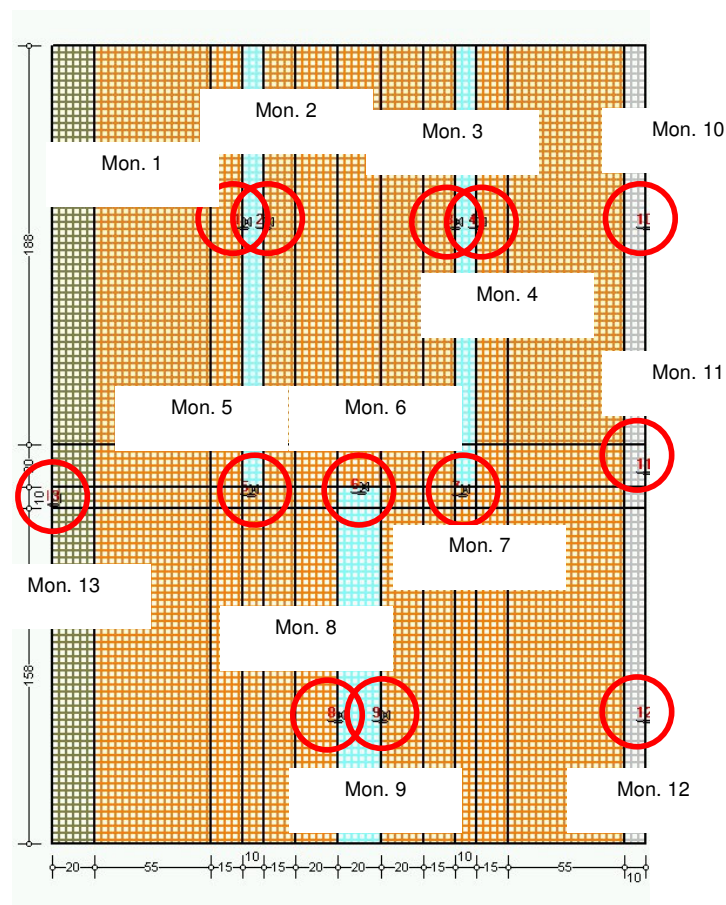
- Wac07: Wacker Chemie AG,  
[http://www.wacker.com/internet/noc/Products/P\\_Pyrogene\\_Kiesels](http://www.wacker.com/internet/noc/Products/P_Pyrogene_Kiesels); Stand: April 2007
- Wae02: <http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/kalziumsilikat.htm>; Stand: 2002
- Wie07: Wienerberger AG,  
<http://www.wienerberger.at>; Stand: März 2007
- Zae03: Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung E. V. (ZAE-Bayern): „Abschlussbericht VIP- Demoobjekte“,  
[http://www.zae-bayern.de/files/ab\\_vip\\_demo.pdf](http://www.zae-bayern.de/files/ab_vip_demo.pdf); Stand: Juni 2003
- Zae06: Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung E. V. (ZAE-Bayern),  
<http://www.zae-bayern.de/deutsch/abteilung-2/spezielle-themen/varianten.html>,  
Stand: Oktober 2006

# Anhang A      Berechnungsergebnisse ausgewählter Varianten aus WUFI-2D

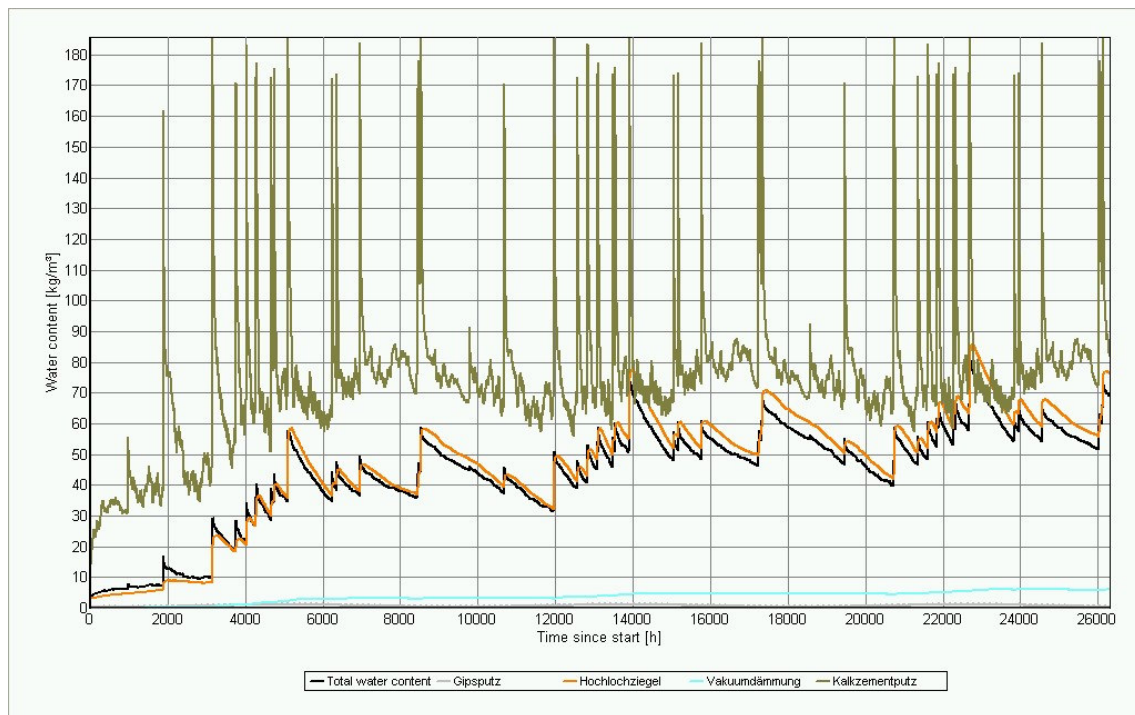
## A.1 Variante 1



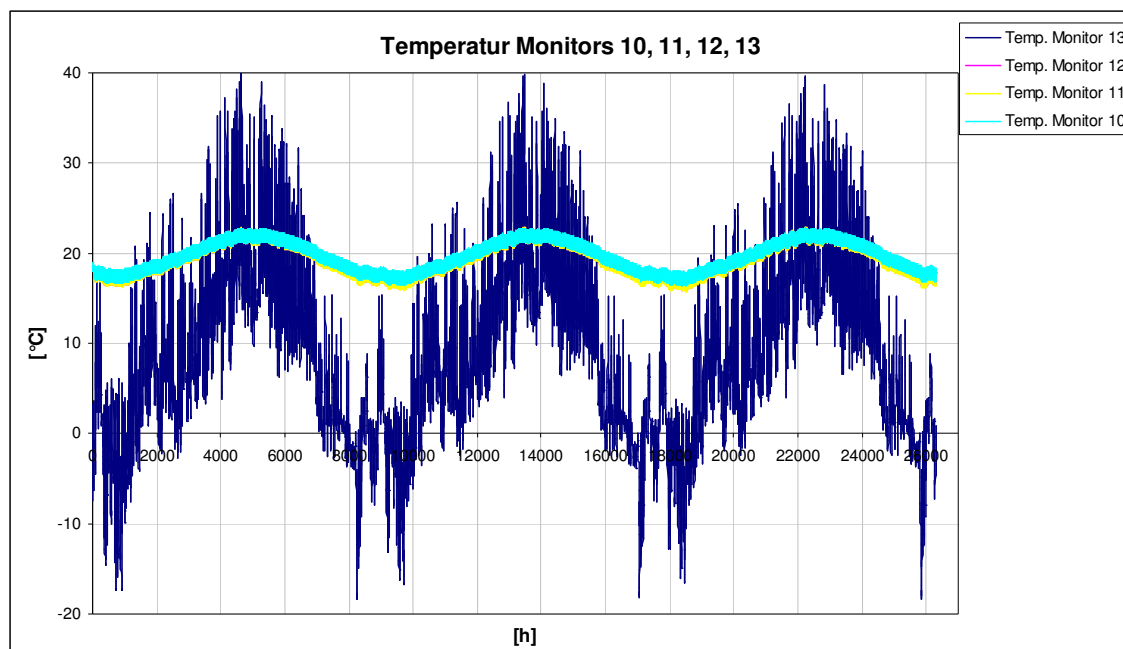
### A.1.1 Eingabe der Konstruktion

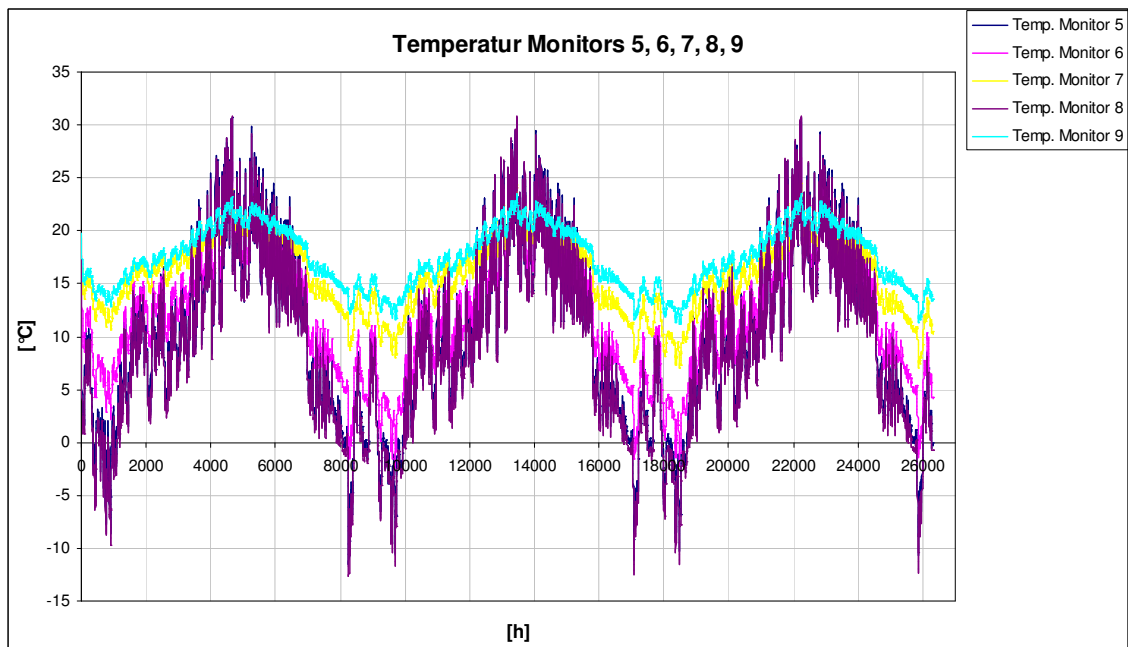
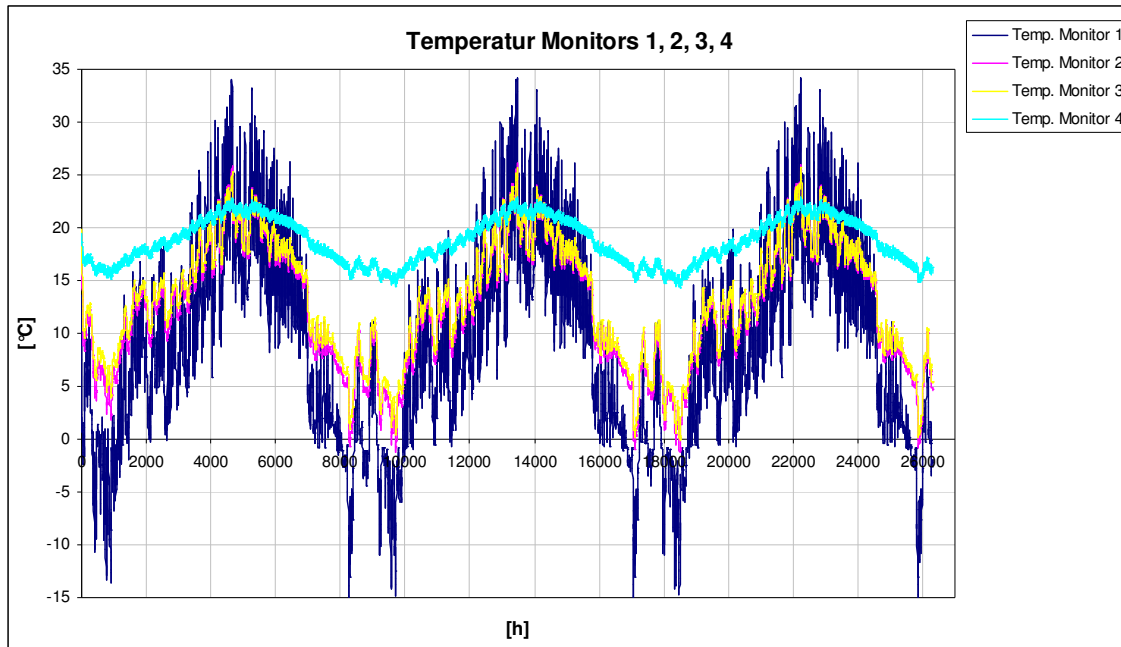


### A.1.2 Wassergehalte der einzelnen Materialschichten

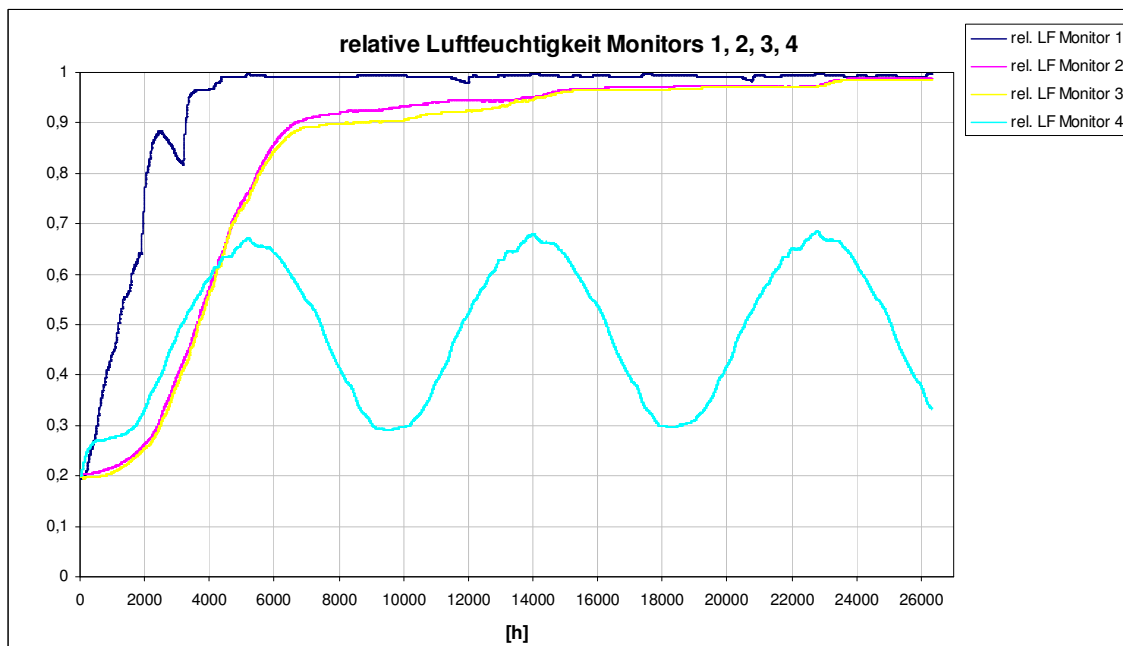
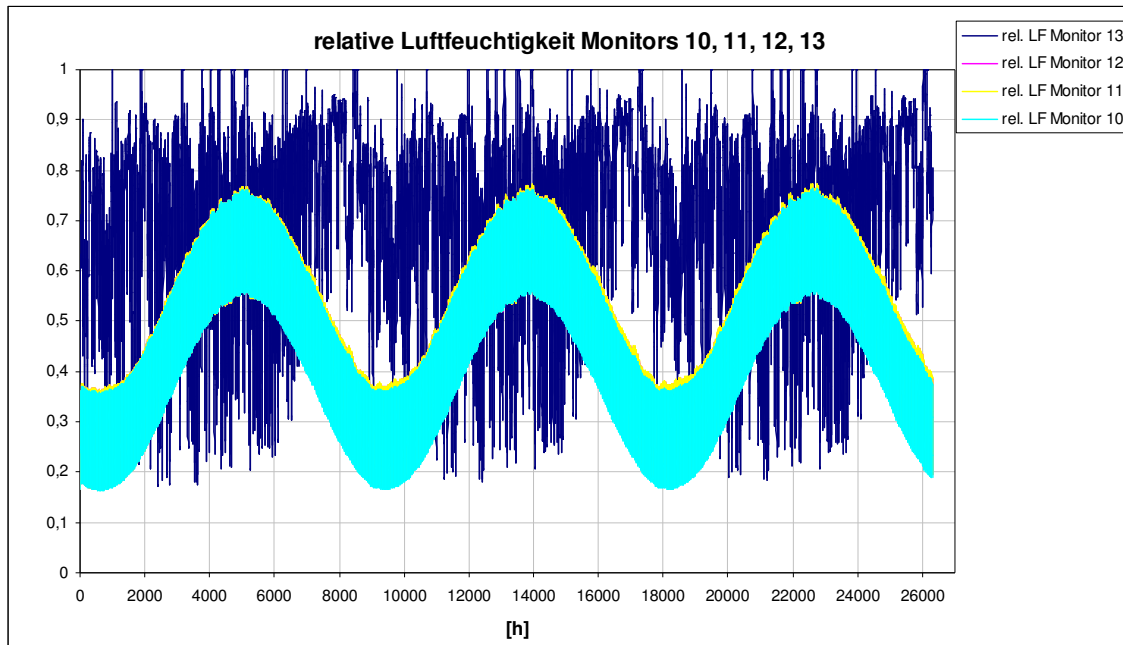


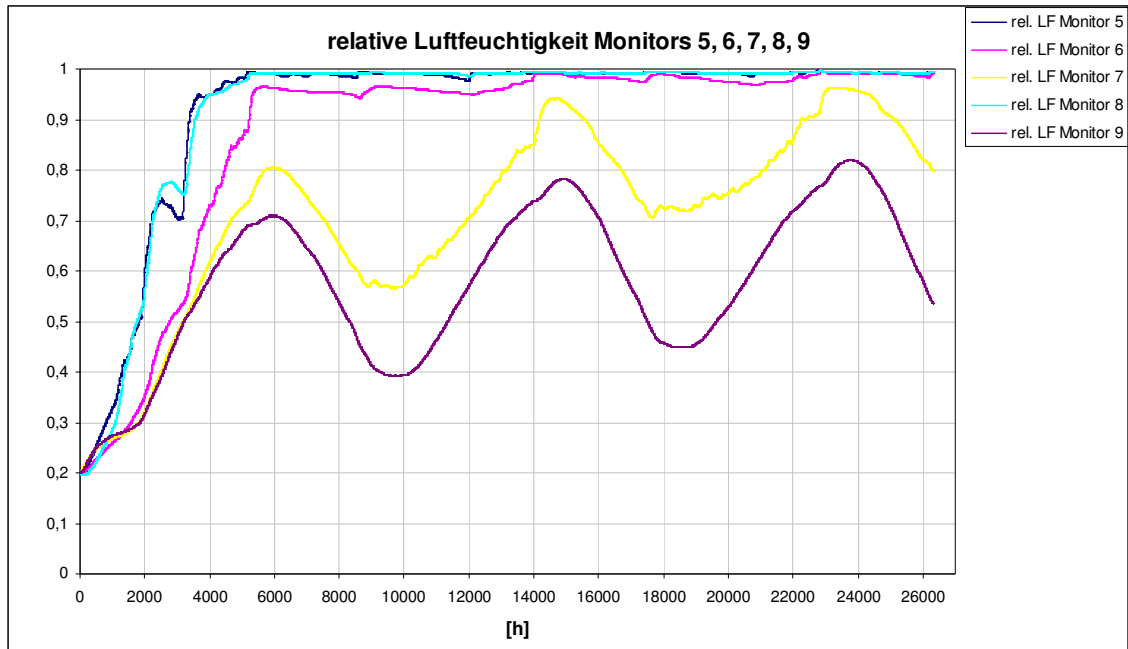
### A.1.3 Temperaturverteilung der Monitorpositionen



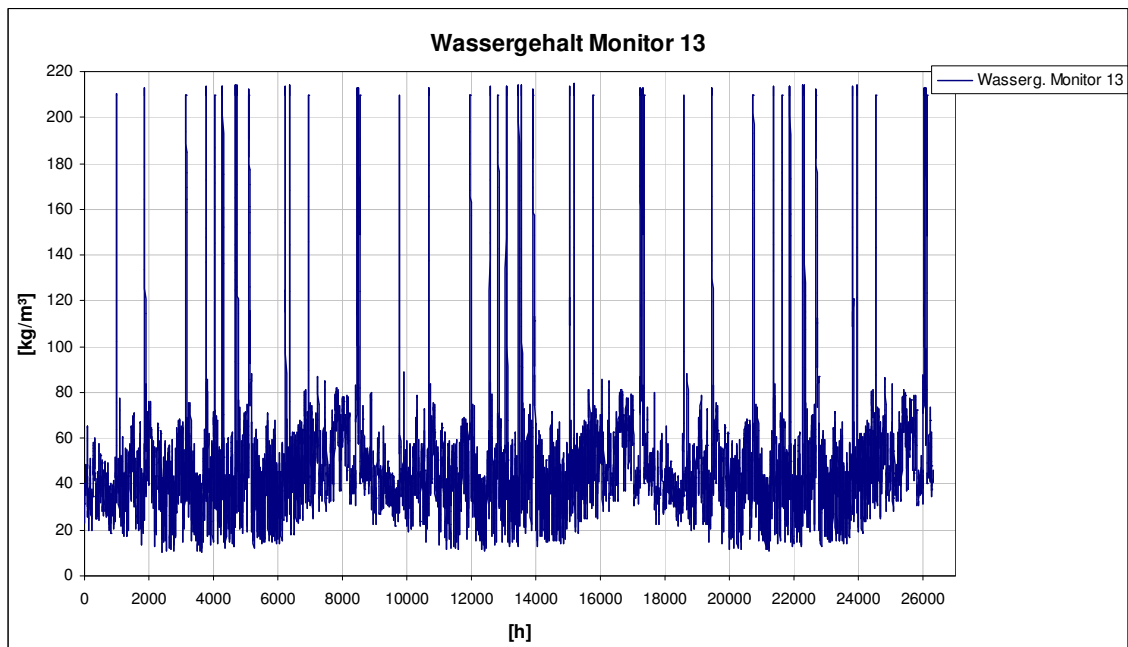


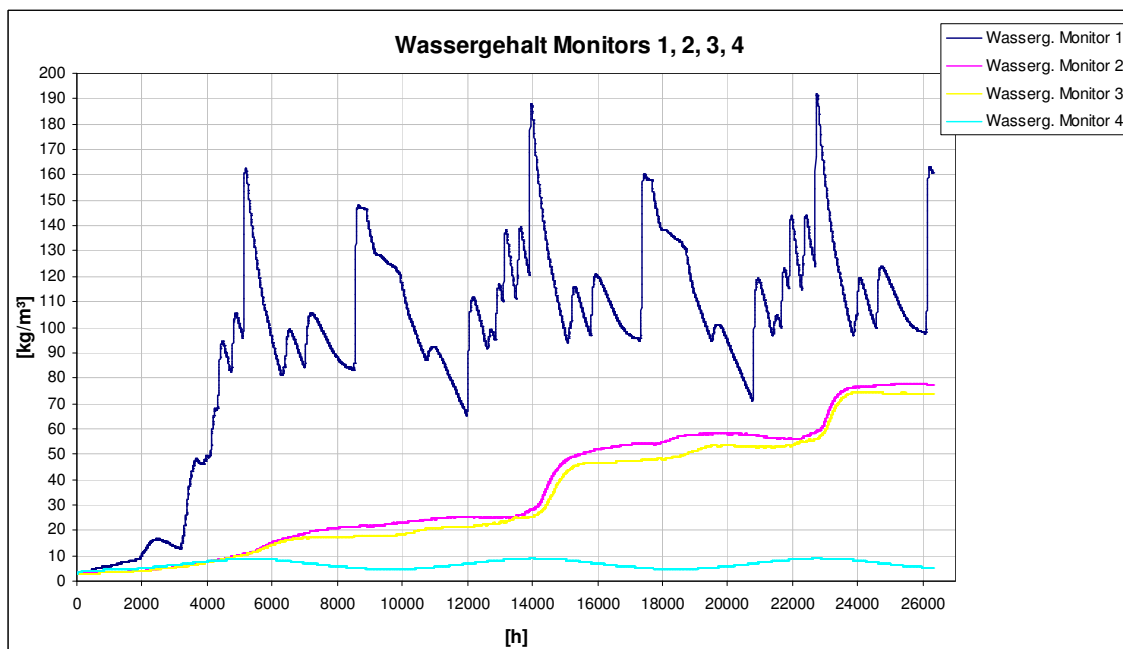
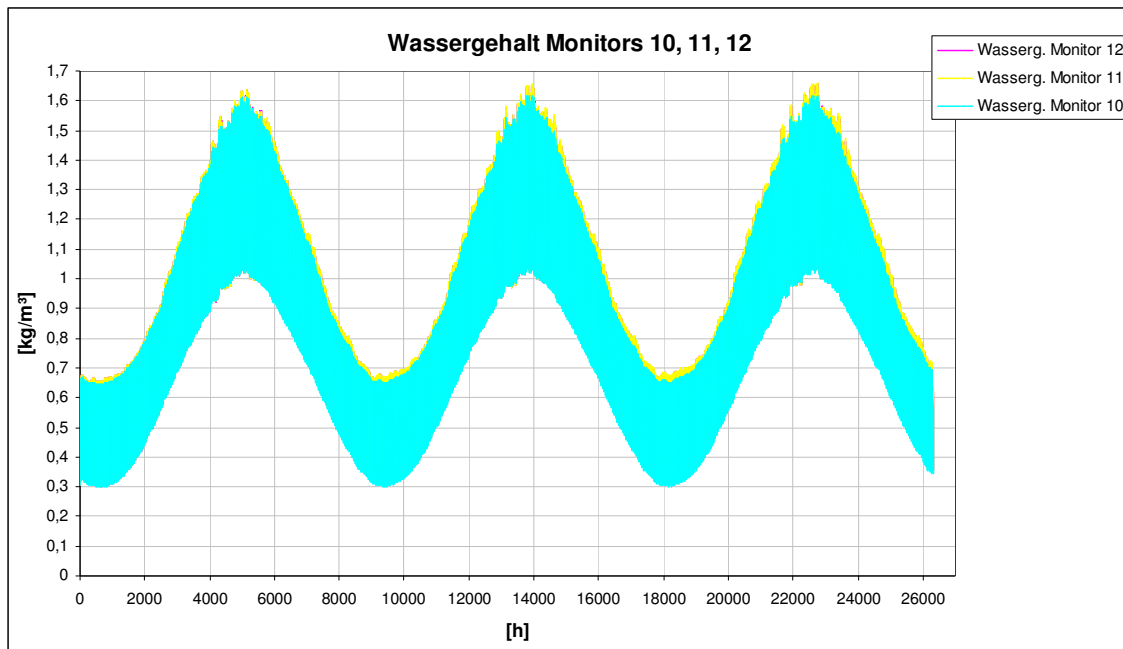
#### A.1.4 Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen

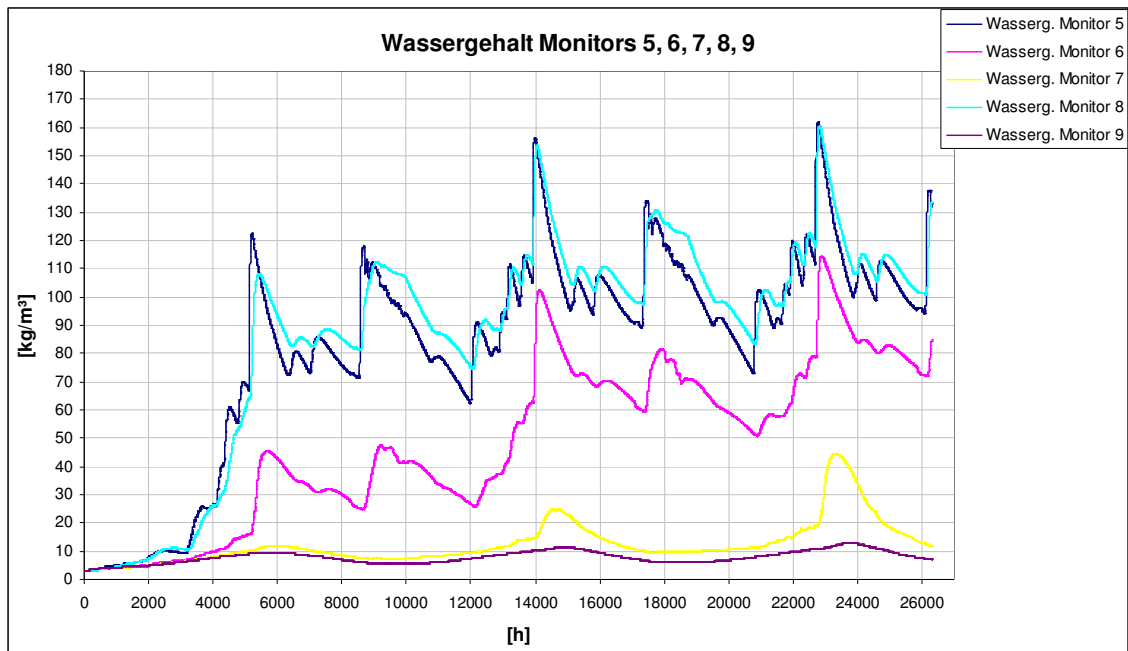




### A.1.5 Wassergehalt der Monitorpositionen





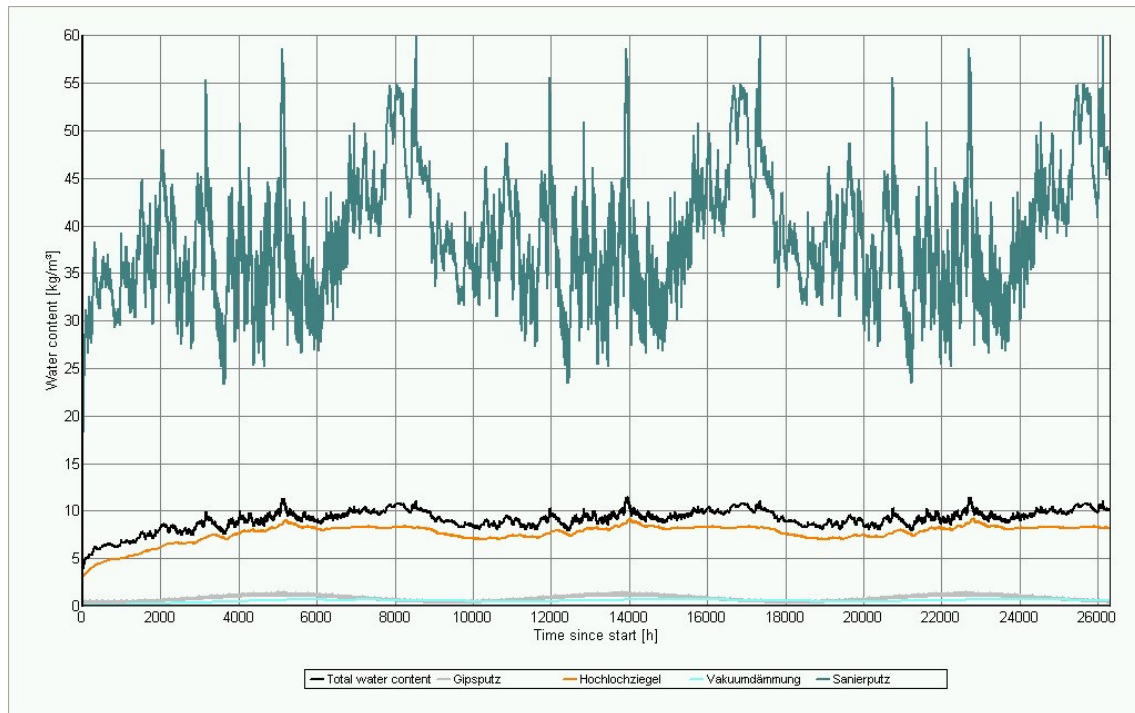


## A.2 Variante 1a

### A.2.1 Eingabe der Konstruktion

Siehe Variante 1.

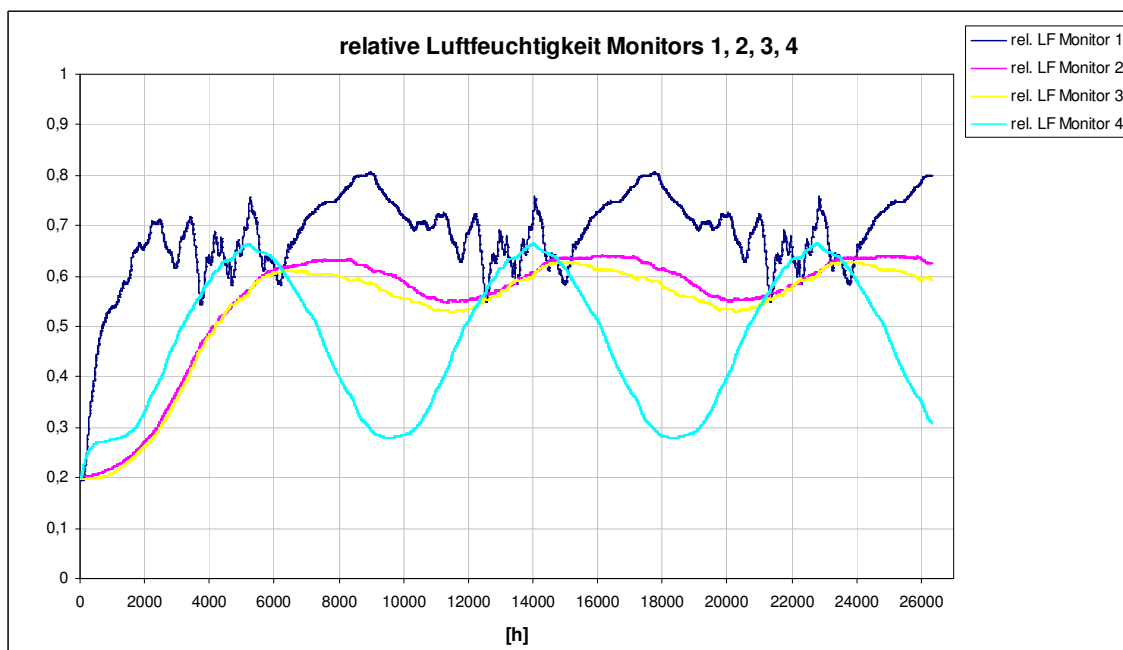
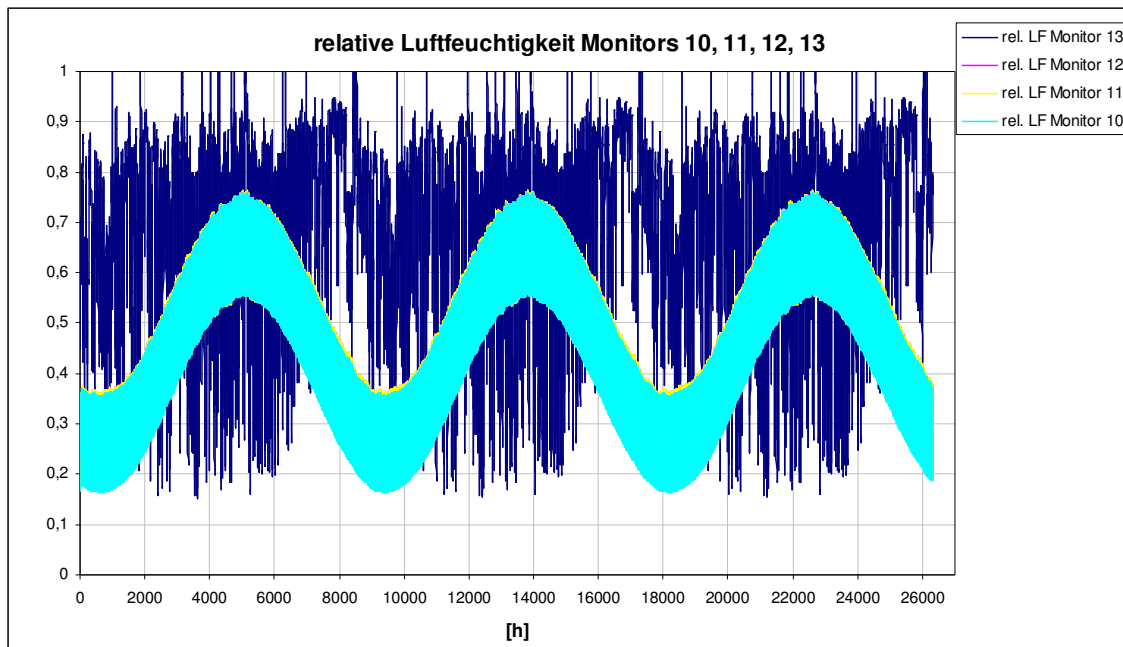
### A.2.2 Wassergehalte der einzelnen Materialschichten

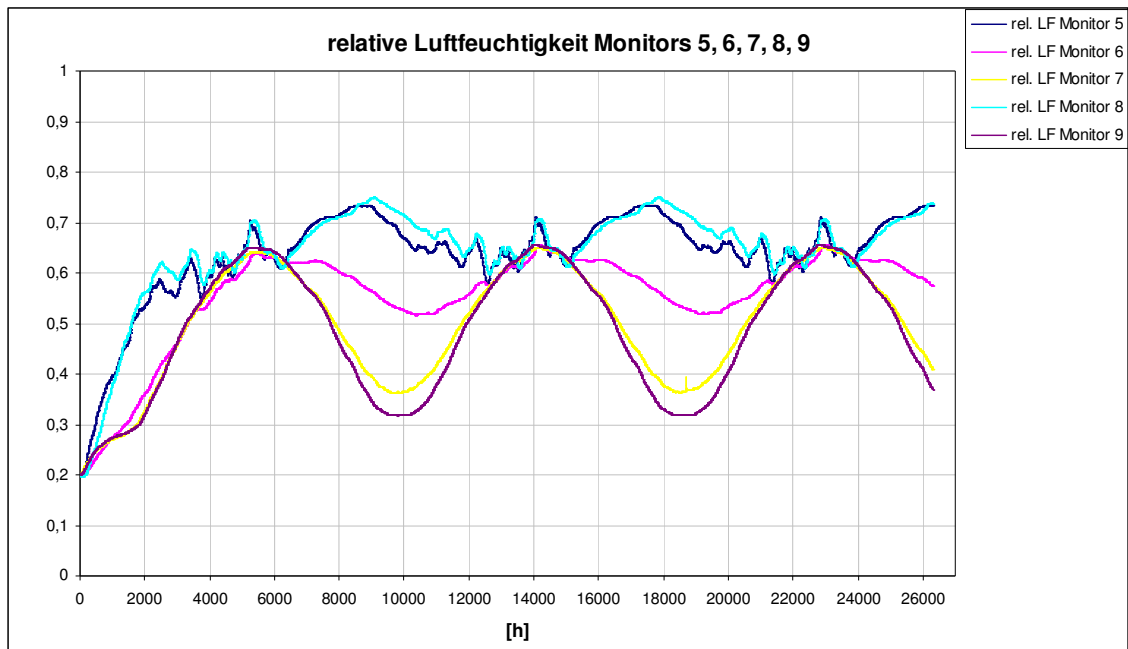


### A.2.3 Temperaturverteilung der Monitorpositionen

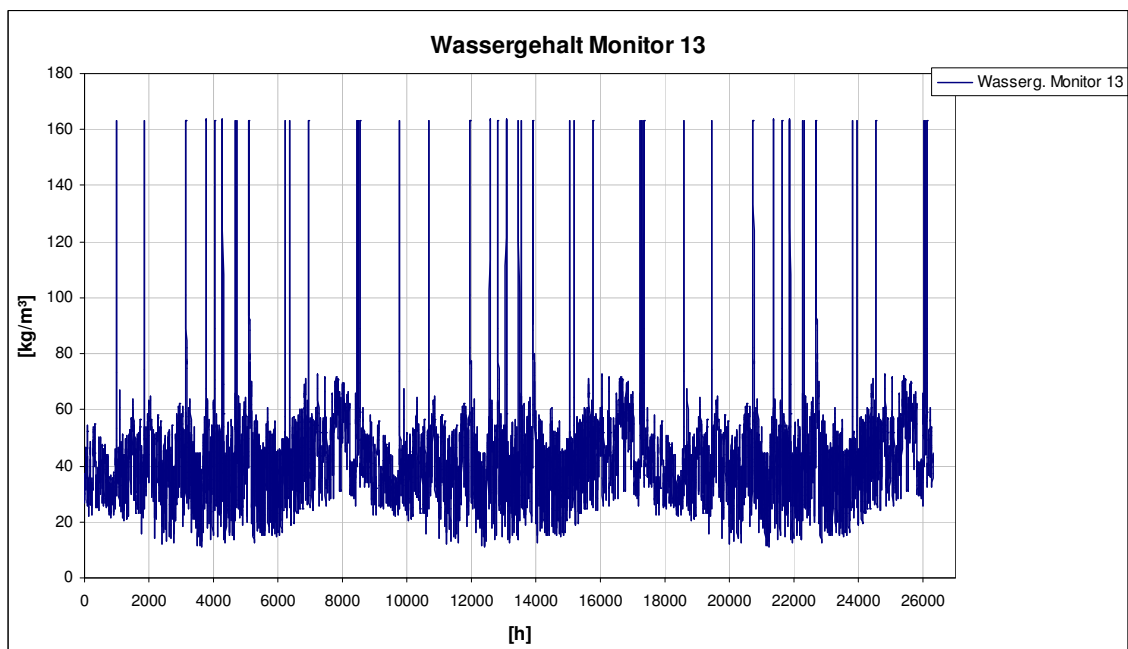
Siehe Variante 1.

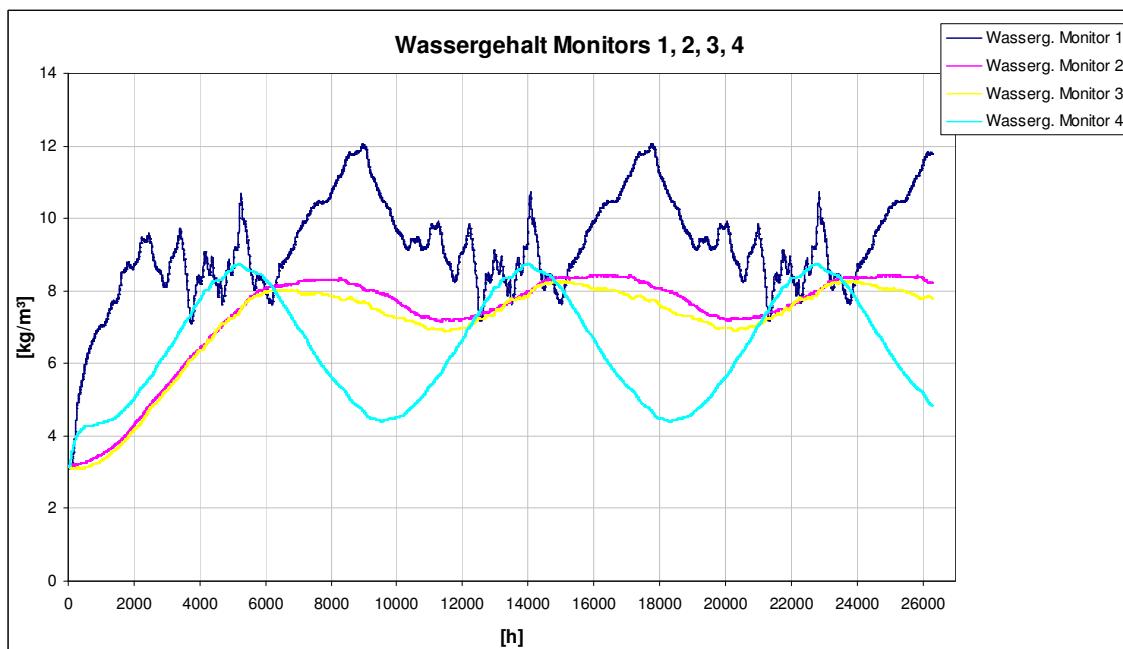
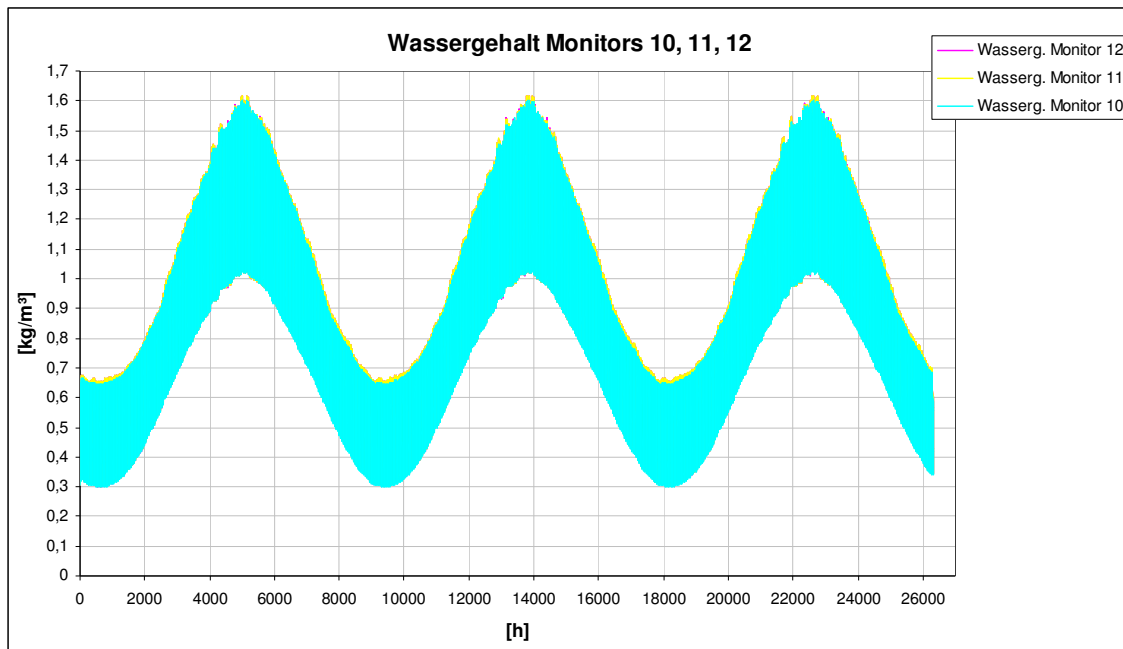
## A.2.4 Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen

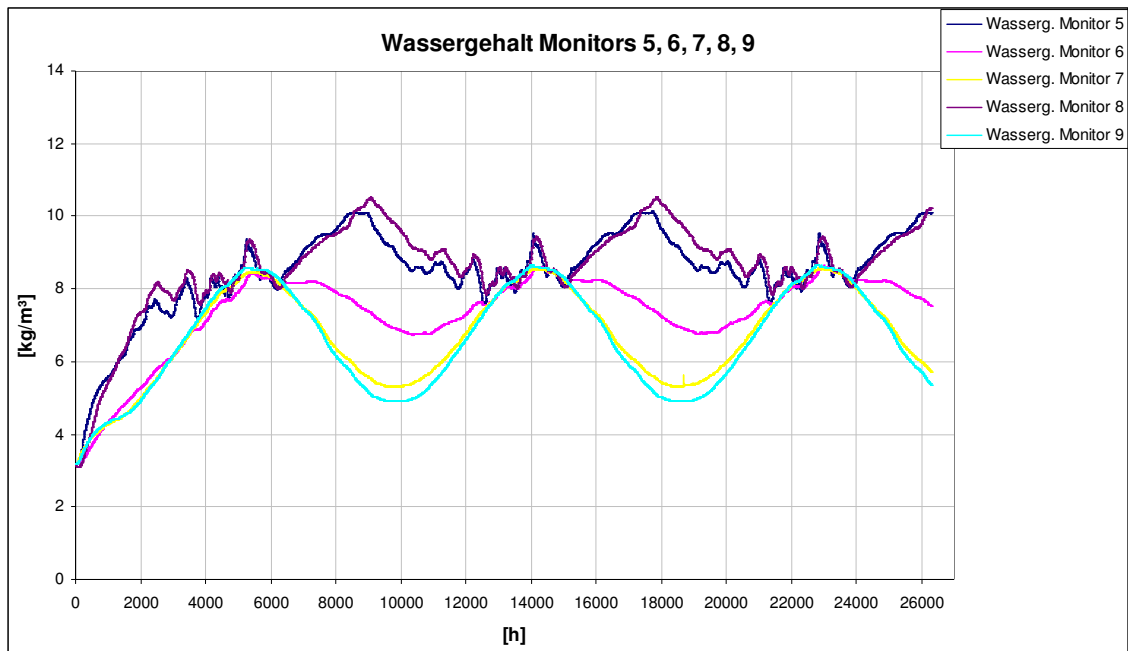




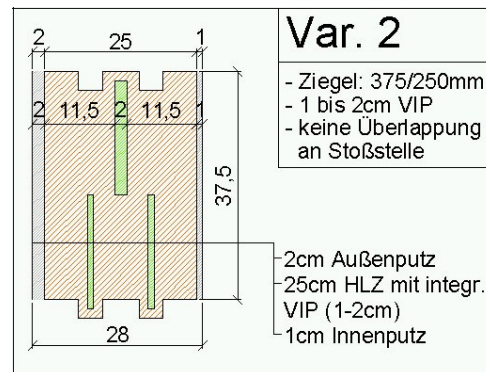
### A.2.5 Wassergehalt der Monitorpositionen



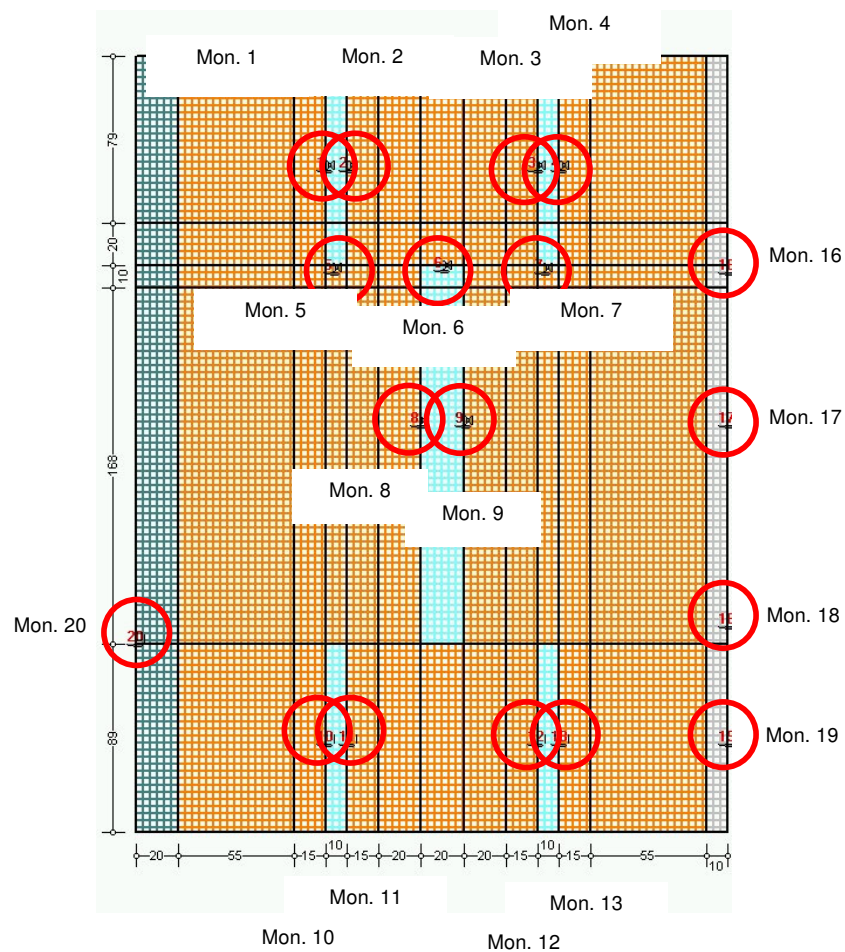




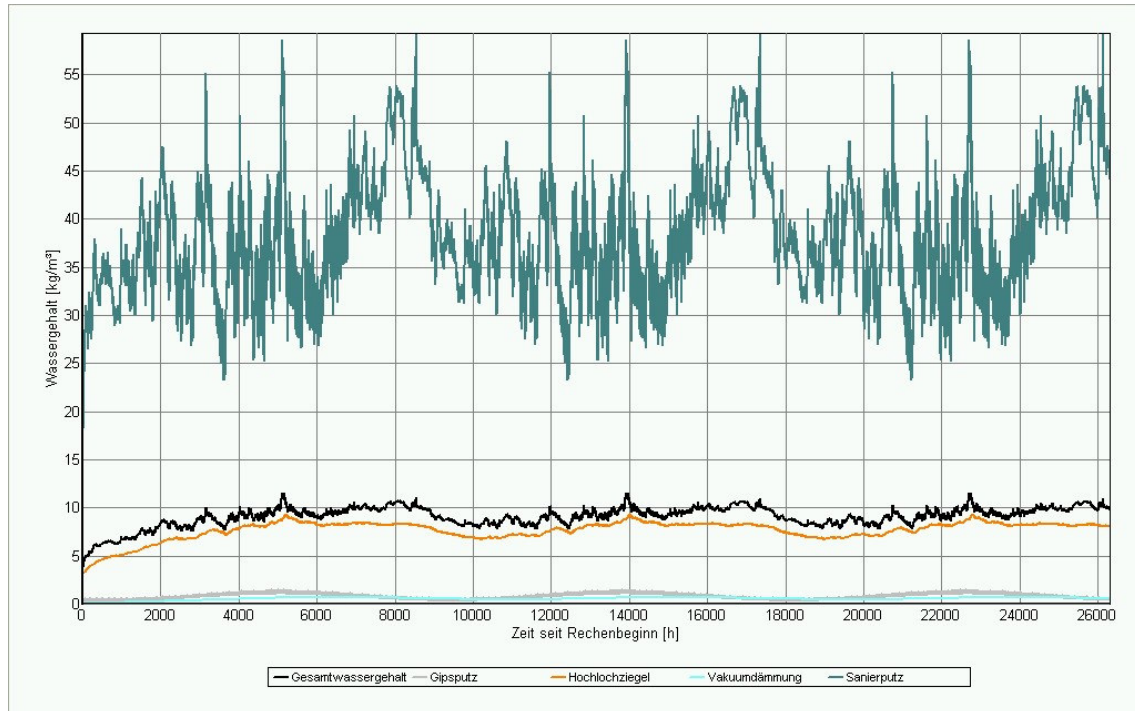
### A.3 Variante 2a



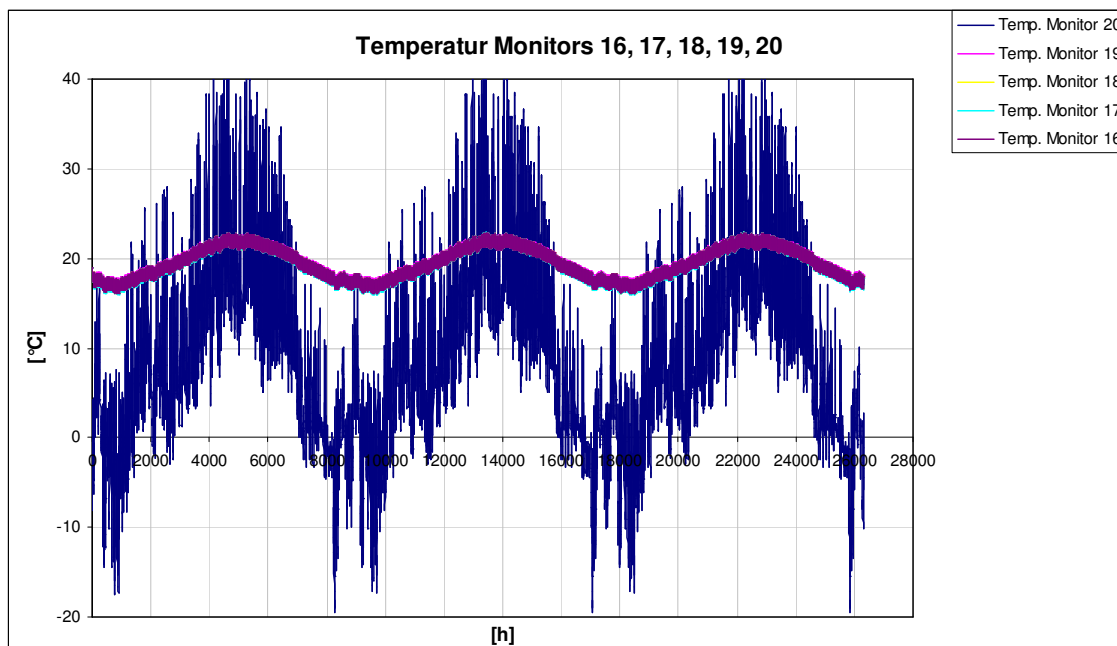
#### A.3.1 Eingabe der Konstruktion

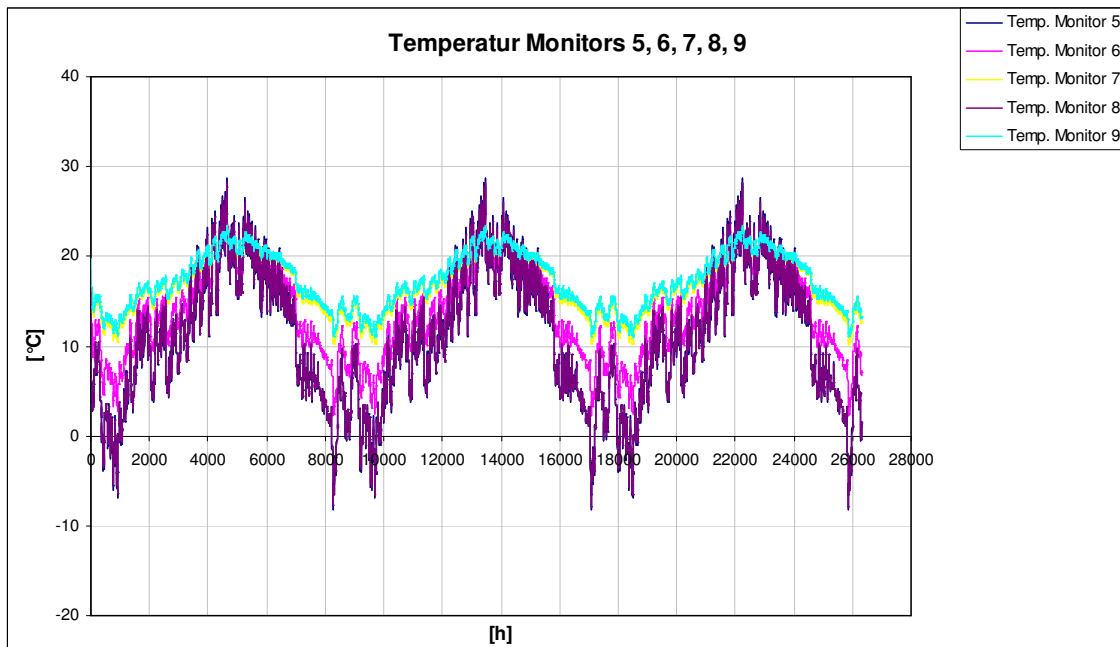
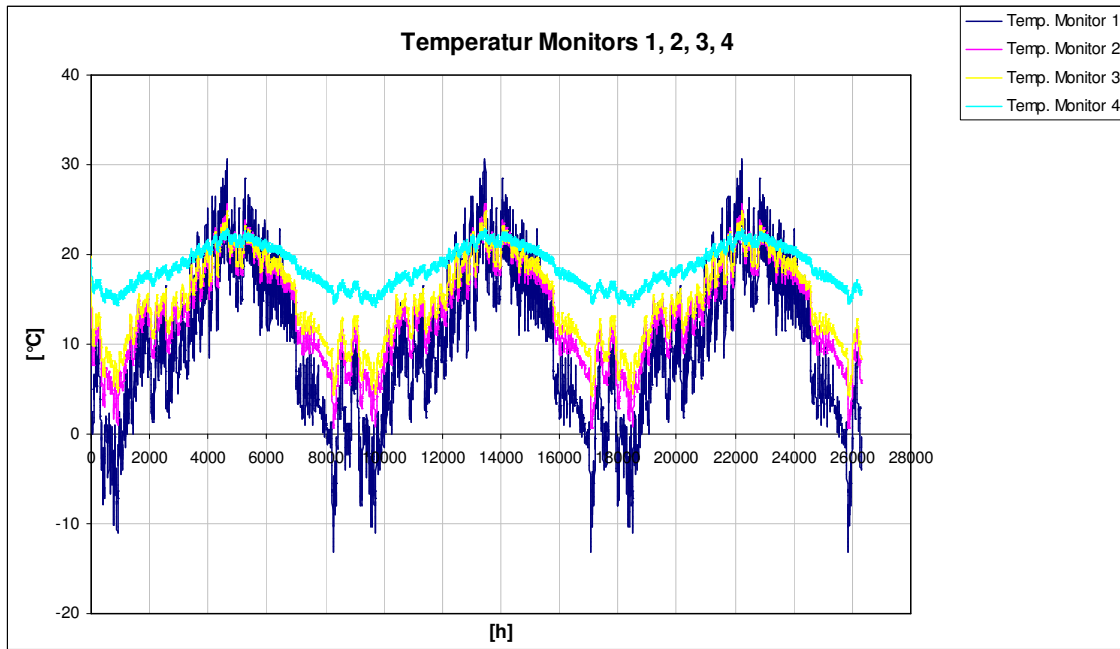


### A.3.2 Wassergehalte der einzelnen Materialschichten

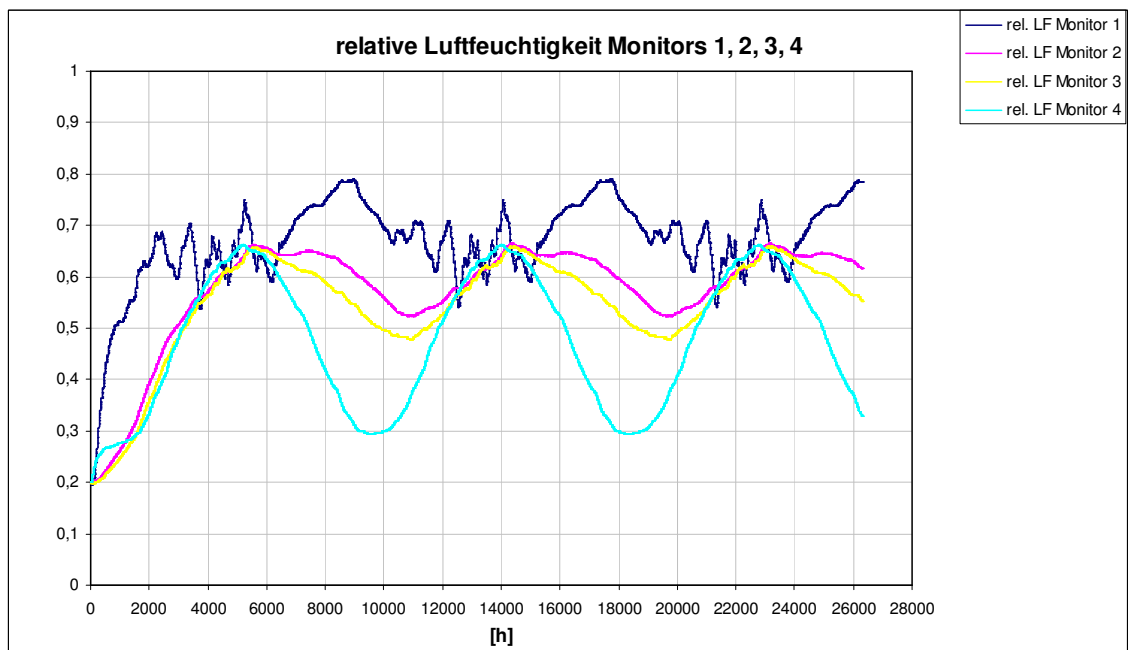
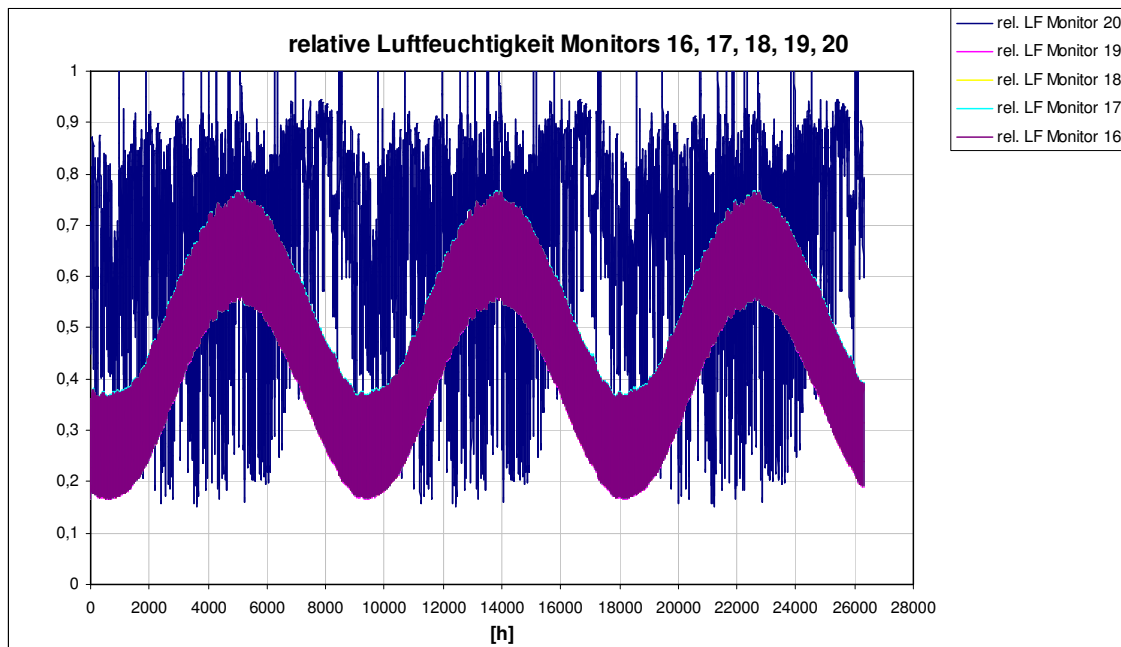


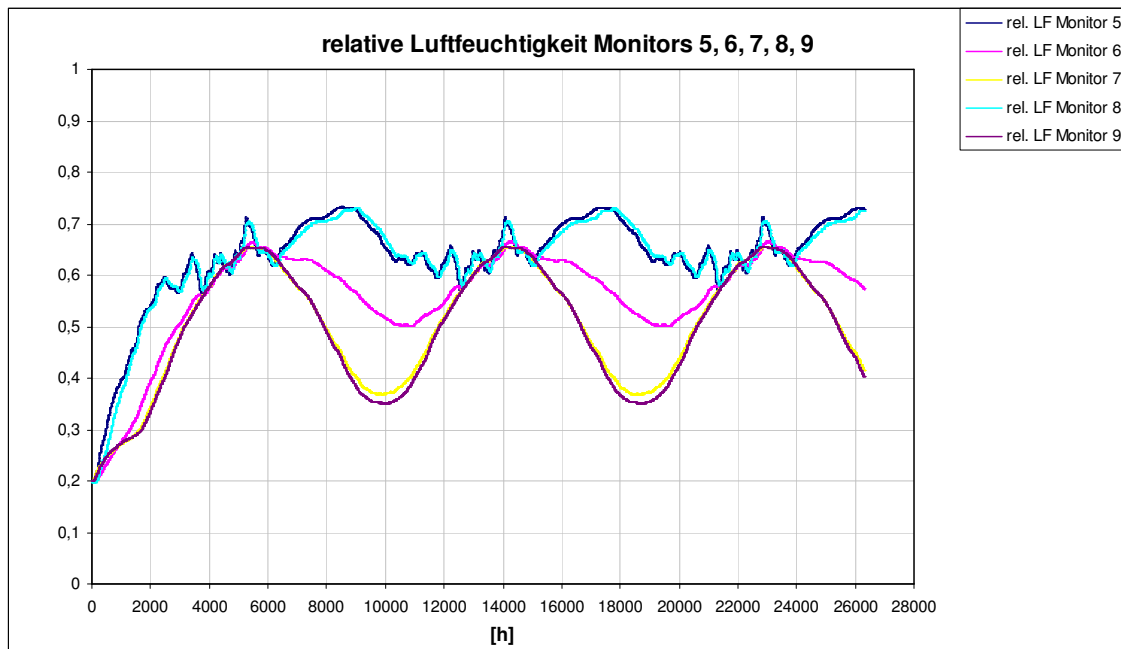
### A.3.3 Temperaturverteilung der Monitorpositionen



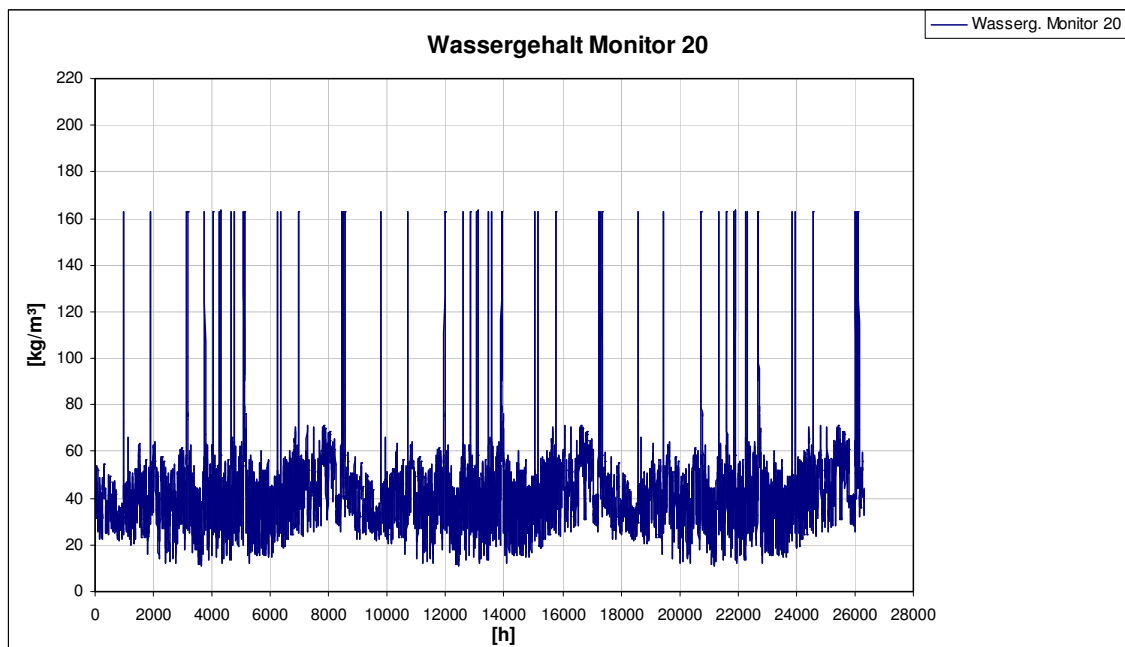


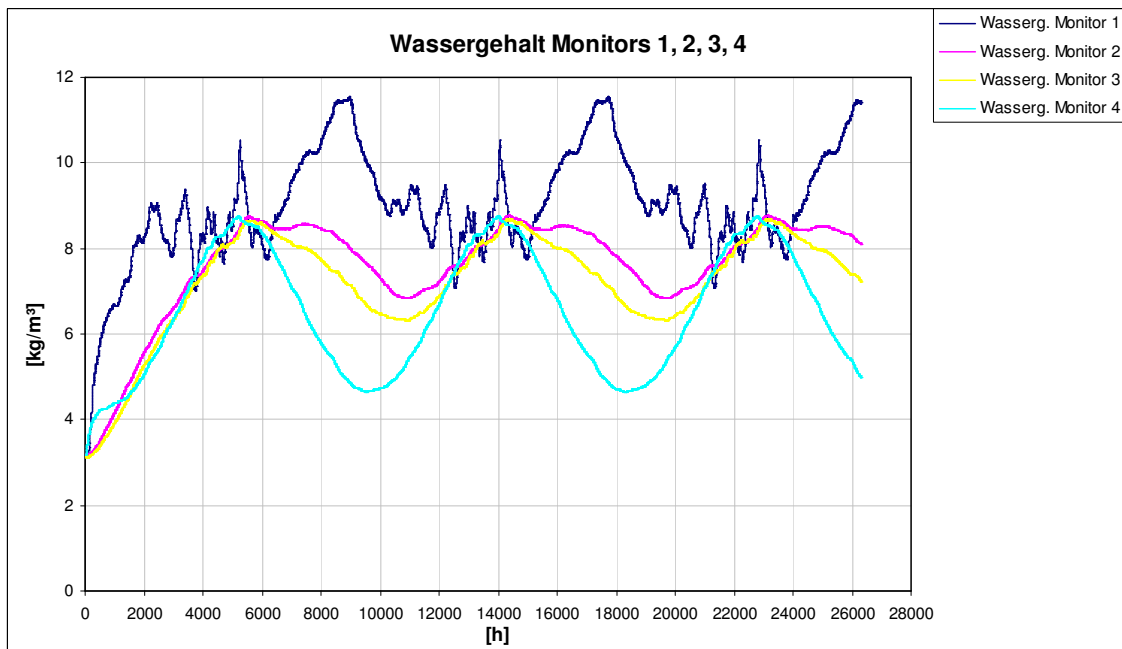
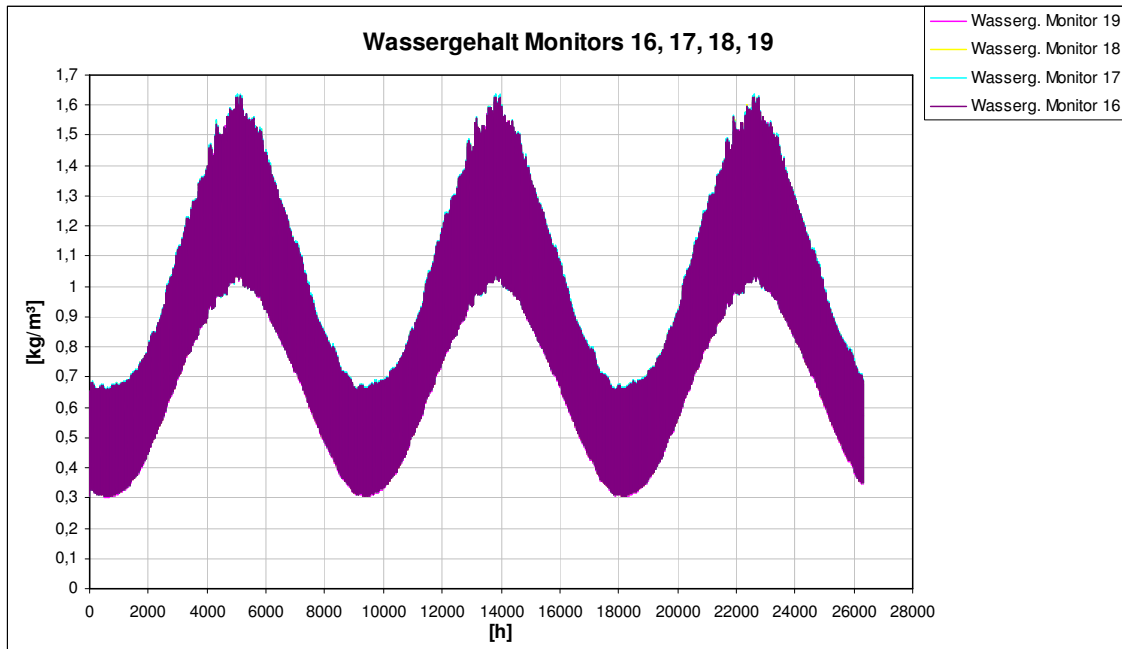
### A.3.4 Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen

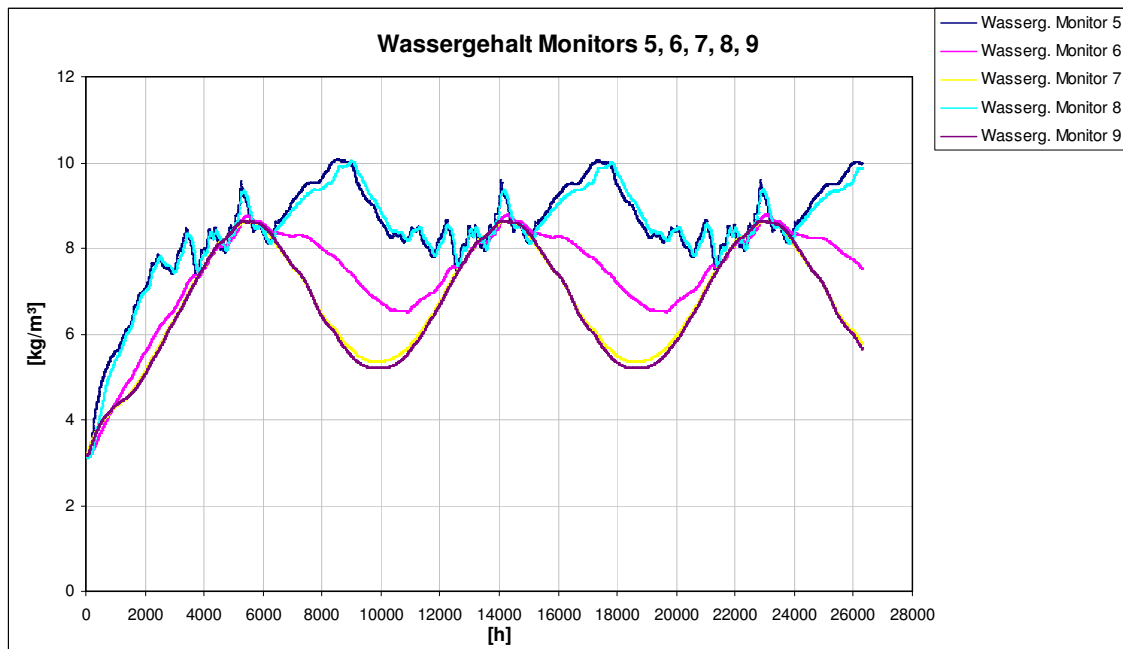




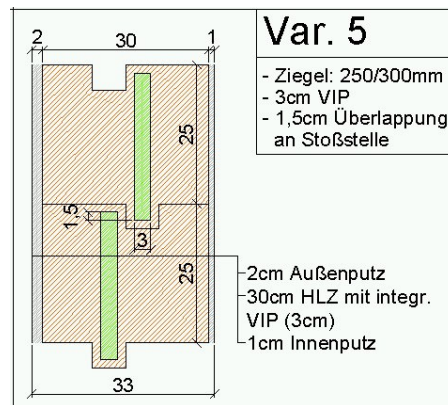
### A.3.5 Wassergehalt der Monitorpositionen



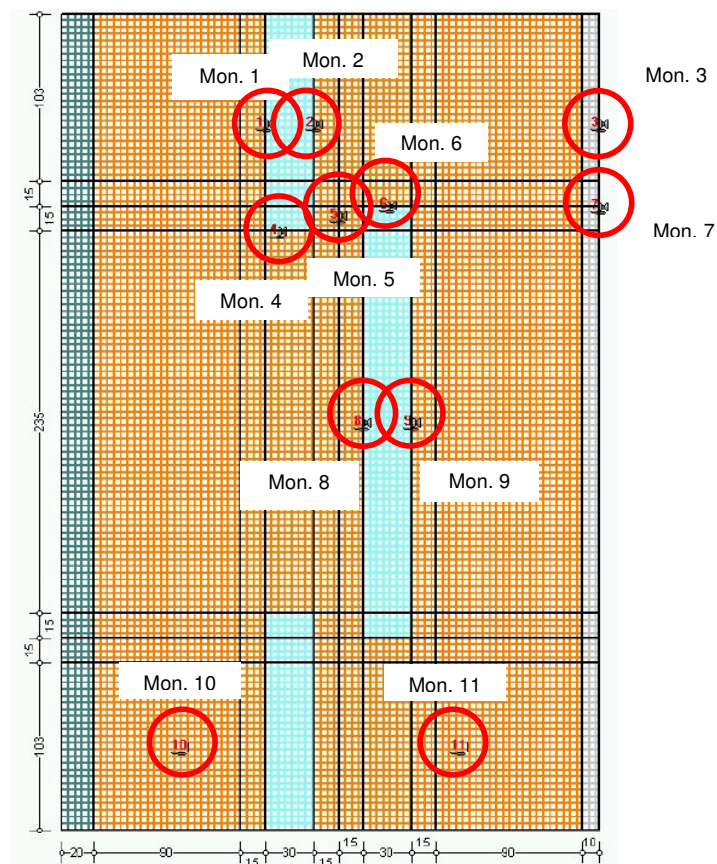




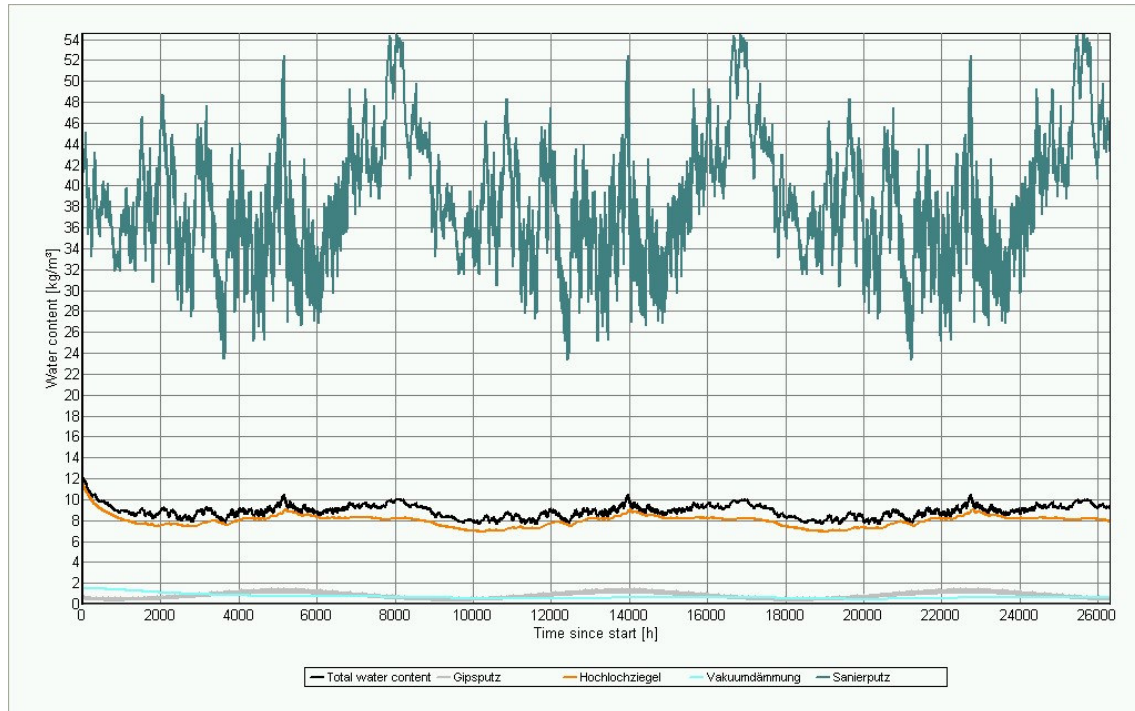
## A.4 Variante 5



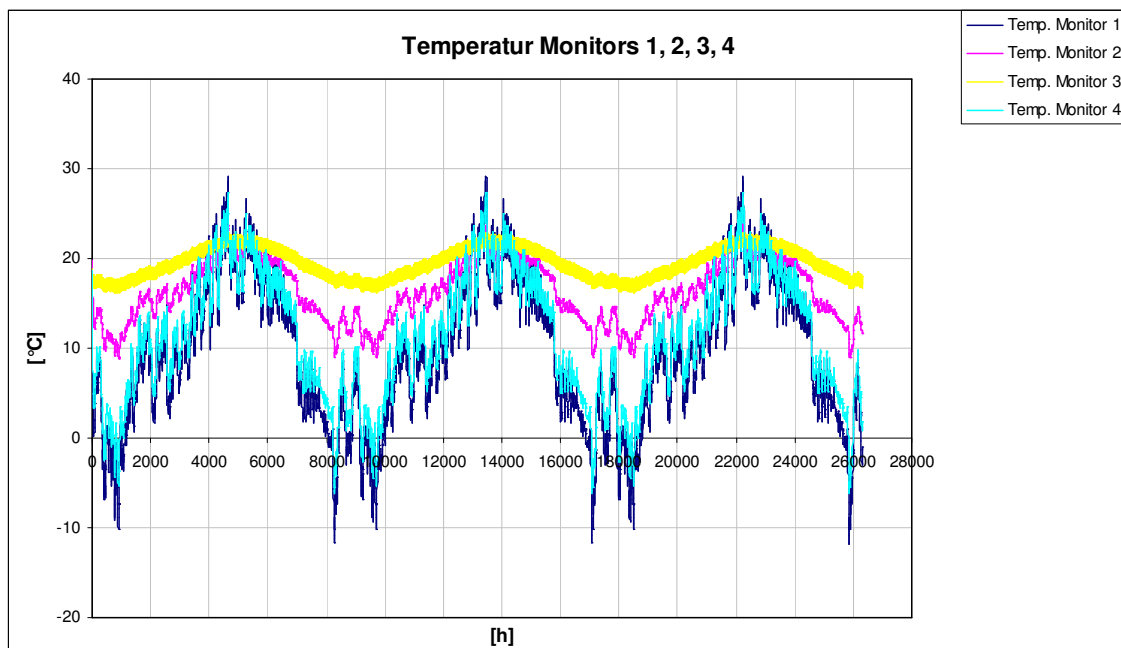
### A.4.1 Eingabe der Konstruktion

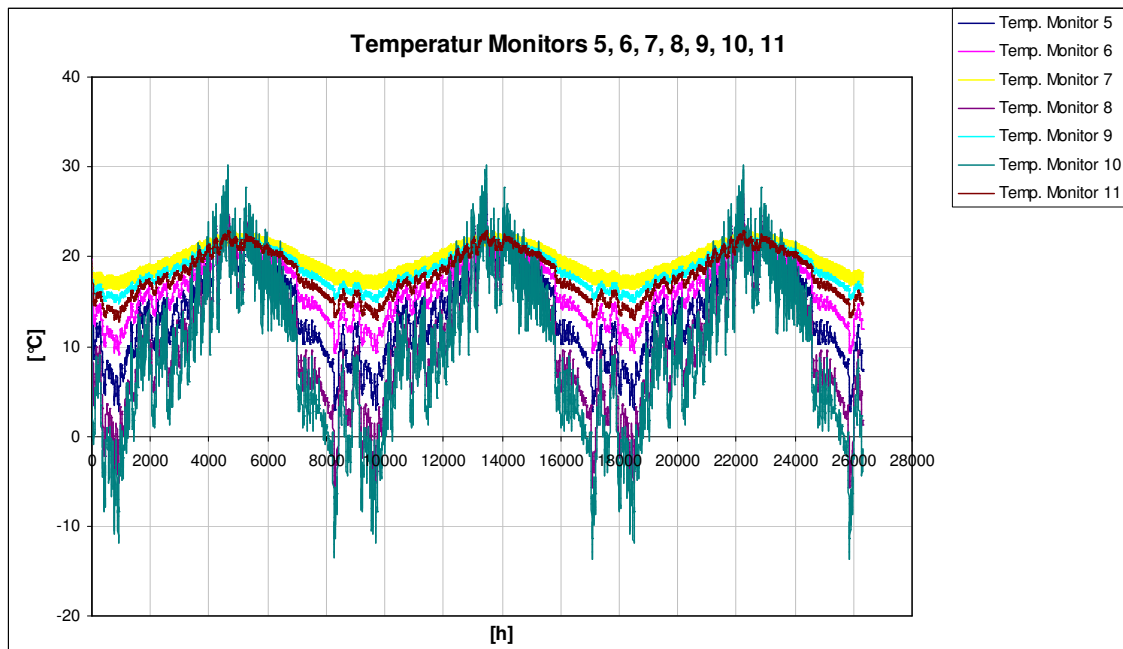


#### A.4.2 Wassergehalte der einzelnen Materialschichten

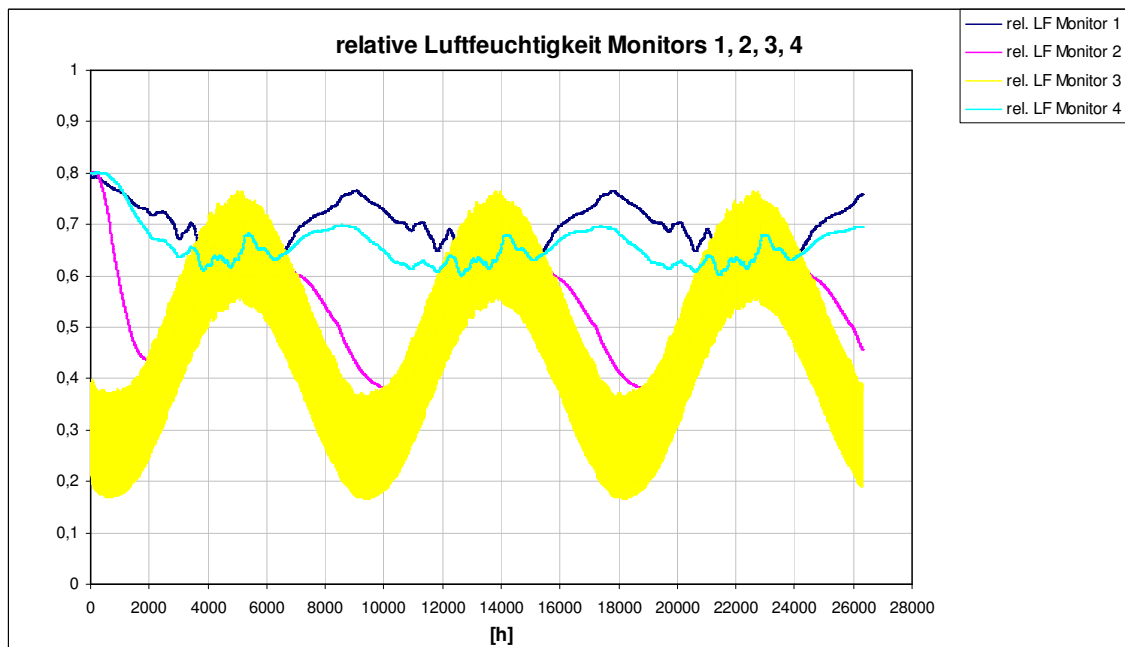


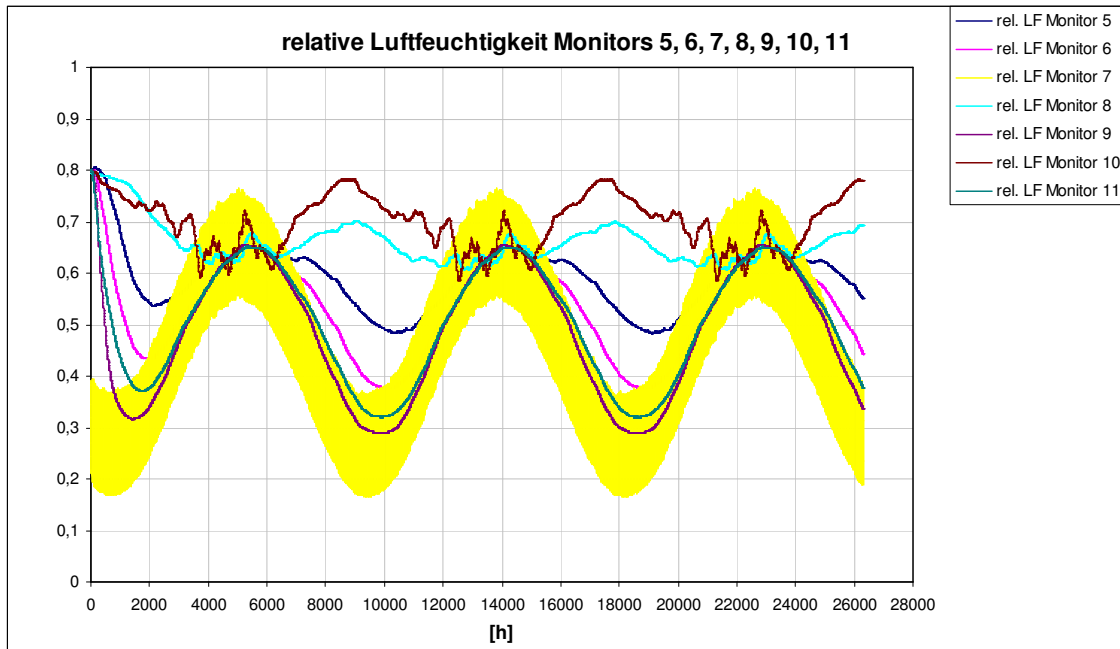
#### A.4.3 Temperaturverteilung der Monitorpositionen



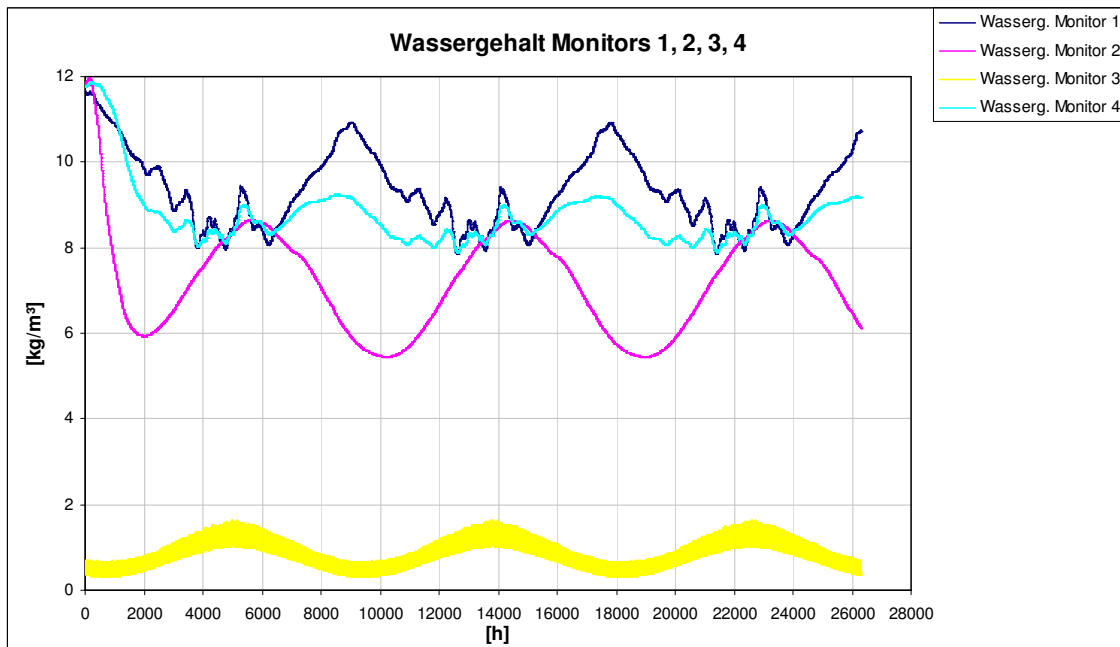


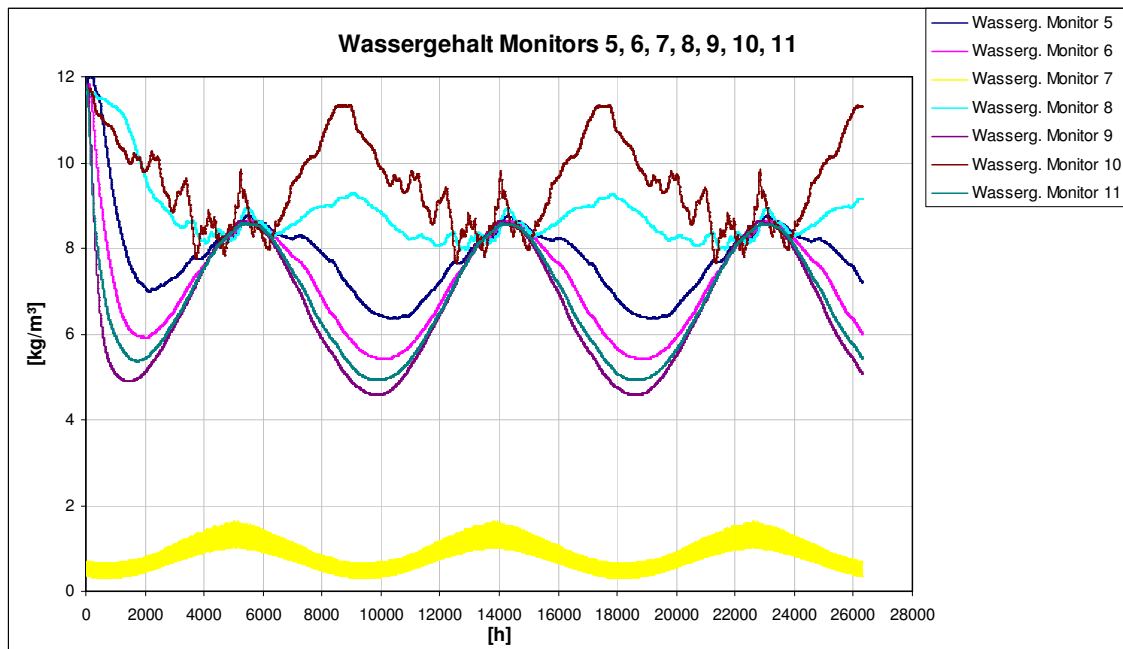
#### A.4.4 Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen





#### A.4.5 Wassergehalt der Monitorpositionen



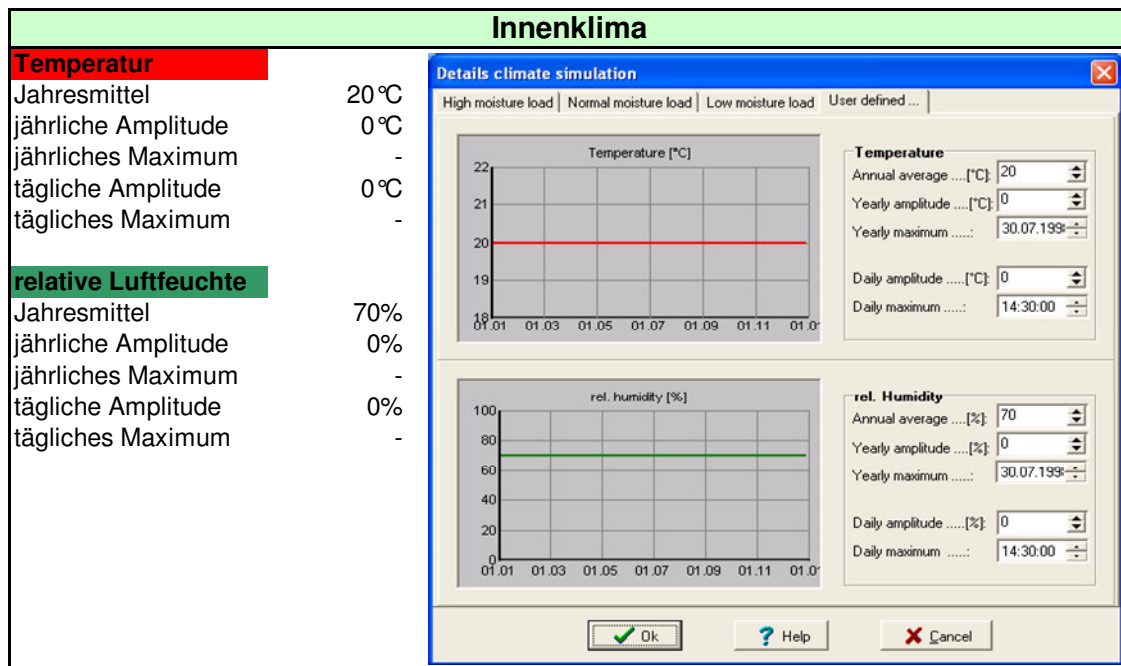


## A.5 Variante 5 – konstant 70% relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum

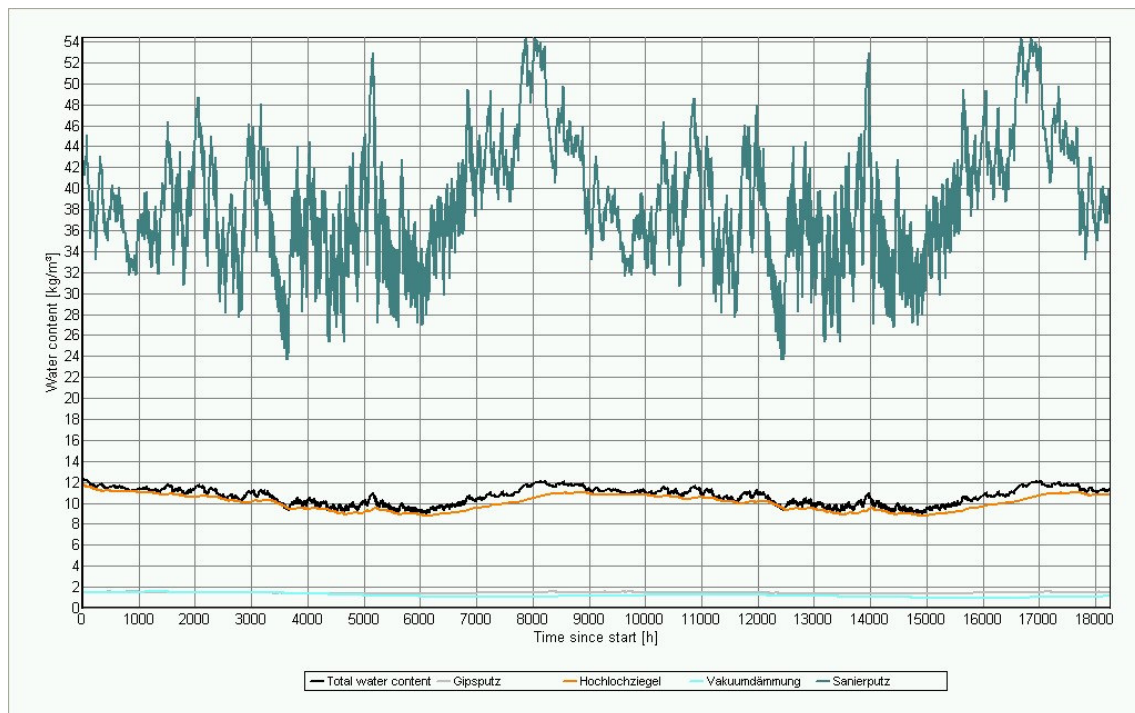
### A.5.1 Eingabe der Konstruktion

Siehe Variante 5.

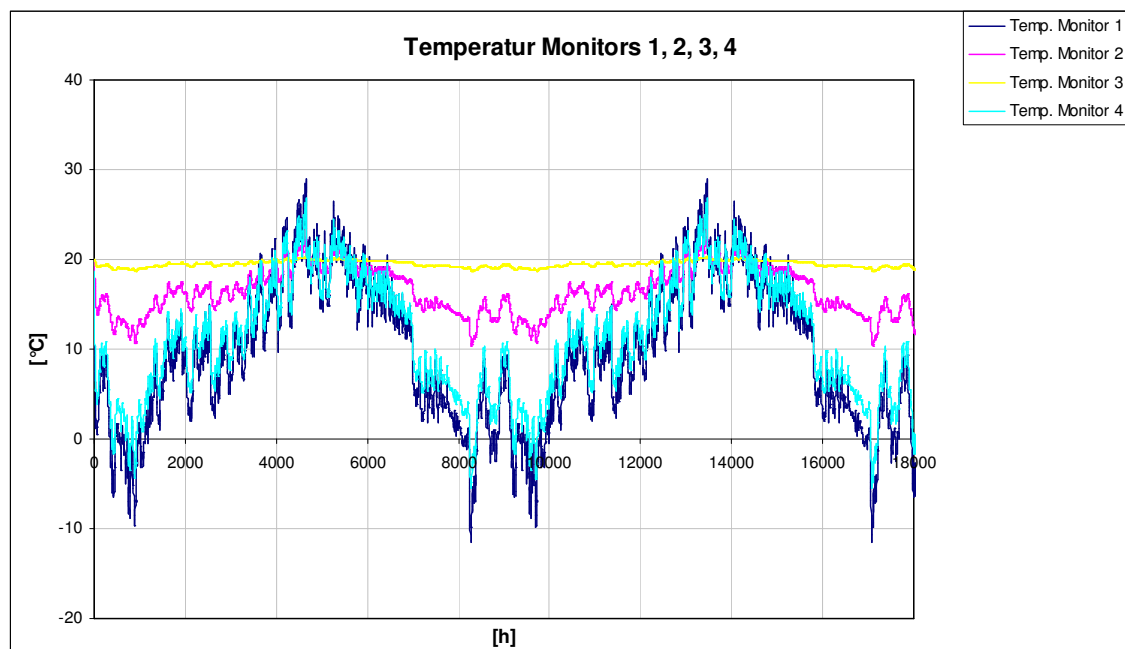
### A.5.2 Abweichende Randbedingungen an der Raumseite

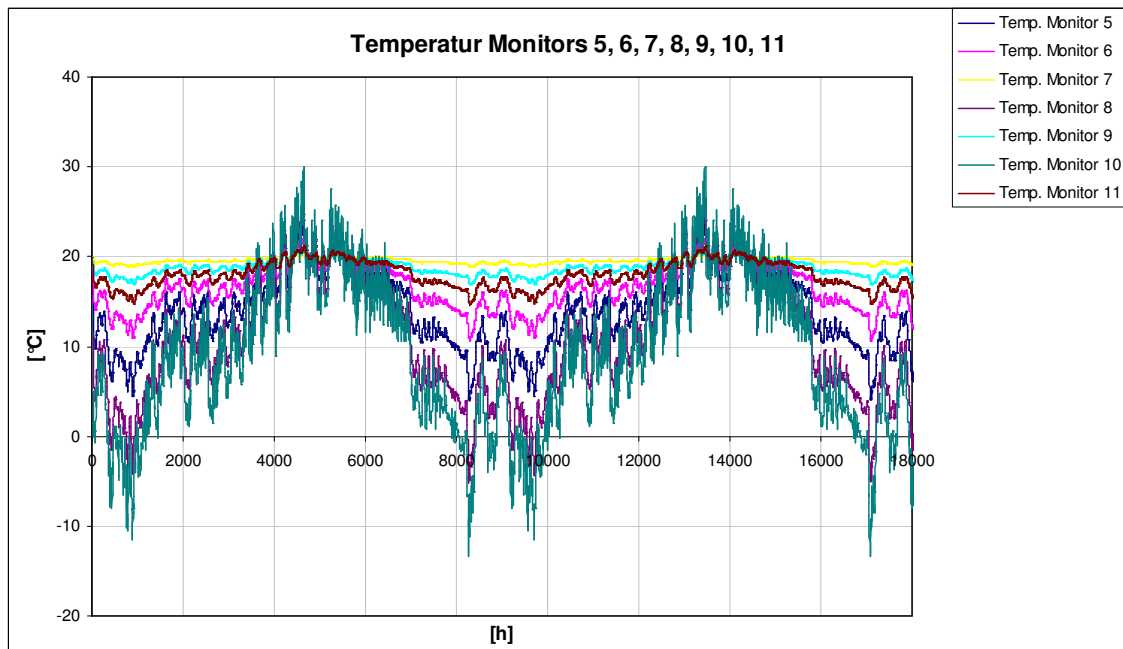


### A.5.3 Wassergehalte der einzelnen Materialschichten

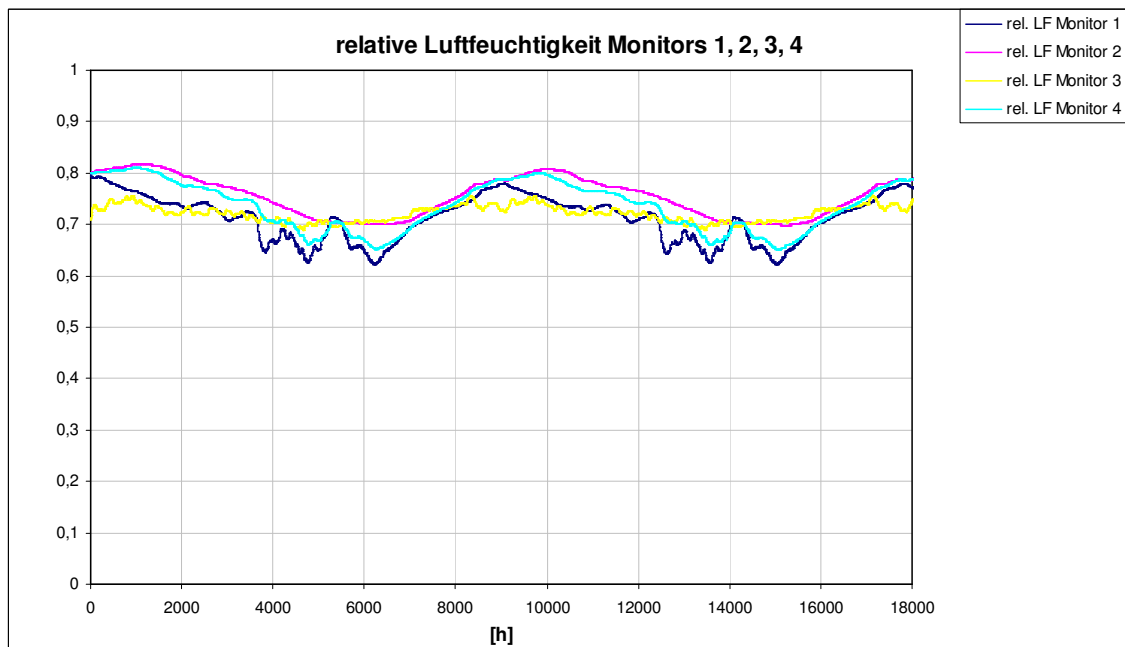


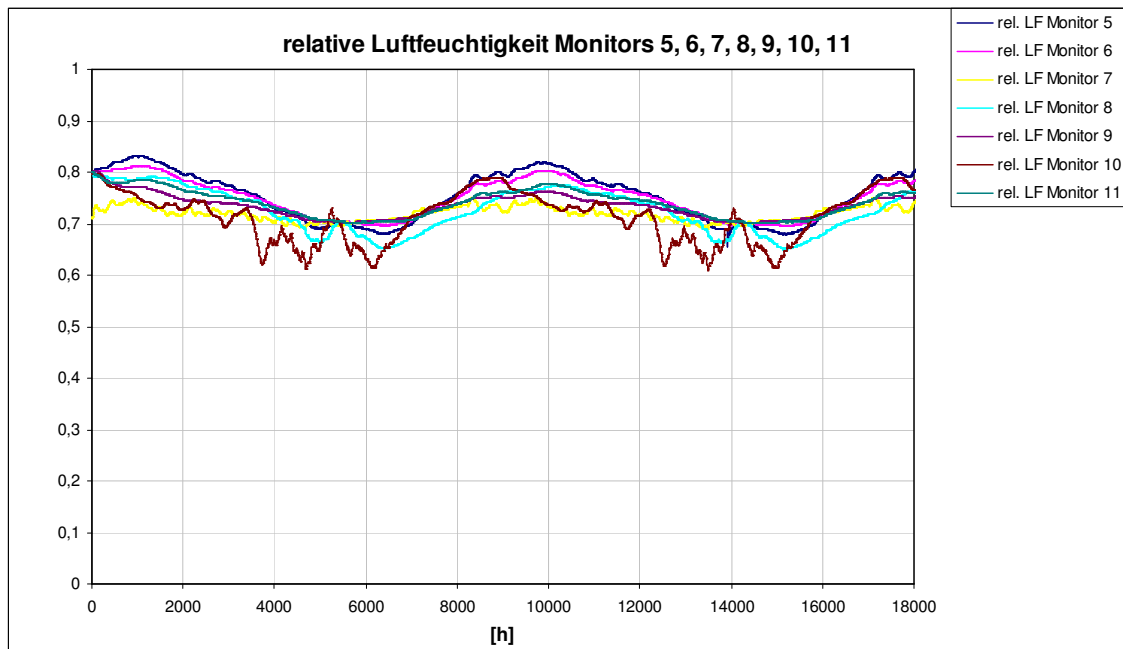
### A.5.4 Temperaturverteilung der Monitorpositionen



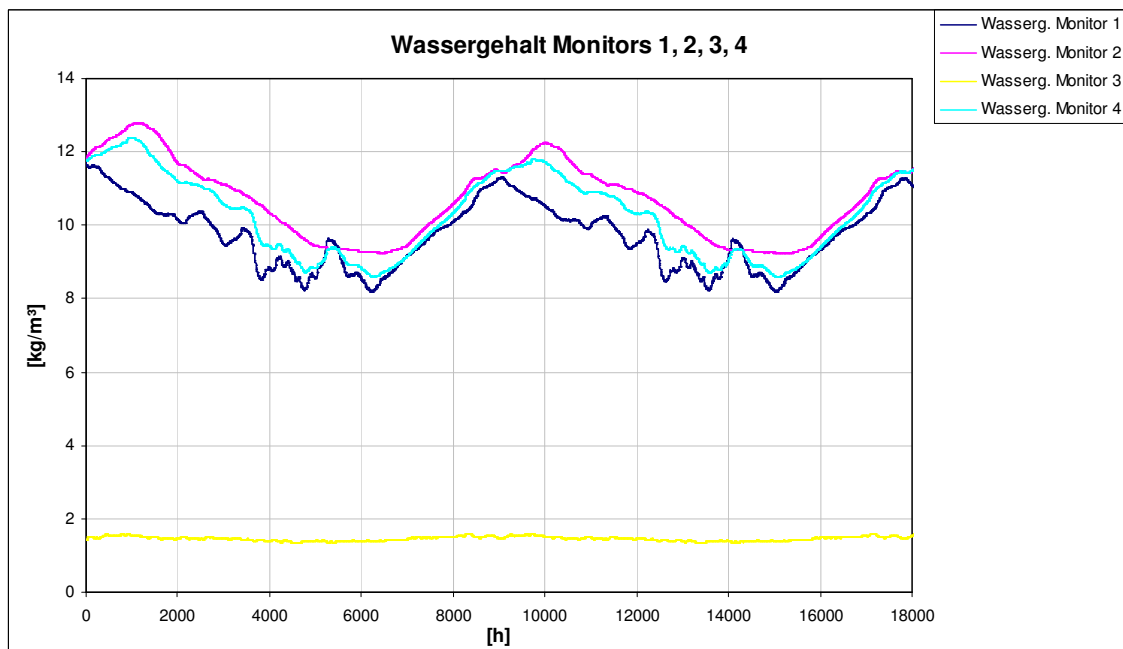


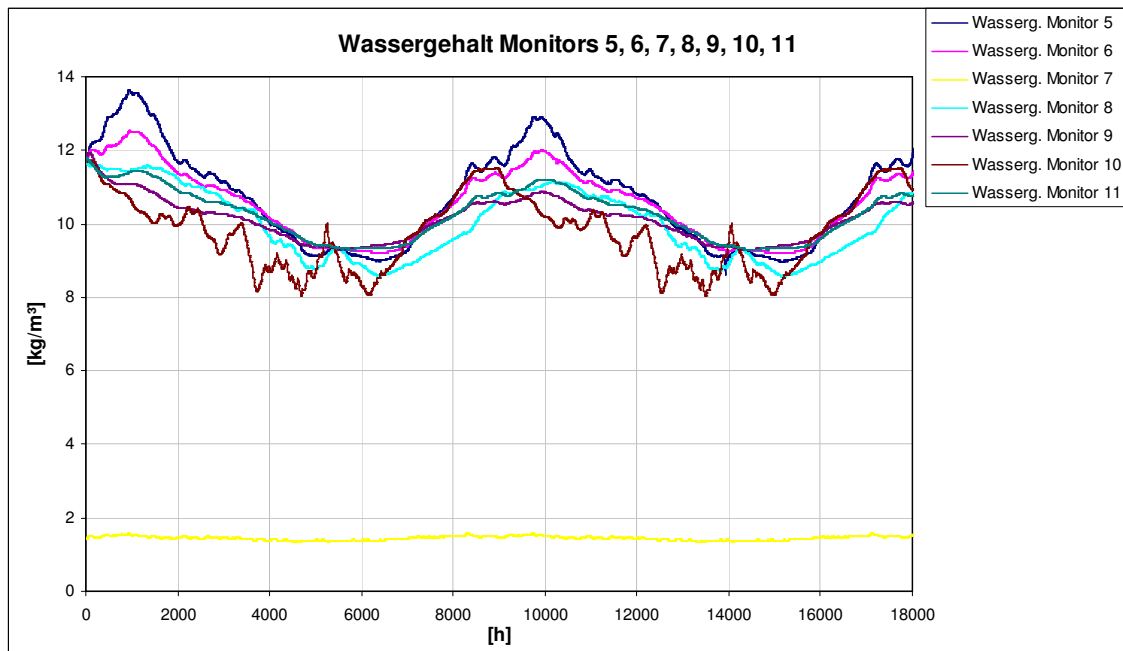
#### A.5.5 Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen



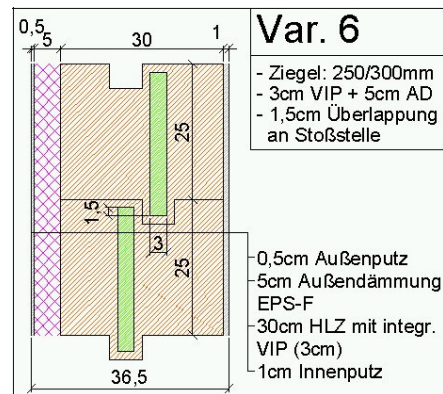


### A.5.6 Wassergehalt der Monitorpositionen

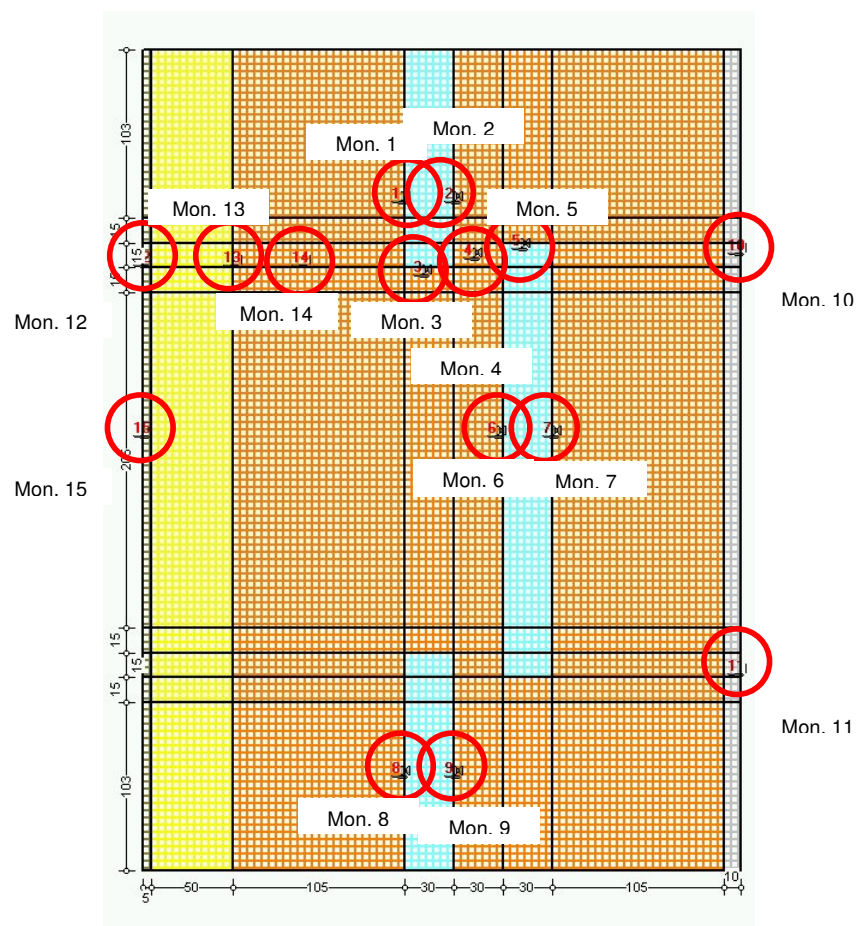




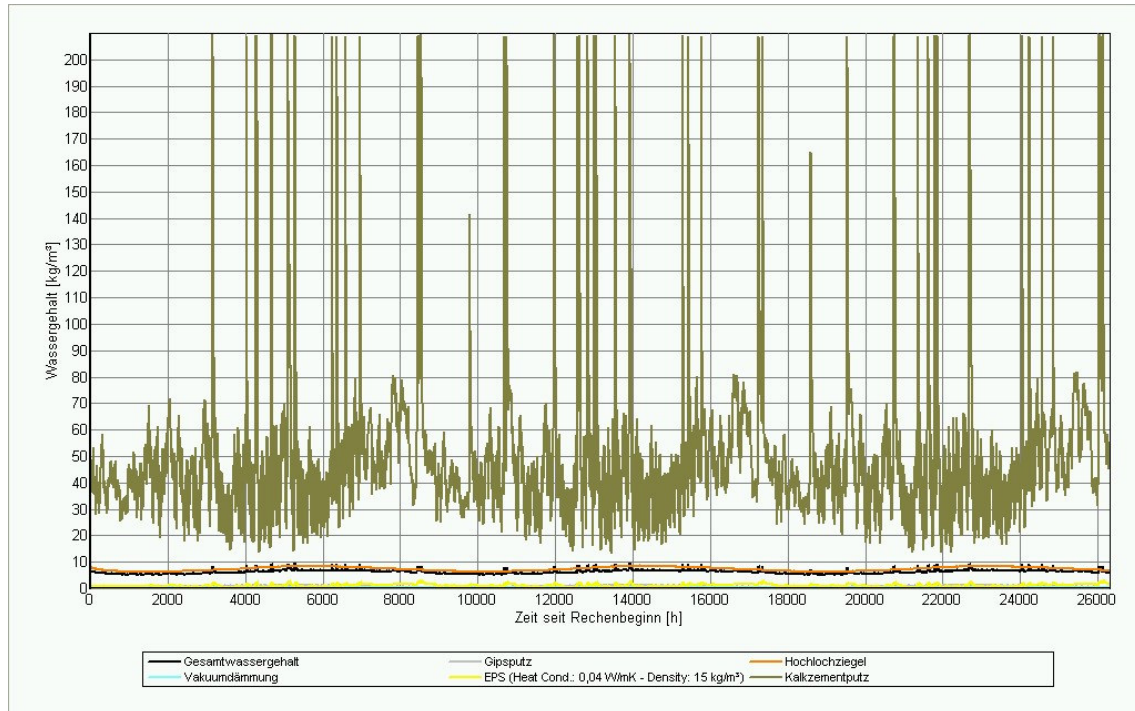
## A.6 Variante 6



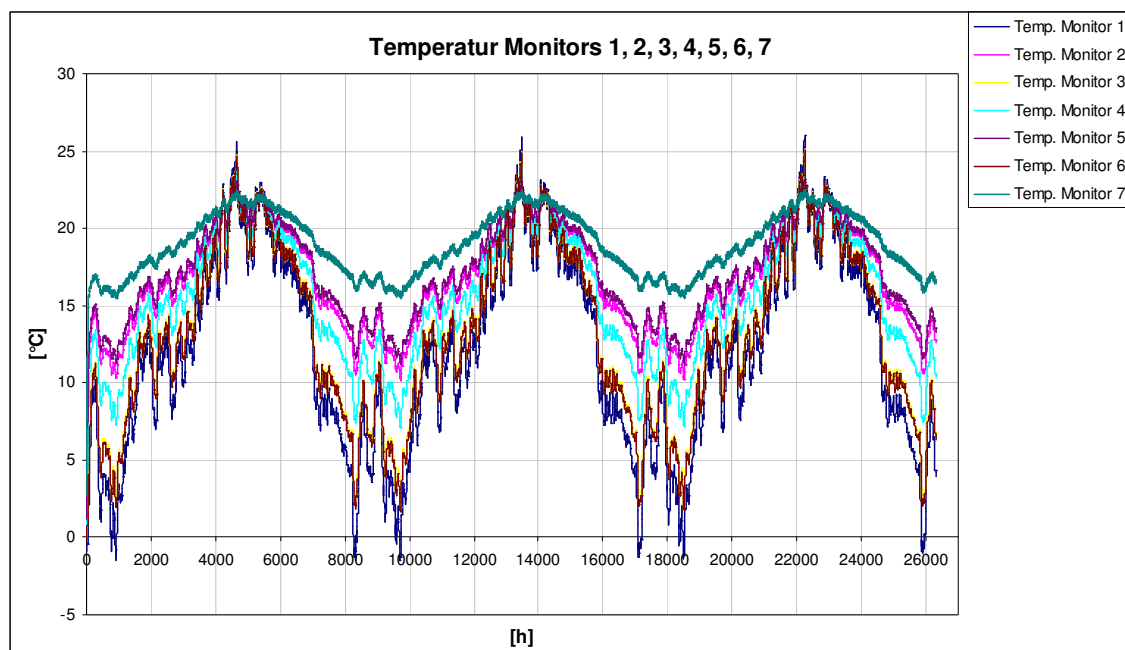
### A.6.1 Eingabe der Konstruktion

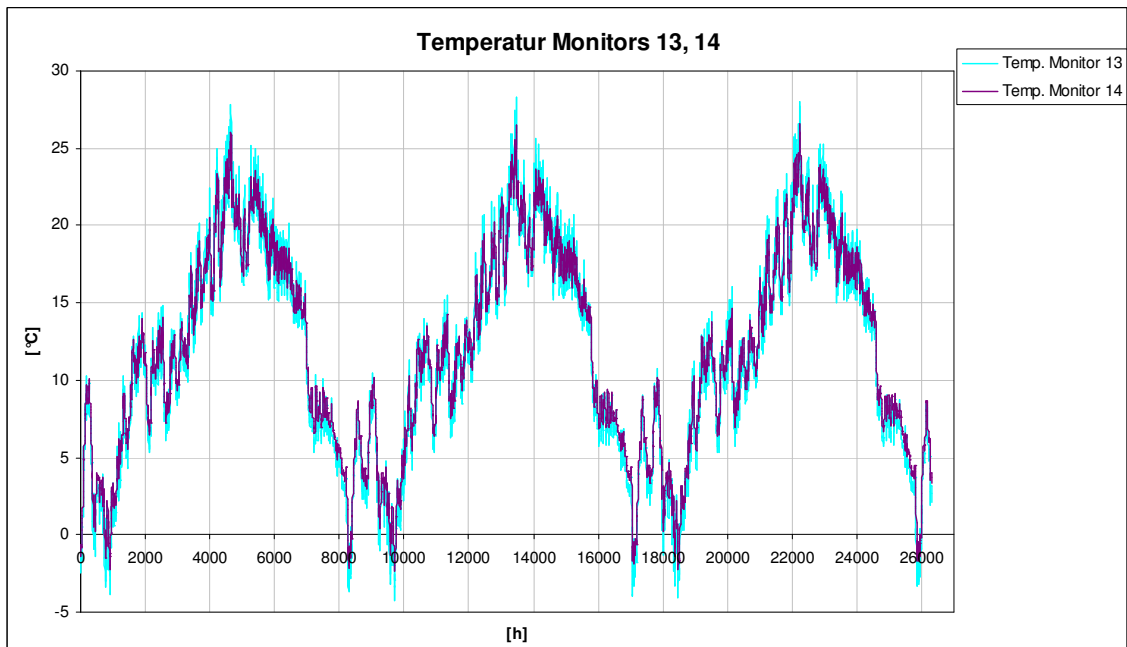
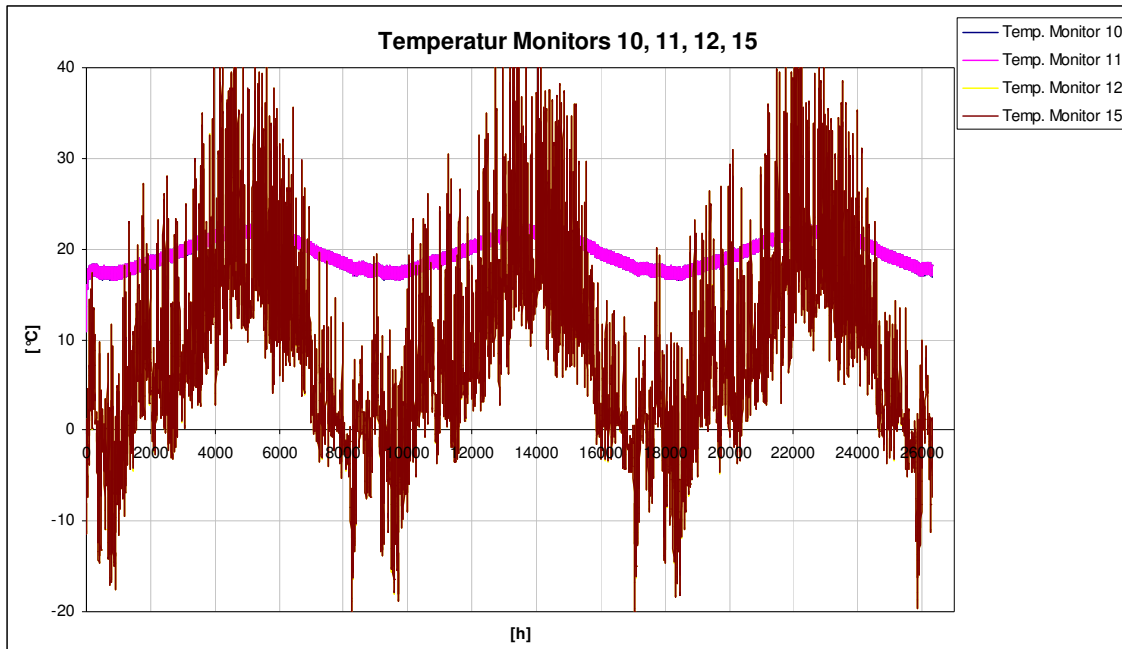


## A.6.2 Wassergehalte der einzelnen Materialschichten

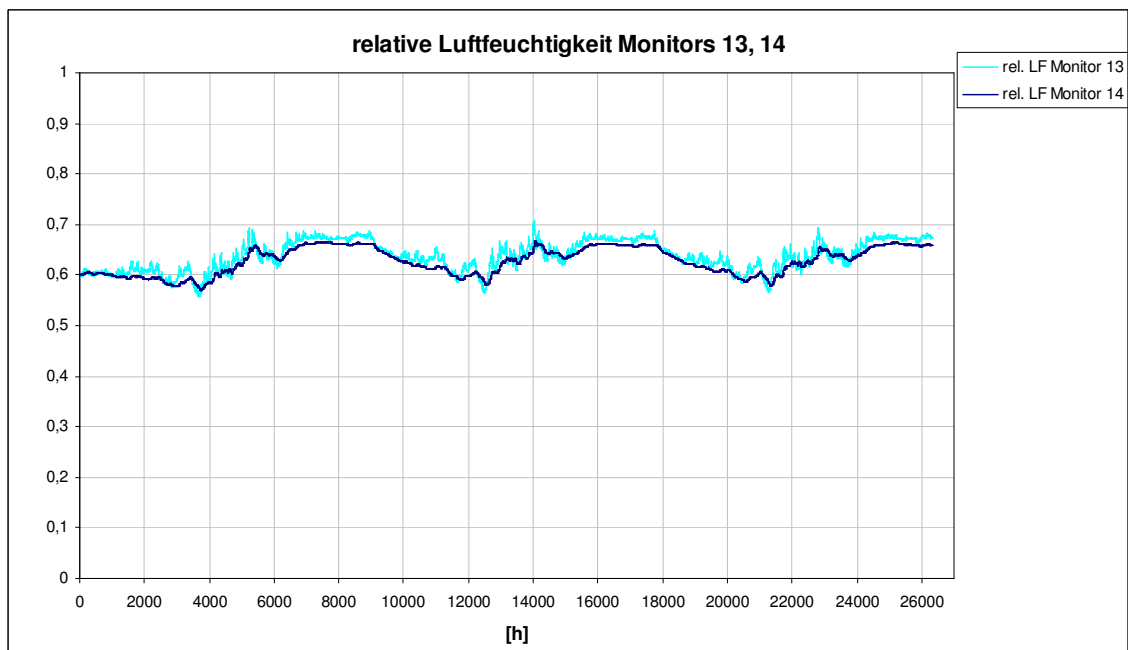
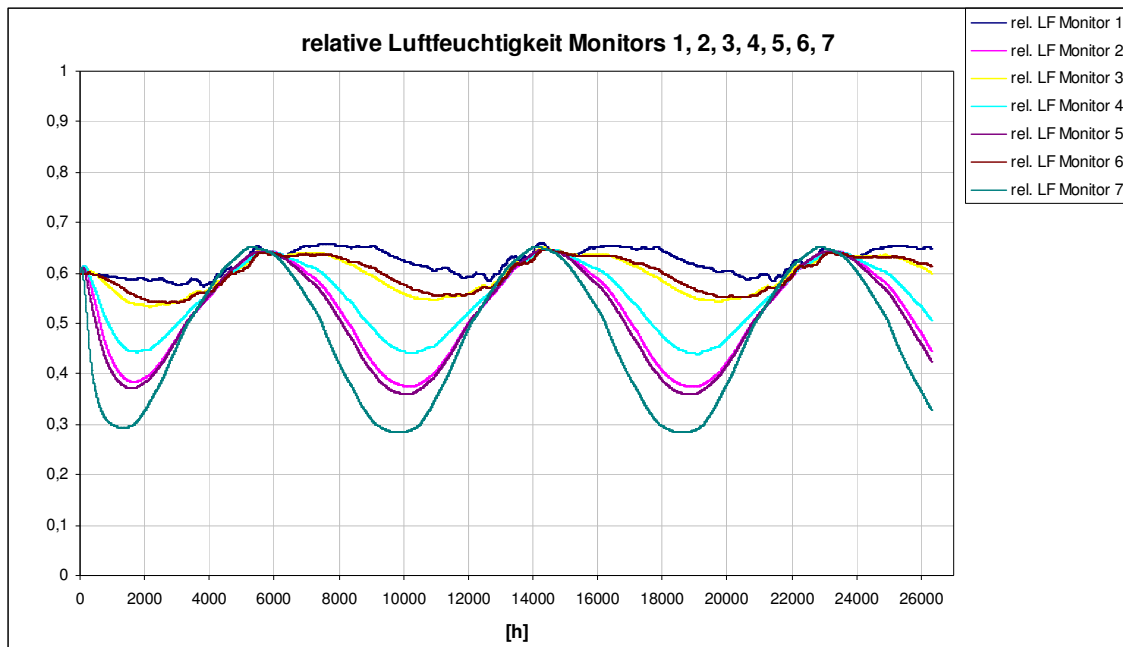


## A.6.3 Temperaturverteilung der Monitorpositionen

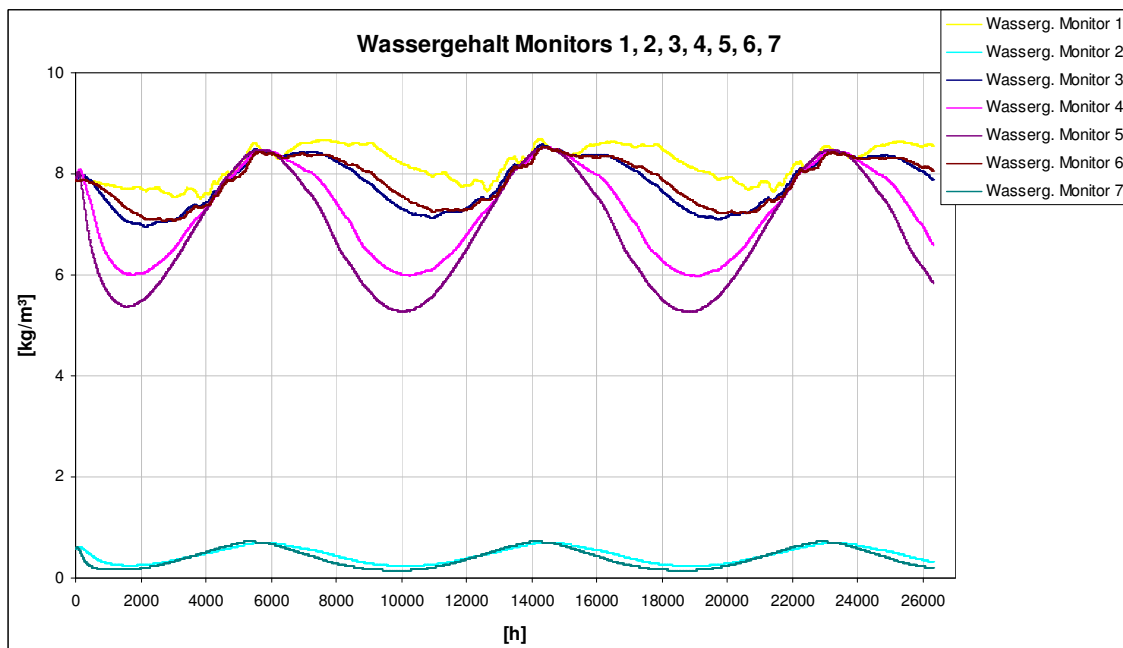
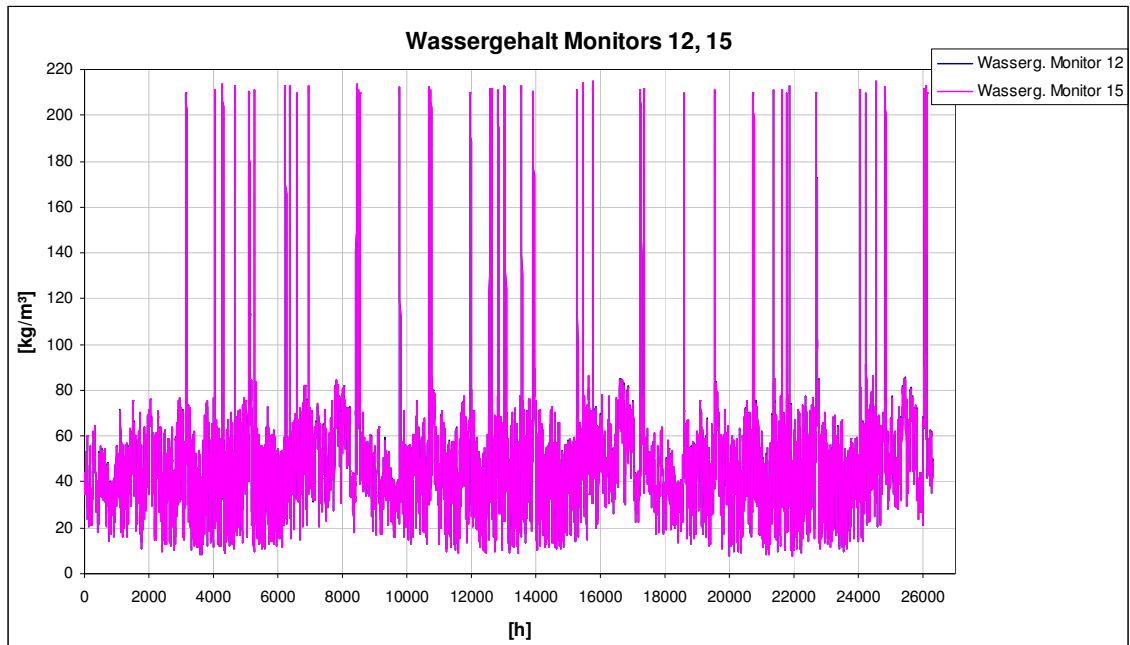


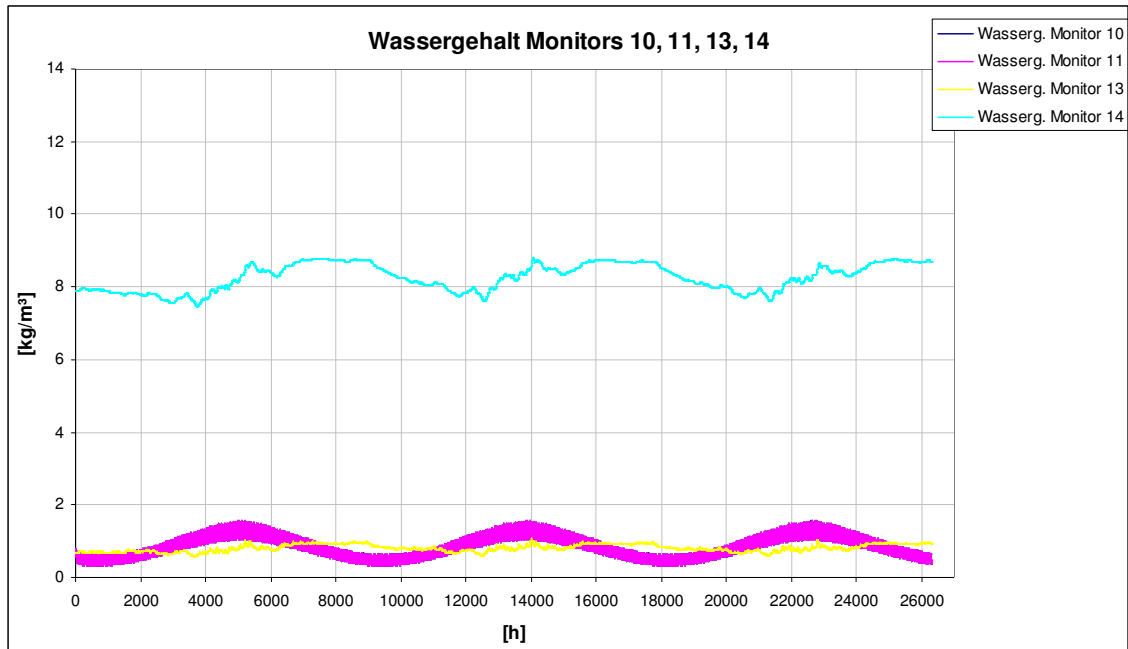


#### A.6.4 Relative Feuchtigkeitsverteilung der Monitorpositionen



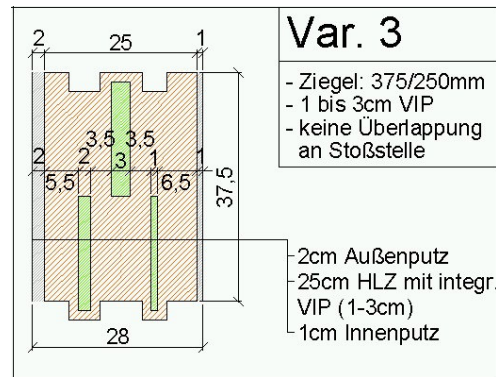
### A.6.5 Wassergehalt der Monitorpositionen





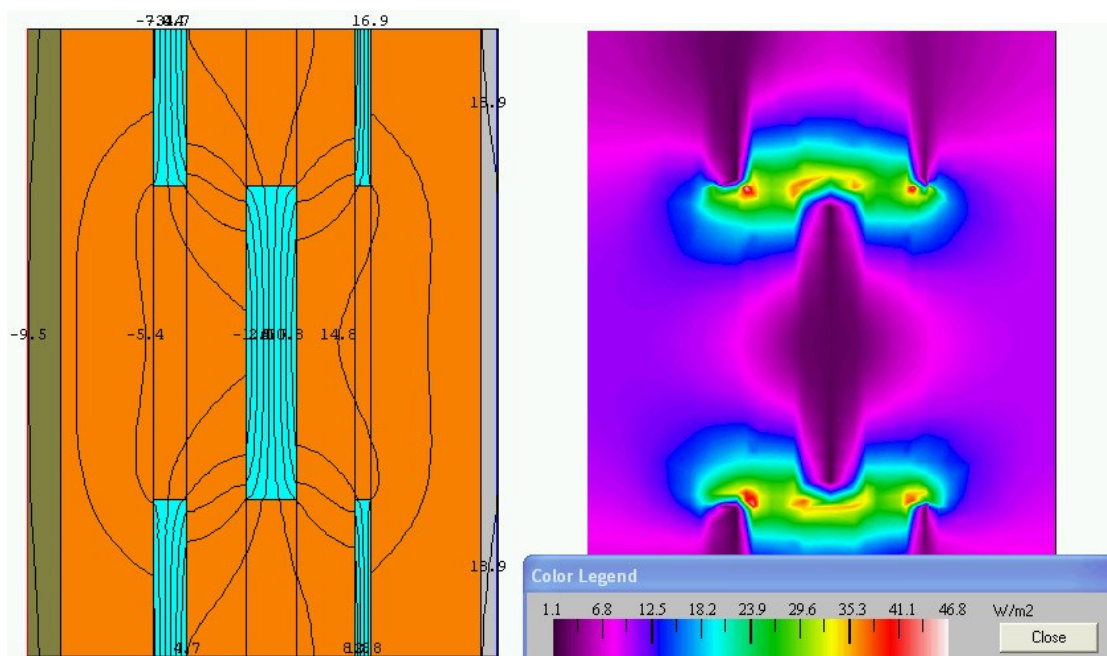
## Anhang B Berechnungsergebnisse ausgewählter Varianten aus THERM 5

### B.1 Variante 3

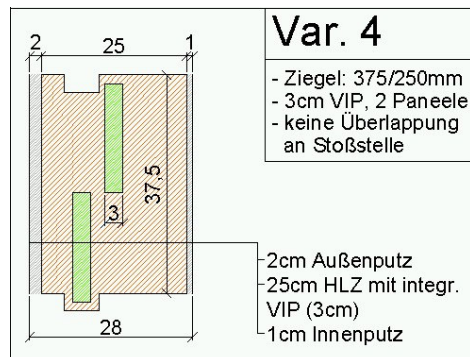


- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (25cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

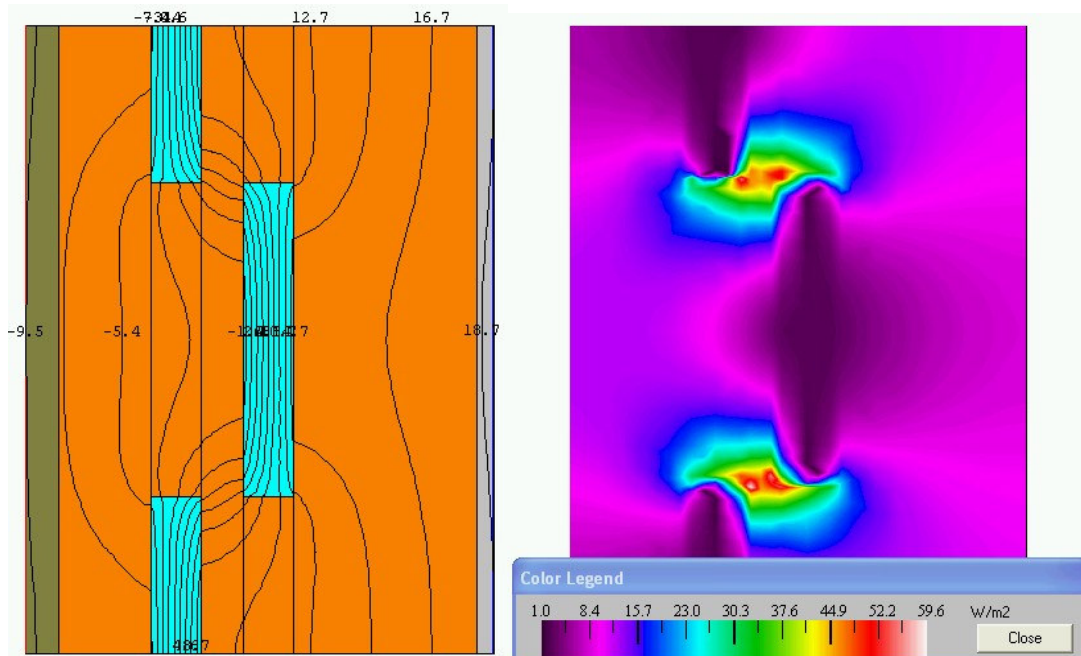


## B.2 Variante 4

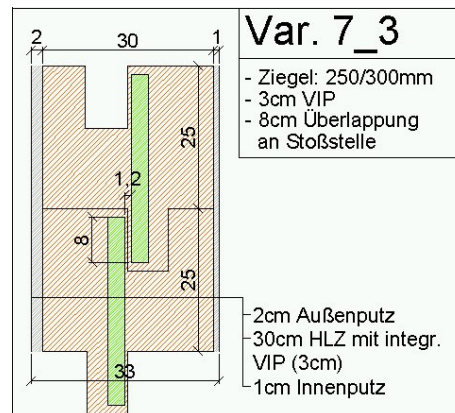


- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,63 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (25cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,11 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,32 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

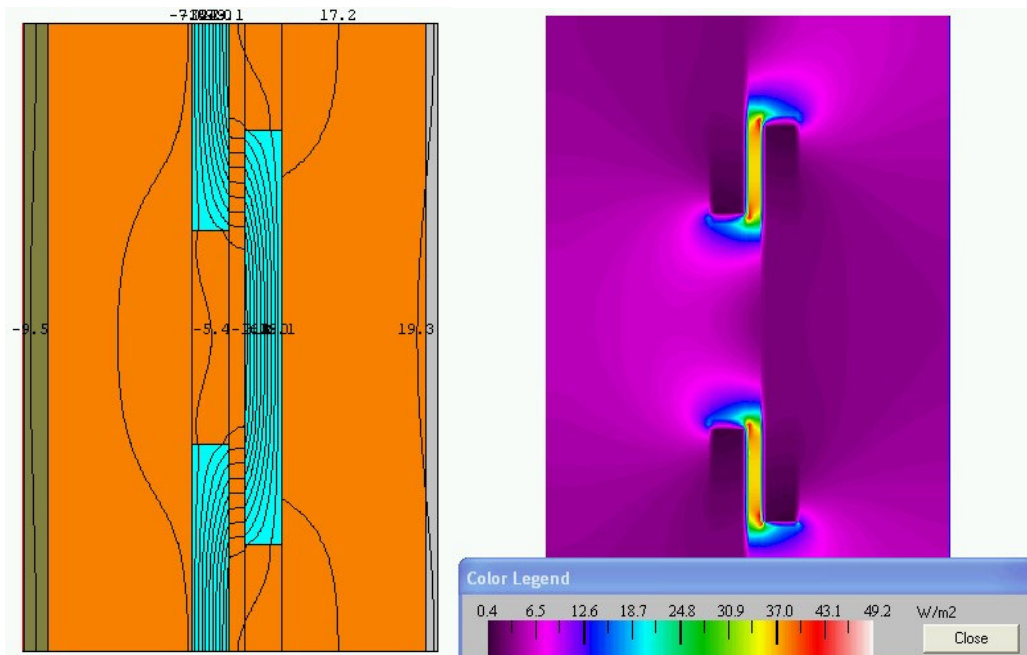


### B.3 Variante 7\_3

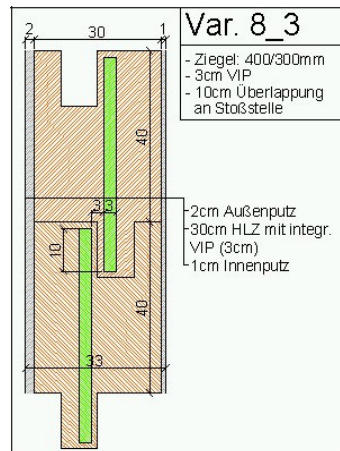


- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (30cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

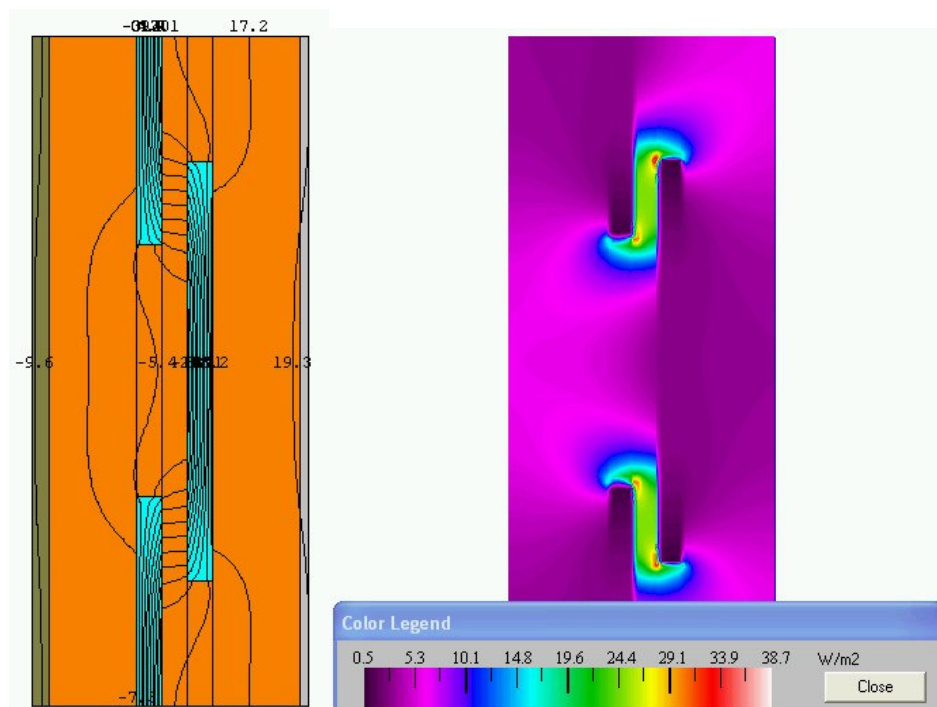


## B.4 Variante 8\_3

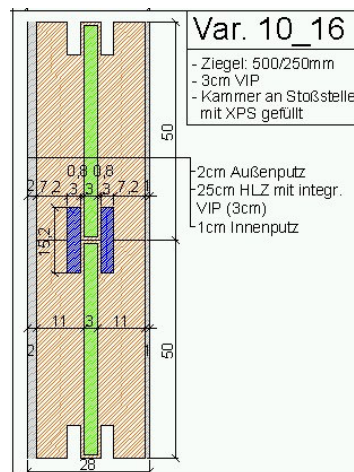


- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,55 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (30cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.

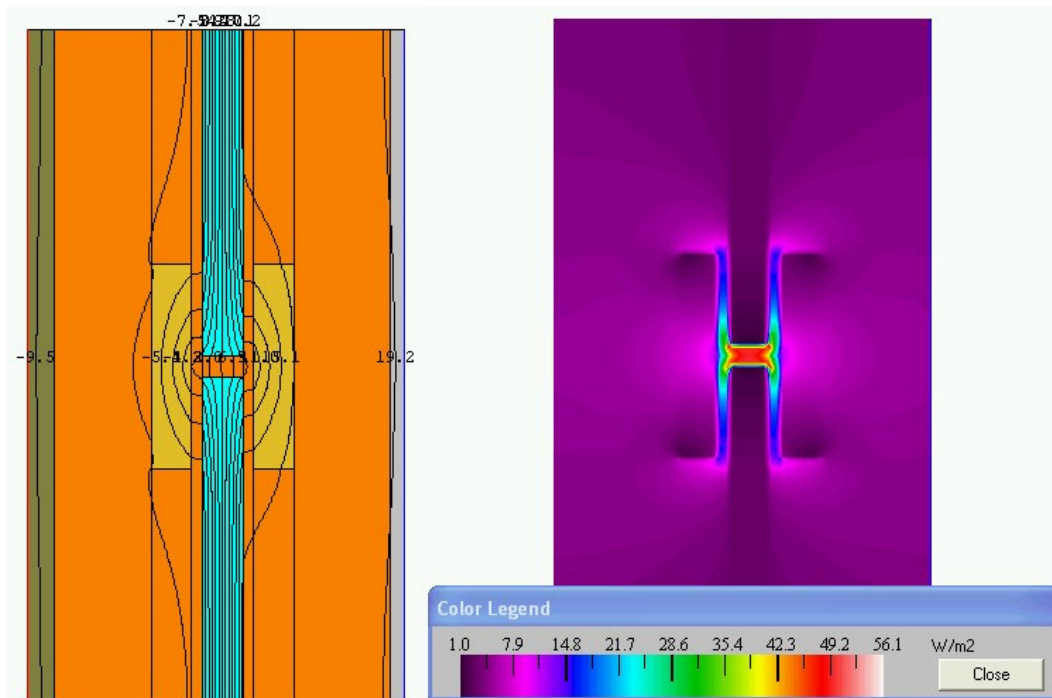


## B.5 Variante 10\_16



- $U_{\text{ohne VIP}} = 0,63 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (25cm Ziegelwand ohne VIP)
- $U_{\text{homogen}} = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (OHNE Berücksichtigung von Wärmebrücken)
- $U_{\text{vorhanden}} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (MIT Berücksichtigung von Wärmebrücken lt. THERM)

Angabe der U- Werte ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste über die Lagerfuge.



## Anhang C Darstellungen der U- Werte und Schichtstärken der Varianten und Verbesserungsvorschläge in tabellarischer Form

Gegenüberstellung der Ersparnisse der Wandstärken OHNE Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßstellenbereich:

| VIP-Ziegel             |  |  |  | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |  |  |  | Ersparnis bei Wandstärke |  |
|------------------------|--|--|--|---------------------------------|--|--|--|--------------------------|--|
| Var 1                  |  |  |  | Var 1                           |  |  |  | 0,195m                   |  |
| Gesamtstärke 0,280 [m] |  |  |  | Gesamtstärke 0,475 [m]          |  |  |  | 41,05%                   |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |
|                        |  |  |  |                                 |  |  |  |                          |  |

| VIP-Ziegel   |       |                 |         | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                 |         | Ersparnis bei Wandstärke             |
|--------------|-------|-----------------|---------|---------------------------------|-------|-----------------|---------|--------------------------------------|
| <b>Var 3</b> |       |                 |         | <b>Var 3</b>                    |       |                 |         |                                      |
| Gesamtstärke |       | 0,280 [m]       |         | Gesamtstärke                    |       | 0,565 [m]       |         | R= 8,93 [m²K/W]<br>U= 0,11 [W/(m²K)] |
|              | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |                                 | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |                                      |
|              |       | Rse             | 0,04    |                                 |       | Rse             | 0,04    |                                      |
| San-Putz     | 0,020 | 0,130           | 0,15    | KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800           | 0,01    |                                      |
| HLZ          | 0,055 | 0,208           | 0,26    | EPS-F                           | 0,300 | 0,040           | 7,50    |                                      |
| VIP          | 0,020 | 0,004           | 5,00    | HLZ                             | 0,250 | 0,208           | 1,20    |                                      |
| HLZ          | 0,100 | 0,208           | 0,48    | Gipsputz                        | 0,010 | 0,200           | 0,05    |                                      |
| VIP          | 0,010 | 0,004           | 2,50    |                                 |       | Rsi             | 0,13    |                                      |
| HLZ          | 0,065 | 0,208           | 0,31    |                                 |       |                 |         |                                      |
| Gipsputz     | 0,010 | 0,200           | 0,05    |                                 |       |                 |         |                                      |
|              |       | Rsi             | 0,13    |                                 |       |                 |         |                                      |
| VIP-Ziegel   |       |                 |         | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                 |         | Ersparnis bei Wandstärke             |
| <b>Var 4</b> |       |                 |         | <b>Var 4</b>                    |       |                 |         |                                      |
| Gesamtstärke |       | 0,280 [m]       |         | Gesamtstärke                    |       | 0,565 [m]       |         | R= 8,93 [m²K/W]<br>U= 0,11 [W/(m²K)] |
|              | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |                                 | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |                                      |
|              |       | Rse             | 0,04    |                                 |       | Rse             | 0,04    |                                      |
| San-Putz     | 0,020 | 0,130           | 0,15    | KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800           | 0,01    |                                      |
| HLZ          | 0,055 | 0,208           | 0,26    | EPS-F                           | 0,300 | 0,040           | 7,50    |                                      |
| VIP          | 0,030 | 0,004           | 7,50    | HLZ                             | 0,250 | 0,208           | 1,20    |                                      |
| HLZ          | 0,165 | 0,208           | 0,79    | Gipsputz                        | 0,010 | 0,200           | 0,05    |                                      |
| Gipsputz     | 0,010 | 0,200           | 0,05    |                                 |       | Rsi             | 0,13    |                                      |
|              |       | Rsi             | 0,13    |                                 |       |                 |         |                                      |
| VIP-Ziegel   |       |                 |         | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                 |         | Ersparnis bei Wandstärke             |
| <b>Var 5</b> |       |                 |         | <b>Var 5</b>                    |       |                 |         |                                      |
| Gesamtstärke |       | 0,330 [m]       |         | Gesamtstärke                    |       | 0,615 [m]       |         | R= 9,17 [m²K/W]<br>U= 0,11 [W/(m²K)] |
|              | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |                                 | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |                                      |
|              |       | Rse             | 0,04    |                                 |       | Rse             | 0,04    |                                      |
| San-Putz     | 0,020 | 0,130           | 0,15    | KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800           | 0,01    |                                      |
| HLZ          | 0,105 | 0,208           | 0,50    | EPS-F                           | 0,300 | 0,040           | 7,50    |                                      |
| VIP          | 0,030 | 0,004           | 7,50    | HLZ                             | 0,300 | 0,208           | 1,44    |                                      |
| HLZ          | 0,165 | 0,208           | 0,79    | Gipsputz                        | 0,010 | 0,200           | 0,05    |                                      |
| Gipsputz     | 0,010 | 0,200           | 0,05    |                                 |       | Rsi             | 0,13    |                                      |
|              |       | Rsi             | 0,13    |                                 |       |                 |         |                                      |

| VIP-Ziegel   |       |                 |          | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                 |          | Ersparnis bei Wandstärke |
|--------------|-------|-----------------|----------|---------------------------------|-------|-----------------|----------|--------------------------|
| Var 6_5cm AD |       |                 |          | Var 6_5cm AD                    |       |                 |          |                          |
| Gesamtstärke |       | 0,365 [m]       |          | Gesamtstärke                    |       | 0,665 [m]       |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W]  |                                 | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W]  |                          |
|              |       |                 | Rse 0,04 |                                 |       |                 | Rse 0,04 |                          |
| KZ-Putz      | 0,005 | 0,800           | 0,01     | KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800           | 0,01     |                          |
| EPS-F        | 0,050 | 0,040           | 1,25     | EPS-F                           | 0,350 | 0,040           | 8,75     |                          |
| HLZ          | 0,105 | 0,208           | 0,50     | HLZ                             | 0,300 | 0,208           | 1,44     |                          |
| VIP          | 0,030 | 0,004           | 7,50     | Gipsputz                        | 0,010 | 0,200           | 0,05     |                          |
| HLZ          | 0,165 | 0,208           | 0,79     |                                 |       |                 | Rsi 0,13 |                          |
| Gipsputz     | 0,010 | 0,200           | 0,05     |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 | Rsi 0,13 |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |
|              |       |                 |          |                                 |       |                 |          |                          |

## Gegenüberstellung der Ersparnisse der Wandstärken MIT Berücksichtigung der Wärmebrücken im Stoßstellenbereich:

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen)                  | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Ersparnis bei Wandstärke |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|---------|--|-----|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|--|-----|------|------------------|
| <b>Var 1</b><br>$R=$ 4,18 [m²K/W]<br>$U=$ 0,24 [W/(m²K)]<br><br>Gesamtstärke 0,280 [m] | <b>Var 1</b><br>Gesamtstärke 0,375 [m]<br><table> <tr> <th>s [m]</th><th>lambda [W/(mK)]</th><th>[m²K/W]</th></tr> <tr> <td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr> <tr> <td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr> <tr> <td>EPS-F</td><td>0,110</td><td>0,040</td></tr> <tr> <td>HLZ</td><td>0,250</td><td>0,208</td></tr> <tr> <td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr> <tr> <td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr> </table> $R=$ 4,18 [m²K/W]<br>$U=$ 0,24 [W/(m²K)] | s [m]                    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,110 | 0,040 | HLZ | 0,250 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 | 0,095m<br>25,33% |
| s [m]                                                                                  | lambda [W/(mK)]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | [m²K/W]                  |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
|                                                                                        | Rse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,04                     |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| KZ-Putz                                                                                | 0,005                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,800                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| EPS-F                                                                                  | 0,110                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,040                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| HLZ                                                                                    | 0,250                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,208                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| Gipsputz                                                                               | 0,010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,200                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
|                                                                                        | Rsi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,13                     |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| <b>Var 2</b><br>$R=$ 3,22 [m²K/W]<br>$U=$ 0,31 [W/(m²K)]<br><br>Gesamtstärke 0,280 [m] | <b>Var 2</b><br>Gesamtstärke 0,335 [m]<br><table> <tr> <th>s [m]</th><th>lambda [W/(mK)]</th><th>[m²K/W]</th></tr> <tr> <td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr> <tr> <td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr> <tr> <td>EPS-F</td><td>0,070</td><td>0,040</td></tr> <tr> <td>HLZ</td><td>0,250</td><td>0,208</td></tr> <tr> <td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr> <tr> <td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr> </table> $R=$ 3,18 [m²K/W]<br>$U=$ 0,31 [W/(m²K)] | s [m]                    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,070 | 0,040 | HLZ | 0,250 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 | 0,055m<br>16,42% |
| s [m]                                                                                  | lambda [W/(mK)]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | [m²K/W]                  |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
|                                                                                        | Rse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,04                     |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| KZ-Putz                                                                                | 0,005                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,800                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| EPS-F                                                                                  | 0,070                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,040                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| HLZ                                                                                    | 0,250                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,208                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| Gipsputz                                                                               | 0,010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,200                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
|                                                                                        | Rsi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,13                     |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| <b>Var 3</b><br>$R=$ 3,51 [m²K/W]<br>$U=$ 0,29 [W/(m²K)]<br><br>Gesamtstärke 0,280 [m] | <b>Var 3</b><br>Gesamtstärke 0,345 [m]<br><table> <tr> <th>s [m]</th><th>lambda [W/(mK)]</th><th>[m²K/W]</th></tr> <tr> <td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr> <tr> <td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr> <tr> <td>EPS-F</td><td>0,080</td><td>0,040</td></tr> <tr> <td>HLZ</td><td>0,250</td><td>0,208</td></tr> <tr> <td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr> <tr> <td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr> </table> $R=$ 3,43 [m²K/W]<br>$U=$ 0,29 [W/(m²K)] | s [m]                    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,080 | 0,040 | HLZ | 0,250 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 | 0,065m<br>18,84% |
| s [m]                                                                                  | lambda [W/(mK)]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | [m²K/W]                  |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
|                                                                                        | Rse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,04                     |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| KZ-Putz                                                                                | 0,005                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,800                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| EPS-F                                                                                  | 0,080                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,040                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| HLZ                                                                                    | 0,250                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,208                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
| Gipsputz                                                                               | 0,010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 0,200                    |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |
|                                                                                        | Rsi                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0,13                     |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |                  |

|                                                                       |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                        |                                      |                  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|---------|--|-----|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|--|-----|------|
| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) |                                      | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                        |                                      |                  | Ersparnis bei Wandstärke |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Var 4                                                                 | R= 3,13 [m²K/W]<br>U= 0,32 [W/(m²K)] | Var 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Gesamtstärke 0,330 [m] | R= 3,05 [m²K/W]<br>U= 0,33 [W/(m²K)] | 0,050m<br>15,15% |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Gesamtstärke 0,280 [m]                                                |                                      | <table><tr><td>s [m]</td><td>lambda [W/(mK)]</td><td>[m²K/W]</td></tr><tr><td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr><tr><td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr><tr><td>EPS-F</td><td>0,065</td><td>0,040</td></tr><tr><td>HLZ</td><td>0,250</td><td>0,208</td></tr><tr><td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr><tr><td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr></table> |                        |                                      |                  | s [m]                    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,065 | 0,040 | HLZ | 0,250 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 |
| s [m]                                                                 | lambda [W/(mK)]                      | [m²K/W]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                        |                                      |                  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|                                                                       | Rse                                  | 0,04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                        |                                      |                  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| KZ-Putz                                                               | 0,005                                | 0,800                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                                      |                  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| EPS-F                                                                 | 0,065                                | 0,040                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                                      |                  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| HLZ                                                                   | 0,250                                | 0,208                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                                      |                  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Gipsputz                                                              | 0,010                                | 0,200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                        |                                      |                  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|                                                                       | Rsi                                  | 0,13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                        |                                      |                  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) | | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F | | | | Ersparnis bei Wandstärke | |
| Var 5 | R= 4,08 [m²K/W] U= 0,25 [W/(m²K)] | Var 5 | Gesamtstärke 0,410 [m] | R= 4,04 [m²K/W] U= 0,25 [W/(m²K)] | 0,080m 19,51% |
| Gesamtstärke 0,330 [m] | | |          |                 |         | |----------|-----------------|---------| | s [m]    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] | |          | Rse             | 0,04    | | KZ-Putz  | 0,005           | 0,800   | | EPS-F    | 0,095           | 0,040   | | HLZ      | 0,300           | 0,208   | | Gipsputz | 0,010           | 0,200   | |          | Rsi             | 0,13    | | | | |
| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) | | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F | | | | Ersparnis bei Wandstärke | |
| Var 6\_AD (5cm) | R= 5,21 [m²K/W] U= 0,19 [W/(m²K)] | Var 6\_5cm AD | Gesamtstärke 0,455 [m] | R= 5,17 [m²K/W] U= 0,19 [W/(m²K)] | 0,090m 19,78% |
| Gesamtstärke 0,365 [m] | | |          |                 |         | |----------|-----------------|---------| | s [m]    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] | |          | Rse             | 0,04    | | KZ-Putz  | 0,005           | 0,800   | | EPS-F    | 0,140           | 0,040   | | HLZ      | 0,300           | 0,208   | | Gipsputz | 0,010           | 0,200   | |          | Rsi             | 0,13    | | | | |

|                                                                       |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--------------------------------------|--------------------------|------------------|-------|-----------------|---------|--|-----|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|--|-----|------|
| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) |                                      | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |  |                                      | Ersparnis bei Wandstärke |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Var 7_1                                                               | R= 4,98 [m²K/W]<br>U= 0,20 [W/(m²K)] | Var 7_1<br>Gesamtstärke 0,445 [m]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |  | R= 4,92 [m²K/W]<br>U= 0,20 [W/(m²K)] |                          | 0,115m<br>25,84% |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Gesamtstärke 0,330 [m]                                                |                                      | <table><tr><td>s [m]</td><td>lambda [W/(mK)]</td><td>[m²K/W]</td></tr><tr><td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr><tr><td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr><tr><td>EPS-F</td><td>0,130</td><td>0,040</td></tr><tr><td>HLZ</td><td>0,300</td><td>0,208</td></tr><tr><td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr><tr><td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr></table> |  |  |                                      |                          |                  | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,130 | 0,040 | HLZ | 0,300 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 |
| s [m]                                                                 | lambda [W/(mK)]                      | [m²K/W]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|                                                                       | Rse                                  | 0,04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| KZ-Putz                                                               | 0,005                                | 0,800                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| EPS-F                                                                 | 0,130                                | 0,040                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| HLZ                                                                   | 0,300                                | 0,208                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Gipsputz                                                              | 0,010                                | 0,200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|                                                                       | Rsi                                  | 0,13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |

|                                                                       |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--------------------------------------|--------------------------|------------------|-------|-----------------|---------|--|-----|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|--|-----|------|
| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) |                                      | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |  |                                      | Ersparnis bei Wandstärke |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Var 7_2                                                               | R= 6,02 [m²K/W]<br>U= 0,17 [W/(m²K)] | Var 7_2<br>Gesamtstärke 0,485 [m]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |  | R= 5,92 [m²K/W]<br>U= 0,17 [W/(m²K)] |                          | 0,155m<br>31,96% |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Gesamtstärke 0,330 [m]                                                |                                      | <table><tr><td>s [m]</td><td>lambda [W/(mK)]</td><td>[m²K/W]</td></tr><tr><td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr><tr><td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr><tr><td>EPS-F</td><td>0,170</td><td>0,040</td></tr><tr><td>HLZ</td><td>0,300</td><td>0,208</td></tr><tr><td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr><tr><td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr></table> |  |  |                                      |                          |                  | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,170 | 0,040 | HLZ | 0,300 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 |
| s [m]                                                                 | lambda [W/(mK)]                      | [m²K/W]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|                                                                       | Rse                                  | 0,04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| KZ-Putz                                                               | 0,005                                | 0,800                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| EPS-F                                                                 | 0,170                                | 0,040                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| HLZ                                                                   | 0,300                                | 0,208                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Gipsputz                                                              | 0,010                                | 0,200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|                                                                       | Rsi                                  | 0,13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |

|                                                                       |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--------------------------------------|--------------------------|------------------|-------|-----------------|---------|--|-----|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|--|-----|------|
| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) |                                      | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |  |                                      | Ersparnis bei Wandstärke |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Var 7_3                                                               | R= 6,80 [m²K/W]<br>U= 0,15 [W/(m²K)] | Var 7_2<br>Gesamtstärke 0,515 [m]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |  |  | R= 6,67 [m²K/W]<br>U= 0,15 [W/(m²K)] |                          | 0,185m<br>35,92% |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Gesamtstärke 0,330 [m]                                                |                                      | <table><tr><td>s [m]</td><td>lambda [W/(mK)]</td><td>[m²K/W]</td></tr><tr><td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr><tr><td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr><tr><td>EPS-F</td><td>0,200</td><td>0,040</td></tr><tr><td>HLZ</td><td>0,300</td><td>0,208</td></tr><tr><td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr><tr><td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr></table> |  |  |                                      |                          |                  | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,200 | 0,040 | HLZ | 0,300 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 |
| s [m]                                                                 | lambda [W/(mK)]                      | [m²K/W]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|                                                                       | Rse                                  | 0,04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| KZ-Putz                                                               | 0,005                                | 0,800                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| EPS-F                                                                 | 0,200                                | 0,040                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| HLZ                                                                   | 0,300                                | 0,208                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
| Gipsputz                                                              | 0,010                                | 0,200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |
|                                                                       | Rsi                                  | 0,13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |  |                                      |                          |                  |       |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) |                                      | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |  | Ersparnis bei Wandstärke |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|-----------------|---------|--|-----|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|--|-----|------|--|--|
| Var 8_1                                                               | R= 5,92 [m²K/W]<br>U= 0,17 [W/(m²K)] | Var 8_1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | R= 5,92 [m²K/W]<br>U= 0,17 [W/(m²K)] |  | 0,155m                   | 31,96%          |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| Gesamtstärke 0,330 [m]                                                |                                      | Gesamtstärke 0,485 [m]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       |                                      | <table><tr><th>s [m]</th><th>lambda [W/(mK)]</th><th>[m²K/W]</th></tr><tr><td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr><tr><td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr><tr><td>EPS-F</td><td>0,170</td><td>0,040</td></tr><tr><td>HLZ</td><td>0,300</td><td>0,208</td></tr><tr><td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr><tr><td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr></table> |                                      |  | s [m]                    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,170 | 0,040 | HLZ | 0,300 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 |  |  |
| s [m]                                                                 | lambda [W/(mK)]                      | [m²K/W]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       | Rse                                  | 0,04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| KZ-Putz                                                               | 0,005                                | 0,800                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| EPS-F                                                                 | 0,170                                | 0,040                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| HLZ                                                                   | 0,300                                | 0,208                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| Gipsputz                                                              | 0,010                                | 0,200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       | Rsi                                  | 0,13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) |                                      | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |  | Ersparnis bei Wandstärke |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|-----------------|---------|--|-----|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|--|-----|------|--|--|
| Var 8_2                                                               | R= 6,29 [m²K/W]<br>U= 0,16 [W/(m²K)] | Var 8_2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | R= 6,42 [m²K/W]<br>U= 0,16 [W/(m²K)] |  | 0,175m                   | 34,65%          |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| Gesamtstärke 0,330 [m]                                                |                                      | Gesamtstärke 0,505 [m]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       |                                      | <table><tr><th>s [m]</th><th>lambda [W/(mK)]</th><th>[m²K/W]</th></tr><tr><td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr><tr><td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr><tr><td>EPS-F</td><td>0,190</td><td>0,040</td></tr><tr><td>HLZ</td><td>0,300</td><td>0,208</td></tr><tr><td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr><tr><td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr></table> |                                      |  | s [m]                    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,190 | 0,040 | HLZ | 0,300 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 |  |  |
| s [m]                                                                 | lambda [W/(mK)]                      | [m²K/W]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       | Rse                                  | 0,04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| KZ-Putz                                                               | 0,005                                | 0,800                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| EPS-F                                                                 | 0,190                                | 0,040                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| HLZ                                                                   | 0,300                                | 0,208                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| Gipsputz                                                              | 0,010                                | 0,200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       | Rsi                                  | 0,13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den Stoßstellen) |                                      | Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                      |  | Ersparnis bei Wandstärke |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--|--------------------------|-----------------|---------|--|-----|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|----------|-------|-------|--|-----|------|--|--|
| Var 8_3                                                               | R= 6,62 [m²K/W]<br>U= 0,15 [W/(m²K)] | Var 8_3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | R= 6,67 [m²K/W]<br>U= 0,15 [W/(m²K)] |  | 0,185m                   | 35,92%          |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| Gesamtstärke 0,330 [m]                                                |                                      | Gesamtstärke 0,515 [m]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       |                                      | <table><tr><th>s [m]</th><th>lambda [W/(mK)]</th><th>[m²K/W]</th></tr><tr><td></td><td>Rse</td><td>0,04</td></tr><tr><td>KZ-Putz</td><td>0,005</td><td>0,800</td></tr><tr><td>EPS-F</td><td>0,200</td><td>0,040</td></tr><tr><td>HLZ</td><td>0,300</td><td>0,208</td></tr><tr><td>Gipsputz</td><td>0,010</td><td>0,200</td></tr><tr><td></td><td>Rsi</td><td>0,13</td></tr></table> |                                      |  | s [m]                    | lambda [W/(mK)] | [m²K/W] |  | Rse | 0,04 | KZ-Putz | 0,005 | 0,800 | EPS-F | 0,200 | 0,040 | HLZ | 0,300 | 0,208 | Gipsputz | 0,010 | 0,200 |  | Rsi | 0,13 |  |  |
| s [m]                                                                 | lambda [W/(mK)]                      | [m²K/W]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       | Rse                                  | 0,04                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| KZ-Putz                                                               | 0,005                                | 0,800                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| EPS-F                                                                 | 0,200                                | 0,040                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| HLZ                                                                   | 0,300                                | 0,208                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
| Gipsputz                                                              | 0,010                                | 0,200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |
|                                                                       | Rsi                                  | 0,13                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                      |  |                          |                 |         |  |     |      |         |       |       |       |       |       |     |       |       |          |       |       |  |     |      |  |  |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den |                   |  |
|----------------------------------------------------------|-------------------|--|
| <b>Var 10_10</b>                                         | R= 6,54 [m²K/W]   |  |
|                                                          | U= 0,15 [W/(m²K)] |  |
| Gesamtstärke 0,280 [m]                                   |                   |  |

| Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                   | Ersparnis bei Wandstärke |
|---------------------------------|-------|-------------------|--------------------------|
| <b>Var 10_10</b>                |       | R= 6,68 [m²K/W]   | 0,195m                   |
| Gesamtstärke 0,475 [m]          |       | U= 0,15 [W/(m²K)] | 41,05%                   |
|                                 | s [m] | lambda [W/(mK)]   | [m²K/W]                  |
|                                 |       | Rse               | 0,04                     |
| KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800             | 0,01                     |
| EPS-F                           | 0,210 | 0,040             | 5,25                     |
| HLZ                             | 0,250 | 0,208             | 1,20                     |
| Gipsputz                        | 0,010 | 0,200             | 0,05                     |
|                                 |       | Rsi               | 0,13                     |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den |                   |  |
|----------------------------------------------------------|-------------------|--|
| <b>Var 10_13</b>                                         | R= 6,90 [m²K/W]   |  |
|                                                          | U= 0,15 [W/(m²K)] |  |
| Gesamtstärke 0,280 [m]                                   |                   |  |

| Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                   | Ersparnis bei Wandstärke |
|---------------------------------|-------|-------------------|--------------------------|
| <b>Var 10_13</b>                |       | R= 6,68 [m²K/W]   | 0,195m                   |
| Gesamtstärke 0,475 [m]          |       | U= 0,15 [W/(m²K)] | 41,05%                   |
|                                 | s [m] | lambda [W/(mK)]   | [m²K/W]                  |
|                                 |       | Rse               | 0,04                     |
| KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800             | 0,01                     |
| EPS-F                           | 0,210 | 0,040             | 5,25                     |
| HLZ                             | 0,250 | 0,208             | 1,20                     |
| Gipsputz                        | 0,010 | 0,200             | 0,05                     |
|                                 |       | Rsi               | 0,13                     |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den |                   |  |
|----------------------------------------------------------|-------------------|--|
| <b>Var 10_16</b>                                         | R= 6,80 [m²K/W]   |  |
|                                                          | U= 0,15 [W/(m²K)] |  |
| Gesamtstärke 0,280 [m]                                   |                   |  |

| Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                   | Ersparnis bei Wandstärke |
|---------------------------------|-------|-------------------|--------------------------|
| <b>Var 10_13</b>                |       | R= 6,68 [m²K/W]   | 0,195m                   |
| Gesamtstärke 0,475 [m]          |       | U= 0,15 [W/(m²K)] | 41,05%                   |
|                                 | s [m] | lambda [W/(mK)]   | [m²K/W]                  |
|                                 |       | Rse               | 0,04                     |
| KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800             | 0,01                     |
| EPS-F                           | 0,210 | 0,040             | 5,25                     |
| HLZ                             | 0,250 | 0,208             | 1,20                     |
| Gipsputz                        | 0,010 | 0,200             | 0,05                     |
|                                 |       | Rsi               | 0,13                     |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den |    |                |
|----------------------------------------------------------|----|----------------|
| Var 11_1                                                 | R= | 6,54 [m²K/W]   |
|                                                          | U= | 0,15 [W/(m²K)] |
| Gesamtstärke                                             |    |                |
| 0,280 [m]                                                |    |                |

| Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                 | Ersparnis bei Wandstärke |
|---------------------------------|-------|-----------------|--------------------------|
| Var 10_13                       | R=    | 6,68 [m²K/W]    | 0,195m                   |
|                                 | U=    | 0,15 [W/(m²K)]  | 41,05%                   |
| Gesamtstärke                    |       |                 |                          |
| 0,475 [m]                       |       |                 |                          |
|                                 | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W]                  |
|                                 |       | Rse             | 0,04                     |
| KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800           | 0,01                     |
| EPS-F                           | 0,210 | 0,040           | 5,25                     |
| HLZ                             | 0,250 | 0,208           | 1,20                     |
| Gipsputz                        | 0,010 | 0,200           | 0,05                     |
|                                 |       | Rsi             | 0,13                     |

| VIP-Ziegel (mit Berücksichtigung der Wärmebrücken an den |    |                |
|----------------------------------------------------------|----|----------------|
| Var 11_2                                                 | R= | 5,56 [m²K/W]   |
|                                                          | U= | 0,18 [W/(m²K)] |
| Gesamtstärke                                             |    |                |
| 0,280 [m]                                                |    |                |

| Vergleichbarer Ziegel mit EPS-F |       |                 | Ersparnis bei Wandstärke |
|---------------------------------|-------|-----------------|--------------------------|
| Var 10_13                       | R=    | 5,68 [m²K/W]    | 0,155m                   |
|                                 | U=    | 0,18 [W/(m²K)]  | 35,63%                   |
| Gesamtstärke                    |       |                 |                          |
| 0,435 [m]                       |       |                 |                          |
|                                 | s [m] | lambda [W/(mK)] | [m²K/W]                  |
|                                 |       | Rse             | 0,04                     |
| KZ-Putz                         | 0,005 | 0,800           | 0,01                     |
| EPS-F                           | 0,170 | 0,040           | 4,25                     |
| HLZ                             | 0,250 | 0,208           | 1,20                     |
| Gipsputz                        | 0,010 | 0,200           | 0,05                     |
|                                 |       | Rsi             | 0,13                     |