



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 1. Oktober 2020

Entwicklung hochisolierender Fenstersysteme mit Vakuumgläsern und ultraschlanker opaker Fassadenteile



Quelle: Martin Gruber 2019



Datum: 1. Oktober 2020

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Gerber-Vogt AG
Binningerstrasse 107, 4123 Allschwil
www.gerber-vogt.ch

Gewerbeverband Basel-Stadt, ENERGIE IMPULSE Region Basel
Elisabethenstrasse 23, 4010 Basel
www.gewerbe-basel.ch

GLASSX
Seefeldstrasse 224, 8008 Zürich
www.glassx.ch

Dietrich Schwarz Architekten AG
Seefeldstrasse 224, 8008 Zürich
www.schwarz-architekten.com

Renggli AG
St. Georgstrasse 2, 6210 Sursee
www.renggli-haus.ch

AGITEC AG
Langwiesenstrasse 6, 8108 Dällikon
www.agitec.ch

Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau
Solithurnerstrasse 102, 2500 Biel 6
www.bfh.ch

Autor/in:

Martin Gruber, Therwil. Im Auftrag von ENERGIE IMPULSE, Gewerbeverband Basel-Stadt

BFE-Projektbegleitung:

Enerconom AG, Herr Marc Köhli, koehli@enerconom.ch
Bundesamt für Energie, Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501494-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Die Wärmeerzeugung für Gebäude ist für einen grossen Teil des Energieverbrauchs in der Schweiz verantwortlich. Projektziel war, die Wärmedämmung von Fenster und Fassaden dank neu aufkommenden Vakuumgläsern und hochdämmenden Isolationsmaterialien zu optimieren und gleichzeitig die Gebäudehülle schlanker zu gestalten.

Es wurde ein neues Fenstersystem aus Vakuumglas (VIG) mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten deutlich unter Minergie-P Niveau entwickelt und die technologischen Voraussetzungen für den systematischen Einbau von Vakuumgläsern (Glaseinstand, Verbauungsart, Statik, Materialien, etc.) in schlanke Rahmen erarbeitet. Parallel dazu wurden vorgefertigte Wandelemente mit hochdämmenden Aerogelmatten entwickelt, welche nur halb so dick sind wie herkömmliche Fertigelemente in Ständerbauweise. Am Pilothaus „Austrasse“ konnte bewiesen werden, dass eine Minergie-A Gebäudehülle mit ultraschlanken Wänden (Isolation 10cm) und mit Vakuumgläsern (12mm) erfolgreich konzipiert und belebt wird.

Im Rahmen des Projekts konnte der U-Wert des Vakuumglases auf $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ gesenkt werden. Der Glas-Glas Randverbund bleibt jedoch eine wärmetechnische Schwachstelle und muss künftig verbessert werden. VIG werden deshalb im Moment für grosse Fensterflächen (>85% Glasanteil) sowie zur Sanierung historischer Fenster empfohlen. Optisch stehen die VIG heute den herkömmlichen Isoliergläsern in nichts nach.

Eine Stakeholder Umfrage zeigt, dass bei Neubauten das energetische Einsparpotential genutzt wird, wenn dieses gleichzeitig mit einem besonders ästhetischen Erscheinungsbild (filigrane Rahmen) präsentiert wird. Dies ist jedoch nur möglich, wenn das ganze Rahmensystem neu aufgebaut wird, herkömmliche Rahmen sind für VIG nicht geeignet.

Exemplarisch ist es gelungen, eine Komplettlösung für ein hochisolierendes Schiebefenster mit VIG zu entwickeln, welches einen schlanken Holz-Metallrahmen aufweist und voll motorisiert ist. Die notwendigen statischen Eigenschaften werden dank einem verstärkten Kern aus Glasfaserkunststoff (GFK) erreicht, miniaturisierte Beschlagsysteme wurden neu entwickelt und sind im GFK Kern versenkt. Motor und Schiebesystem sind aufeinander abgestimmt und ebenfalls im Rahmen unsichtbar eingebaut. Die Motorisierung eröffnet neue Möglichkeiten im automatischen Gebäudemanagement. Dank Schiebefenstern stehen keine Flügel mehr im Raum, was bei Schulen, Altersheimen und Spitälern wichtig ist.

Ultra schlanke Wände mit Hochleistungsdämmstoffen wie z.B. Aerogel lassen sich nicht durch eine simple Redimensionierung bestehender Aufbauten erreichen. Holz isoliert nicht so gut wie Aerogel und fungiert als Wärmbrücke. Ausserdem kann das Material weder mit Verschraubung noch Verklebung befestigt werden. Die Lösung lag in der Verklebung. Dank der Innovation von «verklebten Kastenelementen im Sandwichsystem» können nun fragile Hochleistungsdämmstoffe in vorfabrizierten Fertigelementen verbaut werden. Diese Innovation lässt sich auch auf andere Dämmmaterialien anwenden wie zum Beispiel Isopet oder Kautschuk-Aerogel.



Resumée

La production de chaleur pour les immeubles est en grande partie responsable de la consommation d'énergie en Suisse. Ce projet avait pour but d'optimiser l'isolation thermique de fenêtres ainsi que de façades grâce à de nouveaux verres à vide et de matériaux hautement isolants. En même temps, il s'agissait de rendre l'enveloppe des bâtiments plus mince.

D'une part, un nouveau système de fenêtres à verres à vide (VIG) a été développé. Elles présentent un coefficient de transmission thermique nettement inférieur au niveau de Minergie P. D'autre part, les conditions technologiques nécessaires à l'installation systématique de vitres à vide dans les cadres minces ont été développées (prise en feuillure, type de construction, statique, matériaux, etc.).

En parallèle, des éléments de mur préfabriqués avec des molleton d'aérogel hautement isolants ont été développés. Ils sont deux fois moins épais que les éléments préfabriqués en construction à ossature. La maison pilote „Austrasse“ a prouvé avec succès qu'une enveloppe de bâtiment Minergie-A avec des murs ultra minces (isolation 10cm) et avec des vitres à vide (12mm) a pu être conçue et animée.

Dans le cadre de ce projet, la valeur U du verre sous vide a pu être réduite à 0,4 W/m²K. Cependant, le joint de bordure en verre reste un point faible du génie thermique et devra encore être amélioré. Les IIG sont donc actuellement recommandées pour les grandes surfaces vitrées (>85% de verre) et pour la rénovation des fenêtres historiques. Optiquement, ces VIG ne sont en aucun cas inférieurs aux verres isolants classiques.

Une enquête auprès des parties prenantes montre que le potentiel d'économie d'énergie des bâtiments neufs est exploité s'il est présenté simultanément avec un aspect particulièrement esthétique (cadres filigranes). Cependant, cela n'est possible que si l'ensemble du système de cadres est reconstruit, les cadres conventionnels n'étant pas adaptés à l'VIG.

À titre d'exemple, nous avons réussi à développer une solution complète pour une fenêtre coulissante hautement isolante avec VIG, qui a un cadre mince en bois-métal et est entièrement motorisée. Les propriétés statiques nécessaires sont obtenues grâce à un noyau renforcé en plastique renforcé à la fibre de verre PRFV. Des systèmes matériels miniaturisés ont été récemment développés et sont encastrés dans le noyau GRP. Le moteur et le système de coulissement sont coordonnés et également installés de manière invisible dans le cadre. La motorisation ouvre de nouvelles possibilités dans la gestion automatique des bâtiments. Grâce aux fenêtres coulissantes, il n'y a plus d'ailerons dans la pièce, ce qui est important pour les écoles, les maisons de retraite et les hôpitaux.

Des murs ultra minces avec des matériaux isolants performants comme l'aérogel ne peuvent pas être réalisés par un simple redimensionnement des structures existantes. Le bois n'est pas aussi isolant que l'aérogel et agit comme un pont thermique. En outre, le matériau ne peut pas être fixé avec des vis ou de l'adhésif. La solution réside dans le serrage. Grâce à l'innovation des "éléments de boîtes collées dans un système sandwich", il est désormais possible d'installer des matériaux isolants fragiles et performants dans des éléments préfabriqués. Cette innovation peut également être appliquée à d'autres matériaux d'isolation tels que l'isopet ou l'aérogel en caoutchouc.



Summary

The generation of heat for buildings is responsible for a large part of the energy consumption in Switzerland. The project objective was to optimise the thermal insulation of windows and facades thanks to newly emerging vacuum glazing and highly insulating materials, while at the same time making the building envelope slimmer.

A new window system made of vacuum glass (VIG) with a heat transfer coefficient well below the Minergie-P level was developed and the technological requirements for the systematic installation of vacuum glass (inset of the glass, type of construction, statics, materials, etc.) in slim frames were worked out.

Parallel to this, prefabricated wall elements with highly insulating aerogel mats were developed, which are only half as thick as conventional prefabricated elements in stud construction. The pilot house "Austrasse" proved that a Minergie-A building envelope with ultra-slim walls (insulation 10cm) and with vacuum glasses (12mm) is successfully designed and animated.

Within the framework of the project, the U-value of the vacuum glass was reduced to 0.4 W/m²K. However, the glass-glass edge seal remains a thermal weak point and must be improved in the future. VIG is therefore currently recommended for large window surfaces (>85% glass content) and for the renovation of historic windows. Optically, VIGs are in no way inferior to conventional insulating glass.

A stakeholder survey shows that the energy-saving potential of new buildings is exploited if it is presented simultaneously with a particularly aesthetic appearance (filigree frames). However, this is only possible if the entire frame system is rebuilt; conventional frames are not suitable for VIG.

As an example, we have succeeded in developing a complete solution for a highly insulating sliding window with VIG, which has a slim wood-metal frame and is fully motorised. The necessary static properties are achieved thanks to a reinforced core of glass fibre plastic (GRP), miniaturised hardware systems have been newly developed and are recessed in the GRP core. Motor and sliding system are coordinated and also invisibly installed in the frame. Motorisation opens up new possibilities in automatic building management. Thanks to sliding windows, there are no more sashes in the room, which is important for schools, old people's homes and hospitals.

Ultra slim walls with high-performance insulation materials such as aerogel cannot be achieved by simply redimensioning existing structures. Wood does not insulate as well as aerogel and acts as a thermal bridge. Furthermore, the material cannot be fixed with screws or glue. The solution was to clamp it in place. Thanks to the innovation of "glued box elements in a sandwich system", fragile high-performance insulating materials can now be installed in prefabricated elements. This innovation can also be applied to other insulation materials such as isopet or rubber aerogel.



Take-home messages

- Es wurde ein hochisolierendes Schiebefenster mit Vakuumglas VIG und filigranem Rahmen entwickelt, welches dank integrierten Motoren und Steuerung für eine Gebäudeautomation geeignet ist. Die WLAN basierte Fernsteuerung ermöglicht eine Nachtauskühlung oder den Einsatz in Gebieten mit nächtlichen Lärmimmissionen (z.B. Flugschneisen). Die Praxistauglichkeit von VIG wurde sowohl an einem Pilothehaus als auch am oben erwähnten Schiebefenster Prototypen nachgewiesen.
- Vakuumgläser eignen sich auch für die Sanierung historischer Fenster unter Einhaltung des Denkmalschutzes und eröffnen ein grosses, sofort realisierbares Energiesparpotential.
- Dank der Innovation von «verklebten Kastenelementen im Sandwichsystem» können nun fragile Hochleistungsdämmstoffe in vorfabrizierten Fertigelementen verbaut werden. Diese Innovation lässt sich auch auf andere Dämmmaterialien anwenden, wie zum Beispiel Isopet oder Kautschuk-Aerogel.
- Das Pilothehaus „Austrasse“ beweist, dass eine ultraschlanke Gebäudehülle den Minergie-A Standard erfüllen kann, dank ultraschlanken Wänden (Isolation nur 10cm) und Fenstern mit Vakuumgläsern (12mm).



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Resumée.....	4
Summary	5
Take-home messages	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung.....	10
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	10
1.2 Motivation des Projektes.....	11
1.3 Projektziele.....	12
2 Vorgehen und Methode	14
2.1 Bauherreninterviews	15
2.1 Weiterentwicklung der Vakuumgläser	15
2.2 Entwicklung der Fenstersysteme.....	17
2.3 Auswahl der Hochleistungsdämmstoffe für die opaken Wände.....	23
2.4 Opake Wände.....	25
2.5 Hybridbau - Holzstützen statt Stahlstützen	29
2.6 Pilotheus Nullserie „Austrasse“	30
3 Ergebnisse und Diskussion	37
3.1 Bauherrenumfrage.....	37
3.2 Optimierung Vakuumgläser und technischer Stand heute	37
3.3 Auslegeordnung Einsatz in Fenstersysteme.....	39
3.4 Praxistest Nullserie „Ausstrasse“.....	42
3.5 Praxistest historische Fenstersanierung „Münsterplatz“ mit europäischen VIG	44
3.6 Schlankes, hochisolierendes Schiebefenster mit Vakuumglas.....	46
3.7 Opake Wände.....	51
3.8 Resultate energetisches Konzept „Austrasse“	56
4 Schlussfolgerungen und Fazit	58
4.1 Vakuumgläser und Fenster	58
4.2 Hochisolierende Dämmmaterialien und opake Wände.....	59
4.3 Energetisches Konzept der Nullserie „Austrasse“	60
4.4 Hybridbau – Holz statt Stahlstützen	60
5 Ausblick und zukünftige Umsetzung.....	61
5.1 Technischer Fortschritt	61
5.2 Aktivitäten der beteiligten KMU	61



6	Nationale und internationale Zusammenarbeit	62
7	Publikationen	62
8	Anhang.....	63



Abkürzungsverzeichnis

GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
KEA	kumulierter Energieaufwand
OSB	Holzplatte aus ausgerichteten Spänen
Ψ_g	Psi Wert, längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient im Randbereich des Glases
SIGAB	Schweizerisches Institut für Glas am Bau
VIG	Vakuumisolierglas
VSG	Verbund Sicherheitsglas
U_f	Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen
U_g	Wärmedurchgangskoeffizient Glas
U_w	Wärmedurchgangskoeffizient Fenster



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die Wärmeerzeugung für Gebäude ist für einen grossen Teil des Energieverbrauchs – meist fossile Energie – verantwortlich. Der Wärmedämmung von Fassaden und Fenstersystemen kommt deshalb eine grosse Bedeutung zu.

Die neu aufkommenden, hochdämmenden Vakuumgläser bieten nun die Chance einer technologischen Weiterentwicklung mit noch tieferen U-Werten als die heute erhältlichen zweifach- und dreifach-Isolierverglasungen. Da die Wärmedämmung durch eine einzige, hochisolierende Vakuumkammer gegeben ist, kann die Wärmedämmung unabhängig von der Anzahl der Glasscheiben weiter verbessert werden.

Dank der leichteren und dünneren Vakuumgläser besteht erstmals wieder die Möglichkeit, die Dimension des Fenstersystems anzupassen, das heisst die Rahmen- und Flügelquerschnitte zu reduzieren. Auf diese Weise könnte der Rahmenanteil des Fensters und somit die Wärmeverluste über den Rahmen reduziert werden, bei gleichzeitiger Steigerung der solaren Einträge.

Ein bisher ungelöstes Problem sind historische Fenster, deren energetische Sanierung meist nicht mit den Zielen des Denkmalschutzes zu vereinbaren ist. Auch hier bieten die dünnen Vakuumgläser einen Lösungsansatz, welcher erpöbt werden sollte.

Ein weiteres Problem stellt das Benutzerverhalten dar. Die beste Isolation nützt wenig, wenn Fenster in der Heizperiode in Kippstellung bleiben. Eine Gebäudeautomation mit motorisierten Fenstern kann den Schwachstellen des Benutzerverhaltens begegnen.

Dünnere und leichtere Fenster erlauben in der Folge auch dünnere Rahmenverbreiterungen und dünnere opake Wandelemente, was wiederum eine höhere Raumausnutzung möglich macht. Damit eröffnen sich neue Einsatzgebiete für Superdämmstoffe wie Aerogel.

Ein häufig vorgebrachtes Argument gegen eine hochsolierende Gebäudehülle (z.B. Minergie P) ist deren Dicke, welche der maximalen Raumausnutzung entgegen steht. Vakuumisoliergläser und Superdämmstoffe könnten deshalb künftig für schlanke Gebäudehüllen stehen.

Allerdings bestehen in der Praxis zahlreiche Bedenken und Problemstellungen, die noch nicht gelöst sind:

Die im Angebot stehenden VIG haben noch nicht den tiefen U-Wert, den die Vakuumtechnik bieten könnte, die Produzenten befinden sich im asiatischen Raum und die Lieferketten entsprechend kompliziert. Ausserdem bestehen Vorbehalte gegenüber dem optischen Erscheinungsbild wegen der Glas-Abstandshalter in der Fensterfläche, den sichtbaren Ventilen sowie der zu grünlichen Glasfärbung. Die fehlende Erfahrung mit der Belastbarkeit von VIG resp. der drohende Vakuumverlust bei kleinsten Haarrissen sind gewichtige Unsicherheitsfaktoren.

Im europäischen Fensterbau bestehen kaum Erfahrungswerte im Umgang mit VIG. Die marktüblichen Rahmensysteme und Beschläge sind auf 3-fach Isoliergläser ausgerichtet. VIG sind zwar leichter, haben aber einen deutlich schlechteren Randverbund. Entsprechende Einbaurichtlinien und Anwendungskriterien müssen erst noch erarbeitet werden, damit das Potential der VIG im Markt überhaupt ausgeschöpft werden kann.



Auch die Motorisierung und Steuerung von Fenstern klingen einfacher als sie es sind: Heute erhältliche Fenster-Motoren sind kaum auf die Rahmensysteme abgestimmt, oft klobig und müssen dem Rahmen aufgesetzt werden. Solcherlei „Gebastel“ kann den ästhetischen Anforderungen moderner Architektur nicht gerecht werden.

Ein grundsätzliches Problem besteht auch bei den „Superdämmstoffen“ wie z.B: Aerogel. Diese sind schwer zu verarbeiten, da sie sehr fragil und nicht selbsttragend sind. Kleben oder schrauben geht kaum. Der Einbau in herkömmliche Holz-Ständerbauweisen ist kaum sinnvoll, da mit der Redimensionierung der Querschnitte alle anderen zur Statik notwendigen Bauelemente verstärkt als Wärmebrücken wirken würden. Es fehlt also auch hier an konkreten Lösungen zur Anwendung von Superdämmstoffen in der Praxis.

1.2 Motivation des Projektes

Wir sind überzeugt, dass oben erwähnte Herausforderungen gemeistert werden können, wenn das Knowhow spezialisierter KMU zusammentragen und in engem Austausch gemeinsam angegangen wird.

Wir möchten den Wärmedurchgangskoeffizient der heute erhältlichen VIG in Zusammenarbeit mit den Herstellern technisch verbessern, so dass sie nicht nur leichter, sondern auch einen energetischen Mehrwert bringen. Dazu möchten wir auch die Lieferketten und das optische Erscheinungsbild von VIG in der Praxis testen.

Damit die besten Isoliergläser zur Anwendung kommen, möchten wir das Wissen um die konkrete Anwendung vertiefen. Wir möchten mit einer Auslegeordnung prüfen, wo Vakuumisoliergläser am besten eingesetzt werden und wie die Fensterrahmen dafür optimal ausgestaltet werden müssen. Dazu wird ein iteratives Vorgehen gewählt: Nach den ersten Entwicklungsschritten soll eine Nullserie im Praxiseinsatz an einem Musterhaus getestet werden, um danach an Hand konkreter Erfahrungen die serielle Reife zu erlangen.

Der neue Weg soll mit Schiebefenster beschritten werden, welche in der Schweiz noch wenig verbreitet sind. Schiebefenster sind einfacher zu motorisieren als Dreh-Kipp Fenster. Gleichzeitig soll dem Kunden ein Mehrnutzen mit filigranen Ansichten geboten werden, denn Energieeinsparung alleine reicht leider nicht für die erfolgreiche Lancierung neuer Produkte. Ausserdem ragen geöffnete Schiebefenster nicht in den Raum, was der Sicherheit in Altersheimen und Schulhäusern entgegenkommt.

Parallel dazu suchen wir einen Weg, um hochisolierenden Dämmstoffe für schlankere Wände sinnvoll verarbeiten zu können. Dazu sehen wir vorgefertigte Elemente vor. Denn wo zunehmend kürzere Bauzeiten und in dicht besiedelten Gebieten gefragt sind und häufig beschränkte Zufahrts- und Materialumschlagsmöglichkeiten vorherrschen, sind adäquate Bauweisen gefragt. Mit einer seriellen Vorfabrikation von ein- oder mehrgeschossigen Elementen im Werk sind kürzere Montagezeiten möglich. Leichtbauwände ermöglichen zudem Aufstockungen, um nachträgliche Verdichtungen zur Schonung der Landreserven zu ermöglichen.

Allerdings gilt es auch hier, das ganze Zusammenspiel der Lieferkette von der Produktion der Dämmstoffe, der Konfektionierung bis hin zur Verarbeitung im Element neu aufzugleisen.

Am Musterhaus möchten wir exemplarisch zeigen, dass Minergie-P Fassaden nicht dick sein müssen, sondern schlank sein können.



1.3 Projektziele

a.) Fenstersysteme

- Es soll ein neues Fenstersystem aus Vakuumglas mit einem besonders tiefen Wärmedurchgangskoeffizienten entwickelt und die damit verbundenen bauphysikalischen Problemstellungen gelöst werden. Dabei sollen die grundsätzlichen technologischen Rahmenbedingungen aufgezeigt werden, welche ein systematischer Einsatz hochisolierender Vakuumgläser in ebenso hochisolierenden Rahmen erfordert. Dabei soll auch der Wärmedurchgangskoeffizient der VIG von derzeit 0.58 auf 0.35 W/m²K gesenkt werden
- In die neuen Fenstersysteme soll halb so viel Glas verbaut werden, sie sollen das halbe Gesamtgewicht aufweisen und die halbe Elementstärke benötigen wie die heute auf dem Markt befindlichen Systeme. Damit soll der Aufwand an grauer Energie reduziert werden.
- Es soll eine bessere öffentliche Akzeptanz von hochisolierenden Fenstersystemen bei Bauherren, Investoren und Architekten erreicht werden durch die Kombination mit den Zusatznutzen „filigraner Fensterrahmen“ und moderne Fensterformen „liegendes Rechteck“ für grosse Fensterflächen.
- Integrierte Automation. Der Einsatz moderner Elektrogetriebe soll ausgelotet und diese so stark redimensioniert werden, dass sie im Zusammenspiel mit einer neuen Rahmenkonstruktion künftig in den Rahmen integriert werden können.
- Verbesserte Raumausnutzung. Durch den Einsatz von modernen, leicht bedienbaren Schiebefenstern soll die Flächenausnutzung in Schulzimmern, Kantinen, Büros etc. erhöht werden. Selbst grosse Fensterflächen mit „liegenden Rechtecken“ ragen so nicht in den Raum. Ausserdem begünstigen Schiebefenster das Behinderten- und altersgerechtes Bauen, weil geöffnete Flügel als Gefahrenquelle wegfallen. Die Automation lässt sich bei Schiebefenstern einfacher und effizienter realisieren.
- Wir möchten die Sanierung eines historischen Fensters in einem denkmal geschützten Gebäude mustergültig vorexercieren und damit aufzeigen, dass Denkmalschutz und energetische Sanierung „unter einen Hut gebracht werden können“. Zum Vergleich soll am selben Gebäude ein baugleiches Fenster durch ein Imitat mit 3-fach Isoliergläser (also neues Fenster im historischen Stil) ersetzt und alle Parameter gegenüber gestellt werden.
- Mit dem Pilot sollen auch neue Märkte für Schweizer KMU erschlossen werden. Ein wichtiges Kriterium für das Überleben in der Hochpreisinsel Schweiz im Wettbewerb gegenüber dem Weltmarkt ist für Schweizer Unternehmen das selbst erarbeitete Knowhow bei Prozessen, Herstellungsverfahren und Dienstleistungen.
- Weitere anvisierte Eckwerte sind: Luftschalldämmung der Verglasung R_w 38 dB (bei Vakuumgläsern gegeben), ev. Zusatzglas für höhere Anforderungen 42dB, Schlagregendichtigkeit 9A, Luftdurchlässigkeit Klasse 4, Widerstand bei Windlast B3/C3.



b.) Opake Wandelemente

- Es sollen ultradünne, hochgedämmte Wandelemente und Rahmenverbreiterungen mit „Superdämmmaterialien“ (z.B. Aerogelmatten oder analogen Materialien) entwickelt werden, welche die schmalen Fensterstärken in den opaken Wandteilen weiterführen und gleichzeitig die Schnittstellenproblematik lösen.
- Diese sollen halb so dick sein wie herkömmliche Ständerbauelemente (15 cm statt 30 cm) aber trotzdem einen U-Wert von nur 0.16 W/m²K aufweisen.
- Anvisiert wird eine serielle Produktion von Wandelementen mit hohem Vorfertigungsgrad.
- Es sollen die Marktanteile der Holzständerbauweise bei der Gebäudehülle im urbanen Umfeld bei Neubauten und Gebäudesanierungen ausgeweitet werden.
- Es soll der Einsatz verschiedener wärmebrückenarmer Konstruktionen getestet werden (z.B. aus glasfaserverstärktem Kunststoff GFK, Kohlestofffaser oder anderen Leichtbaumaterialien), um Wände entwickeln zu können, deren Dämmebene in der schlanken Konstruktion integrierter ist.
- Der Einsatz grauer Energie soll durch eine Senkung des Materialbedarfs vermindert werden.



2 Vorgehen und Methode

Das Pilotprojekt wurde in folgenden Phasen abgewickelt:

Technische Vorstudie	<ul style="list-style-type: none">• Entwicklung Basismodell, Produktabklärungen, Integration Beschläge, Motoren und Steuerung• Bauphysikalische Berechnungen• Bau Fenster-Dummie
Gestaltung und Akzeptanz	<ul style="list-style-type: none">• Umfragen bei Architekten, Fachplaner Investoren durch Fachhochschule• Marktabklärungen bei Beschlagherstellern
Zwischenziel Nullserie "Austrasse"	<ul style="list-style-type: none">• Herstellung Nullserie• Bauphysikalische Vorprüfung inhouse und Montage• Praxistest
Prototyp für serielle Fertigung	<ul style="list-style-type: none">• Planung und Herstellung der Werkzeuge• Herstellung Prototyp für serielle Fertigung• Bauphysikalische Vorprüfung inhouse
Dokumentation und Zertifikation	<ul style="list-style-type: none">• Bauphysikalische Messungen Berner FH und EMPA• Zertifikation, CE-Label, Produktebeschreibung• Dokumentation

In der ersten Phase werden die technologischen Grundlagen für einen systematischen Einsatz hochisolierender Vakuumgläser und ultradünner opaker Wände erarbeitet. Weil es sich bei den Entwicklungen um komplexe Prozesse mit zahlreichen Schnittstellen, wechselseitigen Abhängigkeiten sowie vielen Unbekannten handelt, war ein Praxistest „auf halbem Weg“ sinnvoll. Prof. Dietrich Schwarz war bereit, beim Bau einer Liegenschaft „Austrasse“ die ersten Entwicklungen in einem frühen Stadium auszutesten. **Die Nullserie „Austrasse“ stellte also einen Zwischenschritt innerhalb der „technischen Vorstudie“ dar.**

Aus den Erfahrungen der Nullserie wurden in den weiteren Schritten entdeckte Schwachstellen behoben sowie neue Materialien und Techniken in die Weiterentwicklung einbezogen.

Auf Grund des bereits weit fortgeschrittenen Planungsprozesses und der erteilten Baugenehmigung für die „Austrasse“ war es notwendig, nahezu sämtliche Arbeitsschritte parallel laufen zu lassen, um den engen Terminplan einhalten zu können.



2.1 Bauherreninterviews

Die künftigen Produkte sollten bezüglich des potentiellen Marktpotentials und ihrer Marktakzeptanz evaluiert werden.

In einer ersten Analyse wurde eine Selektion aller Schweizer Baubewilligungen in den Jahren 2015 und 2016 nach Baukosten, Gebäudegrösse, Fassadenaufbau etc. durchgeführt. Dies diente als Datenbasis um herauszufinden, wo das grösste Marktpotential für hochisolierende Fenstersysteme liegen könnte. Anschliessend führte die Berner Fachhochschule Interviews bei rund 15 ausgewählten Bauherren, Fachplanern und Architekten durch, welche grössere Neubauten erstellten und daher als potentielle Anwender von in Frage kämen (Details siehe Anhang).

2.1 Weiterentwicklung der Vakuumgläser

a.) Hintergründe

Die auf dem Markt angebotenen Vakuumgläser wiesen zu Projektbeginn einen Wärmedurchgangskoeffizient (U_g -Wert) von $0.58 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf, dieser ist zu nahe am U_g -Wert der weitaus günstigeren 3-fach Isoliergläser. Um dem anvisierten U_g -Wert von $0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ näher zu kommen, musste deshalb der Glasaufbau gemeinsam mit einem Hersteller weiterentwickelt werden.

Die Herausforderung in diesem Projekt lag in der Beschaffung eines möglichst effizienten Glases, das folgende zwei Parameter vereint: ein optimaler U_g -Wert zur Reduktion des Wärmeverlustes und ein optimaler g-Wert (Energiedurchlassgrad der solaren Einstrahlung) zur bestmöglichen Nutzung der solaren Einträge. Die theoretischen Ansätze, wie eine solche Verbesserung möglich sein könnte, wurden mit mehreren Glasherstellern bereits in einer frühen Phase besprochen. Die Kommunikation mit den beiden Vakuumglaslieferanten in China und Taiwan erwies sich jedoch als sehr zäh. Europäische Hersteller waren zu Projektbeginn nicht auf dem Markt.

b.) Tests mit Hersteller in China

Zunächst war nur eine Kooperation mit der chinesischen Firma angedacht, da hier die Zusage vorlag, gemeinsam die U_g -Werte verbessern zu wollen. Die chinesischen Hersteller konnten selber keine besseren Low-E-Beschichtungen anbieten. Deshalb wurde den chinesischen Herstellern Testgläser eines europäischen Herstellers mit einer Low-E Schicht mit Emissivität von 2% zugesandt. Leider scheiterte der Versuch, eine europäische Schicht in das asiatische Vakuumglas zu integrieren, die Beschichtung hatte der Verarbeitung nicht standgehalten hat, d.h. sie war nicht «stabil» genug. Grund sei die hohe Temperatur von 390°C , mit denen das Vakuumglas hergestellt werde und dabei Low-E-Schichten zerstört habe. Im Verlauf des Projekts teilte die chinesische Firma mit, dass bis auf unbestimmte Zeit wegen des Ausfalls der Hauptanlage die grossen Glasdimensionen nicht mehr hergestellt werden können.

c.) Tests mit Herstellern in Taiwan

Auf Grund der sich abzeichnenden Produktionsschwierigkeiten in China wurde der Kontakt mit taiwanesischen Vakuumglas-Produzenten aufgenommen, welche eine eigene relativ optimale Beschichtung verwendet. Glücklicherweise war der taiwanesischer Hersteller generell an einer Optimierung seiner Gläser hinsichtlich der energetischen Parameter interessiert. In der Folge fanden Verhandlungen zwischen GlassX und Taiwan statt, wie der U_g -Wert auf anderem Wege als über die Emissivität resp. Beschichtung gesenkt werden könnte. Einen möglichen Ansatz stellen die



Abstandhalter (sogenannte Pillars) dar, da über sie die grössten Wärmeverluste entstehen. In unserem Fall wurde die Idee verfolgt, die Distanz der Abstandhalter untereinander von 25 mm auf 30 mm zu erhöhen. Der Hersteller hat daraus einen neuen U_g -Wert von $0.39 \text{ W/m}^2\text{K}$ rechnerisch ermittelt.

d.) Lieferfristen, Optik und andere Schwierigkeiten

Die Lieferzeiten von 3 - 4 Monaten waren auf Grund der grossen Distanzen sehr viel länger als im Vergleich zum herkömmlichen Isolierglas, welches dank europäischer Produktion in rund 6 Wochen angeliefert wird. Ausserdem mussten die Transportkisten sehr gut geschützt und im Container gegen Umfallen verankert werden. Die Gläser befanden sich in einer doppelten Holzkiste, welche enorm schwer war (bis 1.3 t). Die Entladung und das Auspacken dauerten aufgrund der aufwändigen Verpackung recht lang. Für jede Nachbestellung musste mit Verzögerungen von weiteren 3 Monaten und erheblichen Zusatzkosten gerechnet werden. Diese Probleme machten sich am Bau der Nullserie „Austrasse“ deutlich bemerkbar.

Ursprünglich waren im Bauprojekt Austrasse Fensterglas-Dimensionen von 190 cm x 250 cm geplant. Leider konnte auf der Taiwanesischen Anlage nur maximale Grössen von 180 cm x 250 cm produziert werden. Deswegen musste die Planung der Fassaden nachträglich angepasst werden.



Abbildung 1: 3-fach Isolierglas



Abbildung 2: Vakuumglas



e.) Entwicklungsschritte der Ventile

Die Ventile der chinesischen Gläser waren als runde „Münze“ auf der Glasfläche sichtbar. Die taiwanesischen Gläser hatten die Ventile stirnseitig angebracht, so dass sie Rahmen versenkt und daher nicht mehr sichtbar waren. Leider beinhaltete diese Lösung einen gravierenden Nachteil, der erst im Laufe der Anwendung an der Nullserie zu Tage trat: die Ventile waren sehr empfindlich auf seitlichen Druck, so dass einige Gläser am Bau das Vakuum verloren. Dies erforderte Anpassungen bei den Einbaurichtlinien. Erst am Ende des Projektes sind europäische VIG Hersteller auf den Markt gekommen, welche jetzt auch VIG ohne Ventile produzieren können.



Abbildung 3: Vakuumbglas mit rundem «Ventil»



Abbildung 4: Vakuumbglas mit stirnseitigem Ventil

f.) Tests im Labor, am Bau und an Mustern

Die Wärmedurchgangskapazität wurde vom Hersteller und von GlassX berechnet und später in Labormessungen der Berner Fachhochschule sowie am Bau der Nullserie „Austrasse“ gemessen. Ausserdem wurden Belastungsmessungen der Gläser auf Druck sowie auf Stösse durchgeführt. Und mit einer Heizwärmeerfassung wurde schliesslich der Isolationswert der eingebauten Gläser und der opaken Wände am gebauten Objekt „Austrasse“ verifiziert.

2.2 Entwicklung der Fenstersysteme

a.) Ausgangslage

Über den Einsatz von Vakuumbgläsern in verschiedenen Fenstersystemen war noch recht wenig bekannt. In der ersten Phase wurde darum die technologische Grundlage für einen systematischen Einsatz hochisolierender Vakuumbgläser ausgelotet. Dabei konnte eine Auslegeordnung vorgenommen werden, die darstellt, in welchen Rahmensystemen und unter welchen Bedingungen Vakuumbgläser überhaupt zu einer energetischen Verbesserung führen würden, und wo der Einsatz mit energetischen Nachteilen verbunden wäre. Bei dieser Auslegeordnung musste immer der Energiefluss der ganzen Fenstersysteme (U_w) bestehend aus Rahmen, Flügel und Glaspaket bewertet werden.



b.) Auslegeordnung

Die Bewertung erfolgte durch Wärmeflussberechnungen marktüblicher Rahmenquerschnitte, bekannter Materialeigenschaften und diverser Glaspakete. In einem zweiten Schritt wurde evaluiert, wie mit modifizierten Rahmenquerschnitten und verschiedenen Einstandstiefen der Glaspakete auf die Anforderungen von Vakuumglas reagiert werden könnte. Auch wurden die Rahmenquerschnitte durch Isolationsmaterialien ergänzt und die Fenstergrösse variiert. Dabei ging man bis an die Grenze des technisch tragbaren, insbesondere an die Grenzen der Statik. Gleichzeitig wurden historische Fenstersysteme überprüft im Hinblick auf den Einsatz in Denkmal geschützten Gebäuden.

Aus diesen Erkenntnissen heraus wurden die ersten Fenster der Nullserie für den Pilotbau «Austrasse» gebaut und daraus später ein vollständig neues Rahmensystem entwickelt.

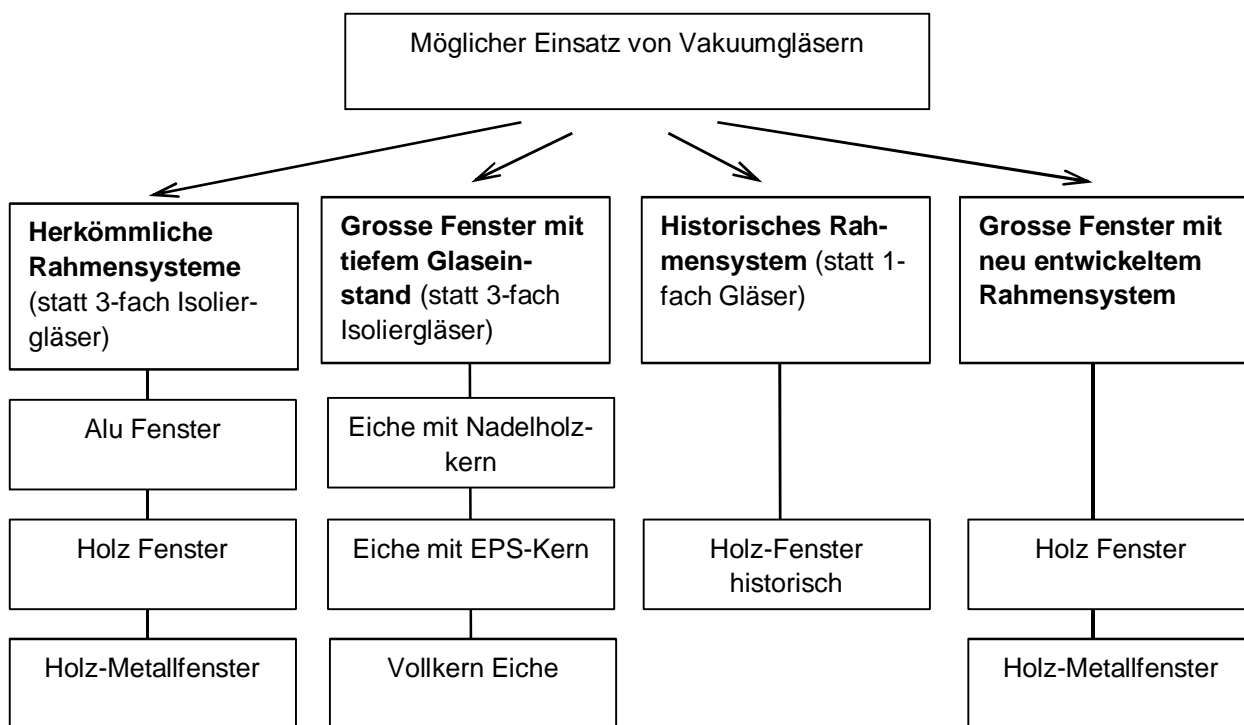


Abbildung 5: Auslegeordnung für den möglichen Einsatz von Vakuumgläsern und erfolgte Weiterentwicklung

c.) Wärmeflussberechnungen

Die Wärmeflussberechnungen erfolgten mit dem Programm „Flixo“ von „Infomind GmbH“. Die Schnittzeichnungen wurden via CAD eingegeben, die diversen Materialarten (Aluminium, Stahl, Tannenholz, Eichenholz, GFK etc.) mussten von Hand den einzelnen Komponenten zugewiesen werden, damit die im System hinterlegten Materialkennwerte korrekt übernommen wurden.

Die U_g -Werte stammen von den Glaslieferanten und werden im Programm manuell zugewiesen. Die Psi-Werte (Ψ_g) handelsüblicher Glaspakete werden mit Hilfe des Programms berechnet. Bei den Vakuumgläsern wurden die U_g -Werte von GlassX gemäss deren Berechnungen geliefert. Die Psi-Werte (Ψ_g) der Vakuumgläser mussten über das Programm an Hand der Informationen über den Glasaufbau berechnet werden.

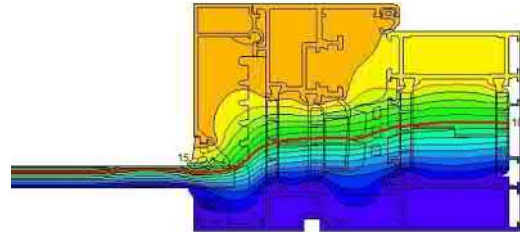
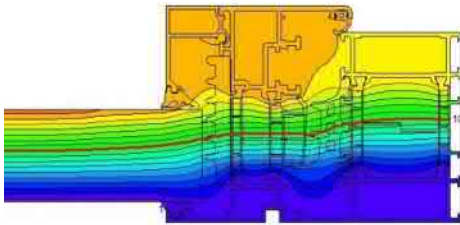


Abbildung 6: Beispiel einer Wärmeflussberechnung. Vergleich 3-fach Isolierverglasung zu Vakuumglas bei Aluminium Fenster (Standardausführung)

3-fach Isolierglas, $U_g = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $U_w = 1.03 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vakuumglas, $U_g = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $U_w = 1.27 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vakuumglas, $U_g = 0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $U_w = 1.13 \text{ W/m}^2\text{K}$

d.) Bau eines ersten Prototyps

Der Bau eines ersten Prototyps sollte als Grundlage für die Nullserie des Bauprojekts „Austrasse“ dienen und alle technischen Probleme aufzeigen, welche erst mit der praktischen Umsetzung zu Tage treten.

Eine grosse Unbekannte war das statische Verhalten der Vakuumgläser. In der werkseigenen Anlage von Gerber-Vogt AG wurden die Gläser einem Windlasttest unterzogen. Die Gläser haben den Test mit 1200 Pa Druck schadlos überstanden. In der Berner Fachhochschule wurden die Gläser zu einem späteren Zeitpunkt einem Stossbelastungstest (Pendelschlag-Versuch) unterzogen.



Abbildung 7: Belastungstest der Vakuumgläser



Abbildung 8: Werkseigene Anlage

e.) Optimierung des Rahmenquerschnitts und Verankerung

Vakuumgläser konnten nicht mit den üblichen Techniken im Fensterrahmen verankert werden. Für 2- und 3-fach Gläser werden normalerweise Verglasungsklötze eingesetzt und das Glas anschliessend durch seitliche Leisten fixiert, welche mit dem Rahmen verschraubt werden. Aber durch den tieferen



Glaseinstand beim Vakuumglas entstünde dabei ein zu grosser Hebel auf die Leisten, welche diese nicht mehr tragen können.

Im ersten Schritt wurde folgende Lösung entwickelt: Glashalter wurden am Grund des Glasfalzes direkt mit dem Rahmen verschraubt und garantieren so den notwendigen Halt und Anpressdruck gegenüber dem Vakuumglas. Die Abdeckleisten wurden lediglich aufgesteckt. Sie sind schraubenlos. Damit keine Raumluft ans Glas innerhalb des Falzes strömen und zu Kondensation führen kann, wurde die Glasleiste seitlich mit Dichtungsschnur abgedichtet. Anschliessend wurde die Vakuumgläser mit Silikonfugen eingebettet. Leider zeigte sich später, dass die Gläser noch weicher verbaut werden müssen...



Abbildung 9: Fixation des Vakuumglases am Grundes des Glasfalzes



Abbildung 10: Querschnitt Abdeckleiste mit Dichtungsschnur und Silikonfuge

f.) Automatisierung

Ein zentrales Element des Projektes ist die Automation der Schiebefenster. Dazu wurde eine grössere Marktrecherche durchgeführt. Die Ergebnisse waren ernüchternd:

- Es waren keine leisen Motoren auf dem Markt.
- Es wurden keine Kompaktmotoren angeboten, welche in den Rahmen integrierbar wären. Angeboten wurden lediglich Rahmenaufsätze, welche optisch aber nicht überzeugen konnten.
- Davon ausgenommen waren die kleinen Verschlussmotoren, welche die mobilen Flügelteile verriegeln.

Aus dieser Situation heraus wurde vom Architekten der Anspruch formuliert, dass der Motor wenigstens in die Betondecke versenkt werden muss, um den Gesamteindruck der Fensterfront nicht durch unschöne Aufsätze zu stören. Die entsprechende Aussparung im Betonkern liess sich leicht realisieren. Daraus ergab sich aber ein weiteres Problem: Der Motor musste jederzeit für Reparaturen ausgetauscht werden können, ohne dass gleich das ganze Fenster ausgebaut werden muss. Aber alle standardmässig angebotenen Motoren bedingen einen waagrechten Zugang zu den Verschraubungen der Motorleiste.

Die Lösung wurde in der Konstruktion eines „Bettladenverschlusses“ gefunden, der es ermöglicht, den Motor von unten her ein- und auszuhängen.



Abbildung 11: Motoraufsatz an Schiebefenster



Abbildung 12: Versenkung der Motoren durch Aussparungen in der Betondecke

g.) Test am Bau

Mitte 2018 konnte am Bau „Austrasse“ in Meilen die optische Wirkung von grossflächigen Vakuumfenstern und das Erscheinungsbild von Eichenholz-Schiebefenstern mit Motorisierung geprüft werden. Die Optik in Sachen „Abstandshalter“ war sehr gut. Entgegen vieler im Vorfeld geäusselter Zweifel störten die winzigen Punkte der Abstandshalter überhaupt nicht. Im Gegenteil, Besucher bekundeten Mühe, die Glasbrücken überhaupt zu entdecken. Lediglich die Glasfarbe war von innen gesehen noch etwas zu grünlich (da zu Eisenoxyd-haltig) und von aussen betrachtet hat das Glas einen rosa Stich (von der Sonnenschutzbeschichtung herrührend).

Die Motoren und die Mechanik der automatischen Schiebefenster funktionieren zwar problemlos. Probleme waren aber bei der Ansteuerung einzelner der Motoren aufgetaucht, deren Ursache nicht geklärt werden konnte. Verschiedene Besuche des Motorherstellers und des Elektrikers brachten lange nicht den gewünschten Erfolg.

Im Oktober 2018 wurde an 8 Gläsern im Bau „Austrasse“ ein Totalverlust des Vakuums festgestellt. Drei Vertreter von Taiwan-Glas waren im Januar 2019 vor Ort und haben nach den Ursachen gesucht.

Ein Defekt auf Grund des Transportes konnte ausgeschlossen werden. Taiwan-Glas ging davon aus, dass Druck auf die Ventile durch den Stufenfalz (Hartanschlag) zu Haarrissen geführt haben muss: Die nähere Betrachtung ergab, dass an der heikelsten Stelle des Vakuumglases, beim Ventil der Schaden entstanden ist. Dieses Ventil war beim vorliegenden Typ als feines und verschweisstes Glasröhrchen ausgebildet. Dieses war wiederum im Randverbund durch einen relativ harten Siegel-Kunststoff eingebettet. Bei näherer Untersuchung konnte festgestellt werden, dass dieses Röhrchen gebrochen war und entsprechend sich das Vakuum entspannt hatte.

GlassX resp. Taiwan Glas geht davon aus, dass die Ursache des Bruchs auf den Stufenfalz zurückzuführen sei, der im Holzrahmen der Fenster für den Fenstereinstand eingefräst war. Dieser hat die Funktion Isoliergläser mit einem Befestigungselement sauber an den Rahmen zu pressen. Dieser Umstand hat beim Vakuumglas dazu geführt, dass eine Druckstelle über dem harten Siegel auf das Glas-Ventil entstanden ist und dieses beim Anpressen abgebrochen wurde.

Anmerkung. Bei grossen Gläsern werden bei Windlast zwingend auch erhebliche Drücke an den Rändern erzeugt. Ausserdem sind beim Material Holz immer auch kleinste Veränderungen in der Rahmengometrie möglich.



Beim Ersetzen der Gläser wurde einerseits dieser Stufenfalz partiell im Bereich des Ventils weggefräst und andererseits verzichteten die Taiwanesischen Hersteller beim Vakuumglas inzwischen auf den harten Siegel beim Ventil, sodass keine Druckstellen auftreten können.

h.) Test Sanierung historischer Fenster am Münsterplatz mit VIG

Der Einsatz von Vakuumgläsern zur Sanierung historischer Fenster wurden in einer praktischen Anwendung am Denkmal geschützten Gebäude Münsterplatz 12 in Basel parallel getestet. Verglichen wurde eine sanfte Sanierung mit Vakuumisoliertgläsern unter Erhalt der historischen Fensterrahmen einerseits und der Ersatz der historischen Fenster durch Imitate (also neue Fenster im historischen Stil mit 3-fach Isoliertgläsern). Um die energetische Verbesserung zu dokumentieren, wurden auch die alten historischen Fenster auf dem Prüfstand bei Geber-Vogt bezüglich Wind- und Schlagregendichtigkeit geprüft.



Abbildung 13: historischer Rahmen mit Vakuumglas saniert



Abbildung 14: historischer Rahmen auf dem Prüfstand

i.) Totaler Neuaufbau des Rahmensystems

Um die Rahmen- und Flügeldimensionen wie vorgesehen weiter reduzieren zu können (schlankere Querschnitte) musste der Aufbau des Fenstersystems als Ganzes weiterentwickelt werden. Dies u.a. weil Vakuumglas tiefere Einstände braucht als herkömmliche dreifach Isoliertgläser und so mit herkömmlichen Beschlägen „kollidieren“ würde. Ausserdem musste eine statische Verstärkung der Mittelpartie gefunden werden, welche bei reduzierten Querschnitten notwendig würde.

Es war offensichtlich, dass ein gänzlich neuartiges Schiebe-Beschlagsystem notwendig wird, welches auf die reduzierten Querschnitte angepasst ist und grössere Einstandstiefen erlaubt. Eine solche tiefgreifende Erneuerung war nur in Kooperation mit potenten Beschlagherstellern auf Entwicklerebene möglich.

Auch der Motor musste deutlich kleiner werden, so dass er künftig in den Rahmen eingebaut werden kann. Zwar konnten beim Bau an der „Austrasse“ die Motoren durch Aussparungen in der Betondecke versenkt werden, wodurch ein optisch schönes Resultat erzielt wurde. Diese Lösung erfordert aber



bauseitig einen erheblichen Mehraufwand. Für energetische Sanierungen bestehender Bauten wäre dies keine zweckmässige Option.

Zuverlässige Steuerung: Die Ansteuerung des Motors muss absolut zuverlässig funktionieren. Schnittstellen zur Haustechnik könnten ein Schwachpunkt sein.



Abbildung 15: Entwickler verschiedener Firmen an einem Tisch



Abbildung 16: miniaturisierte Beschläge im Test

2.3 Auswahl der Hochleistungsdämmstoffe für die opaken Wände

a.) Ausgangslage

Rund um die Frage, wie extrem dünne, aber superisolierte Wände überhaupt konstruiert werden können, ergaben sich im Teilbereich „Isolation“ folgende Problemstellungen: Welches ist überhaupt der geeignetste Dämmstoff, der mit extrem tiefen λ -Werten aufwarten kann? Wie kann der Dämmstoff genügend genau und technisch sicher kommissioniert werden? Wer führt die Kommissionierung durch? Und welches ist die geeignetste Befestigungsart?

b.) Prüfung alternativer Dämmstoffe mit tieferen Kosten

Aerogel stand bereits mit der Projekteingabe im Fokus. Trotzdem sollten Alternativen seriös überprüft werden, insbesondere weil Aerogel gegenwärtig noch ein sehr teureres Material ist. Deshalb wurden auch verschiedene alternative Dämmstoffe nochmals überprüft. So wurde auch der Dämmstoff „Calostat“ vom Hersteller EVONIK in die nähere Auswahl einbezogen. Calostat ist eine Kieselsäureplatte mit λ -Wert 0.019 W/mK . Der Anwendungstest vor Ort hat jedoch ergeben, dass das Produkt in seiner heutigen Form keine Alternative zum Aerogel-Dämmstoff sein kann. Die Platte ist brüchig und zu wenig stabil, vor allem wenn sie im Grossformat eingesetzt werden muss.



c.) Entwicklung der Anforderungen

In Zusammenarbeit mit Renggli AG, welche den tragenden Teil der Wände entwickelte, wurden im Laufe des Projektfortschrittes die Anforderungen an den Dämmstoff immer weiter präzisiert. Renggli AG hatte sich inzwischen beim Wandaufbau für ein Sandwichsystem entschieden (siehe nächstes Kapitel). Mit der Wahl eines Sandwichsystems für die Herstellung der opaken Wände wurde damit indirekt auch die Befestigungsart des Dämmmaterials vorgegeben: das Einklemmverfahren erweist sich in diesem Fall idealer als die Verklebung der Dämmstoffe. Daraus ergaben sich folgende Bedingungen an den Dämmstoff:

Wichtig war, dass die eingesetzten Dämmstoffe als weiche (etwas zusammendruckbare) Platten vorlagen. So konnten die Platten seitlich gut verklemmt werden. Ausserdem mussten bei den geringen Dimensionen der opaken Wände selbst geringste Luftzirkulationen innerhalb der Wände ausgeschlossen werden.

- Der Dämmstoff musste auf ein Toleranzmass von 1 mm exakt zuschneidbar sein
- Die Dämmstoff-Dicken durfte höchstens 2 mm variieren

Musterplatten von 50 mm und 10 mm Spaceloft board wurden für die ersten Wand-Prototypen bereitgestellt. Bei der Herstellung der Muster fiel auf, dass 10 Lagen Spaceloft nicht 10 cm Boards ergaben, obwohl das Produkt jeweils 10 mm stark sein sollte. Deshalb wurde beschlossen, bei der Herstellung der Boards jede Platte einzeln nachzumessen und wenn nötig 11 Lagen Spaceloft zu 10 cm boards verkleben, so dass eine gleichbleibende Qualität garantiert werden konnte.

d.) Produkte-Sicherheit Verleimung

Gemäss Erfahrung von AGITEC greifen viele Klebstoffe die Aerogelstruktur an und beeinträchtigen damit die guten Dämmeigenschaften von Aerogel. Deshalb hatte AGITEC Leime selektioniert, welche eine sichere Verklebung der Platten garantieren.

Auch wenn die Aerogelmatten in der Wandkonstruktion nur verklemmt wurden, können im Holzbau trotzdem Leime zur Anwendung kommen, welche möglicherweise in direktem oder indirektem Kontakt die Aerogelstruktur angreifen. Aus diesem Grund wurden die bei der Wandkonstruktion bei Renggli AG eingesetzten Klebstoffe ebenfalls getestet. Abklärungen ergaben, dass die eingesetzten Klebstoffe die Dämmeigenschaft der Dämmplatte nicht beeinträchtigen.

Lösungssuche für Konfektionierung und Einbau: Es wurden mit Renggli AG verschiedene Lieferformen und deren Kosten besprochen. Es bestand die Möglichkeit Spaceloft als Vlies oder mehrlagig verklebt und in der richtigen Grösse von AGITEC zugeschnitten geliefert zu bekommen. Auf Grund der Staubentwicklung bei der Konfektionierung und der Notwendigkeit geeigneter Arbeitssicherheitsanforderungen (Abzugsvorrichtungen, Filter etc.) entschied sich Renggli für die vorkonfektionierte Variante.

e.) Abschnitteverlust und optimierte Zuschnittplanung

Der Schnittplan von Seiten Renggli enthielt 92 verschiedenen grosse Positionen. Die Platten dazu werden aus Rollenmaterial hergestellt welches standardmässig eine Breite von ca. 1.45 m hat. Daraus hätte sich ein Abschnittverlust von 25% ergeben, was ökologisch und ökonomisch nicht tragbar war.

Um den Abschnittverlust zu minimieren wurde mit Firma Renggli Lösungen gesucht, wie der Zuschnitt auf jedes Feld hin so zu optimieren war, dass möglichst wenig Verschnitt entstand, der Arbeitsaufwand bei Renggli aber trotzdem so gering wie möglich ausfiel. Mit dem neu erarbeiteten Zuschnittsplan konnte der Verschnitt schliesslich auf 5% reduziert werden.



Jedoch erhöhte sich die Anzahl der Einzelteile auf ca. 150 Stück. Deshalb musste die Kommissionierung für einen effizienten und reibungslosen Einbau der Isomatten neu überdacht werden. Es wurde eine Planliste erstellt und jedes Einzelteil mit Elementnummer und Feldnummer gekennzeichnet. Zusätzlich wurden alle Zuschnitte pro Element auf einer separaten Palette angeliefert, um den Arbeitern die Abläufe zu erleichtern resp. Fehlerquellen zu vermeiden.

Damit soll exemplarisch gezeigt werden, dass die Verarbeitung neuer Materialien oft auch zu einer Veränderung der bisherigen Arbeitsteilung zwischen den involvierten Firmen führt.



Abbildung 17: Areogelmatten, Kommissioniert und Palettisiert



Abbildung 18: jedes Einzelteil mit Elementnummer und Feldnummer gekennzeichnet

2.4 Opake Wände

a.) Ausgangslage

Um die schmalen Fensterstärken auch in den opaken Wandteilen weiter zu führen, wurde eine Produktion von Wandelementen aus Holz mit einem hohem Vorfertigungsgrad.

Zwar bestanden langjährige Erfahrungen mit zahlreichen Modellen vorgefertigter Wandelemente aus Holz. Aber ultradünne Wandelemente, welche die schmalen Fensterstärken dieses Projektes weiterführen sollen, mussten gerade Mal 15 cm Wandstärke aufweisen. Trotzdem mussten die Elemente nach wie vor selbsttragend sein und auch bei Dimensionen von 240 cm Verformungsstabil bleiben. Gleichzeitig hatten sie trotzdem einen U-Wert von 0.155 W/m²K einzuhalten. Diese Vorgaben ergaben ganz neue physikalische Herausforderungen, welche nicht einfach durch eine simple Redimensionierung bestehender Aufbauten erreicht werden konnten. Es hatte sich vielmehr herausgestellt, dass die Wandelemente von Grund auf neu entwickelt werden mussten.

b.) Erste Projektschritte

Die ersten Projektwochen galten der Definition des Wandaufbaus. Zwei Systeme kamen in die engere Auswahl:

- a) Trägerplatte mit appliziertem Aerogel (oder Alternative Dämmmaterial „Calostat“)



b) Holzständerbausystem mit integriertem Aerogel (Holzständerbausystem -> Kastenelement im Sandwichsystem)

Das System a) mit Trägerplatte bedeutete, dass die Dämmung vollflächig auf eine in sich stabile Holzplatte aufgebracht würde. Aufgrund der durchgehenden Dämmschicht gäbe es keine linearen Wärmebrücken durch tragende Bauteile in der Dämmebene. Das für den Einsatz vorgesehene Dämmmaterial erwies sich jedoch als ungeeignet für die flächige Befestigung. Selbige Erkenntnis galt auch für die Alternative „Calostat“. Das Dämmmaterial konnte weder kraftschlüssig an eine Trägerplatte geklebt werden, noch einfach mit Schrauben für eine Befestigung durchdrungen werden. Von einer Verschraubung musste auch deshalb abgesehen werden, weil Verschraubungen punktuelle Wärmebrücken dargestellt hätten. Diese Wärmebrücken wären Quellen von Kondensaten etc. geworden.

Die Variante b) mit Holzständerbausystem wurde weiter verfolgt.

c.) Kastenelement im Sandwichsystem – eine vollständige Neuentwicklung :

Ein Element wie es in der Holzständerbauweise traditionell hergestellt wird, bringt den Nachteil, dass statische Elemente in der Dämmebene eine lineare Schwächung der Dämmleistung (Wärmebrücke) darstellen. Obwohl Holz kein besonders guter Wärmeleiter ist, gilt dieser Grundsatz auch für Holz. Je leistungsfähiger die Dämmung, desto dünner werden die opaken Elemente. Umso mehr fallen solche Wärmebrücken ins Gewicht. Eine zentrale Herausforderung bei ultradünnen Wänden war darum, diese Unterbrechungen zu minimieren.

Eine Lösung wurde im Einsatz von sehr schmalen Stegen gefunden. Im Gegensatz zum konventionellen Ständerbau, bei dem die Ständer die vertikalen Lasten abtragen und die Platten lediglich für die Aussteifung dienen, musste das neu entwickelte System im Verbund funktionieren: Die Platten übernehmen dabei auch einen Teil der vertikalen Lasten. Ein starrer Verbund von Platten und Stegen war unumgänglich. Wir nennen diese Neuentwicklung „**Kastenelement im Sandwichsystem**“.

Des Weiteren war aufgrund der schmalen Stege eine im Holzsystembau übliche Klammerung nicht möglich. Die Randabstände wären nicht gewährleistet gewesen. Die Lösung lag in der Verklebung der Elemente.



Abbildung 19: Kastenelement im Sandwichsystem



d.) Schubversagen und neues Material

Eine erste Analyse mit Stegen aus OSB hat zu Schubversagen bei horizontaler Beanspruchung (Wind) geführt. Um die auftretenden Schubkräfte in den Stegen ableiten zu können, wurde der Einsatz von Birken-Sperrholz 15mm weiter verfolgt.

Die Klebefläche bei 15 mm Stegen war zu klein um die Schubkraft von dem Steg in die Platte zu übertragen. Es wurde eine V-Nut in der Platte entwickelt, welche zum einen eine Führung der Stege in der Platte ergab, aber auch die Fläche der Leimfuge ca. um den Faktor 2.5 vergrösserte. Eine absolute Passgenauigkeit dieser V-Nut war unabdingbar. Diese konnte mit CAD gesteuerter Fräsen mit einer Genauigkeit von 0.1 mm erreicht werden.



Abbildung 20: passgenauer Steg



Abbildung 21: Kastenelement bereit zur Dämmung

Die Platten weisen Hersteller bedingt Toleranzen von 1-2 mm auf. Dies war zu viel, für die exakte Einfassung in V-Nuten. Die Platten wurden deshalb etwas dicker bestellt und nachträglich um 0.5 mm Genauigkeit abgefräst .

Das feinporige Material der Dämmung hatte nach ersten Erkenntnissen einen negativen Einfluss auf die Verklebung der Holzbauteile. Die Abbundzeit musste erhöht werden. Eine allfällige Minderung der Festigkeit musste geprüft werden. Die Festigkeit konnte garantiert werden, wenn die Oberflächen vor dem Verleimen mit dem Staubsauber von allfälligem Aerogel-Staub gründliche gereinigt werden.

e.) Test mit Dämmstoff

Der Dämmstoff mit einer planerischen Dicke von 100 mm wurde durch den Lieferanten aus einzelnen 10 mm dicken Lagen zusammengeklebt. Die vorliegende Musterplatte zeigte aber, dass das Material auf die Gesamtdicke von 100 mm ein Untermass von bis zu 10% aufweisen konnte. Deshalb wurde, wie beschrieben, mit 11 Platten gearbeitet.

Der Zuschnitt der Dämmmaterialien erwies sich als sehr aufwändig und staubintensiv. Die Fa. Agitec war bereit, dass Material beim Pilotprojekt nach Zuschnittsplänen der Firma Renggli vor zu konfektionieren. Das Dämmmaterial liess sich in der Fläche kaum komprimieren. Eine absolute Passgenauigkeit von Element und Dämmung war deshalb unumgänglich.



f.) Dampfbremse

Wünschenswert war eine Konstruktion, welche ohne zusätzliche Dampfbremse (Folie) auskommt. Dies bedingte, dass die äussere Beplankung um ein Vielfaches diffusionsoffener sein musste als die Innere. Trotz längerer Recherche wurde keine Kombination von Plattenmaterialien gefunden, welche die Parameter der Bauphysik, aber auch die Anforderungen an die Statik erfüllen konnten. Dieser Ansatz musste fallen gelassen werden.

Der Prototyp mit beidseitiger Beplankung mittels Furnierschichtholz (Kerto-Q) wurde deshalb weiterverfolgt. Die Kerto-Q-Platten wiesen optimale statische Werte auf und liessen eine zuverlässige Verklebung mit den Stegen zu. Ein dauerhafter Verbund als Kastenträger war somit gewährleistet. Mit der inneren Schicht konnte das Fassadenelement an den Gebäudekern befestigt werden. Dazu wird ein Tragwinkel an Betonkern geschraubt, auf diese die Wände mit dem Kran gestellt. Die äussere Beplankung diente zur Befestigung der Fassadenbekleidung. Eine Folie auf der Gebäudeinnenseite als auch eine Hinterlüftung auf der Gebäudeaussenseite ist mit dieser Konstruktion jedoch unabdingbar.



Abbildung 22: Entstaubung



Abbildung 23: Zusammensetzung ist Millimeterarbeit

g.) Erfahrungen Einbau Austrasse

Eine grosse Herausforderung waren die maximalen Toleranzen von nur gerade 2 cm zwischen Holz- und Massivbau. Das heisst, die Hülle wurde um 2 cm grösser geplant als der Betonkern. Dies bedingte ein sehr genaues Arbeiten des Baumeisters. Bei der Montage hat sich gezeigt, dass an gewissen Orten die Toleranzen bis auf 5 mm von den noch real existierenden Abweichungen aufgefressen wurden.

Bei der Montage der Holzelemente mussten diese exakt waagrecht eingemessen werden, und zwar unabhängig von der Neigung der Betonböden, damit die Holzelemente seitlich perfekt ineinander passten. Nur an einer einzigen Stelle musste ein Element vor Ort etwas eingekürzt werden.



Abbildung 24: Anlieferung...



Abbildung 25: ...und Montage der Elemente

2.5 Hybridbau - Holzstützen statt Stahlstützen

Das Pilotprojekt Austrasse wurde als Hybridbau realisiert. D.h. Geschossdecken in Beton, Gebäudehülle in Holzbauweise (siehe nächstes Kapitel). Die Holzelemente wurden kraftschlüssig an den Betonkern befestigt. Im Rahmen des Projektes wurde entschieden, die Betondecken nicht wie herkömmlich bekannt auf Stahlstützen - sondern im südlichen Bereich auf Holzstützen abzustützen. Diese Eichenstützen in Brettschichtholzqualität wurden im Bauprozess eingebaut und direkt mit der Betondecke vergossen. Diese Stützen gelten als gestalterisches Element und werden in der Nutzungsphase freistehend sichtbar im Raum stehen.

Erfahrungen Holzschutz

Die Stützen wurden im Werk vorgefertigt, mit einem Dorn unten und oben als Verbindungsmittel zum Beton. Zuerst wurde die untere Platte betoniert, darauf die Holzstütze gestellt und der Dorn einbetoniert. Dann erfolgte das Betonieren der oberen Decke. Eine grosse Herausforderung war, dass die Pfeiler keine Wasserschäden über die lange Phase des Rohbaus erleiden, was so nicht geklappt hatte. Die Holzpfosten müssten künftig nicht nur in Plastik eingepackt, sondern regelrecht eingeschweisst werden, damit kein Betonwasser während des Baus ins Holz eindringen kann.



Abbildung 26: Setzen der Holzstützen



Abbildung 27: Wasserschaden



2.6 Pilotheus Nullserie „Austrasse“

a.) Architektonisches Konzept und Materialisierung

Der Bau des Einfamilienhauses „Austrasse“ in Meilen sollte neue Wege bei der Vereinigung von Architektur und energetischer Optimierung unter Verwendung natürlicher Materialeien aufzeigen. Das Projekt, das sich exponiert am Siedlungsrand befindet, weist eine kompakte, jedoch in sich versetzte Grundrissituation auf, die sich optimal ins Gelände einfügt. Der nördliche und horizontal versetzte Gebäudeteil um den zentral gelegenen Erschliessungstrakt ist der Umgebung angepasst und zeigt einen zurückhaltenden, soliden Charakter. Die Südwestseite dagegen ist mit grossem Fensterflächenanteil offen gestaltet und erhält durch vorgelagerte Beschattungselemente eine individuelle Anmutung. Die zurückversetzte Attikageschossebene bestimmt mit dem Spiel zwischen offenen und geschlossenen Flächen das äussere Erscheinungsbild.

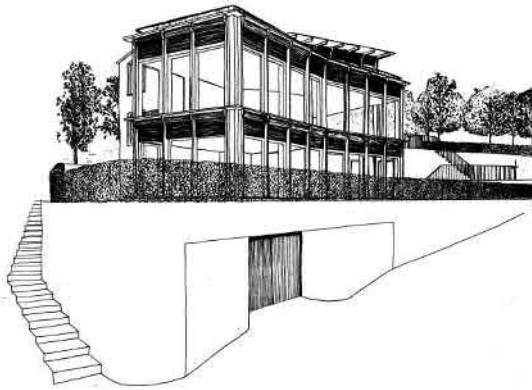


Abbildung 28: Projekt Austrasse West Ansicht

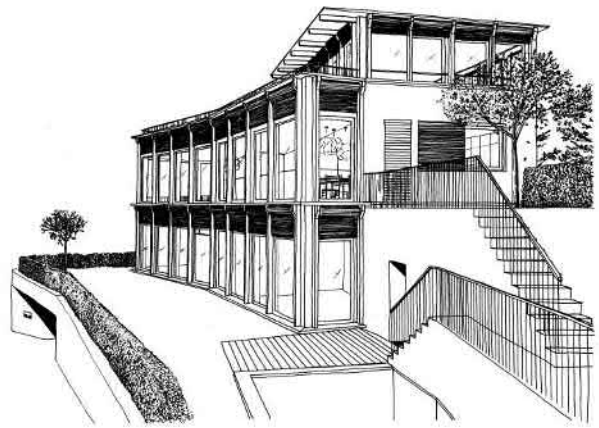


Abbildung 29: Ost-Ansicht

Das Neubauprojekt besteht aus einem grosszügigen Einfamilienhaus auf zwei Geschossebenen mit Attikaausbildung und Blick auf den Zürichsee.

b.) Materialwahl

Bei diesem Bauvorhaben wurden nur 3 Materialien verwendet:

- Holz für die Hülle
- Beton für den Kern / die Erschliessung
- Messing für die Details wie Griffe oder Abdeckungen

Die Fassadenflächen sind als Holzkonstruktion mit Hinterlüftung und aussenseitig horizontaler Schalung ausgebildet. Innen vorgestellte Stahlstützen übernehmen die tragenden Funktionen. Im Kern des Gebäudes wurden statt Stahlstützen Stahlbetonwände erstellt, die sich innenseitig als Sichtbeton zeigen. Die Decken des Gebäudes sind massiv aus Stahlbeton ausgebildet.

Die verbauten Materialien Beton, Eiche/Nussbaum und Messing sind im Innenraum unbehandelt und im Aussenraum nur mit dem Notwendigsten behandelt, so dass sie Ihre Funktion als Witterungsschutz besser erfüllen.

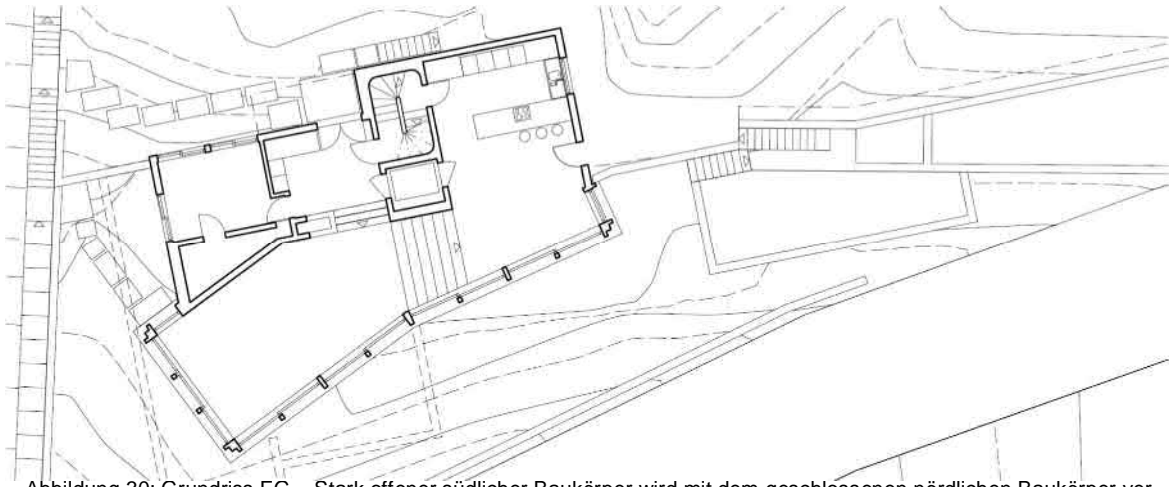


Abbildung 30: Grundriss EG – Stark offener südlicher Baukörper wird mit dem geschlossenen nördlichen Baukörper verschnitten

c.) Holzverschalung

Bei der Holzverschalung hat sich leider auch nach längerer Recherche herausgestellt, dass besonders langlebige Produkte wie Acoya nur in beschränkter Grösse (Länge und Breite) fabriziert werden. In einem weiteren Schritt wurden Leimverbindungen geprüft, mit denen grössere Bauteile ermöglicht würden. Diese Bemühungen waren nicht erfolgreich.

Deshalb fiel die Wahl der äusseren Haut aus einer 40 mm dicken Verschalung aus druckimprägnierter Weisstanne, welche sowohl durch ihre Materialstärke als auch durch die Druckimprägnierung eine extrem langlebige Verschleisschicht darstellt. Nach Angaben des Herstellers wird durch die Druckimprägnierung die Weisstanne mit einer Lebensdauern von 10 Jahren im erdberührten Bereich angegeben.

Alle beweglichen Teile zu denen die Fenster, der Sonnenschutz mit Schiebeläden und Rollläden und die Türen gehören, sind aus langlebiger Eiche gefertigt die mit einem Schutzanstrich (Rubiomonocoat Oil Plus 2C) versehen ist, damit ein Auswaschen der Gerbsäure verhindert wird.



Abbildung 31: Eichenfenster mit druckimprägnierter Holzschalung (Eiche, Messing, Nuss)



Abbildung 32: Materialmix der Ausbauten im Innenraum

d.) Innenraum

Im Innenraum übernimmt der Sichtbeton und die Eichenstützen (15 x 15 cm) die tragende Funktion. Ausbauten wie Küche und Schränke werden in Nussbaum ausgeführt. Alle technischen Bauteile sind in Metall ausgeführt. Da Messing vor allem bei bewegten Teilen sehr gute selbstschmierende Eigenschaften hat konnte es sich gegenüber Alternativen durchsetzen. Das grösste Problem stellt beim Messing jedoch das Verbinden von Elementen. Das „Schweissen“ von Messing ist nicht möglich – alternativ muss es entweder verlötet oder verschraubt werden. Zu den Metallbauteilen gehören u.a. Absturzsicherungen, Küchenabdeckung, Lichtschalter, Türgriffe und Scharniere .

e.) Integration des Tragwerks

Neben den herausragenden Dämmeigenschaften der ultradünnen Holzwände wollte die Bauherrschaft auch das Tragwerk in selbige integrieren, da sonst durch additives Auftragen einer zusätzlichen Tragschicht der Systemaufbau massiv vergrössert würde. Leider konnte die Tragkonstruktion nicht vollständig in das Fassadenelement integriert werden, da der kraftschlüssige Verbund zwischen dem Element und dem Holzbau sehr schwierig und keine adäquate Lösung im Holzbau ersichtlich war. Mit diesen Rahmenbedingungen konnte die Austrasse noch keine „tragenden“ Fassadenelemente besitzen, sondern lediglich selbsttragend sein. Daraus ergaben sich in der Austrasse zwei Situationen:

1. Opake Wand mit Aussparung für Stahlstütze im nördlichen Bereich
2. Opake Wand/Fenster mit frei stehenden Holzstützen im südlichen Bereich

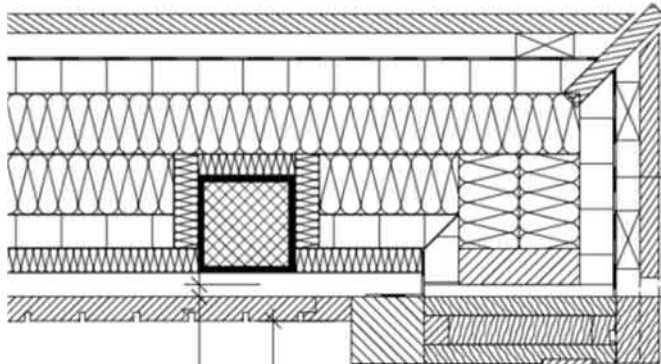


Abbildung 33: Querschnitt integrierte Stahlstütze in Holzelement im Bereich Nordfassade

Abbildung 34: integrierte Stahlstütze in Wandelement

Die Frage der Tragwerke bei der opaken Wand musste mit einer konventionellen Lösung mittels Stahlstütze beantwortet werden, welche in einer Aussparung der Holzelemente positioniert wurde. Die Stahlstützen sollten so wenig wie möglich in die Dämmebene eingeschoben werden, so dass die entstehende Wärmebrücke durch eine gezielte Überdämmung aus Aerogel grösstenteils kompensiert werden konnte.

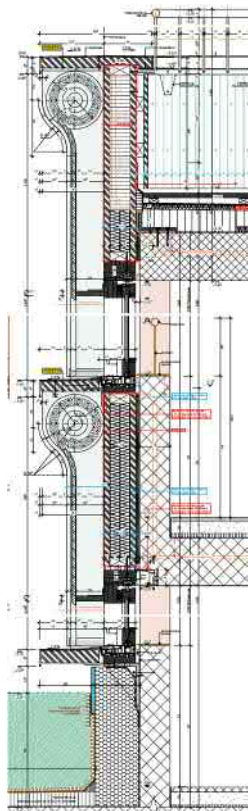


Abbildung 35: Längsschnitt Sonnenschutz Südfassade

e.) Energetisches Konzept

Bereits die Kubatur und die darin enthaltenen Öffnungen wurden nach energetischen Gesichtspunkten positioniert: offene Fassade nach Süden und somit grosse solare Gewinne im Winter - geschlossenen Fassade nach Norden, so dass energetische Verluste im Winter minimiert werden.

Ergänzt wurde dies durch einen massiven Sonnenschutz, der in den Sommermonaten das Gebäude vor dem Überhitzen schützt. Durch den Aufbau des Sonnenschutz wird wie eine doppelschalige Fassade kreiert, über die im geschlossenen Zustand, ähnlich wie in einem Kamin die warme Luft abgeführt wird, so dass es selbst an der Scheibenausseite schon zu keiner Überhitzung kommt. Mittels einer thermischen Simulation konnte eine höhere Wirksamkeit nachgewiesen werden als mit einem Konventionellen Sonnenschutz möglich ist.

Das Gebäude wird im sog. „Minergie A“ Standard erbaut. Hinter diesem Standard verbirgt sich, dass mittels der Jahresproduktion an Strom durch die PV Module auf dem Dach ($9.3 \text{ kWp} = 10'245 \text{ kWh/Jahr}$ gewonnen) der Betriebsenergiebedarf gedeckt wird (Gesamtenergiebilanz $<35 \text{ kWh/m}^2\text{a}$). Der gewonnene elektrische Strom wird in einer zentralen Batterie in der Tiefgarage gespeichert. Im Falle ein Stromausfalles kann der Batteriespeicher 5 definierte Verbraucher unterbruchsfrei mit Strom versorgen.



Die benötigte Heizwärme wird 100% fossilfrei über geothermische Wärmepumpe mit 2 x 200 m tiefen Bohrungen bereitgestellt. Die hierbei vorherrschenden Vorlauftemperaturen von ca. 35°C setzen einen niedrigen Energieverbrauch voraus, welcher über die hochgedämmte und luftdichte Hülle ermöglicht wird. Das Lüftungssystem wurde mit einer WRG kurzgeschlossen, damit die produzierte Energie auch bei dem notwendigen Frischluftwechsel im Gebäude bleibt

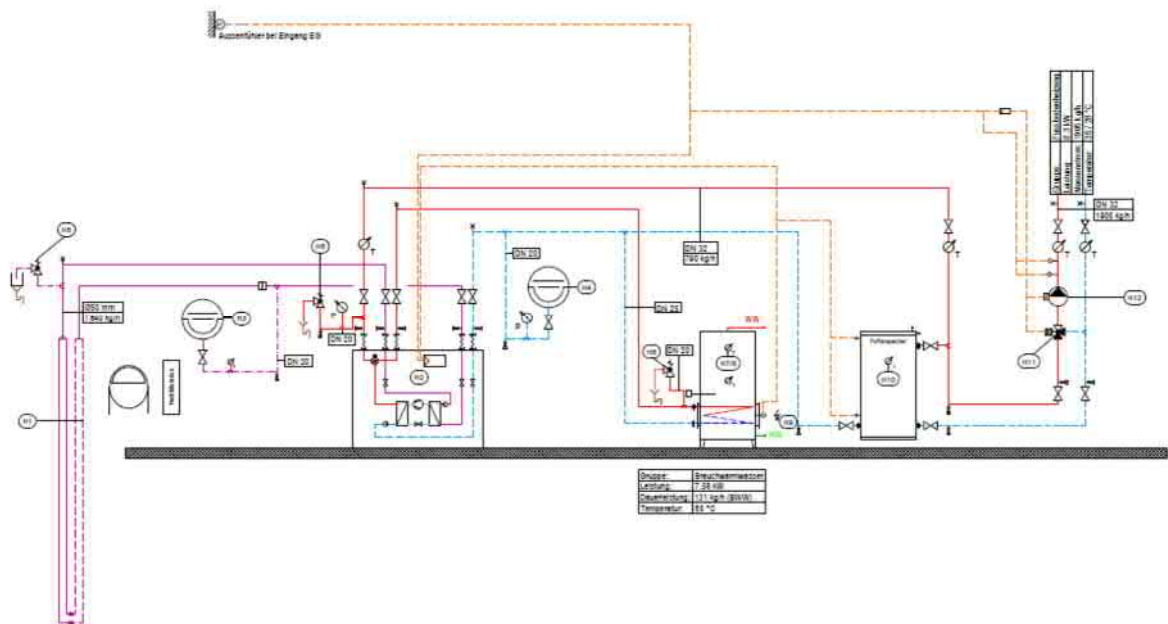


Abbildung 36: Strangschema Heizung („Quelle W&P Engineering, Stansstaad“)

Die von aussen zugeführte Luft wird über ein Erdregister geführt und so im Winter vorgewärmt und im Sommer vorgekühlt.

f.) Bauseitige Herausforderungen bei Schiebefenster mit Vakuumverglasung



Abbildung 37: Rohbau



Abbildung 38: Ansicht Westfassade



Da es sich bei der Vakuumverglasung um ein neues bzw. noch nicht weit verarbeitetes Produkt handelt sind noch weitere Schwierigkeiten und Hindernisse aufgetaucht, die im konventionellen Arbeits- und Produktionsprozess keine Hindernisse darstellen. Wie bereits beschrieben kann Float in den Dimensionen von 3 x 6 m ohne Probleme hergestellt werden – bei der Vakuumverglasung wurden die Dimensionen des Glases auf 1.80 m Breite und eine maximale Höhe von 3.00 m begrenzt. Die maximale Lieferbreite des Glases war in der Summe 8 cm kleiner als durch den Entwurf gefordert und bedingten Anpassung des ursprünglichen Fassadenentwurfs.



Abbildung 39: Eingangstüre mit provisorischer Holzplatte bis nächste Glaslieferung eintrifft.



Abbildung 40: Fertig montierte Vakuumfenster

g.) Bauseitige Herausforderungen bei hochisolierten ultraschlanken Fassadenelementen

Ziel der Fassadeelemente war es, mit einem schlankest möglichen Aufbau die hohen geltenden Standards zu erfüllen – dies verpackt in einem vorfabrizierten Zustand, um Zeit zu gewinnen bei gleicher bis höherer Präzision als im konventionellen Bauen.

Da es sich um vorgefertigte Holzelemente handelt, welche über eine Kerndämmung aus Hochleistungsdämmstoff verfügen, reagiert sowohl das Holz als auch die Dämmung sehr schlecht auf Wasser. Durch ein Leck in der Dachabdichtung ist Wasser entlang einer Stahlstütze bis zu einem Holzwandelemente gelaufen. In einer ersten Massnahmen musste die bereits montierte Dampfsperre gelöst werden um ein tiefergehendes Eindringen des Wassers in das Holzbauteil zu verhindern und ein erstes austrocknen zu ermöglichen. Im weiteren Verlauf stellte sich raus, dass das Wasser nur oberflächlich war und nicht tiefer in das Holz eingedrungen ist. Wäre dieser Fall eingetreten, hätte mittels mehrerer Bohrungen und darüber einblasender Luft das Bauteil über einen langen Zeitraum getrocknet werden müssen.



Abbildung 41: Wasserschaden



Abbildung 42: Vorbereitungen für Bodensteckdose

Durch den sehr dünnen Aufbau der Wände durften diese im Bereich der Dämmung nicht weiter geschwächt werden. Aus diesem Grund Steckdosen oder andere Querschnittschwächungen nicht im Wandelement, sondern ausweichend z.B. im Boden als Bodensteckdose oder in flankierenden Wänden verbaut werden.

Bei den vorfabrizierten Wandelementen wird Millimetergenau gefertigt – diese Genauigkeit kann allerdings nur im Wechselspiel mit dem Rohbau Vorteile generieren und so mussten die Rohbautolleranzen auf ein Minimum von 2 cm über die ganze Baubreite reduziert werden. Diese Zusatzleistungen müssen bereits in der Ausschreibung definiert werden, so dass Baumeister und Bauleitung mit der entsprechenden Sensibilität und Massgenauigkeit arbeiteten.



Abbildung 43: Nordfassade der «Austrasse»



3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Bauherrenumfrage

Die Berner Fachhochschule, Kompetenzbereich Management und Marktforschung untersuchte das Marktpotential von hochisolierenden Schiebefenstern sowie von ultraschlanken Wänden (siehe Anhang C).

Untersucht wurden alle Schweizer Baubewilligungen des Jahres 2016, selektioniert nach den wichtigsten Gebäudekategorien, Projektgrössen bezüglich Baukosten und Gebäudegrösse, Regionen etc.

Das grösste Baupotential ergibt sich in den Bereichen Unterricht/Bildung, Wohnheime (hauptsächlich Altersheime) sowie Handels-und Verwaltungsgebäude. Diese Einschätzung basiert auf der Annahme, dass die Verteilung der Bauvorhaben nach Kategorien sich auch in naher Zukunft nicht gross ändern wird.

In der anschliessenden Umfrage wurden die wichtigsten Akteure oben erwähnter Bauvorhaben bezüglich ihrer Ansichten zu Schiebefenster und Automation, dem Einsatz hochisolierender Vakuumisolationsgläsern sowie schlanken Leichtbauwänden mit Aerogeldämmung befragt. Die wichtigsten Aussagen sind folgende:

- Innovative Produkte dürfen nur geringfügig teurer sein, bezogen auf die Investitionen und die life cycle Kosten.
- Die häufigst genannten Wünsche an neue Fenster sind: Ästhetik, Verbesserungen im U-Wert und geringeres Gewicht.
- Als wichtigste Eigenschaften von Schiebefenstern werden die platzsparende Öffnungsart sowie die Möglichkeit einer einfachen Automation angesehen.
- Grundsätzlich besteht ein grosses Vertrauen in die statischen Eigenschaften von Leichtbauwänden und eine Mehrheit könnte sich einen eventuellen Einsatz vorstellen.

Die Umfrage zeigt, dass ein grosses Interesse an innovativen Produkten besteht, aber der tatsächliche Einsatz energieeffizienter Produkte massgeblich vom Preis sowie einem Zusatznutzen, wie z.B. einem ästhetischen Erscheinungsbild abhängig ist.

3.2 Optimierung Vakuumgläser und technischer Stand heute

a.) Verbesserung Wärmedurchgangskoeffizient U_g

Im Rahmen des Projekts wurden die Vakuumgläser in Zusammenarbeit mit einem Taiwanesischen Produzenten weiterentwickelt und der Wärmedurchgangskoeffizient (U_g -Wert) auf nur noch $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ gesenkt, was dem ursprünglichen Zielwert von $0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ sehr nahekommt. Zum Vergleich: vor Projektstart waren Vakuumisoliertgläser mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten U_g von $0.58 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf dem Markt erhältlich.

Die Wärmedurchgangskapazität konnte um fast 40% verbessert werden, indem die Distanz der Abstandshalter (so genannte Pillars) untereinander von 25 mm auf 30 mm erhöht wurde. Damit sollte rein rechnerisch ein U_g -Wert bei $0.39 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht werden. Messungen direkt am Bau an der Atrasse in Meilen bestätigten die theoretischen Berechnungen, es wurden U_g -Werte von 0.36 - 0.38



W/m^2K gemessen. Eine weitere Senkung des U-Wertes hätte nur mit einer anderen Glasbeschichtung erreicht werden können. Für das Pilotheus «Austrasse» wurde jedoch auf eine Low-E Schicht von Troesch mit 2% Emissivität und einem g-Wert von 0.42 zurückgegriffen. Dies, damit die Scheiben nicht zu dunkel ausfallen und das Haus nicht zu tiefe solare Gewinne generiert.

Labormessungen der Berner Fachhochschule konnten die oben erwähnten Werte leider nicht vollumfänglich bestätigen (siehe Anhang D). Messungen von kleinen Glasmustern im Format 800mm x 800mm im Plattengerät (Guarded Hot Plate) ergaben durchschnittliche U_g -Werte von $0.51 W/m^2K$. Die einzelnen Messwerte der Glasmuster weisen jedoch eine starke Streuung von 0.46 bis $0.62 W/m^2K$ auf und lassen auf eine inkonstante Produktionsqualität der Muster schliessen, die von der grosstechnischen Produktion der taiwanesischen Hersteller abweichen kann.

b.) keine Verbesserung im Randverbund

Im Gegensatz zum erreichten, sehr tiefen Wärmedurchgangskoeffizient U_g ist der Psi Wert (längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient Ψ_g im Randbereich) nach wie vor unbefriedigend. Dies gilt im Moment für alle auf dem Markt erhältlichen VIG und ist vom verwendeten Glaslot bestimmt. Dessen negativer Einfluss beschränkt die Anwendbarkeit der Vakuumsoliergläser auf ganz bestimmte Bereiche, wie nachfolgende Auslegeordnung im Kapitel «Fenstersysteme» zeigen wird.

c.) Widerstandsfähigkeit gegenüber Stossbelastungen

Zur Untersuchung der Widerstandsfähigkeit von Floatglas gegenüber Stoßbelastungen werden Pendelschlagversuche direkt am Bauteil mit einem Stoßkörper von 50 kg in Anlehnung an SN EN 12600 und SN EN 13049 durchgeführt. Die Berner Fachhochschule verglich dabei drei Vakuumsoliergläser aus 2 x TVG (teilvergespannt) mit zwei 2-fach Isolationsgläsern. Die Vakuumsoliergläser widerstanden lediglich Stössen von 150, 170 und 200 mm im Vergleich zu 850 und 900 mm bei herkömmlichen 2-fach Isoliergläsern (siehe Anhang). **Ergebnis: Vakuumsoliergläser sind gegenüber Stossbelastungen nach DIN 12600 Glas im Bauwesen deutlich empfindlicher als Standard-Isoliergläser.**

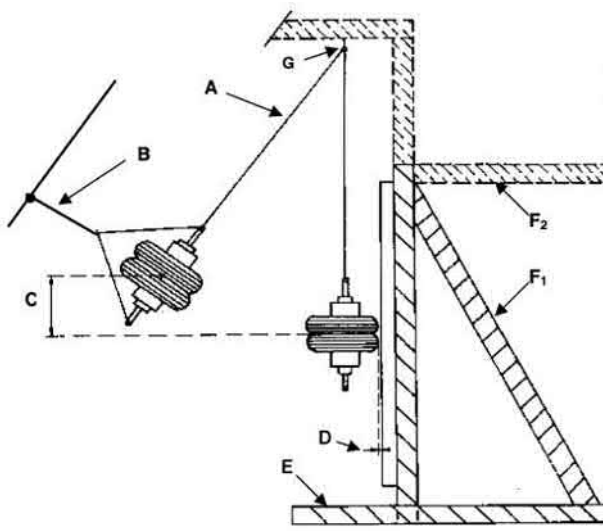


Abbildung 44: Pendelschlag an VIG



Abbildung 45: Bruch des Vakuumglases 3484-3 bei $c = 200$



e.) Technischer Stand der Vakuumgläser bei Projektabschluss

Im Pilotheus „Austrasse“ konnten Erfahrungen mit optimierten VIG's vom Lieferant Taiwan-Glas gemacht werden. 2019 hat die Firma AGC-Interpane einen Produktionsstandort in Belgien errichtet. Die dort angebotenen VIG weisen eine Glasfarbe auf, die mittlerweile fast dem europäischen Anspruch mit einem weiss / leicht grünlichen Ton entspricht. Die VIG werden ventillos angeboten, was nicht nur der Optik, sondern offenbar auch der Robustheit zugutekommt (15 Jahre Garantie). Und die Glasmasse sind auf 2.5 Meter angehoben worden. Hier sind die aktuellen technischen Parameter tabellarisch zusammengestellt:

Glastypen	VIG Taiwan / Asien	VIG AGC Interpane Belgien	Vergleich 3-fach Isolierglas
U_g (W/m ² K)	0.36 – 0.38	0.7 (später 0.4)	0.5 – 0.6
Randverbund	Glaslot	Glaslot	Polysulfid- oder Polyurethanmatrix
Ψ_g (W/mK)	0.074	0.074	0.032
Ventil	am Rand	keines	keines
Pendelschlagversuch Bruch bei Pendelhöhe (mm)	150-200	-	850-1000 (für 2-fach Isolierglas)
Schallschutz R_w+C_{tr}	30-34	30-34	30-42
Absturzsicherung	nur in Kombination mit VSG möglich	nur in Kombination mit VSG möglich	nur in Kombination mit VSG möglich
Max. Abmessungen	1.8 m x 2.8 m	1.5 m x 2.5 m	noch grösser
Optischer Eindruck	grünlich	weiss – leicht grünlich	weiss-leicht grünlich
Gewicht (kg/m ²)	20	20	30
Dicke (mm)	7 - 9	7 - 9	42 (Argonfüllung) oder 36 (mit Kryptonfüllung)
Preis CHF/m ² exkl. MWST	450	300	60 - 200
Lieferfrist	16 Wochen	8 Wochen	3 - 4 Wochen, bei ESG bis 6 Wochen
Kommunikation mit Lieferant	schleppend	im Aufbau	gut

Abbildung 46: Vergleich Vakuumisoliergläser zweier Hersteller mit herkömmlichen 3-fach Isoliergläsern

3.3 Auslegeordnung Einsatz in Fenstersysteme

Um die energietechnischen Einsatzmöglichkeiten von Vakuumisoliergläsern beurteilen und optimieren zu können, wurde das ganze Fenstersystem – also das Zusammenspiel von Rahmen und Gläsern – beleuchtet und der Wärmedurchgangskoeffizient über das ganze Fenstersystem berechnet. Nachfolgende Kapitel zeigen die Zusammenhänge auf.

a.) Einsatz VIG in handelsüblichen Rahmensystemen

3-fach Isoliergläser sind heute Standard, die dazu passenden Rahmensysteme werden in Holz, Holzmetall, Metall oder Kunststoff angeboten. Als erstes wurde geprüft, ob es sich energetisch auszahlt, an Stelle von 3-fach Isoliergläsern neuartige Vakuumgläser in die bekannten, marktüblichen Rahmensysteme einzusetzen. Die von uns weiterentwickelten Vakuumgläser haben einen besseren Wärmedurchgangskoeffizienten (U_g -Wert) über die Glasfläche als gute Dreifach-Isoliergläser, aber



leiten wesentlich mehr Energie über die Ränder, haben also einen schlechteren Randverbund (Ψ_g – Wert). Der schlechtere Randverbund beeinflusst deshalb auch den ganzen Wärmedurchgangskoeffizienten des Fenster (U_w -Wert). Die Frage war, welcher der zwei Aspekte überwiegt?

Dabei gilt zu beachten, dass die positiven Auswirkungen des Glases U_g umso weniger ins Gewicht fallen, je kleiner die (Glas)fensterfläche im Verhältnis zum Rahmenanteil ist. Um diesbezüglich eine generelle aussagekräftige Antwort zu erhalten, wurde das Verhältnis Rahmen zu Fensterfläche nach der Minergie-Regel berechnet (Reglement und Nachweisverfahren zur Vergabe des MINERGIE - Zertifikats für MINERGIE - Modul Fenster).

Die Glaseinstandstiefen – also wie tief das Glaspaket in den Rahmen hineinragt – wurden bei den üblichen 13-15 mm gehalten.

Glastypen	3-fach Isoliergläser $U_g = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$	Standard VIG $U_g = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$	Verbessertes VIG $U_g = 0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$
Alufenster	$U_w = 1.03 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_w = 1.27 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_w = 1.13 \text{ W/m}^2\text{K}$
Holzfenster	$U_w = 0.88 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_w = 1.13 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_w = 0.98 \text{ W/m}^2\text{K}$
Holz-Metallfenster	$U_w = 0.84 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_w = 1.10 \text{ W/m}^2\text{K}$	$U_w = 0.94 \text{ W/m}^2\text{K}$

Abbildung 47: Wärmedurchgangskoeffizienten U_w ($\text{W/m}^2\text{K}$) von drei handelsüblichen Fenstersystemen mit 3-fach Isoliergläsern im Vergleich zu zwei Typen Vakuumgläsern. Folgende Glastypen wurden beispielhaft berechnet: Ein herkömmliches 3-fach Isolierglas mit einem U_g Wert $= 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem Ψ_g Wert $\Psi_g = 0.029 - 0.036 \text{ W/m}$, ein Standard Vakuumglas $U_g = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $\Psi_g = 0.089 \text{ W/mK}$ sowie ein optimiertes Vakuumglas mit weiter auseinander liegenden Abstandshaltern und daher tieferem $U_g = 0.39 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $\Psi_g = 0.089 \text{ W/mK}$.

Resultat: Bei allen drei Standard-Rahmentypen, welche für 3-fach Isoliergläser konzipiert wurden, führte der Einsatz von Vakuumgläsern zu einem gesamthaft schlechteren U_w -Wert über das ganze Fenstersystem. Ursache ist der schlechtere Ψ_g -Wert des Randverbundes bei den Vakuumgläsern.

Der schlechtere Ψ_g -Wert bedeutet in den kalten Jahreszeiten auch erhöhte Kondensatbildung im sichtbaren Randbereich des Glases, was zu Akzeptanzproblemen bei den Endkunden führen kann. Dies kann weder aus dem Energieverbrauch noch dem U_w -Wert herausgelesen werden. Mit den heute üblichen Abstandshaltern bei Isoliergläsern mit einem Ψ_g -Wert um 0.003-0.004 konnte das Kondensat Problem, ein früher häufiger Reklamationsgrund von Bewohnern, praktisch vollständig aus der Welt geschaffen werden. Mit einem Ψ_g -Wert über 0.06 bei Vakuumisoliergläsern kommen diese Probleme wieder zurück.

b.) Einsatz VIG in „grossen Fenstern“ mit verbesserten Rahmensystemen

Auf Basis herkömmlicher Holz Rahmensysteme wurde anschliessend geprüft, wie die Ansprüche von Minergie-P (mindestens $U_w = 0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$) für «grosse Fenster» erreicht werden können, ohne auf vollständig neue Materialien für den Rahmenbau zurückgreifen zu müssen. Denn mit zunehmender Grösse der Fenster (>85% Glasanteil) nimmt auch die Bedeutung des U_g -Wertes des Glases gegenüber dem schlechten Randverbund zu.

Zu den hier geprüften Variablen zählen veränderte Glas-Einstandstiefen, Verwendung weiterer Holzarten oder Kombinationen verschiedener Holzarten, sowie die Verwendung von Rahmenhölzern mit einem Dämmkern.

Die Berechnungen wurden zur Vorbereitung der Nullserie „Austrasse“ getroffen, wo aus architektonischer Sicht Eichenfenster vorgesehen waren mit Rahmenaussenmassen 3860 x 2670 mm.



Rahmen	Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens U_f -Wert	Wärmedurchgangskoeffizient des Fenstersystems U_w	Bemerkung
Nadelholz mit Eichenummantelung	1.41 (W/m ² K)	0.82 (W/m ² K)	hohe Kosten bei nur geringer Verbesserung im Rahmenbereich (U_f)
Eiche mit EPS-Dämmkern	1.43 (W/m ² K)	0.80 (W/m ² K)	Statische Probleme der Mittelpartie (Windlast)
Vollkern Eiche	1.72 (W/m ² K)	0.89 (W/m ² K)	ausgeführt

Abbildung 48: Wärmedurchgangskoeffizienten des Rahmens U_f und des Fenstersystems U_w bei Schiebefenster Austrasse mit verschiedenen Rahmenarten, Grösse Rahmen aussen 3860 x 2675 mm, Glaswerte: $U_g = 0.48$ W/m²K; $\Psi_g = 0.074$ W/m¹K, Glasstärken 8.2 + 14.2 mm.

Resultat: Mit vertieften Einständen des Glaspakets in den Rahmen in Kombination mit Dämmmaterialien (z.B. EPS Dämmkern) kann dem schlechten Randverbund entgegnet und Minergie-P Standard erreicht werden. Aber es ergeben sich statische Probleme in der Mittelpartie. Schlankere Ansichtsbreiten lassen sich mit einem klassischen Rahmenaufbau also nicht erreichen. Die unter Absatz a.) erwähnten Möglichkeit der Kondensatbildung im sichtbaren Bereiche während kalter Jahreszeiten bleibt weiterhin ungelöst.

c.) Einsatz VIG in historischen und Denkmal geschützten Rahmensystemen

Energetische Sanierungen von historisch wertvollen Fenstern scheitern oftmals daran, dass der Einsatz von hochisolierenden 3-fach Gläsern sich nicht mit den Grundsätzen der Denkmalpflege vereinbaren lassen. Sie sind zu schwer und zu dick als dass der historische Rahmen die Gläser aufnehmen kann. Eine Chance bieten da leichte, dünne Vakuumgläser, welche ohne optische Veränderungen des Rahmenaufbaus eingesetzt werden können.

Es wurde ein Vergleich zwischen einem typischen Altbau-Holzfenster mit Einfachverglasung und einem Altbau-Holzfenster mit Vakuumglas angestellt. Die Berechnungen erfolgten wiederum nach dem Reglement und Nachweisverfahren zur Vergabe des MINERGIE-Zertifikate für MINERGIE-Modul Fenster.

Glastypen	1-fach Gläser $U_g = 5.75$ W/m ² K	Standard VIG $U_g = 0.6$ W/m ² K	Verbessertes VIG $U_g = 0.4$ W/m ² K
Historische Fenster	$U_w = 5.66$ W/m ² K	$U_w = 1.16$ W/m ² K	$U_w = 0.99$ W/m ² K

Abbildung 49: Wärmedurchgangskoeffizient U_w eines Altbau-Holzfensters mit Einfachverglasung im Vergleich zu einer Sanierung mit zwei Typen Vakuumgläsern. Für das Einfachglas wurde ein U_g von 5.747 W/m²K angenommen. Für Vakuumglas wurde je ein U_g von 0.6 W/m²K (Standard) resp. U_g von 0.4 W/m²K (optimiert) angenommen. Der Glaseinstand wurde von den für Altbau Holzfenstern üblichen 5 mm auf 12 mm vertieft.

Resultat: Der Ersatz von Einfach-Gläsern durch Vakuumgläser kann bei Altbau-Holzfenstern zu einer bis fünf Mal besseren Isolation führen: Altbau Holzfenster mit Einfachglas weisen einen U_w von 5.66 W/m²K auf, solche mit Standardvakuumglas nur noch einen U_w von 1.16 W/m²K. Mit optimiertem Vakuumglas sinkt der Wärmedurchgangskoeffizient des Fenstersystems sogar auf 0.99 W/m²K. Dies trotz des schlechten Randverbundes von Vakuumglas und einem relativ hohen mittleren U_f des Fensterrahmes von 2.5 W/m²K.



3.4 Praxistest Nullserie „Ausstrasse“

a.) Einbau VIG in „grosse“ Schiebefenster

Für den Zwischenschritt Nullserie „Austrasse“ wurde vorerst auf schlankere Ansichtsbreiten verzichtet und der Fokus statt dessen die physikalischen Problemstellungen beim Einbau der Vakuumgläser sowie des Verhalten in der Anwendung gelegt.

Für den Einbau grosser VIG bestanden zu Projektbeginn keine Erfahrungswerte. Vakuumgläser können nicht mit den üblichen Techniken im Fensterrahmen verankert werden. Durch den tieferen Glaseinstand beim Vakuumglas entstehen grosse Hebel auf die Leisten, welche diese nicht mehr tragen können. Gerade bei grossen Gläsern können bei Windlast erhebliche Drücke an den Rändern entstehen.

Nach dem ersten Einbau im Pilotheus „Austrasse“ musste ein Totalverlust des Vakuums bei einem Teil der Gläser festgestellt werden. Der Glashersteller ging davon aus, dass Druck auf die Ventile durch den Stufenfalz zu Haarrissen an der heikelsten Stelle – dem Ventil - geführt haben muss. In der Folge wurde glasseitig der Bau des Ventils verbessert und rahmenseitig die Einbauart.

Ergebnis: Dank eines „weichen“ Einbaus und verbesserten Ventilen konnte das Problem der Haarrisse beseitigt werden (dies zumindest bei Taiwan-Gläsern mit einem stirnseitig angebrachten Ventil). Dabei muss die Rahmenleiste so ausgestaltet sein, dass ein seitlicher Abstand zum Vakuumglas möglich ist, damit dieses weich gelagert werden kann. Auf diese Weise kann übermässiger Druck auf die Glasfritte, speziell im Ventilbereich auch bei leichten Verwindungen vermieden werden.

Fenstersystem	Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens U_r -Wert	Wärmedurchgangskoeffizient des Fenstersystems U_w
Pilotheus „Austrasse“ mit VIG (realisiert)	1.385 (W/m ² K)	0.78 (W/m ² K)
Pilotheus „Austrasse“ (Vergleich mit 3-fach Isoliergläser)	1.410 (W/m ² K)	0.81 (W/m ² K)
Verbesserung %	2%	4%

Abbildung 50: Wärmedurchgangskoeffizient des Eichenholz-Schiebefenster der Pilotheus „Austrasse“ mit Vakuumisoliertgläser im Vergleich mit herkömmlichen 3-fach Isoliergläsern. Berechnungsgrösse Rahmen aussen $b \times h = 3860 \text{ mm} \times 2675 \text{ mm}$, Vakuumglas $U_g = 0.48 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0.074 \text{ W/m}^3\text{K}$. Glaswerte Isolierglas: $U_g = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\Psi_g = 0.032 \text{ W}$

b.) Motorisierung und Steuerung

Für die Umsetzung einer energiesparenden Gebäudeautomation wurde für das Pilotheus auf motorisierte Schiebefenster gesetzt, die von einer KNX-Steuerung angesprochen werden. Dabei wurden die kleinsten auf dem Markt erhältlichen Motoren verwendet. Zum Zeitpunkt der Nullserie waren nur solche erhältlich, die auf den Rahmen aufgesetzt werden müssen. Beim Bau des Pilotheus konnten diese durch Aussparungen in der Betondecke versenkt werden, wodurch ein optisch schönes Resultat erzielt wurde. Diese Lösung erfordert aber bauseitig einen erheblichen Mehraufwand. Für energetische Sanierungen bestehender Bauten ist dies keine zweckmässige Option. Die ersten praktischen Erfahrungen zeigten, dass die Schiebefenster und die Motoren funktionieren, aber die Ansteuerung immer wieder Ausfälle hatte. Nach mehrfachen Nachbesserungen konnte schliesslich auch die Schnittstellen zwischen elektronischer Ansteuerung und Motoren behoben werden.



Ergebnis: Für eine anwenderfreundliche Lösung müssen die Motoren so klein dimensioniert werden, dass sie in den Rahmen eingebaut werden können und keine weiteren Anpassungen am Baukörper erfordern. Dies wiederum bedingt, dass die Dimensionierung der Beschläge und der Motoren aufeinander abgestimmt werden müssen, was nur durch eine Lösung „aus einer Hand“ möglich ist.



Abbildung 51: in «grossen» Schiebefenstern sollte VIG weich eingebaut werden.



3.5 Praxistest historische Fenstersanierung „Münsterplatz“ mit europäischen VIG

a.) Ergebnisse der Sanierung am Münsterplatz

Die Ergebnisse der Vorstudie bezüglich Einsatzes von VIG bei historischen Fenstern wurden in einer praktischen Anwendung am Gebäude Münsterplatz 12 in Basel getestet. Das Hochbau- und Planungsamt Basel-Stadt beabsichtigt die Sanierung dieses historischen Gebäudes unter Wahrung des Denkmalschutzes. Zur Auswahl steht der Ersatz der historischen Fenster durch Imitate (also neue Fenster im historischen Stil mit 3-fach Isoliergläsern) oder eine sanfte Sanierung mit Vakuumisoliertgläser unter Erhalt der historischen Fensterrahmen.

Fenstertyp	Historisches Fenster im Originalzustand	Historisches Fenster nach sanfter Sanierung	Neues Holzfenster im historischen Stil
Kurzbeschreibung	Eichenfenster im Originalzustand. Innen hell lackiert, aussen deckend weiss gestrichen.	Originalfenster modifiziert. Rahmen unverändert. Flügel aussen mit acetyliertem Holz aufgedoppelt.	Neues Holzfenster in Eiche. Innen hell lackiert, aussen deckend weiss gestrichen.
Glastyp	1-fach Glas (4) mm	Vakuumglas 4(v)4 mm	3-fach Isolierglas Extraweiss (6/4/4) mm
Elementdicke Glas (mm)	4	8	38
U_g (W/m ² K)	5.8	0.7 (0.4)*	0.7
g-Wert (%)	87	67	55
Lt (%)	90	80	76
Rw + Ctr Glas (dB)	24 (28-4)	30 (35-5)	32 (38-6)
U_w (W/m ² K)	4.94	1.50 (1.28)*	1.17
Schlagregendichtheit (EN 12208)	Klasse 0	Klasse 1A	Klasse 9A
Luftdurchlässigkeit (EN 12207)	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 4
Kosten in CHF exkl. MWST/St.	-	4'100.-	4'680.-

Abbildung 52 Sanierung eines historischen Fensters am Münsterplatz 12, Basel: Vergleich mit einer sanften Sanierung mittels Vakuumisoliertglas unter Erhalt des historischen Rahmens und einem Neuen Holzfenster mit 3-fach Isolierglas.



Abbildung 53 Münsterplatz 12, Basel:.

Ergebnis: die historischen Holzfenster konnten mit VIG so restauriert werden, dass der historisch wertvolle Rahmen erhalten wurde. Je nach verwendetem Vakuumglastyp wird der Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters dabei um den Faktor 3.2 bis 3.8 verbessert. Ein Nachbau mit neuem Rahmen und 3-fach Isolierglas schneidet energetisch zwar etwas besser ab, käme aber teurer zu stehen und hätte den Verlust des antiken Fensters zur Folge.

Optisch können beide Varianten praktisch nicht vom historischen Original unterschieden werden. Die Glasbrücken der VIG können im eingebauten Zustand nicht mehr wahrgenommen werden, das Auge fokussiert nicht auf die Ebene des Glases, sondern auf das was sich hinter dem Fenster befindet. Die Glasfarbe ist nahezu identisch.



Abbildungen 54, 55 und 56: Original historische Fenster Münsterplatz 12 vor und nach Sanierung.



b.) Abschätzung des Energie Einsparungspotential historischer Fenster

Rund 261 PJ Heizenergie wird in der Schweiz jährlich für die rund 2.3 Millionen Gebäude verwendet (Quelle: EnDK Konferenz der Kantonalen Energiedirektoren, Energiekennzahlen von Gebäuden in der Schweiz 2011). Fachleute schätzen den Bestand an Denkmal geschützten Gebäuden (nationale bis lokale Bedeutung) auf rund 90' – 100'000 Objekte. Das würde knapp 4% aller Gebäude der Schweiz entsprechen (Quelle: www.Denkmalschutz.ch, Konferenz der Schweizerischen Denkmalpflegerinnen und Denkmalpfleger).

Als Faustregel kann der Energieverlust über die Fensterfläche auf durchschnittlich auf etwa 10-15% des Heizenergieverbrauches eines Gebäudes beziffert werden. Historischen Gebäude haben zwar meist kleinere Fensterflächen als der Durchschnitt des Schweizer Gebäudebestandes, sind aber auch mindestens zweimal schlechter isoliert, wenn nicht sogar schlechter. Aus diesem Grund darf angenommen werden, dass über historische Fensterfläche pro Jahr rund 1.566 PJ Energie entweicht ($261 \text{ PJ} \times 0.04 \times 0.15$). **Das Energie Einsparpotential mit der Sanierung historischer Fenster durch Vakuumisolierverglasung beträgt somit mindestens 1 PJ Energie pro Jahr, was rund 2.7 Millionen Liter Heizöl entspricht.**

3.6 Schlankes, hochisolierendes Schiebefenster mit Vakuumglas

a.) Wichtigste Eckwerte der Neuentwicklung

Auf Basis der vorangehenden Studien und den Erfahrungen aus der Nullserie „Austrasse“ wurde das Kernanliegen dieses Pilotprojektes erreicht: Die erfolgreiche Entwicklung eines hochisolierenden Schiebefensters mit Vakuumglas bei einer gleichzeitigen Reduktion der Rahmenansicht. Ebenso wurden die Vorgaben für eine automatisierte Raumlüftung dank Motorisierung realisiert. Zur Erinnerung: Filigrane Rahmen und eine komfortable Bedienung wurden in der Bauherrenumfrage als wichtige Indikatoren erkannt, damit energiesparende Fenstersysteme bei den Kunden auf Akzeptanz zählen können, eine Voraussetzung für einen künftigen Markterfolg.

Um die Rahmen- und Flügeldimensionen aus den vorangegangenen Studien weiter reduzieren zu können (schlankere Querschnitte) musste der Aufbau des Fenstersystems als Ganzes weiter entwickelt werden. Aus physikalischen Gründen wurde ein neuartiges Schiebe-Beschlagsystem notwendig, welches auf die reduzierten Querschnitte angepasst ist und grössere Einstandstiefen der Vakuumgläser erlaubt. Gleichzeitig mussten die statischen Eigenschaften verbessert werden, u.a. weil tiefere Einstände der Vakuumgläser sich schwächend auf den Rahmen auswirken. Dies konnte in enger Kooperation mit dem Beschlaghersteller Maco auf Entwicklerebene erreicht werden (Schnittzeichnungen im Anhang A).

Im Fenster Detail:

Das neu entwickelte Schiebefenster besteht aus einem verstärkten Kern aus GFK-Profil und kann als Holz-Alu oder Holz-Fenster ausgeführt werden. Die Aluverschalung kann optional aufgeklipst werden.

Neuartige Beschläge: Die extra klein dimensionierten Laufwagen wurden so verstärkt, dass sie die Lasten von grossen Flügeln tragen können. Die Wagen sind im GFK-Profil versenkt und reichen bis auf 3 mm ans Vakuumglas heran. In der Folge konnten die Flügelansichten auf 50mm (Ränder) resp. 60 mm (Mittelpartie) reduziert werden.



Abbildung 57: GFK Profil mit auf-geklipstem Holzverschalung



Abbildung 58: versenkter Laufwagen



Abbildung 59: 3 mm Abstand vom VIG

Hervorragende Parameter

Luftdurchlässigkeit EN 12207: 4 (sehr gut, Minergie P Level)

Schlagregendichtheit EN 12208: 8A (gut, Minergie Level)

Durchbiegung EN 12210: C4 (sehr gut, Minergie P Level)

Die Motorisierung wird mit zwei Mini-Motoren erreicht:

Schieben mit einem Motor der im Rahmen versenkt ist, der Schliessmechanismus erfolgt mit einem Motor, der im beweglichen Rahmen mit Beschlag integriert ist. Der Zugang frontal, was bei Störungen wichtig ist.

Programmierung und Einjustierung erfolgt zu Beginn der Inbetriebnahme und wird mit mechanischen Adaptoren störungssicher festgehalten.

Sicherheit: Der Motor erkennt Störungen und Hindernisse. Bei einem Ereignis öffnet der Motor das Fenster um 10 cm, um das Einklemmen eines Gegenstandes oder Körperteils zu verhindern.



Abbildung 60: Miniaturisierter Motor



Abbildung 61: so klein wie ein Feuerzeug - Motor für Schliessmechanismus



Abbildung 62: Barrierefreiheit, falls die Fenster auch als Türen verwendet werden

Zentrale Steuerung: WLAN fähig. Damit können zum Beispiel für eine Nachtauskühlung alle Fenster eines Gebäudes zentral angesteuert werden. Auch die Taster zur Bedienung können sowohl über Kabel als auch WLAN angesteuert werden. Letzteres vor allem wenn die Taster nicht am Rahmen sondern extern angebracht werden sollen (behinderten gerechtes Bauen).

Barrierefreiheit: Die Laufschiene können auf Bodenebene abgesenkt werden. Dies für den Anwendungsfall, wenn die Schiebefenster in einzelnen Bereichen auch als Türen dienen sollen.



Abbildungen 63, 64 und 65: Ansteuerung der Motoren inkl. WLAN Signalbox sind im Rahmen Platz unsichtbar verbaut.



Abbildung 66: fertige Neuentwicklung des hochisolierenden Fensters mit Vakuumglas mit integrierter Motorisierung



b.) Wärmedurchgangskoeffizient Fenstersystem

	Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens U_r -Wert	Wärmedurchgangskoeffizient des Fenstersystems U_w
Schlankes Superfenster	1.666 (W/m ² K)	0.69 (W/m ² K)
Vergleich (theoretisch mit 3-fach Isoliergläser)	1.375 (W/m ² K)	0.76 (W/m ² K)
Verbesserung %	- 20%	9%

Abbildung 67: Wärmedurchgangskoeffizient des schlanken Schiebefenster „Panorama“ mit Vakuumisoliergläser im Vergleich mit herkömmlichen 3-fach Isoliergläsern. Berechnungsgrösse Rahmen aussen $b \times h = 3860 \text{ mm} \times 2675 \text{ mm}$, Vakuumglas $U_g = 0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\Psi_g = 0.074 \text{ W/m}^3\text{K}$. Glaswerte Isolierglas: $U_g = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\Psi_g = 0.032 \text{ W/m}^3\text{K}$

Mit vorliegender Entwicklung wurden die physikalischen Grenzen des Machbaren ausgelotet und ein vollautomatisches Schiebefenster entwickelt, welches rund 10% mehr Energie einspart als vergleichbare Schiebefenster. Eine weitere Senkung des Wärmedurchgangskoeffizienten des Fenstersystems ist jedoch nur möglich, wenn der Randverbund der Vakuumisoliergläser nachhaltig verbessert werden kann. Damit wäre auch die Kondensatproblematik gelöst.

c.) Energieaufwand und Klimabilanz für Herstellung

	Konventionelles Fenster mit 3-fach Isolierglas					Schlankes hochisolierendes Fenster mit VIG und GFK-Kern				
	Gewicht (kg)	Klima (kg CO ₂)	KEA (MJ)			Gewicht (kg)	Klima (kg CO ₂)	KEA (MJ)		
			Nicht erneuerbar	erneuerbar	Total			Nicht erneuerbar	erneuerbar	Total
Flachglas	111	146	1'909	70	1'979	77	101	1'324	49	1'373
- getempert	1					1				
GFK		0			0	18	85	1'406	48	1455
Aluminium	6.2	37	649	129	778	4	24	424	84	508
Holz	63	14	255	1'473	1'728	53	12	214	1'239	1454
Total	181.2	200	2'800	1'700	4'500	153.1	220	3'400	1'400	4'800

Abbildung 68: Abschätzung des kumulierten Energieaufwandes (KEA) und der Klimabilanz (für die Herstellung eines mittelgrossen Fensters (3000 mm x 1500 mm Rahmenausmass). Verglichen wird ein konventionelles Fenster mit 3-fach Isolierglas und ein schlankes hochisolierendes Fenster mit VIG und GFK Kern.

Es wurde ausserdem ermittelt, ob die Gewichtseinsparung durch leichtere VIG und schlankere Rahmen auch einen verminderten Aufwand an «grauer Energie» für die Herstellung der Fenster bedeuten?

Die Berechnung erfolgte durch Dr. Fredy Dinkel, Carbotech AG – Umweltprojekte und Beratung in Basel (siehe Anhang E). Basis waren die verwendeten Materialien Holz, Aluminium, GFK und Flachglas für ein mittelgrosses Fenster von 3000 x 1500 mm Rahmenausmass, einmal als Standard Fenster



mit 3-fach Isolierglas und einmal als schlankes Fenster mit VIG und GFK Kern. Als Indikatoren für «graue Energie» wurden zwei Werte herangezogen:

- der kumulierte Energieaufwand (KEA) aus erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energie in MJ.
- und andererseits die Klimabilanz in kg CO₂ Äquivalenten (Details siehe Anhang).

Die Daten sind aus der Ökobilanzdatenbank UVEK 2018 und umfassen den gesamten Lebensweg bis und mit Materialherstellung. Was nicht berücksichtigt ist, sind die Transporte, die Verarbeitung sowie die Entsorgung bzw. Wiederverwertung. Ebenfalls wurde die Edelgasfüllung beim konventionellen Fenster nicht ermittelt.

Bezüglich dem kumulierten Energieaufwand sind diese eher von untergeordneter Bedeutung. D.h. die Resultate sind eine gute Näherung. Was relativ stark einschneidet ist der Energieaufwand für den GFK, welcher dazu führt, dass der kumulierte Energieaufwand der schlanken Fenster mit VIG etwas höher ist als derjenige der konventionellen Fenster trotz der schweren 3-fach Isoliergläser. Weil die Edelgasfüllung beim konventionellen Fenster aber nicht berücksichtigt wurde und dies einen durchaus relevanten Beitrag gibt, **ist zu erwarten, dass die Belastungen der beiden Fenster in der Herstellung gleich hoch sind. Nichts desto trotz: die Energieeinsparung im Betrieb durch den geringeren U-Wert des schlanken Fensters mit VIG ist wesentlich relevanter als die «graue Energie» der Fensterherstellung.**



3.7 Opake Wände

Um die schmalen Fensterstärken auch in den opaken Wandteilen weiterzuführen, wurden extrem dünne Wände entwickelt, die gerade mal 16 cm Wandstärke aufweisen. Trotzdem halten sie die Minergie-P Vorgaben ein. Anvisiert wurde eine Produktion von Wandelementen aus Holz mit einem hohen Vorfertigungsgrad. Gleichzeitig sind die Elemente nach wie vor selbsttragend und auch bei Dimensionen von Höhen bis zu 3 Metern immer noch Verformungsstabil.

a.) Aufbau der Wände

Diese Rahmenbedingungen ergaben ganz neue physikalische Herausforderungen, welche nicht einfach durch eine simple Redimensionierung bestehender Aufbauten erreicht werden konnten: Ein Element wie es in der Holzständerbauweise traditionell hergestellt wird, bringt den Nachteil, dass statische Elemente in der Dämmebene eine lineare Schwächung der Dämmleistung (Wärmebrücke) darstellen. Obwohl Holz kein besonders guter Wärmeleiter ist, gilt dieser Grundsatz trotzdem: Je leistungsfähiger die Dämmung, desto dünner werden die opaken Elemente, umso mehr fallen solche Wärmebrücken ins Gewicht. Eine zentrale Herausforderung bei ultradünnen Wänden war, diese Unterbrechungen zu minimieren. Es hatte sich im Laufe der Entwicklungsarbeit herausgestellt, dass die Wandelemente von Grund auf neu entwickelt werden mussten.

Mit der Neuentwicklung des „**Kastenelement im Sandwichsystem**“ konnten die wichtigsten physikalischen Herausforderungen erfolgreich gelöst werden.

- 1.) Eine Lösung wurde im Einsatz von sehr schmalen Stegen gefunden, ähnlich wie die Gerippe in den Tragflächen eines Segelfliegers. Im Gegensatz zum konventionellen Ständerbau, bei dem die Ständer die vertikalen Lasten abtragen und die Platten lediglich für die Aussteifung dienen, funktioniert das neu entwickelte System im Verbund: Die Platten übernehmen dabei auch einen Teil der vertikalen Lasten. Ein starrer Verbund von Platten und Stegen war also unumgänglich.
- 2.) Eine erste Analyse mit Stegen aus OSB hat zu Schubversagen bei horizontaler Beanspruchung (Wind) geführt. Mit dem Einsatz von Birken-Sperrholz 15mm konnten die auftretenden Schubkräfte in den Stegen abgeleitet werden. Damit konnte eine wärmebrückenarme Konstruktion einheitlich in Holz (an Stelle des zu Beginn vorgesehenen Kohlenstofffaser-Kunststoff CFK) errichtet werden.
- 3.) Des Weiteren war aufgrund der schmalen Stege eine im Holzsystembau übliche Klammerung nicht möglich. Die Randabstände wären nicht gewährleistet. Die Lösung lag in der Verklebung der Elemente. Die Klebefläche bei 15 mm Stegen wäre aber zu klein gewesen, um die Schubkraft vom Steg in die Platte zu übertragen. Es wurde deshalb eine V-Nut in der Platte entwickelt, welche zum einen eine Führung der Stege in der Platte ergab, aber auch die Fläche der Leimfuge ca. um den Faktor 2.5 vergrößerte. Eine absolute Passgenauigkeit dieser V-Nut war unabdingbar. Diese konnte mit CAD gesteuerter Fräsen mit einer Genauigkeit von 0.1 mm erreicht werden. Allerdings mussten die Teile innert Tagesfrist bearbeitet werden, damit die Materialien nicht unterschiedlich stark schwanden.

b.) Einbau Dämmmaterial

Für die Befestigung des Dämmstoff Aerogel Spaceloft erwies sich das Einklemmverfahren als ideal. Spaceloft wird also weder verklebt noch geschraubt. Sie liegen als weiche, etwas zusammen-drückbare Platten vor, was garantiert, dass selbst geringste Luftzirkulationen innerhalb der Wände ausgeschlossen werden können.

Auf Grund der Staubentwicklung bei der Konfektionierung und der Notwendigkeit geeigneter Anforderungen an die Arbeitssicherheit (Abzugsvorrichtungen, Filter etc.) wurden die Platten beim Isolations-spezialisten Agitec vorkonfektioniert.



Dank einem optimierten Zuschnittsplan konnte der Verschnitt auf weniger als 5% reduziert werden.

Eine nachgeschaltete Entstaubung nach dem Einbau gewährleistete, dass der Leim der Beplankung auch höchsten Belastungen standhalten konnte.

d.) Hygrothermische Analyse

BAUTEIL Aussenwand 001	
AUFBAU	
Falzschalung Fi/Ta	21 mm
Hinterlüftungslattung	27mm
Fassadenpapier	-
Kerto (kalibriert)	30mm
Steg Sperrholz	100mm
Dämmung Aerogel	100mm (zwischen Ständer)
Kerto (kalibriert)	30mm
Dampfbremse	-
Gipskartonplatte	12.5mm
BEMERKUNG	
- Fassadenschalung Eterno Old Chalet behandelt	

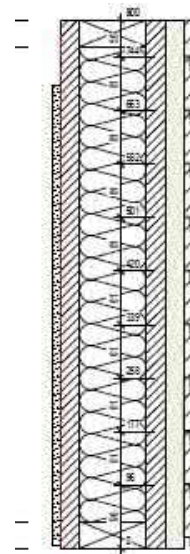


Abbildung 69: Aufbau vorgefertigtes Wandelement für „Austrasse“ plus nachträgliche Beschichtung innen (Gipskarton) und hinterlüftete Aussenbeplankung.

Die hygrothermische Analyse der opaken Wände wurde von der Fachhochschule Bern erstellt (Details siehe Anhang D). Als klimatische Randbedingungen wurde auf der Raumseite normales Innenklima nach EN15026 und für das Aussenklima ein kaltes Jahr in Zürich eingesetzt. Da die Wand durch eine Hinterlüftung geschützt ist, wurde keine Regenwasser-Absorption angenommen.

Die Schwankungen der Holzfeuchte in den drei Teilen der äusseren Schicht zeigen zwar ein periodisches Verhalten, aber keine Ansammlung von Feuchte. Also keine bedenkliche Feuchte Ansammlung selbst in einem kalten Jahr. Die inneren Holzschichten trocknen eher aus.

Resultat für Aerogeldämmung: Auch mit einem ultraschlanken Aufbau der Wände sind die thermischen und hygrothermischen Probleme gelöst.

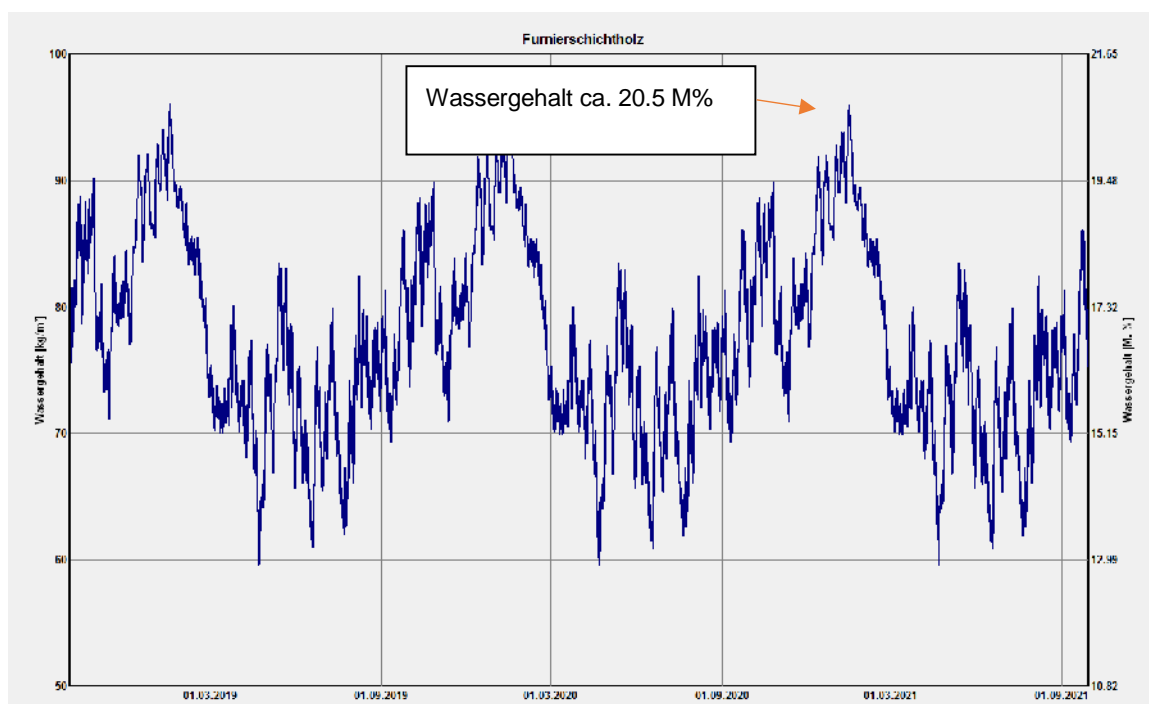


Abbildung 70: Hygrothermische Analyse der äusseren Holzschicht: keine Ansammlung der Feuchtigkeit über drei Jahre.

d.) Eignung auch für andere fragile Hochleistungsdämmstoffe

Die Firma Agitec prüfte, ob die ultra schlanken Wände nach dem Prinzip «verklebtes Kastenelement im Sandwichsystem» auch für den Verbau von weiteren fragilen Hochleistungsdämmstoffen möglich ist, wie zum Beispiel Isopet oder Kautschuk-Aerogel an Stelle von Aerogel-Spaceloft. Untersucht wurden Wärmeschutz, Feuchteschutz und Hitzeschutz. Die Berechnungen wurden einem traditionellen Wandelement in Ständerbauweise mit Steinwolle-Dämmung gegenüber gestellt (siehe nachfolgende Abbildung sowie Anhänge F, G, H und I).

Resultat: Im «verklebten Kastenelement im Sandwichsystem» können die Dämmstoffe Aerogel Spacelof, Aerogel Pureflex und Isopet die Anforderungen an MuKEN 14 Neubau, MuKEN 14 Umbauen und HFM 2015 sowie ESanMV grösstenteils erfüllen. Dies bei halber Dicke (16 cm statt 29 cm) im Vergleich zu einem herkömmlichen Wandelement mit Mineralwolle Isolation.



Dämmstoff	Typ		Steinwolle - Flumroc DUO	Aerogel - Spaceloft	Aerogel - Pureflex	Isopet
	Dicke	[mm]	260	100	100	100
	Lamda-Wert	[W/mK]	0.034	0.015	0.014	0.019
Beplankung innen	Typ		OSB-Platte	LVL	LVL	LVL
	Dicke	[mm]	15	30	30	30
	Lamda-Wert	[W/mK]	0.14	0.14	0.14	0.14
Beplankung Aussen	Typ		OSB-Platte	LVL	LVL	LVL
	Dicke	[mm]	15	30	30	30
	Lamda-Wert	[W/mK]	0.14	0.14	0.14	0.14
Element gesamt	Dicke	[mm]	290	160	160	160
	U-Wert	[W/m ² K]	0.17	0.17	0.16	0.2
	Gewicht	kg/m	250	170	170	160
Grenzwerte	MuKEN14 Neubau		□	□	□	-
	MuKEN14 Umbauten		□	□	□	□
	HFM 2015		□	□	□	□
	ESabMV		□	□	□	□

Abbildung 71: Vorgefertigte Wandelemente im Vergleich: Aufbau mit herkömmlichem Dämmelement Steinwolle, ultraschlanker Aufbau mit Aerogel-Spaceloft sowie zwei potentielle Alternativen Aereogel-Pureflex und Isopet. Ausführliche Berechnungen im Anhang.

e.) Wieviel darf eine effizienter, dünnere Wärmedämmung kosten?

Für den künftigen Markterfolg sind die Mehrkosten für Hochleistungsdämmstoffen den Mehrwert der gewonnenen Wohnfläche gegenüber zu stellen. Rechenbeispiel:

Wohnhaus mit 3 Stockwerken: Höhe 9 m, Grundfläche von 10 x 20 m, Fenster -/ Türanteil 25% von Wand. Eine um 12 cm dünner WD (8 cm Aerogel anstelle von 20 cm EPS) wird bei gleichem U-Wert, mit 480.- CHF/m² Mehrkosten offeriert. Lohnt sich diese Investition?

Annahme Wert Innenfläche = CHF 9'000.-/m²

1. Mehrkosten

Wandfläche mit Grenzabstand: 2 x 9 m x 20 m x 75% = 270m²

Mehrkosten Dämmung: 270 x 480.- CHF/m² = 129'600.- CHF

2. Wert des Flächengewinns

Flächengewinn (bei 9'000.-/m²) 2 x 20 m x 0.12 m x 3 Stockwerke = 14.4 m²

Mehrwert Wohnfläche: 14.4 m² x 9'000.-/m² = 129'000.- CHF

Mehrkosten Dämmung = Mehrwert Wohnfläche

Resultat: Aerogel lohnt sich ab CHF 9'000.-/m² Wohnflächenkosten



Zum Vergleich: Der Mittelpreis pro m² in der Schweiz beträgt CHF 6'341/m² (Durchschnittspreis pro Quadratmeter Wohnung). In den städtischen Ballungsgebieten liegt der Durchschnittspreis deutlich höher als der schweizerische Durchschnitt: Basel CHF 10'146, Genf CHF 14'722, Luzern CHF 9'250, Bern CHF 6'899, Zürich CHF 13'471 (Quelle <https://realadvisor.ch/de/immobilienpreise-pro-m2>).



Abbildungen 72: 73, 74, 75, und 76: Aufbau klassisches Wandelement mit Steinwolle Dämmung im Vergleich mit Aerogel-Spaceloft Dämmung, Aerogel Pureflex und Isopet Dämmung.



3.8 Resultate energetisches Konzept „Austrasse“

Das EFH-Gebäude an der Austrasse 61/ 63 in 8706 Meilen wurde als Minergie-A Gebäude im 2018 fertig gebaut und mit dem Label Minergie-A zertifiziert. Speziell daran ist die ultraschlanke Gebäudehülle mit Vakuumgläsern bei den Fenstern sowie einer Aerogeldämmung. Die Firma W & P Engineering, Stansstad quantifizierte die tatsächlichen Eigenschaften der Gebäudehülle als Ganzes an Hand nachfolgender Berechnungen (ganze Berechnung siehe Anhang B).

Die Wärmeversorgung wird mit einer Wärmepumpe sichergestellt. Diese ist seit Juli 2018 im Betrieb. Anhand der verfügbaren Stromverbrauchsdaten der Wärmepumpe von Juli 2018 bis und mit April 2020 des EW Meilen wurden die Heizwärme-Verbrauchsdaten erhoben. Der monatliche Heizwärmebedarf wurde mit Heizgradtagen und Stromverbrauch für Brauchwasser bereinigt.

Diese „Messwerte“ wurden mit einem berechneten theoretischen Heizwärmebedarf nach SIA 380/1-2009 (Muken2014) verglichen, in dem die Solaren Energiegewinne selbstverständlich mit eingerechnet sind:

Der theoretische Heizwärmebedarfes wurde für folgende Szenarien neu berechnet:

- Variante 1 «Gut» alle Fenster mit intakten Vakuum-Gläsern
- Variante 2 «Schlecht» total 7 defekte Vakuum-Gläser (massgeb. Sept. 18 - April 19), der Rest sind intakte Vakuumgläser
- Variante 3 «Mittel» alle Fenster mit Standard 3-fach IV

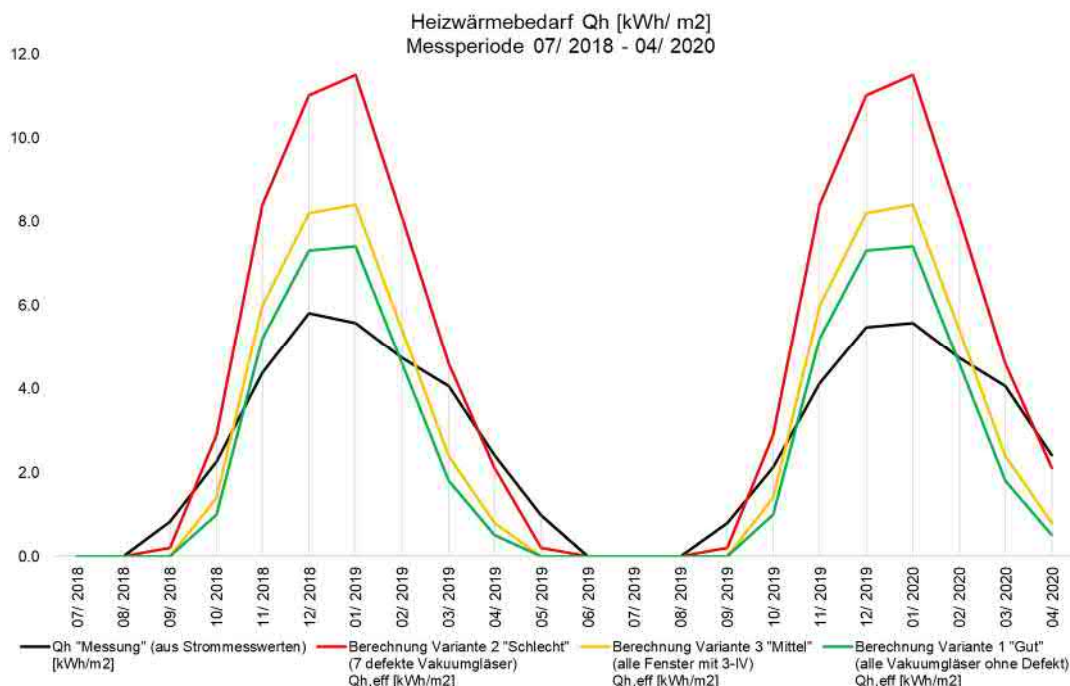


Abbildung 77: Heizwärmebedarf Q_h in kWh/m² für die „Messwerte“ basierend auf den Strombezügen für die Wärmepumpe im Vergleich mit den berechneten Varianten „schlecht“, „mittel“ und „gut“.



Der Heizwärmebedarf der Berechnungsvarianten mit defekten Vakuumgläsern (Schlecht) und IV Gläsern (Mittel) ist im Vergleich zum «Messwert» Heizwärme bei beiden höher. Der Heizwärmebedarf der Variante «Gut» liegt jedoch etwas unter den Messwerten.

Dies bedeutet, dass der Heizwärmeverbrauch des Gebäudes im Betrieb bzw. mit der Nutzung kleiner ist als die berechneten Heizwärmebedarfskennwerte und damit das Gebäude besser dasteht als die Berechnungen dies zeigen.

Sind Vakuumgläser defekt erhöht sich der Heizwärmebedarf logischerweise deutlich, hier im Gebäude um bis zu +60% im Jahresmittel betrachtet. Eine Einschätzung der effektiven realen U_w -Werte von Fenstern mit defekten Vakuumgläsern ist anspruchsvoll. Die hohen Abweichungen von der Kurve des Heizwärmeverbrauches um bis fast Faktor 2 von der Kurve des Heizwärmebedarfes - vor allem in den Wintermonaten - zeigt dies deutlich.

Als Richtgrösse zeigen die vorliegenden Auswertungen zum Gebäude, dass durch den Einsatz von Vakuumgläsern bei den Fenstern im Vergleich zu 3-IV-Fenstern noch ca. 17 % Jahresheizwärme eingespart werden können. Ein Genauigkeitsbereich dieser Grössenordnung für die Reduktion der Heizwärme kann jedoch nicht daraus abgeleitet werden und schwankt mit grosser Wahrscheinlichkeit stark. Diese ist u.a. abhängig von der Bau-Qualität des ganzen Gebäudes und insbesondere der eingebauten Vakuum-Gläser, des Gebäude-Standortes selbst sowie von verschiedenen anderen Faktoren.



4 Schlussfolgerungen und Fazit

4.1 Vakuumgläser und Fenster

- Hochisolierende Vakuumgläser können nun mit einem rekordtiefen Wärmedurchgangskoeffizienten U_g von nur noch $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ hergestellt werden. Die erfolgreiche Anwendung konnte bewiesen werden und bietet energetische Vorteile für folgende zwei Einsatzbereiche:
 - Ein Energiesparpotential von ca. 10% für sehr grosse Fenster, bei denen der Glasanteil gegenüber dem Rahmenanteil massiv überwiegt ($> 85\%$ Glasfläche)
 - Ein Energiesparpotential um Faktor 4 bei der Sanierung historisch wertvoller Fenster mit VIG, wo herkömmliche 3-fach Isoliergläser in der Regel nicht verbaut werden können.
 - Nicht empfohlen wird der Einsatz von VIG an Stelle von 3-fach Isolationsgläsern für Fenstersysteme mit Standardrahmen oder im Bereich von SIA 3080/1 Normgrössen.
- Für eine weitere Verbesserung der Energieeffizienz müssen die unbefriedigenden Eigenschaften des Randverbundes angegangen werden. Der Psi-Wert sollte auf ungefähr 0.035 W/mK gesenkt werden (z.B. durch Kunststoff-Verbund statt Glasfritten). Alternativ könnte der U_g auf unter $0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ gesenkt werden, damit die ungünstigen Einflüsse des Randverbundes noch besser kompensiert werden.
- Das optische Erscheinungsbild von VIG steht dem herkömmlicher Isoliergläser in nichts nach. Die Glasbrückchen werden in der praktischen Anwendung nicht wahrgenommen. Auch die Glasfarbe wurde inzwischen dem Standard europäischer Ansprüche angepasst (früher waren die Gläser zu grünlich wegen hohem Eisenoxidanteil). Der europäische Hersteller AGC Interpane stellt VIG im Gegensatz zu seinen asiatischen Konkurrenten ohne Ventile her. Eine Erweiterung der VIG Palette mit Gussgläsern für die Sanierung historischer Fenster und mit Verbundgläsern zur Absturzsicherung ist in Planung.
- Die technischen Fragen für den systematischen Einbau von VIG im Rahmen (Einstand, Befestigung, Dampfbremse etc.) konnten weitgehend gelöst werden. Insbesondere müssen grosse VIG «weich» verbaut werden, damit keine Druckstellen an den Rändern entstehen können.
- Damit das energetische Potential von hochisolierenden Fenstersystemen bei Neubauten künftig tatsächlich genutzt wird, empfehlen wir, diese in Kombination mit einem besonders ästhetischen Erscheinungsbild (filigraner Rahmen) im Markt zu präsentieren. Diese Anforderungen sind jedoch nur mit einem vollständig neuen Aufbau des Fenstersystems als Ganzes zu erfüllen. Die herkömmlichen, für 3-fach Isoliergläser ausgelegten Rahmensysteme eignen sich kaum für VIG Gläser, denn der bei VIG notwendige tiefere Glaseinstand kann nicht gleichzeitig mit dünneren Rahmen- und Flügelquerschnitten einhergehen, ohne mit dem Beschlag zu kollidieren.
- Im P&D Projekt ist es exemplarisch gelungen eine Komplettlösung für ein hochisolierendes Schiebefenster mit Vakuumglas zu entwickeln, welches einen schlanken Holz-Metall Rahmen aufweist und voll motorisiert ist. Die notwendigen statischen Eigenschaften werden dank einem verstärkten Kern aus Glasfaserkunststoff (GFK) erreicht, miniaturisierte Beschlagssysteme wurden neu entwickelt und sind im GFK Kern versenkt. Motor und Schiebesystem sind aufeinander abgestimmt und ebenfalls im Rahmen unsichtbar eingebaut. Diese Entwicklung war nur möglich, weil auch die Zulieferer bei der Lösungsfindung mitgewirkt haben.
- VIG sind heute noch zwei- bis dreimal so teuer wie Isoliergläser (CHF 300.-/m² statt CHF 60-200.-/m²). Für den Marktdurchbruch im Bereich der «neuen Fenster» dürfen VIG nur moderat mehr



kosten, Preissenkungen sind also zwingend notwendig. Mit dem Aufbau einer europäischen Produktionsstätte in Belgien (AGC Interpane) sind konkurrenzfähige Preise in naher Zukunft zu erwarten.

- Ganz anders sieht heute die Preissituation beim Einsatz für die Sanierung «historischer Fenster» aus: Ist der Erhalt des alten Rahmens aus denkmalpflegerischer Sicht zwingend, stehen VIG schon jetzt ohne Konkurrenz da. Es kann sogar finanziell günstiger sein, historische Fenster mit VIG zu sanieren als neue Fenster im historischem Stil mit 3-fach Isoliergläser nachzubauen. Das Marktpotential der Sanierung historischer Fenster gilt es sofort zu erschliessen.
- Das Energie Einsparpotential durch die Sanierung der historischen Fenster in der Schweiz beträgt mindestens 1 PJ pro Jahr, was rund 2.7 Millionen Liter Heizöl entspricht.
- Der Verbrauch an «grauer Energie» kann durch leichtere VIG statt 3-fach Isoliergläser nicht reduziert werden. Die Einsparung durch leichtere Gläser wird durch den energetischen Mehraufwand für höherwertiges GFK aufgehoben.
- Die Lieferketten von VIG sind gegenwärtig zu langsam und müssen auf den Stand herkömmlicher 3-fach Isoliergläser verkürzt werden. Hersteller in Asien werden diesem Anspruch kaum gerecht werden (Transportweg mit Containerschiffen), weshalb der Marktdurchbruch vom Erfolg europäischer Produktionsstätten abhängen wird.
- Der Zwischenschritt einer Nullserie wurde ursprünglich «aus der Not geboren» (bereits erfolgte Baueingabe), hat sich aber im Nachhinein als Glücksfall erwiesen. Viele nicht vorhersehbare Probleme konnten so in einer frühen Projektphase identifiziert und bei der nachfolgenden Weiterentwicklung gelöst werden. Wir empfehlen deshalb bei komplexen Entwicklungen vermehrt eine iterative Vorgehensstrategie zu wählen.

4.2 Hochisolierende Dämmmaterialien und opake Wände

- Halb so dicke Wände bei gleicher Isolation mit einem U-Wert von nur $0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$ stellen einen Meilenstein dar und bieten neue Chancen für platzsparendes Bauen und raumplanerische Nachverdichtungen.
- Mit der Innovation von «verklebten Kastenelementen im Sandwichsystem» wurde der Verbau von fragilen Hochleistungsdämmstoffen erst möglich gemacht. Diese Innovation lässt sich auch auf andere Dämmmaterialien anwenden wie zum Beispiel Isopet oder Kautschuk-Aerogel.
- Sie setzt allerdings ein Vorfabrizieren der Elemente voraus, weil die Verarbeitung der Hochleistungsdämmstoffe direkt am Bau weder möglich noch zeitgemäss ist.
- Fertigelemente setzen eine gute Planung und Koordination über die ganzen Prozesskette mit allen involvierten Partnern voraus (Baumeister, Isolationsfirmen, Fertigelementebauer). Die herkömmliche Arbeitsteilung zwischen Dämmmateriallieferant und Fertigelementebauer müssen neu organisiert werden. Zudem sind am Gebäudekern deutlich geringere Toleranzwerte einzuhalten als üblich (maximal $\pm 2 \text{ cm}$ über das gesamte Bauvorhaben).
- Aerogel für den Einsatz als Dämmung der gesamten Gebäudehülle muss günstiger werden. Gegenwärtig ist Aerogel im Vergleich zu Konkurrenzprodukten trotz besseren Wärmedämmwerten bei vielen Anwendungen noch zu teuer. Aerogel bietet dort ökonomische Vorteile, wo die Grundstückspreise besonders hoch sind und eine höhere Flächennutzung dank dünneren Wänden sich rechnet.



- Um auf ein werkseitiges Egalisieren der Plattenwerkstoffe verzichten zu können, müssen die Plattenlieferanten künftig die Dicken-Toleranzen auf 0.5 mm senken können.
- Vorfertigung von Bauelementen in der Halle wird in Zukunft noch an Bedeutung gewinnen. Erstens weil Vorfertigung kürzere Montagezeiten bedeutet, was besonders bei Bauen im Stadtkern von Vorteil ist, da dort Baustelleneinrichtungen generell sehr knapp bemessen werden müssen. Zweitens weil Building integrated modeling (BIM) zunehmend zur Anwendung kommt, was die Planung vorgefertigter Elemente weiter vereinfachen wird. Zusätzlich kann bei einer Produktion im Werk eine wesentlich höhere Genauigkeit gewährleistet werden.

4.3 Energetisches Konzept der Nullserie „Austrasse“

- Ein verbreitetes Argument gegen Gebäudehüllen mit Minergie-A Standard wird deren Platzverbrauch angeführt. Das Pilotheus beweist, dass der Minergie-A Standard auch durch eine ultraschlanke Gebäudehülle erfüllt werden kann, dank ultraschlanken Wänden (Isolation nur 10cm) und Fenstern mit Vakuumgläsern (12 mm).

4.4 Hybridbau – Holz statt Stahlstützen

- Holz statt Stahlstützen als tragendes Element von Betongeschossdecken sind sowohl in statischer als auch optischer Hinsicht eine elegante Lösung, insbesondere wenn Stützen nicht in ultraschlanke Wände eingebaut werden können. Es müssen aber noch geeignete Schutzmassnahmen entwickelt werden, um diese vor Wasserschäden in der Rohbauphase zu bewahren.



5 Ausblick und zukünftige Umsetzung

5.1 Technischer Fortschritt

- Die anfänglich noch festgestellten Probleme mit Vakuumverlust dürften bald Geschichte sein. AGC Interpane bietet 15 Jahre Garantie auf seine VIG. Und um den «Worst Case» in die richtigen Relationen zu setzen: Ein Totalverlust des Vakuums eines Glases würde eine Rückstufung des Dämmwertes auf den eines historischen Fensters bedeuten, also $U_G = 4.0 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Weil historische Fenster möglicherweise auch das „Gussglas Design“ erfüllen müssen wird nun mit den europäischen VIG Herstellern über die Produktion von Gussglas-Vakuumgläsern verhandelt. Ab Herbst 2020 werden auch runde Gläser angeboten.
- Wir erwarten, dass die neu geschaffene europäische Produktionsstätte (AGC Interpane) die Verbreitung von VIG in Europa beschleunigen wird. Das ökologisch motivierte Argument, man wolle keine Gläser aus Asien importieren, wird damit hinfällig. Allerdings wird mittelfristig auch wichtig, dass Sicherheitsgläser etc. ebenfalls in die Angebotspalette übernommen werden.
- Weitere Hochleistungsdämmstoffe sind kurz vor der Markteinführung (vgl. Isopet) oder Pureflex (New Spaceloft). Da diese vermutlich deutlich günstiger angeboten werden können als Aerogel (CHF 600/m² statt CHF 750/m² was einer Reduktion von 25% entspricht) erhoffen wir uns eine Marktdurchdringung der ultraschlanken Gebäudehülle im „Sandwichelement“.

5.2 Aktivitäten der beteiligten KMU

- Das Hochbau- und Planungsamt der Stadt Basel evaluiert gegenwärtig eine energetische Sanierung historisch wertvoller Fenster unter Berücksichtigung der denkmalpflegerischen Ansprüche am Gebäude „Münsterplatz 12“. Im Rahmen der Evaluation konnte gezeigt werden, dass die Sanierung historischer Fensterrahmen mit VIG sowohl energetisch als auch finanziell sehr interessant ist. Nun bietet sich eine konkrete Chance für lokale KMU, den grossen Basler Gebäudepark mit historischen Fenstern endlich energetisch sanieren zu können. Der politische Wille zur Sanierung ist vom Parlament mit der CO₂ neutralen Verwaltung Basel-Stadt ausgedrückt worden. Jetzt gilt es noch, die Vertreter des Denkmalschutzes von VIG Gläsern zu überzeugen.
- Mit dem „Panorama“- Fenster bieten wir erstmals eine ästhetische Komplettlösung an, die für mustergültige Neubauten interessant sein können. Weil Schiebefenster bei Architekten und Bauherren noch immer ein Nischendasein fristen, werden wir Aufklärungsarbeit in Kooperationen mit unseren Systemlieferanten vorantreiben.
- Vor dem Hintergrund der in den nächsten Jahren anstehenden öffentlicher Infrastrukturbauten (+40% im Bereich Alters- und Pflegeheime) besteht ein grosses Potential für Barriere freies und sicheres Bauen. Hier gilt es, die verantwortlichen Bauherren und Planer bereits in einer frühen Phase über die Vorzüge der neuen automatischen Schiebefenster zu informieren, welche zudem hochisolierend sind. Bisher ist dies noch zu wenig gelungen. Wir wollen diesem Umstand mit einer Informationsoffensive zu Altersheimen und Schulhäusern begegnen.
- Eine schöne, im Rahmen integrierte Motorisierung eröffnet neue Anwendungsfelder für intelligentes Gebäudemanagement (z.B. Nachtauskühlung in Schulhäusern etc.). Diesen Aspekt wollen wir in der oben erwähnten Informationsoffensive beleuchten.



- AGITEC AG wird versuchen, die Abhängigkeit vom amerikanischen Zulieferer zu reduzieren, indem die einzelnen Komponenten günstiger in Europa und Asien produziert und dann zusammengesetzt werden.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Verbesserung des U_g Wertes von Vakuumglas wurde in Zusammenarbeit mit den Produzenten in Taiwan erreicht. Einzelne Tests verschiedener Glasbeschichtungen wurden mit Gläsern von Glas Troesch durchgeführt.

Für die Optimierung des Fensterrahmens in Abstimmung auf VIG Einsatz mussten die Fensterbeschläge von Grund auf neu entwickelt werden. Der Prototyp mit miniaturisierten Beschlägen, integriert in GFK-Rahmen sowie Motor und Schiebesystem wurde in enger Zusammenarbeit mit der Entwicklungsabteilung der Firma Maco AG, Österreich realisiert.

7 Publikationen

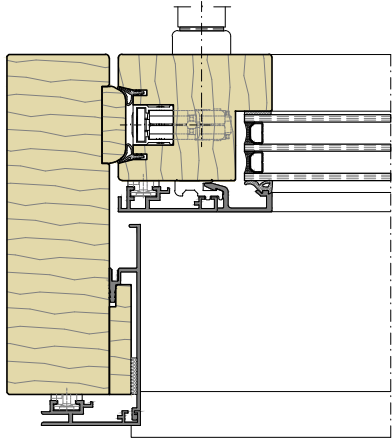
- KMU News 1/2/17: KMU bauen das Superfenster mit Vakuumgläsern und ultraschlanke Wände (2 Seiten)
- KMU News 6/7 17: KMU entwickeln das Fenster der Zukunft (2 Seiten)
- KMU News 9/17: KMU entwickeln ultradünne Superwände (2 Seiten)
- Basler Gwärb Nr. 5 / Oktober 2018: Regionale KMU entwickeln neue Konzepte zum Energiesparen (4 Seiten)
- Wir Holzbauer 8.2019 / November: Ultraschlanke Gebäudehülle (3 Seiten)
- Baublatt Nr. 44, November 2019: Vakuumfenster – gute Aussicht auf Marktpotential (4 Seiten)
- CISBAT 2019 - International Scientific Conference 3-4 September EPFL Lausanne: Slim building envelopes using vacuum glazing and high-performance insulation
- Holzmagazin 01/2020, Österreich: Dünn wie Untertassen (2 Seiten)
- Sonderausgabe KMU News 2020: KMU entwickeln neu Konzepte zum Energiesparen (1 Seite)



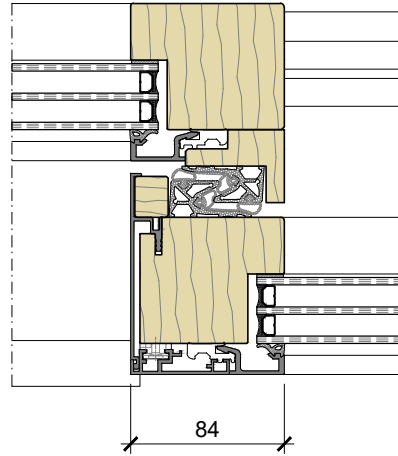
8 Anhang

- A Schnittzeichnungen Fenster - AGM ISO-7600 HS
- B Bericht «Validierung Wärmeverbrauch des Gebäudes, EFH Austrasse 61/63, 8707 Meilen»
- C Berner Fachhochschule: Präsentation Marktabklärungen zu Fenster-Wände-Vakuumgläser
«Umfrage zum Projekt Entwicklung hochisolierender Fenstersysteme»
- D Berner Fachhochschule: «Untersuchungen an Vakuumgläsern und ultraschlanker Wandkonstruktionen 14.11.2018»
- E Carbotech AG: Vergleich «graue Energie» eines konventionellen Fensters mit 3-fach Isolierglas und einem schlanken Fenster mit Vakuumisolierglas/GFK»
- F Agitec AG, Berechnungen Wärmeschutz, Feuchteschutz Hitzeschutz, schlanke opake Wand mit Spaceloft Dämmung
- G Agitec AG, Berechnungen Wärmeschutz, Feuchteschutz Hitzeschutz, schlanke opake Wand mit Spaceloft Dämmung
- H Agitec AG, Berechnungen Wärmeschutz, Feuchteschutz Hitzeschutz, schlanke opake Wand mit «neuem Aerogel» Dämmung
- I Agitec AG, Berechnungen Wärmeschutz, Feuchteschutz Hitzeschutz, schlanke opake Wand mit Flumroc Dämmung

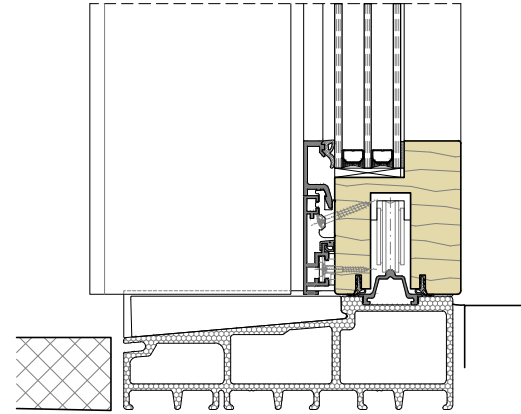
AGM ISO-7600 HS



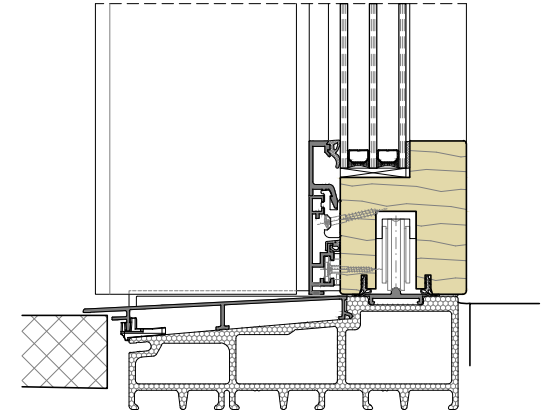
Seitlich schiebend



Mittelpartie 84mm

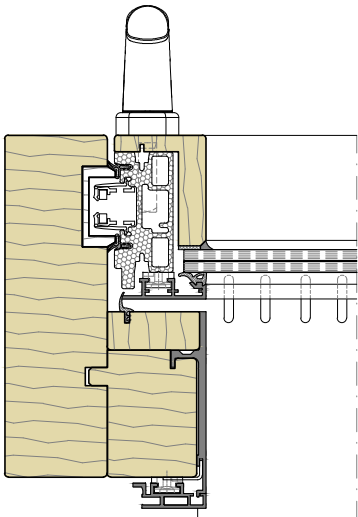


Unten schiebend Standard Laufschiene

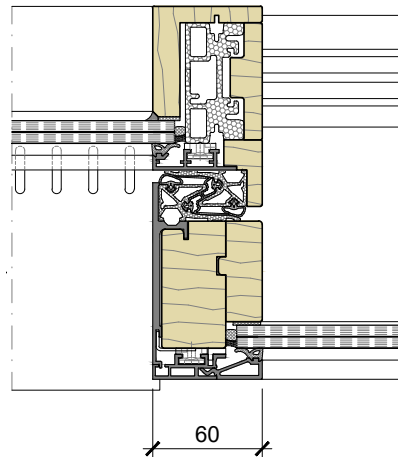


Unten schiebend Nullschwelle

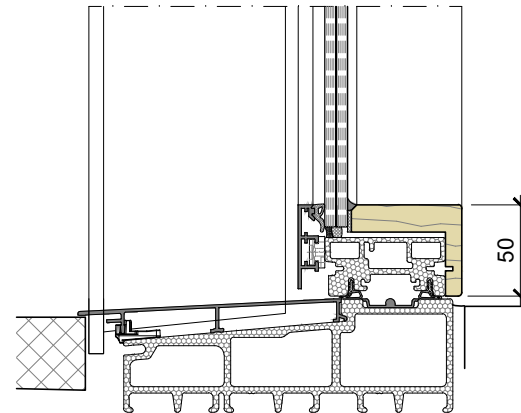
AGM ISO-7600 Skyline



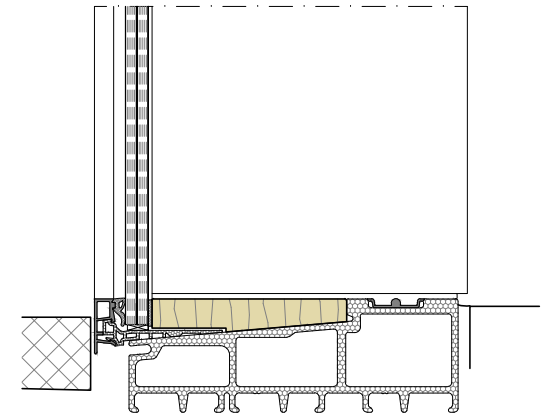
Seitlich schiebend



Mittelpartie 60 mm



Unten schiebend Flügel 50 mm



Unten fester Teil Sockelverglasung



Stansstad, 25. Mai 2020

Version 2.0

EFH Austrasse 61/ 63, 8706 Meilen

Bericht Validierung Wärmeverbrauch des Gebäudes

Zeitraum von Juli 2018 – April 2020

Projekt	20017
Objekt	EFH Austrasse 61, 63 8706 Meilen
Auftraggeber	Dietrich Schwarz Architekten AG Seefeldstrasse 224 CH-8008 Zürich
Vertreter	Dietrich Schwarz Verwaltungsrat und Geschäftsführer dietrich.schwarz@schwarz-architekten.com
Auftragnehmer	W&P ENGINEERING AG Mühlebach 2 CH-6362 Stansstad
Autoren	David Galvagno-Erny d.galvagno@wpe.ch Joel Werngren j.werngren@wpe.ch



Beratung
Konzipierung
Planung
Fachbauleitung

**Koordiniert
und optimiert**



Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage	2
2.	Grundlagen und Methodik	2
3.	Details Berechnungsgrundlagen	4
4.	Ergebnisse	6
5.	Vergleich der Varianten	8
6.	Erkenntnisse	11
7.	Abbildungsverzeichnis	12
8.	Tabellenverzeichnis	12

Anhang

Ohne Seiten-Nummerierung

Anhang 1: monatlicher Heizwärmebedarf SIA 380/1-2009 für jede Variante

Anhang 2: Auswertungsbasis mit den 4 Varianten Heizwärmebedarf

Anhang 3: Grundlagen zu den defekten Vakuumgläsern

Anhang 4: Heizwärmebilanz Ausgangslage

Anhang 5: Heizwärmebilanz Variante 1 «Gut»

Anhang 6: Heizwärmebilanz Variante 2 "Schlecht"

Anhang 7: Heizwärmebilanz Variante 3 «Mittel»

Übersicht Berichte-Versionen

<i>Datum</i>	<i>Änderung</i>	<i>Version</i>
16.5.2020	Definitiver Bericht	1.0
25.5.2020	Methodische Anpassung Heizgradtagekorrektur und Anpassungen gemäss Absprache Auftraggeber	2.0



1. Ausgangslage

Einleitung	<p>Das EFH-Gebäude an der Austrasse 61/ 63 in 8706 Meilen wurde als Minergie-A Gebäude im 2018 fertig gebaut und mit dem Label Minergie-A zertifiziert.</p> <p>Das Gebäude wurde mit verschiedenen neuartigen und innovativen Baumaterialien erstellt u.a. auch mit Vakuumgläsern bei den Fenstern sowie einer Aerogel-dämmung.</p> <p>Die Wärmeversorgung wird mit einer Wärmepumpe sichergestellt. Diese ist seit Juli 2018 im Betrieb. Gemessen wird der Stromverbrauch der Wärmepumpe, Messdaten zur produzierten Wärmemenge bzw. dem Wärmeverbrauch sind keine vorhanden.</p>
Auftrag	<p>Anhand der verfügbaren Stromverbrauchsdaten der Wärmepumpe von Juli 2018 bis und mit April 2020 des EW Meilen sollen Heizwärme-Verbrauchsdaten berechnet werden.</p> <p>Diese werden mit einem berechneten Heizwärmebedarf verglichen und anhand von verschiedenen Berechnungsvarianten validiert.</p> <p>Daraus sollen Schlüsse gezogen werden, welche Hinweise auf andere Anwendungsfälle geben könnten.</p>

2. Grundlagen und Methodik

Daten	<p>Vom Architekturbüro standen folgende Daten zur Verfügung:</p> <ul style="list-style-type: none">- Energienachweis der Minergie-Zertifizierung des Gebäudes aus den Grundlagen inkl. Bilanz SIA 380/1-2009 vom 13.07.2018 Stand Endabgabe an Minergie mit Anpassungen nach der Bauausführung («Austrasse_Meilen_170102_MINERGIE_eingereicht Endabgabe_angepasst Ausführung_180713.14.2016.0 (build 1034)»)- Lage, Grösse und Kennwerte der Fenster mit defekten Vakuumgläsern- Stromverbrauchsdaten der Wärmepumpe-Zähler vom EW Meilen der Jahre 2018, 2019 bis und mit April 2020- Planunterlagen des Gebäudes- Vorgehensvorschlag des BFE zum vorliegenden Bericht für die Validierung <p>Zudem wurden weitere Daten und Normen hinzugezogen:</p> <ul style="list-style-type: none">- Heizgradtage des HEV Hauseigentümerverbandes (www.hev.ch)- Normen SIA 380-2015, SIA 380/1-2009, SIA 2024-2015, SIA 2028-2015
Berechnungs- hilfsmittel	<p>Die Energieberechnungen wurden mit der Software Lesosai durchgeführt mit der aktuellsten Version V.2020.0 (build 1506).</p> <p>Die weiteren Berechnungen und Auswertungen wurden mit Microsoft Excel 2016 erstellt.</p>



Vorgehen und
Methodik

1. Berechnungen nach SIA 380/1 - Theoretischer Heizwärmebedarf

Das gebaute Gebäude wurde für drei theoretische Fälle eines Heizwärmebedarfes nach SIA 380/1-2009 (Mukun2014) neu berechnet:

- **Variante 1 «Gut»** alle Fenster mit intakten Vakuum-Gläsern
- **Variante 2 «Schlecht»** total 7 defekte Vakuum-Gläser (massgeb. Sept. 18 - April 19), der Rest sind intakte Vakuumgläser
- **Variante 3 «Mittel»** alle Fenster mit Standard 3-fach IV

Allgemeine Rahmenbedingungen

Berechnung mit Innen-Raumtemperatur 21° C statt wie normativ 20° C. Diese leicht höhere Innenraumtemperatur wurde mittels der «Referenzraum-Temperatur-Regelung» rechnerisch in den Heizwärmebilanzierungen nach SIA 380/1-2009 erfasst.

2. Auswertung Stromverbrauch der Wärmepumpe

Je Monat der Messreihe von Juli 2018 bis und mit April 2020:

Analyse der Stromverbrauchsdaten

Witterungsbereinigung Stromverbrauchsdaten mittels Heizgradtage (HGT 20/12) nach Norm SIA 380/1

3. Energieberechnungen und Auswertungen nach SIA

Je Monat der Messdatenreihe und für alle 3 Varianten der Heizwärmebilanz «Gut», «Mittel» und «Schlecht» wurde folgendes ermittelt Schritt für Schritt:

- Normativer Kennwert für Warmwasserwärme Q_{ww} nach SIA 2024
- Thermischer Wärmebedarf Q_{hww} (Heizen und Warmwasser)
minus theoretischer Wärmebedarf für Warmwasser
- Wärmebedarf Q_h nur für Heizen

Daraus wird der «Aus der Berechnung» ermittelte monatliche Heizwärmebedarf des Gebäudes nur für Heizen dem ermittelten «effektiven» monatlichen Heizwärmeverbrauch (aus Stromverbrauch) der Wärmepumpe – ebenfalls nur für Heizen – gegenübergestellt, insgesamt über alle 22 Monate der Messperiode.



3. Details Berechnungsgrundlagen

Kennwerte
SIA 2024

Beschreibung	Vorgabe SIA 2024	Resultat
Nettogeschossfläche pro Person	20 m ²	22.86 Personen
Heizwärmebedarf Q _h	28.8 kWh/m ²	13'167 kWh
Energiebedarf Warmwasser Q _{ww}	13.5 kWh/m ²	6'172 kWh
Normativ notwendige Leistung zur Deckung Heizwärmebedarf	0.02189 kW/ m ²	10 kW

Tabelle 1: Kennwerte Bedarf nach SIA 2024 «Neubau» «EFH» für Energiebezugsfläche von 457.2 m²

Bilanzgrundlage

Heizwärmebedarf Variante 1 «Gut» (alle Vakuumgläser ohne Defekte)

Im Zeitraum von Juli bis und mit August 2018 sowie ab Mai 2019 bis April 2020 waren alle Vakuumgläser ohne Defekte. Diese wurden so eingesetzt

Glas-Hersteller Glassx

Fenster mit VIG $U_g = 0.39 \text{ W/ m}^2\text{K}$

Rahmen $U_f = 1.9 \text{ W/ m}^2\text{K}$

$g_L = 0.42$

Details siehe Anhang

Abbildung 1: Angaben zum Fenstertyp der Firma Glassx

Bilanzgrundlage

Heizwärmebedarf Variante 2 «Schlecht» (7 defekte Vakuumgläser)

Im Zeitraum von Sept. 2018 bis und mit April 2019 waren total 7 Vakuumgläser defekt. Diese 7 defekten Vakuumgläser wurden entsprechend ihrer Fläche in der Heizwärmebilanz mit einem Ersatz-U_w-Wert eingesetzt wie folgt:

Die Vakuumgläser (siehe Angaben Var. 1) bestehen aus 2x6 mm Glas mit einem Scheibenzwischenraum von 0.2 mm. Das Vakuum wurde vollständig als inexistent angenommen und als stehende Luft mit einem Kennwert für horizontale Wärmeleitfähigkeit von ca. $0.018 \text{ W/ m}^2\text{K}$ eingesetzt.

Rahmen $U_f = 1.9 \text{ W/ m}^2\text{K}$

$g_L = 0.42$

Fenster $U_w = 4.21 \text{ W/ m}^2\text{K}$



Konstruktionsaufbau (von innen nach aussen)

Übergang innen
Glaskörper ca. 6 mm
Luftschicht ca. 0.2 mm
Glaskörper ca. 6 mm

Dicke [m]	λ_D [W/mK]	R [m ² K/W]
0.006	1.000	0.006
0.001	0.018	0.056
0.006	1.000	0.006

Übergang aussen

0.040

Abbildung 2: Berechnung U-Wert defektes Vakuumglas

Bilanzgrundlage

Heizwärmebedarf Variante 3 «Mittel» (alle Fenster mit 3-IV)

Dies ist eine Berechnungsvariante, welche generisch zum Vergleich der Varianten 1 und 2 dient. Für alle Gebäudefenster wurde mit folgenden Fensterkennwerten in der Heizwärmebilanz gerechnet:

$$U_g = 0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Rahmen } U_f = 1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$g_L = 0.42$$

**Heizgradtage
HGT (20/ 12)**

Für die Witterungsbereinigung wurden die notwendigen Daten zusammengetragen:

Jahr	Station	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Total
2018	Zürich / Fluntern	473	601	503	112	75	0	0	0	30	188	440	513	2935
2019	Zürich / Fluntern	616	451	396	272	234	0	0	0	35	177	428	503	3112
2020	Zürich / Fluntern	540	379	421	114									

Tabelle 2: effektive Heizgradtage HGT 20/ 12 der Messperiode 2018-2020

Jahr	Station	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Total
Mittelwert 10 J	Zürich / Fluntern	602	512	438	261	105	30	3	7	85	230	446	591	3310

Tabelle 3: langjährige Mittelwerte Heizgradtage HGT 20/ 12 von 2001-2010

**Auswertung
Stromzähler**

Jahr	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
2018							60 kWh	151 kWh	146 kWh	221 kWh	810 kWh	946 kWh
2019	1'256 kWh	897 kWh	860 kWh	617 kWh	541 kWh	271 kWh	279 kWh	251 kWh	204 kWh	362 kWh	684 kWh	839 kWh
2020	872 kWh	688 kWh	605 kWh	315 kWh								

Tabelle 4: Auswertung Stromzähler-Messdaten in kWh/ Monat



4. Ergebnisse

Heizwärmebedarf Sämtliche Heizwärmebedarfsrechnungen wurden ausgewertet und die notwendigen Kennzahlen in einer Tabelle zusammengefasst, siehe dazu

- Anhang 1: monatlicher Heizwärmebedarf SIA 380/1-2009 für 3 Varianten
- Anhang 2: Auswertungsbasis mit den 4 Varianten Heizwärmebedarf

Als erster Hinweis für die verschiedenen Fenster-Varianten mit Bauzuständen wie oben beschrieben sind nachfolgend die Energiebilanzen rein nur für die Fenster dargestellt:

Fenster Var. 1

«Gut» (alle Vakuumgläser ohne Defekte)

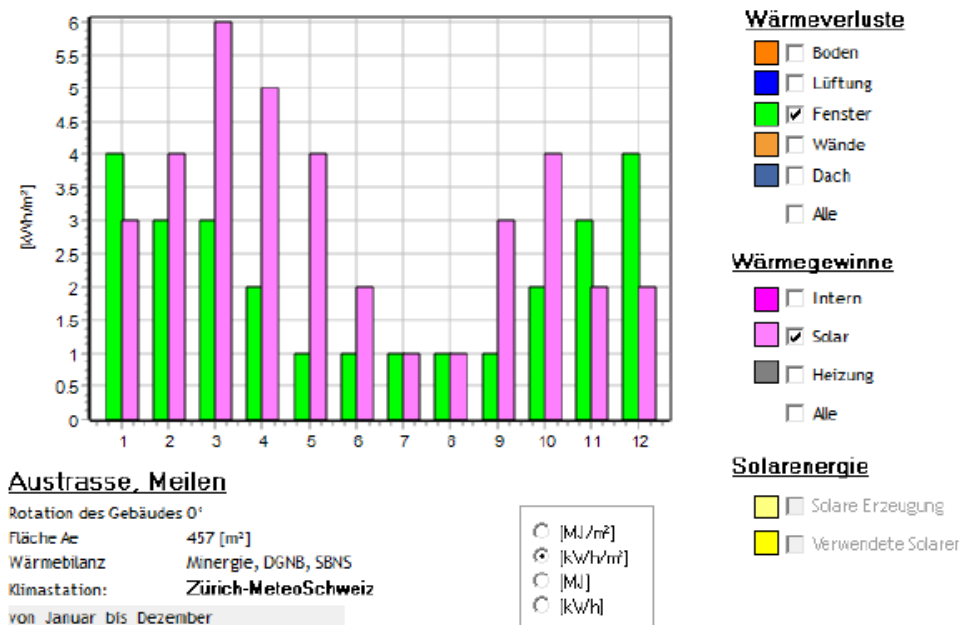


Abbildung 3: Variante 1 «Gut» - Monatliche Energiebilanz in [kWh/ m²] der Fenster je Kalendermonat: Verluste (grün) und Solargewinne (rosa)

Interpretation

In den Monate Febr. - Juni sowie im Sept./ Okt. ist die Gesamtbilanz der Vakuumgläser damit Null oder grösser. In den restlichen Monaten ist der Verlust grösser als die Solargewinne über die Gläser.



Fenster Var. 2

«Schlecht» (7 defekte Vakuumgläser)

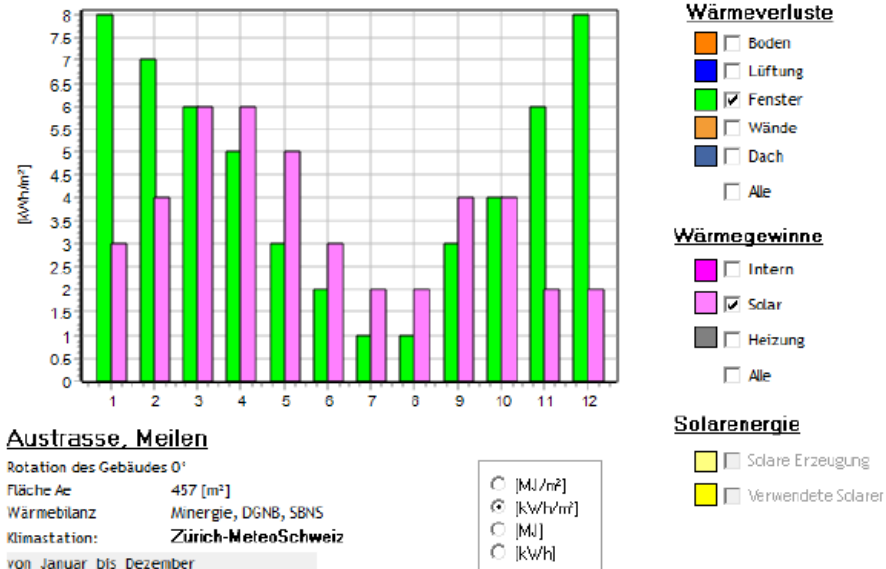


Abbildung 4: Variante 2 «Schlecht» - Monatliche Energiebilanz [kWh/ m²] der Fenster je Kalendermonat: Verluste (grün) und Solargewinne (rosa)

Interpretation

In den Monaten April - Juni sowie nur noch im Sept. ist die Gesamtbilanz der Vakuumgläser damit Null oder grösser. Durch die defekten Vakuumgläser geht mehr Wärme verloren als in Variante 1. Entsprechend erhöhen sich v.a. in den kalten Monaten die Verluste massiv.

Fenster Var. 1

«Mittel» (alle Fenster mit 3-IV)

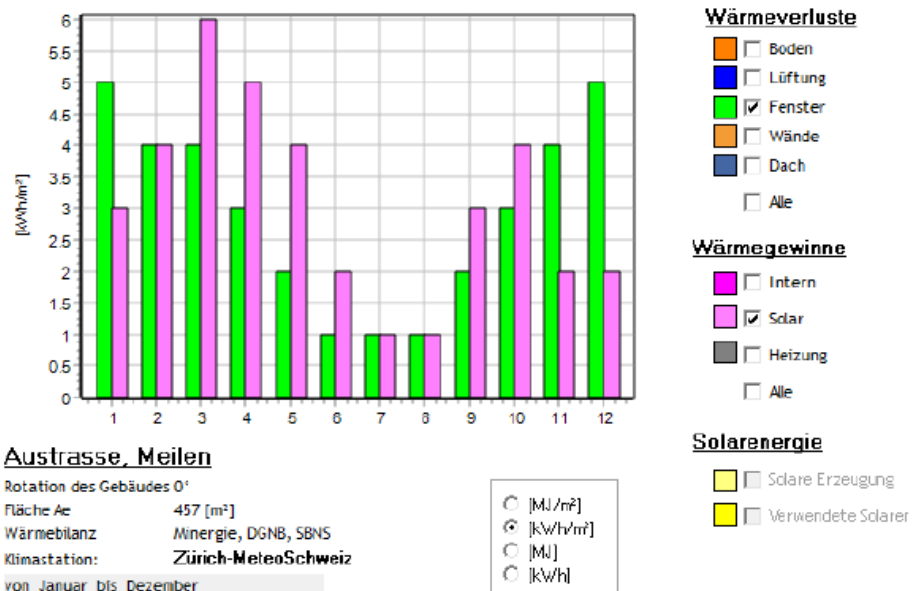


Abbildung 5: Variante 3 «Mittel» - Monatliche Energiebilanz [kWh/ m²] der Fenster je Kalendermonat: Verluste (grün) und Solargewinne (rosa)

Interpretation

Das Bild mit 3-IV-Fenstern ist praktisch identisch mit dem von Var. 1.

5. Vergleich der Varianten

Verlauf Heizwärmebedarf und –verbrauch über den ganzen Messzeitraum

Ausgangslage Berechnung: Über den gesamten Messzeitraum von Juli 2018 bis April 2020 wurde der Heizwärmebedarf für jede Variante (1-3 sowie gebautes Haus) nach SIA 380/1 für jeden Monat berechnet.

Messwert: Der «Heizwärmebedarf Q_h auf der Basis von monatlichen Strom-Messwerten» (mittels konstanten theoretischen Monatsarbeitszahl) wurde ebenfalls ermittelt als mit Heizgradtagen (witterungs-) bereinigte Kennwerte.

Gegenüberstellung: Beide Monatswerte «Berechnung» und «Messwert» wurden einander gegenübergestellt. Es zeigt sich folgender Verlauf über die Monate

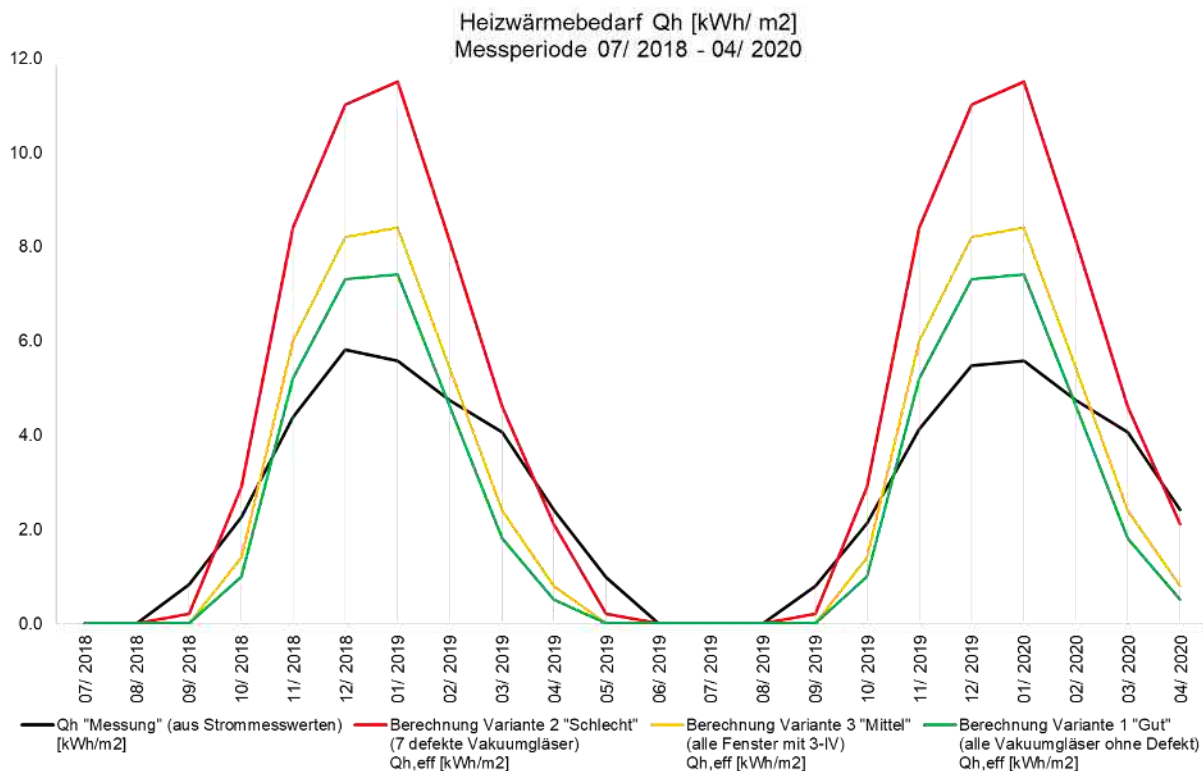


Abbildung 6: Heizwärmebedarf Q_h in [kWh/ m²] für die «Messwerte» sowie die 3 Varianten «Gut», «Mittel» und «Schlecht»

Interpretation Die Varianten «Gut» (grün) bis «Schlecht» (rot) zeigen klar einen Trend zu deutlich verringertem Heizwärmebedarf übers Jahr (nach unten). Jedoch liegen diese im Verhältnis zum monatlichen Heizwärmebedarf aus Messwerten im Mittel um den Faktor 1.3 (bei «Gut») bis Faktor 1.9 («bei Schlecht») doch deutlich erkennbar darüber, jedoch nur in den Wintermonaten. In den restlichen Monaten September Oktober und März-Mai ist der Verbrauch höher als die Berechnungen.

Vergleich der effektiven Kennwerte des Heizwärmebedarfes Q_h in kWh/ m² über verschiedene zusammengefasste Zeiträume

Ausgangslage Die gesamten Resultate der Berechnungen und «Messwerten» wurde über die Zeitperioden des baulichen Zustandes der Fenster einander gegenübergestellt:

Dabei wurden diese eingeteilt in die Zeitperioden «wie gebaut»:

- Zeitraum mit 7 defekten Vakuumgläsern
- Zeitraum Rest keine defekten Vakuumgläser
- Gesamter Zeitraum zum Vergleich

Effektive Kennwerte in kWh/ m² Die folgenden Resultate zeigen Kennwerte in kWh/ m² für den Messwert Q_h sowie die vier verschiedenen Berechnungsvarianten:

- Var. 1 mit defekten Vakuumgläsern
- Var. 2 mit 3-IV-Fenstern
- Var. 3 Vakuumgläser ohne Defekte

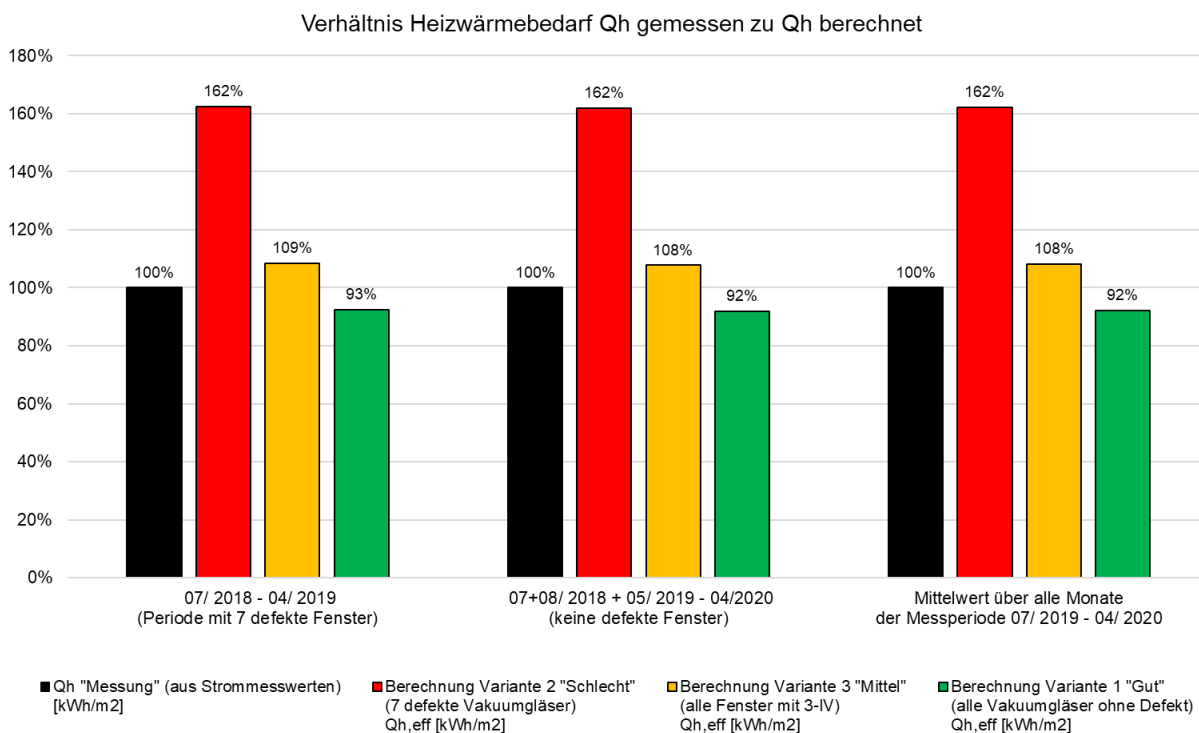


Abbildung 7: Kennwerte Heizwärmebedarf Q_h in [kWh/ m²] für 2 Zeiträume sowie einen Mittelwert über die ganze Messperiode für alle Berechnungs-Varianten

Interpretation Der Heizwärmebedarf «Gut» liegt etwas unter den Messwerten, die Werte der Variante mit defekten Gläser liegt im Mittel um Faktor 1.6 höher. Variante 3-IV-Fenster hat gleich mit 8% gleich viel Abweichung (über der Variante «Messung») wie die Variante «Gut», welche ca. 8% darüber liegt.

Vergleich der Relationen der Kennwerten in % des Heizwärmebedarfes Qh über verschiedene zusammengefasste Zeiträume

Grundlage

Die folgenden Resultate zeigen die Relationen der Messwerte (100%) zu den vier verschiedenen Berechnungsvarianten:

- Var. 1 mit defekten Vakuumgläsern
- Var. 2 mit 3-IV-Fenstern
- Var. 3 Vakuumgläser ohne Defekte

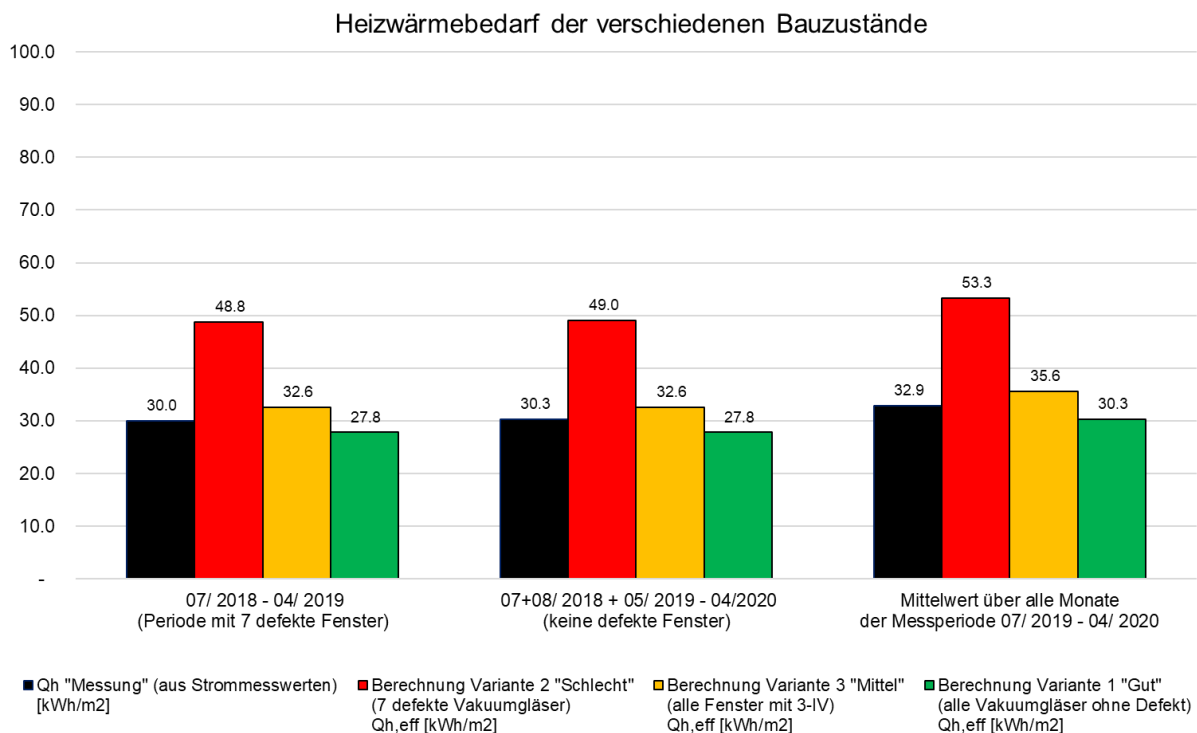


Abbildung 8: Heizwärmebedarf Qh für zwei Zeiträume sowie einen Mittelwert über die ganze Messperiode für alle Berechnungs-Varianten

Interpretation

Im Zeitraum der defekten Vakuumgläser liegt der Heizwärmebedarf «gebautes Haus» beim Doppelten (Faktor 2) der Heizwärmebedarf-Messwerte.

Hingegen zeigt sich im Zeitraum «ohne defekte Vakuumgläser», dass die Berechnung «gebautes Haus» sehr nahe bei den Messwerten liegt mit 110% des Messwertes (10% Abweichung). Damit liegt die Variante 1 «Gut» sehr nahe an der Realität des Heizwärmeverbrauches.



6. Erkenntnisse

Erkenntnisse

Der Heizwärmebedarf der Berechnungsvarianten «Schlecht» und «Mittel» ist im Vergleich zum «Messwert» Heizwärme bei beiden höher. Der Heizwärmebedarf der Variante «Gut» liegt jedoch etwas unter den Messwerten.

Dies bedeutet, dass der Heizwärmeverbrauch des Gebäudes im Betrieb bzw. mit der Nutzung kleiner ist als die berechneten Heizwärmebedarfskennwerte und damit das Gebäude besser dasteht als die Berechnungen dies zeigen.

Sind Vakuumgläser defekt erhöht sich der Heizwärmebedarf logischerweise deutlich, hier im Gebäude um bis zu +60% im Jahresmittel betrachtet.

Eine Einschätzung der effektiven realen U_w -Werte von Fenstern mit defekten Vakuumgläsern ist anspruchsvoll. Die hohen Abweichungen von der Kurve des Heizwärmeverbrauches um bis fast Faktor 2 von der Kurve des Heizwärmebedarfes - vor allem in den Wintermonaten - zeigt dies deutlich.

Richtgrösse

Die vorliegenden Auswertungen zum Gebäude zeigen, dass durch den Einsatz von Vakuumgläsern bei den Fenstern im Vergleich zu 3-IV-Fenstern noch ca. 17 % Jahresheizwärme eingespart werden können.

Ein Genauigkeitsbereich dieser Grössenordnung für die Reduktion der Heizwärme kann jedoch nicht daraus abgeleitet werden und schwankt mit grosser Wahrscheinlichkeit stark. Diese ist u.a. abhängig von der Bau-Qualität des ganzen Gebäudes und insbesondere der eingebauten Vakuum-Gläser, des Gebäude-Standortes selbst sowie von verschiedenen anderen Faktoren etc.



7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Angaben zum Fenstertyp der Firma Glassx.....	4
Abbildung 2:	Berechnung U-Wert defektes Vakuumglas	5
Abbildung 3:	Variante 1 «Gut» - Monatliche Energiebilanz der Fenster je Kalendermonat: Verluste (grün) und Solargewinne (rosa).....	6
Abbildung 4:	Variante 2 «Schlecht» - Monatliche Energiebilanz der Fenster je Kalendermonat: Verluste (grün) und Solargewinne (rosa).....	7
Abbildung 5:	Variante 3 «Mittel» - Monatliche Energiebilanz der Fenster je Kalendermonat: Verluste (grün) und Solargewinne (rosa).....	7
Abbildung 6:	Heizwärmebedarf Q _h für die «Messwerte» sowie die 3 Varianten «Gut», «Mittel» und «Schlecht»	8
Abbildung 7:	Kennwerte Heizwärmebedarf Q _h in kWh/ m ² für 2 Zeiträume sowie einen Mittelwert über die ganze Messperiode für alle Berechnungs-Varianten.....	9
Abbildung 8:	Heizwärmebedarf Q _h für 2 Zeiträume sowie einen Mittelwert über die ganze Messperiode für alle Berechnungs-Varianten	10

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kennwerte Bedarf nach SIA 2024 «Neubau» «EFH» für Energiebezugsfläche von 457.2 m ²	4
Tabelle 3:	Berechnungsvarianten der Variante «Bilanz SIA 380/1 gebautes Haus» über den gesamten Messzeitraum des Berichtes ... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Tabelle 2:	effektive Heizgradtage HGT 20/ 12 der Messperiode 2018-2020.	5
Tabelle 4:	langjährige Mittelwerte Heizgradtage HGT 20/ 12 von 2001-2010.....	5
Tabelle 5:	Auswertung Stromzähler-Messdaten in kWh/ Monat	5



Anhang 1: monatlicher Heizwärmebedarf SIA 380/1-2009 für jede Variante

Bilanz SIA 380/1 - Variante 1 "Gut" (alle Vakuumfenster ohne Defekte)

Monatliche Bilanz							
Monat	Q_T	Q_V	Wärmegewinne			η_g	Q_h
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	Q_l	Q_s	Total		
			[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]		[kWh/m ²]
Januar	8.9	3.4	1.8	2.7	4.5	1	7.8
Februar	7.6	2.9	1.6	3.9	5.5	1	5
März	6.7	2.6	1.8	5.9	7.6	0.9	2.1
April	5.3	2	1.7	6.4	8.1	0.8	0.6
Mai	3.4	1.3	1.8	7.2	8.9	0.5	0.0
Juni	2.1	0.8	1.7	7.3	9	0.3	0
Juli	1.2	0.4	1.8	7.8	9.6	0.2	0
August	1.2	0.4	1.8	7.7	9.4	0.2	0
September	3	1.1	1.7	6	7.7	0.5	0.0
Oktober	4.8	1.8	1.8	4.2	6	0.9	1.2
November	7	2.7	1.7	2.5	4.2	1	5.6
Dezember	8.3	3.2	1.8	2	3.8	1	7.7
Total	59.6	22.6	20.7	63.6	84.2	-	30

Bilanz SIA 380/1 - Variante 3 "Schlecht" (7 defekte Vakuumgläser)

Monatliche Bilanz							
Monat	Q_T	Q_V	Wärmegewinne			η_g	Q_h
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	Q_l	Q_s	Total		
			[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]		[kWh/m ²]
Januar	8.9	3.4	1.8	2.7	4.5	1	7.8
Februar	7.6	2.9	1.6	3.9	5.5	1	5
März	6.7	2.6	1.8	5.9	7.6	0.9	2.1
April	5.3	2	1.7	6.4	8.1	0.8	0.6
Mai	3.4	1.3	1.8	7.2	8.9	0.5	0.0
Juni	2.1	0.8	1.7	7.3	9	0.3	0
Juli	1.2	0.4	1.8	7.8	9.6	0.2	0
August	1.2	0.4	1.8	7.7	9.4	0.2	0
September	3	1.1	1.7	6	7.7	0.5	0.0
Oktober	4.8	1.8	1.8	4.2	6	0.9	1.2
November	7	2.7	1.7	2.5	4.2	1	5.6
Dezember	8.3	3.2	1.8	2	3.8	1	7.7
Total	59.6	22.6	20.7	63.6	84.2	-	30

Bilanz SIA 380/1 - Variante 2 "Mittel" (alle Fenster mit 3-IV)

Monatliche Bilanz							
Monat	Q_T	Q_V	Wärmegewinne			η_g	Q_h
	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	Q_l	Q_s	Total		
			[kWh/m ²]	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]		[kWh/m ²]
Januar	9.9	3.4	1.8	2.7	4.5	1	8.8
Februar	8.4	2.9	1.6	3.9	5.5	1	5.8
März	7.5	2.6	1.8	5.9	7.6	1	2.7
April	5.9	2	1.7	6.4	8.1	0.9	0.9
Mai	3.7	1.3	1.8	7.2	8.9	0.6	0.0
Juni	2.3	0.8	1.7	7.3	9	0.3	0
Juli	1.4	0.4	1.8	7.8	9.6	0.2	0
August	1.4	0.4	1.8	7.7	9.4	0.2	0
September	3.3	1.1	1.7	6	7.7	0.6	0.1
Oktober	5.4	1.8	1.8	4.2	6	0.9	1.6
November	7.8	2.7	1.7	2.5	4.2	1	6.3
Dezember	9.2	3.2	1.8	2	3.8	1	8.6
Total	66	22.6	20.7	63.6	84.2	-	34.9



Anhang 2: Auswertungsbasis mit den 4 Varianten Heizwärmebedarf

Berechnete Werte aus Messung			Bilanz SIA 380/1 – Variante 2 "Schlecht" (7 defekte Vakuumgläser)				Bilanz SIA 380/1 – Variante 3 "Mittel" (alle Fenster mit 3-IV)				Bilanz SIA 380/1 – Variante 1 "Gut" (alle Vakuumfenster ohne Defekte)			
Fenster	Jahr	Monat	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (7 defekte Vakuumgläser) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (alle Fenster mit 3-IV) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (alle Vakuumfenster ohne Defekte) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]			
Normal	2018	7	0.0	0.00	0%	0.00	0.00	0%	0.00	0.00	0%			
Normal	2018	8	0.0	0.00	0%	0.00	0.00	0%	0.00	0.00	0%			
Defekt	2018	9	0.8	0.20	24%	0.00	0.83	0%	0.00	0.83	0%			
Defekt	2018	10	2.3	2.90	126%	1.40	0.86	62%	1.00	1.26	44%			
Defekt	2018	11	4.4	8.40	192%	6.00	1.62	137%	5.20	0.82	119%			
Defekt	2018	12	5.8	11.00	190%	8.20	2.40	141%	7.30	1.50	126%			
			13.3	22.50 kWh/m ²	170%	15.60 kWh/m ²	2.33	118%	13.50 kWh/m ²	0.23	102%			
					167%			116%			100%			
Berechnete Werte aus Messung			Bilanz SIA 380/1 – Variante 2 "Schlecht" (7 defekte Vakuumgläser)				Bilanz SIA 380/1 – Variante 3 "Mittel" (alle Fenster mit 3-IV)				Bilanz SIA 380/1 – Variante 1 "Gut" (alle Vakuumfenster ohne Defekte)			
Fenster	Jahr	Monat	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (7 defekte Vakuumgläser) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (alle Fenster mit 3-IV) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (alle Vakuumfenster ohne Defekte) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]			
Defekt	2019	1	5.6	11.50	206%	8.40	2.83	151%	7.40	1.83	133%			
Defekt	2019	2	4.7	8.10	171%	5.40	0.66	114%	4.60	0.14	97%			
Defekt	2019	3	4.1	4.60	113%	2.40	1.65	59%	1.80	2.25	44%			
Defekt	2019	4	2.4	2.10	87%	0.80	1.62	33%	0.50	1.92	21%			
Normal	2019	5	1.0	0.20	21%	-	0.97	0%	-	0.97	0%			
Normal	2019	6	0.0	-	0%	-	0.00	0%	-	-	0%			
Normal	2019	7	0.0	-	0%	-	0.00	0%	-	-	0%			
Normal	2019	8	0.0	-	0%	-	0.00	0%	-	-	0%			
Normal	2019	9	0.8	0.20	25%	-	0.79	0%	-	0.79	0%			
Normal	2019	10	2.1	2.90	136%	1.40	0.73	68%	1.00	1.13	47%			
Normal	2019	11	4.1	8.40	204%	6.00	1.87	145%	5.20	1.07	126%			
Normal	2019	12	5.5	11.00	201%	8.20	2.73	150%	7.30	1.83	133%			
			30.3	49.00 kWh/m ²	176%	32.60 kWh/m ²	2.34	117%	27.80 kWh/m ²	2.46	92%			
					176%			117%			100%			
Berechnete Werte aus Messung			Bilanz SIA 380/1 – Variante 2 "Schlecht" (7 defekte Vakuumgläser)				Bilanz SIA 380/1 – Variante 3 "Mittel" (alle Fenster mit 3-IV)				Bilanz SIA 380/1 – Variante 1 "Gut" (alle Vakuumfenster ohne Defekte)			
Fenster	Jahr	Monat	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (7 defekte Vakuumgläser) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (alle Fenster mit 3-IV) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]	\dot{Q}_{eff} Eerechnet (alle Vakuumfenster ohne Defekte) [kWh/m ²]	\dot{Q}_{eff} DZif [kWh/m ²]	Verhältnis \dot{Q}_{eff} gerechnet mit \dot{Q}_{eff} Korr ohne \dot{Q}_{eff} v/v [-]			
Normal	2020	1	5.6	11.50	206%	8.4	2.83	151%	7.4	1.83	133%			
Normal	2020	2	4.7	8.10	171%	5.4	0.66	114%	4.6	0.14	97%			
Normal	2020	3	4.1	4.60	113%	2.4	1.65	59%	1.8	2.25	44%			
Normal	2020	4	2.4	2.10	87%	0.8	1.62	33%	0.5	1.92	21%			
			16.8	26.30 kWh/m ²	157%	17.00 kWh/m ²	0.22	101%	14.30 kWh/m ²	2.48	85%			
					184%			119%			100%			
Total			60 kWh/m ²	98 kWh/m ²	162%	65 kWh/m ²	5 kWh/m ²	108%	56 kWh/m ²	5 kWh/m ²	92%			
					176%			117%			100%			
			33 kWh/m ²	53 kWh/m ²		36 kWh/m ²			30 kWh/m ²					



Anhang 3: Grundlagen zu den defekten Vakuumgläsern

Alle defekten Fenster wurden grün markiert. Diese Flächen wurden in die Berechnungen der zweiten Variante mit einbezogen.



Abbildung: Defekte Fenster im UG

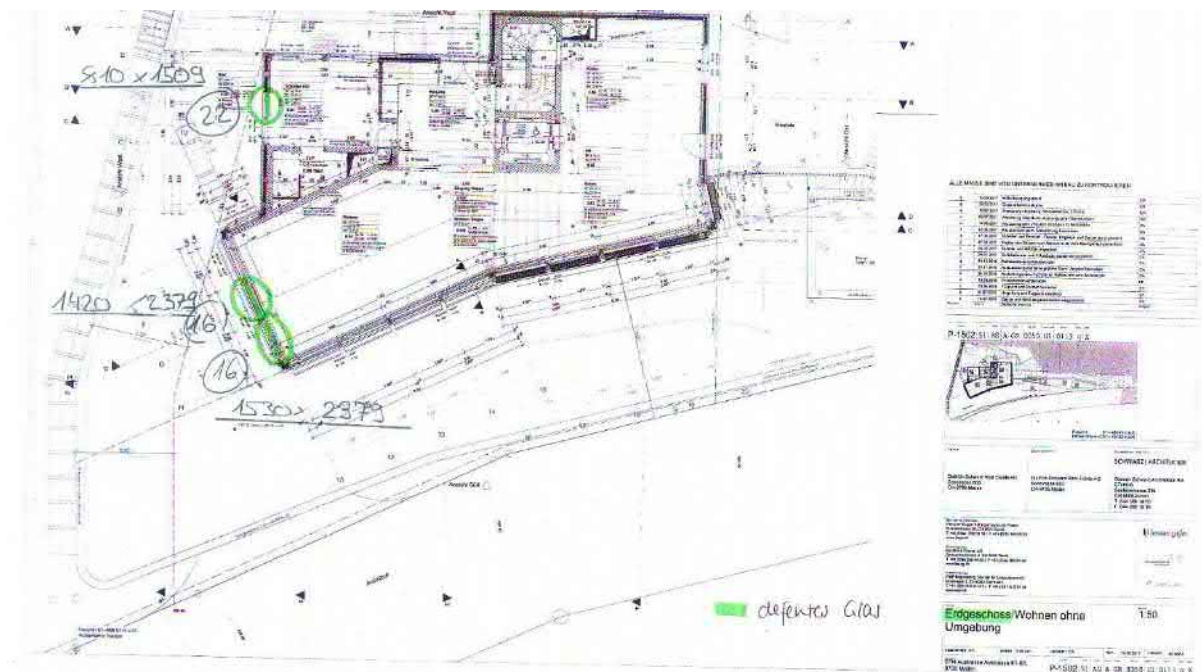


Abbildung: Defekte Fenster im EG

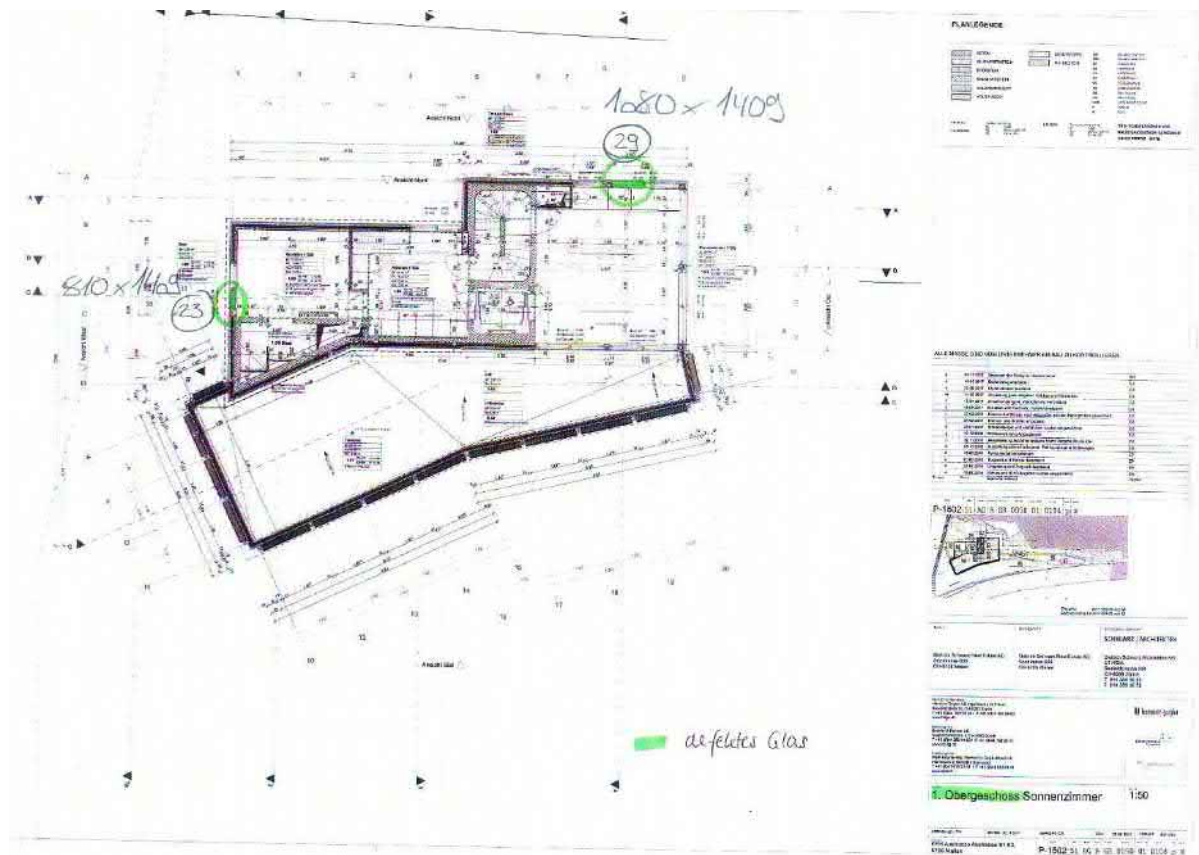


Abbildung: Defekte Fenster im 1. OG



W&P Engineering
Partner für Gebäudetechnik

Anhang 4: Heizwärmebilanz Ausgangslage



W&P Engineering
Partner für Gebäudetechnik

Anhang 5: Heizwärmebilanz Variante 1 «Gut»



W&P Engineering
Partner für Gebäudetechnik

Anhang 6: Heizwärmebilanz Variante 2 "Schlecht"



W&P Engineering
Partner für Gebäudetechnik

Anhang 7: Heizwärmebilanz Variante 3 «Mittel»



Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences

Informationen aus der Umfrage zum Projekt "Entwicklung hochisolierender Fenstersysteme«

zum Projekttermin 23.05.2018, bei Fa.
Gerber-Vogt, Allschwil

► Kompetenzbereich Management und Marktforschung/ zum 23.05.2018 / Birgit Neubauer-Letsch, Ivana Krajnovic

Übersicht

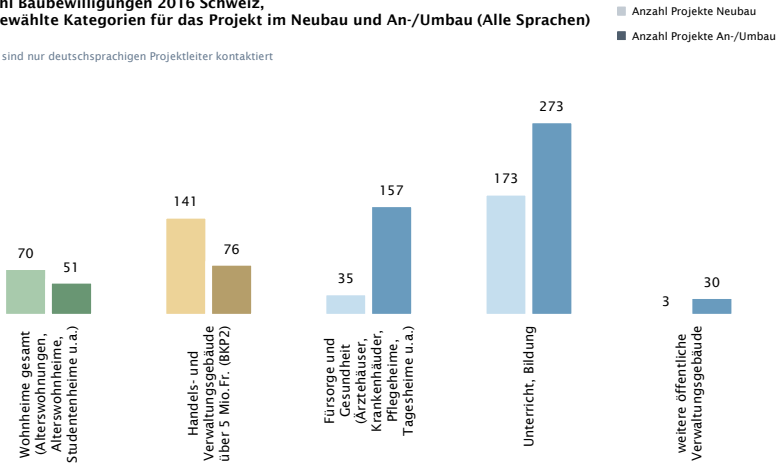
- Kurzer Rückblick auf den Ablauf mit der Marktanalyse (BFH F&E) und der Umfrage (Projektarbeit 5.Sem. BSc Holztechnik)
- Informationen zur Zielgruppe und zu den Profilen der Teilnehmenden
- Entscheidungen und Informationskanäle für die Materialwahl im Fensterbereich
- Themenbereich Schiebefenster und Automatisierung
- Themenbereich schlanke Leichtbauwände mit Aerogel
- Themenbereich hochisolierende Vakuumgläser
- Vorschläge aus der Projektarbeit
- Ausblick, weitere mögliche Schritte im Projekt zur Vermarktungsseite/ Kundenakzeptanz

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Informationen zur Zielgruppe für die Umfrage

Anzahl Baubewilligungen 2016 Schweiz, Ausgewählte Kategorien für das Projekt im Neubau und An-/Umbau (Alle Sprachen)

*Davon sind nur deutschsprachigen Projektleiter kontaktiert



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Durchführung mit persönlichen Befragungen und als Online-Umfrage

Auszug E-Mail

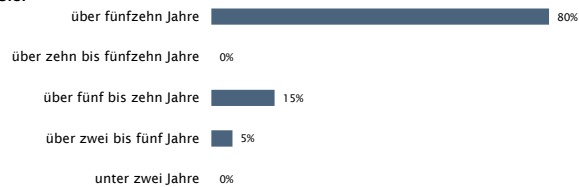


Auszug Fragenkatalog

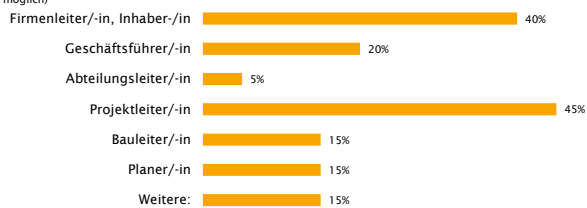
Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Ergebnis zum Profil der Umfrage-Teilnehmer

Über wie viele Jahre Berufserfahrung in der Baubranche verfügen Sie?



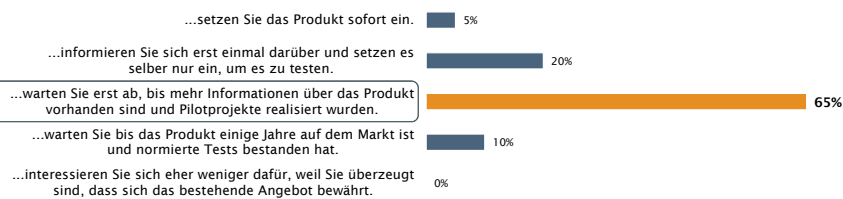
Welche Funktionen üben Sie in Ihrer Tätigkeit aus? (Mehrfachantwort möglich)



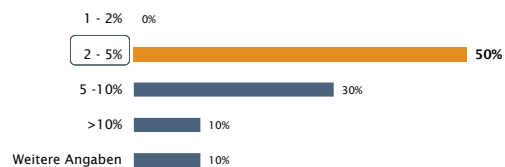
Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Interesse der Teilnehmer an innovativen Produkten

Wie stehen Sie generell zu innovativen Produkten? Wenn Sie von einem neuen Produkt hören...



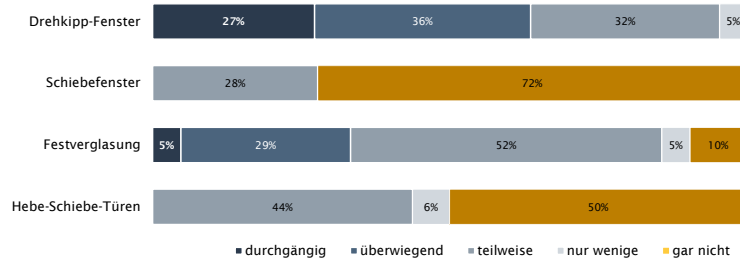
Wie viel teurer dürften innovative Produkte sein? (bezogen auf Investitionen und Life cycle costs)



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Gewählte Öffnungsart für das spezifische Bauprojekt

Welche Öffnungsart haben Sie für Ihr Bauprojekt gewählt?



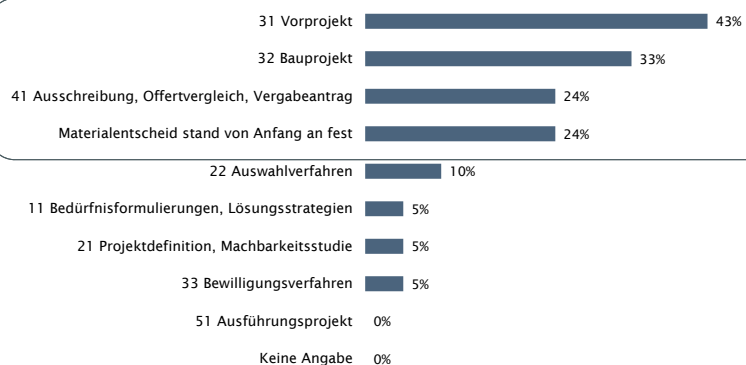
Sonstiges nach individuellen Angaben:

- Je nach Raum – WC und Küche Drehkipp
- Lamellenfenster, Dichtigkeitsprobleme
- Automatische Schiebetüren
- Kippfenster

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Zeitpunkt von Materialentscheidungen im Fensterbereich

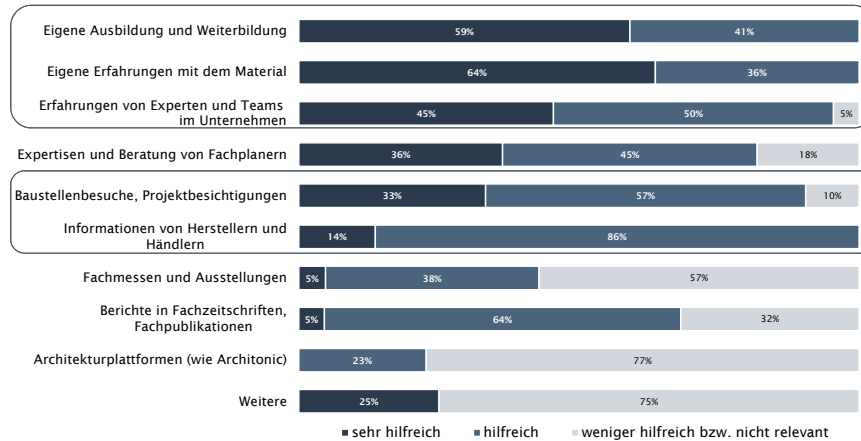
In welcher Teilphase (nach SIA 112) wurden die Materialentscheidungen für den Fensterbereich getroffen? (Sie können mehrere Antwortmöglichkeiten auswählen)



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Informationsquellen für die Materialwahl Fenster

Welche der folgenden Informationsquellen sind für Sie generell hilfreich bei der Materialwahl für Fenster?

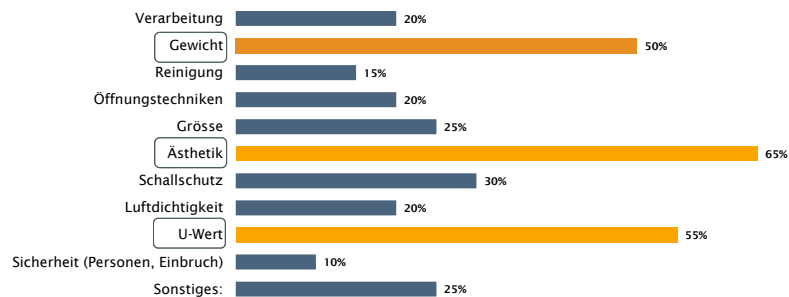


Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Wünsche für die Verbesserung von Fenstern generell

Welche Verbesserungen wünschen Sie sich bei den Fenstern?

Verbesserungen im Bereich....(Mehrere Nennungen möglich)



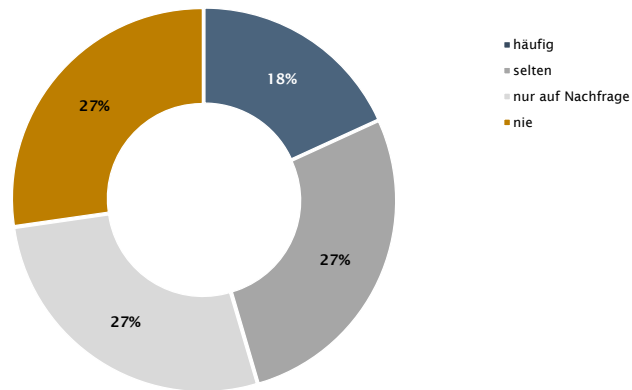
Sonstiges nach individueller Angabe:

- Variabler G-Wert
- Schlagregendichtigkeit
- Montagequalität
- Verspiegeln, Verdunkeln...

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Einsatz von Schiebefenstern

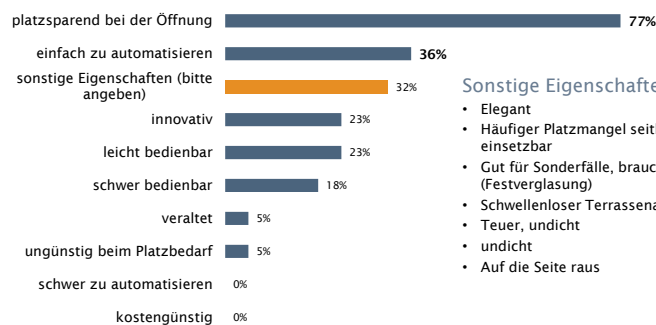
Setzen Sie Schiebefenstersysteme wie z.B. Ergoslide in Ihren Bauprojekten ein?



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Einschätzung zu Eigenschaften von Schiebefenstern

Mit welchen Eigenschaften verbinden Sie Schiebefenster? (Bitte kreuzen Sie an, was Sie wichtig finden)



Sonstige Eigenschaften, individuelle Texte:

- Elegant
- Häufiger Platzmangel seitlich bei Sanierung i.d.r. nicht einsetzbar
- Gut für Sonderfälle, braucht doppelte Fensterfläche (Festverglasung)
- Schwellenloser Terrassenausgang
- Teuer, undicht
- undicht
- Auf die Seite raus

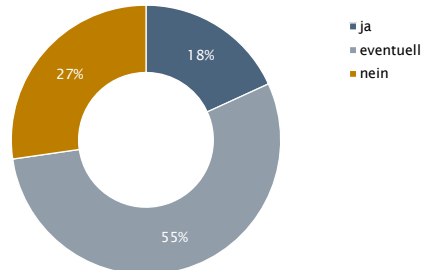
Bei Schiebefenstersystemen ist die Reinigung ein grosses Problem.

■ Stimme vollkommen zu ■ Stimme überwiegend zu ■ Stimme teilweise zu ■ Stimme nicht zu

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Automatisierung von Fenstern

Kommt eine automatisierte Öffnungslösung für die Fenster bei Ihren Bauprojekten generell in Frage?



Sonstiges (bitte angeben):

- NEIN: Automatischer Sonnenschutz ist wichtiger, kontrollierte Lüftung → Automatisierung hinfällig
- EVENTUELL: Je nach Art des Gebäudes, Bürogebäude ja, Wohnung nur verdunkeln automatisieren
- JA: Wird in naher Zukunft zum Standard werden
- EVENTUELL: Grundsätzlich gute Sache z.B. Für Lärmbelastete Gebiete, Problem der Einbuchsicherheit
- EVENTUELL: Die Komfortlüftungen greifen den automatisierten Öffnungslösungen vor

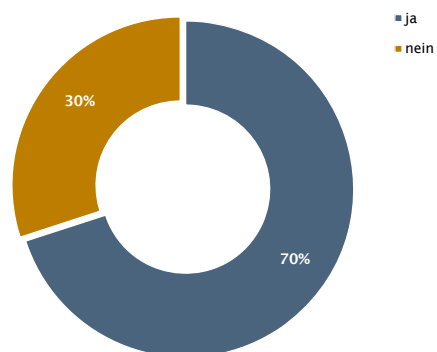
Die Automatisierung von Fenstern wird in den nächsten Jahren sehr stark zunehmen.



■ Stimme vollkommen zu ■ Stimme überwiegend zu ■ Stimme teilweise zu ■ Stimme nicht zu

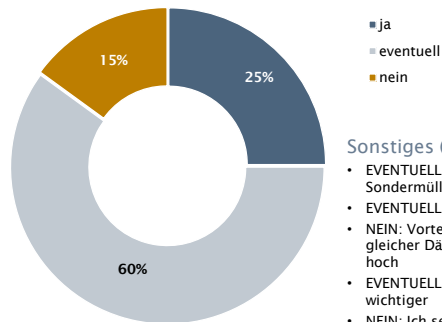
Kenntnis zu schlanken Leichtbauwänden mit Aerogel

Haben Sie schon von schlanken, mit Aerogel isolierten Leichtbauwänden gehört?



Einschätzung zum Einsatz von schlanken Leichtbauwänden mit Aerogel

Würden Sie diese Wände in Ihrem Projekt einbauen?



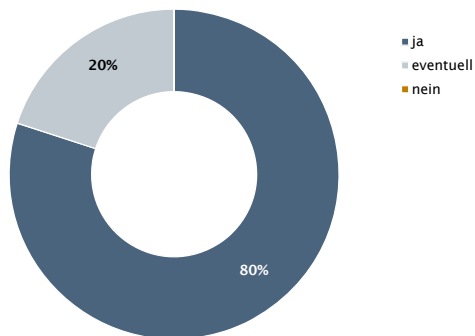
Sonstiges (bitte angeben):

- EVENTUELL: Je nach Situation und Kosten, Aerogel Gesundheitsschädigend? Sondermüll
- EVENTUELL: Preis!!! Eine Wand darf nichts kosten
- NEIN: Vorteil von dünnen Wänden ist zu gering, Preis von Aerogel bei gleicher Dämmleistung im Vergleich zu herkömmlicher Dämmung viel zu hoch
- EVENTUELL: Dämmung erzeugt Dicke, nicht Statik, je nach Kosten, Fenster wichtiger
- NEIN: Ich sehe keinen Vorteil
- JA: Bereits gemacht, vor allem für Teilbereiche beachtenswert
- NEIN: Keine Erfahrung
- EVENTUELL: Preisfrage
- EVENTUELL: vermutlich zu teuer
- EVENTUELL: Denkmalschutz

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Einschätzung zu den statischen Eigenschaften von dünnen Wänden

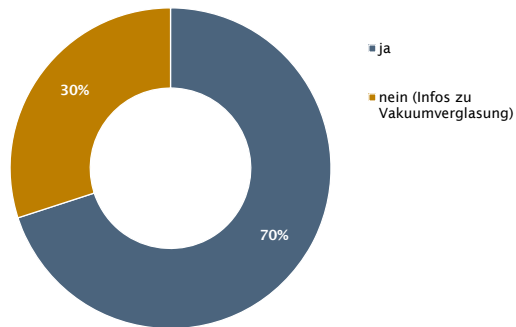
Vertrauen Sie den statischen Eigenschaften einer Wand, die nur halb so dick ist wie gewohnt?



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Kenntnis zu hochisolierenden Vakuumgläsern

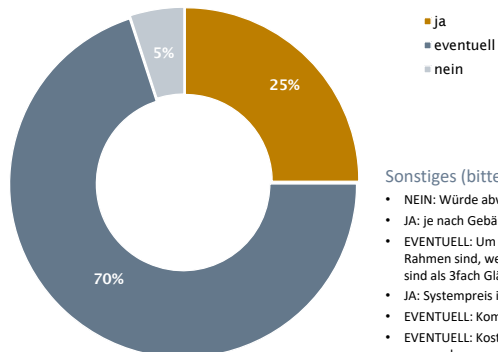
Haben Sie bereits von hochisolierenden Vakuumgläsern gehört?



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Einschätzung zum Einsatz von hochisolierenden Vakuumgläsern

Würden Sie es bei einem Ihrer nächsten Projekte in Betracht ziehen, innovative Vakuumverglasungen zu verbauen?



Sonstiges (bitte angeben):

- NEIN: Würde abwarten ob es sich bewährt
- JA: je nach Gebäudeart, Mehrwert muss sein, Amortisation
- EVENTUELL: Um Erfahrung zu sammeln, wenn Mehrkosten in erträglichem Rahmen sind, wenn U- und G- wert mindestens gleichwertig oder besser sind als 3fach Gläser
- JA: Systempreis ist relevant, spannende Entwicklung
- EVENTUELL: Kommt aufs Projekt an, wird eher nicht die generelle Lösung
- EVENTUELL: Kostenabgleich mit Bauherrschaften, wer ist bereit mehr Geld auszugeben
- EVENTUELL: Vakuumdämmung auch schon angewendet

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Vorschläge aus Projektarbeit Schlatter/Balmelli



Quelle: containex.at

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Ausblick und mögliche weitere, vertiefte Befragungen zu 3 Themen

- ▶ Nach der Projektpräsentation der Studenten wurden 3 mögliche Bereiche thematisiert, die separat vertieft werden können – sofern das Interesse der Projektpartner besteht:
 - Schiebefenster und Automatisierung
 - schlanke Leichtbauwände
 - hochisolierende Vakuumgläser
- ▶ Entsprechende, vertiefte Umfragen können im Rahmen von Projektarbeiten von Studierenden des 5. Semesters Bachelor konzipiert und bearbeitet werden.
- ▶ Die Projektarbeit/en werden vom Team der BFH betreut, in Abstimmung mit den Projektpartnern.
- ▶ Die Zielgruppe wird für jedes Thema separat definiert.
- ▶ **Ausführung:** ab Mitte September – Dezember 2018

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Konzeption für die vertiefte Befragung zum Thema «Schiebefenster und Automatisierung»

- ▶ Thema wie bei der Projektvorstellung mit Fa. Gerber-Vogt besprochen.
- ▶ Eine vertiefte Umfrage wird kompakt konzipiert mit Fokus «Schiebefenster und Automatisierung».
- ▶ Basis sind die selektierten Bauprojekte im Neubau und für grössere An-/Umbauten der letzten 6-18 Monate, regionaler Schwerpunkt D-CH.
- ▶ Die Umfrage wird vor allem aus Fachfragen zum Fokusthema «Schiebefenster und Automatisierung» bestehen, ergänzt mit wenigen Fragen zur generellen Einstellung zu Produktneuheiten und Profilfragen.
- ▶ Die Umfrage wird durch persönliche Experteninterviews und Telefoninterviews durchgeführt.
- ▶ Die Zielgruppe zu diesem Thema wird sich auf Bauherren bzw. Verwaltung/Betreiber der Institutionen konzentrieren.

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Weitere Schritte im Bereich Marktakzeptanz/Vermarktung/Kundenansprache

- ▶ Interesse für die beiden weiteren Themenbereiche abstimmen am 23.05. bei der Projektbesprechung (BFH).
- ▶ Briefing formulieren und Fragestellungen zur Umfrage vertiefen (BFH).
- ▶ Zielgruppe zusammen mit dem Auftraggeber im Detail definieren (BFH).
- ▶ Die Anträge für die Projektarbeiten eingeben (BFH).
- ▶ Zeitplan abstimmen.

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Vergleich "graue Energie" konventionelles Fenster mit 3-fach Isolierglas und einem schlankem Fenster mit VIG Glas/GFK

Calculation:	Compare
Results:	Impact assessment
Product 1:	1 kg Flat glass, coated, at plant/RER U (of project UVEK:2018)
Product 2:	1 kg Flat glass, uncoated, at plant/RER U (of project UVEK:2018)
Product 3:	1 kg Tempering, flat glass/RER U (of project UVEK:2018)
Product 4:	1 kg Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant/RER U (of project UVEK:2018)
Product 5:	1 kg Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up, at plant/RER U (of project UVEK:2018)
Product 6:	1 kg aluminium, production mix, cast alloy, at plant/kg/RER U (of project UVEK:2018)
Product 7:	1 kg aluminium, production mix, cast alloy, at plant/kg/RER U (of project UVEK:2018)
Product 8:	0.002222 m3 Sawn timber, softwood, planed, kiln dried, at plant/RER U (of project KBOB 2016 Library)
Product 9:	1 kg Cold impact extrusion, aluminium, 3 strokes/RER U (of project UVEK:2018)
Method:	IPCC 2013 GWP 100a, Carbotech 1.03.01 V1.03
Indicator:	Characterization
Skip categories:	Never
Exclude infrastr:	No
Exclude long-ter	Yes
Sorted on item:	Impact category
Sort order:	Ascending

Calculation:	Compare
Results:	Impact assessment
Product 1:	1 kg Flat glass, coated, at plant/RER U (of project UVEK:2018)
Product 2:	1 kg Flat glass, uncoated, at plant/RER U (of project UVEK:2018)
Product 3:	1 kg Tempering, flat glass/RER U (of project UVEK:2018)
Product 4:	1 kg Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant/RER U (of project UVEK:2018)
Product 5:	1 kg Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up, at plant/RER U (of project UVEK:2018)
Product 6:	1 kg aluminium, production mix, cast alloy, at plant/kg/RER U (of project UVEK:2018)
Product 7:	1 kg aluminium, production mix, cast alloy, at plant/kg/RER U (of project UVEK:2018)
Product 8:	0.002222 m3 Sawn timber, softwood, planed, kiln dried, at plant/RER U (of project KBOB 2016 Library)
Product 9:	1 kg Cold impact extrusion, aluminium, 3 strokes/RER U (of project UVEK:2018)
Method:	Cumulative Energy Demand V1.11 / Cumulative energy demand
Indicator:	Characterization
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure proc	No
Exclude long-term emission	Yes
Sorted on item:	Impact category
Sort order:	Ascending

Impact category	Unit	Flat glass, coated, at plant/RER U	Flat glass, uncoated, at plant/RER U	Tempering, flat glass/RER U	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant/RER U	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up, at plant/RER U	aluminium, production mix, cast alloy, at plant/kg/RER U	aluminium, production mix, cast alloy, at plant/kg/RER U	Sawn timber, softwood, planed, kiln dried, at plant/RER U	Cold impact extrusion, aluminium, 3 strokes/RER U
IPCC GWP 100a	kg CO2 eq	1.08	0.98	0.23	8.88	4.68	4.39	4.39	0.22	1.47

Impact category	Unit	Flat glass, coated, at plant/RER U	Flat glass, uncoated, at plant/RER U	Tempering, flat glass/RER U	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant/RER U	Glass fibre reinforced plastic, polyester resin, hand lay-up, at plant/RER U	aluminium, production mix, cast alloy, at plant/kg/RER U	aluminium, production mix, cast alloy, at plant/kg/RER U	Sawn timber, softwood, planed, kiln dried, at plant/RER U	Cold impact extrusion, aluminium, 3 strokes/RER U
Non renewable, fossil	MJ	12.67	11.36	3.21	125.14	68.13	55.12	55.12	3.05	17.93
Non-renewable, nuclear	MJ	1.15	0.72	0.16	17.57	9.44	18.49	18.49	1.00	7.97
Non-renewable, biomass	MJ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Renewable, biomass	MJ	0.23	0.18	0.03	1.85	0.62	0.26	0.26	23.16	0.51
Renewable, wind, solar, gec	MJ	0.05	0.03	0.01	0.27	0.39	0.11	0.11	0.04	0.37
Renewable, water	MJ	0.28	0.19	0.04	1.42	1.67	15.06	15.06	0.19	1.43
erneuerbar	MJ	0.56	0.40	0.07	3.53	2.67	15.43	15.43	23.39	2.30
nicht meuerbar	MJ	13.82	12.09	3.38	142.71	77.57	73.61	73.61	4.04	25.90

Konventionell			Infinity Gewicht kg	0: Nein, 1: ja	Konventionell					schlankes Fenster mit VIG und GFK			
					Klima kg CO2	KEA MJ				Klima kg CO2	KEA MJ		
					nicht erneuerbar	erneuerbar	Total	nicht erneuerbar		erneuerbar	Total		
					1'909	70	1'979	1'324		49	1'373		
Flachglas	111.0	77.0	145.9	-	-	-	84.8	1'406	48	1'455			
- getempert	1	1	-	-	-	-	23.7	403	72	475			
GFK		18.1	36.4	618	110	728	11.9	214	1'239	1'454			
Aluminium	6.2	4.1	14.1	255	1'473	1'728							
Holz	63.0	53.0											
Total	181.2	153.2	200	2'800	1'700	4'400	220	3'300	1'400	4'800			

Dr Fredy Dinkel | f.dinkel@carbotech.ch
T +41 61 206 95 22 | M +41 79 335 38 54

Carbotech AG | Umweltprojekte und Beratung
St. Alban-Vorstadt 19,
4052 Basel
Postfach
CH-4002 Basel
www.carbotech.ch

Zusammenfassung der Untersuchungen der BFH an Vakuumgläser und ultraschlanker Wandkonstruktionen (vorgestellt als PPT am 14.11.2018 Meilen/Zürich)

Messungen zur Bestimmung des U_g -Wertes

Die Messungen wurden in einem geschützten Plattenmessgerät (Guarded Hot Plate) durchgeführt. Dazu wurden Vakuumgläser der Grösse 800 mm x 800 mm mit einem Dämmstoffrahmen von 50 mm Dicke (Bild 1. Rechts) und auf beiden Seiten je eine Folie mit Temperatursensoren (Bild 1. Links) in das Plattengerät eingebaut. Gemessen wurde im 1-Proben Modus (mit Gegenheizplatte) und vertikaler Position des Glases.

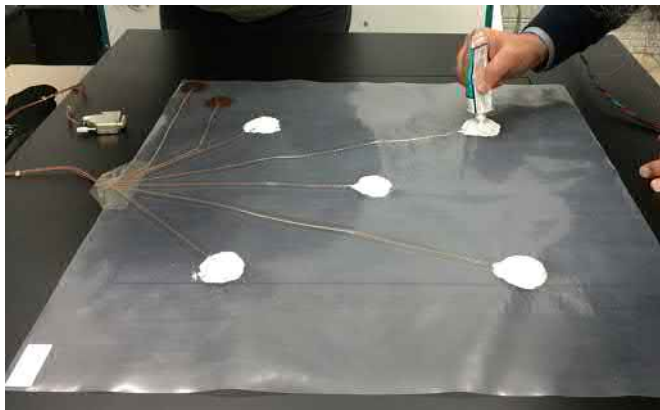


Bild 1. Einbau eines Vakuumglases mit Thermoelement-Folie und Kontaktpaste

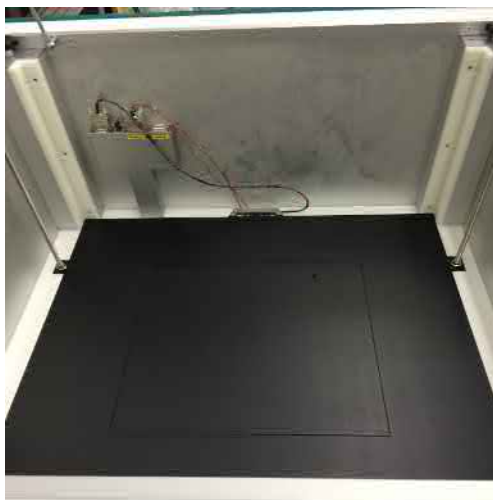


Bild 2. Heizplatte ohne Probe (links) und Gesamtansicht des Plattengeräts (rechts)

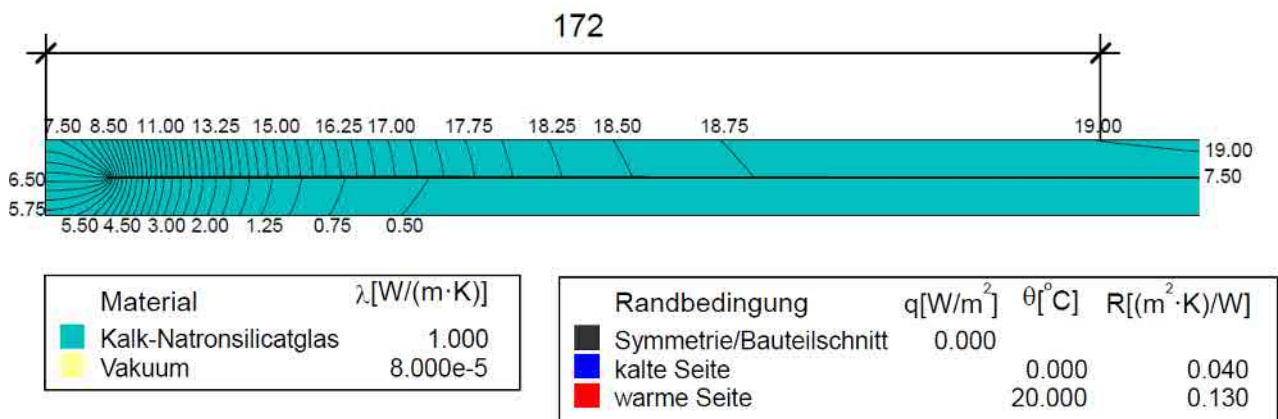
Es wurden drei Vakuumgläser in der obigen Apparatur gemessen. Ursprüngliche Lieferant ist ein Hersteller in Taiwan. Bei den Messungen wurden die Vorgaben der Norm EN 674:2011 befolgt, d.h. eine mittlere Temperatur von 10°C, ein Temperaturgradient von mindestens 15K unter Benützung von Ausgleichsschichten.

Probe 3468-001: $U_g = 0.46 \pm 0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$

Probe 3468-002: $U_g = 0.51 \pm 0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$

Probe 3468-003: $U_g = 0.62 \pm 0.01 \text{ W/m}^2\text{K}$

Alle 3 Messungen bei einem $\Delta T = 15 \text{ K}$ Und $T_m = 10^\circ \text{ C}$



Im Unterschied zu den konventionellen Gläser haben Vakuumgläser nur einen kleinen Abstand von 0.2 mm und einen thermisch ungünstigen Randabschnitt (Abgeschmolzenes Glas und metallische Lagen).

- 1- Es gibt keine Standard-Verfahren (EN, ISO, etc.) die speziell auf Vakuumverglasungen zugeschnitten sind.
- 2- Der Randeffect spielt bei Vakuumverglasungen eine sehr wichtige Rolle. Diesen konnte man in dem vorliegenden Projekt nur rechnerisch Abschätzen. Eine genaue Berechnung bedarf der genauen Angabe des verwendeten Materials, um das Vakuumglas über Jahrzehnte dicht zu halten (keine Angaben vom Hersteller).
- 3- Der Randeffect ist umso grösser je kleiner der Wärmedurchgang im ungestörten Bereich in der Mitte des Glases ist.
- 4- Die Messung im Plattengerät (Guarded Hot Plate) von Vakuumgläser im Format 800mm x 800mm schliesst den Einfluss des Randes in der Messfläche (500mm x 500mm) nicht aus. Dies ist einer der Gründe für die Diskrepanz der Resultate im Vergleich zur in-situ Messungen (J. Stelljes).
- 5- Die in-situ Messungen sind an grösseren Glasflächen und bei einer Messfläche von ca. 50mm x 50mm also viel kleiner als die oben genannte Messfläche. Deshalb ist auch der Randeinfluss viel kleiner.
- 6- Zur in-situ Messung die nur 2 Tage gedauert hat (13 und 14 März) muss gesagt werden, dass hier die Orientierung und die Sonneneinstrahlung und die Jahreszeit eine Rolle spielen was zu verschiedentlichen Resultaten führen kann.

- 3484-001 Vakuumglas
3484-002 Vakuumglas
3484-003 Vakuumglas
3484-004 5-12-5 2-fach Isolierglas
3484-005 4-12-4 2-fach Isolierglas



Bild 4. Fünf in Holzrahmen eingebaute Gläser davon 3 Vakuumgläser und 2 konventionelle 2-fach Isoliergläser. Probengrösse 760 mm x 1409 mm Glasgrösse



Bild 5. Bruch des Vakuumglases 3484-3 bei $c = 200$ (Bild 3), Schwarz: Bruchlinien auf dem vorderen Glas (Aufprall) Rot: Bruchlinien im hinteren Glas

Ein sehr grosser Unterschied zwischen den Vakuumgläser und den konventionellen 2-fach Isoliergläser besteht in dem Vorhandensein von einem Netz von durchsichtigen Abstandhaltern in einer Matrix von 40 mm x 40 mm angeordnet die den Glasabstand von 0.2 mm aufrechterhalten. Diese kleinen zylindrischen Kunststoffelemente wirken als punktuelle Kraftübertragung die zu einem frühzeitigen Bruch des Vakuumglases führt (Bild 5). In den

Konventionellen Gläser wird die auftreffende kraft von Gasgemisch zwischen den Gläsern abgedeutert was zu einem späteren Bruch (grosser Höhenunterschied c in Bild 3) führt.

Resultate der Pendelschlagversuche:

3484-001	3484-002	3484-003	3484-004	3484-005
50	50	50	150	100
100	100	100	200	150
150	150	150	250	200
	175	200	300	250
			400	300
			450	350
			500	450
	Bruch in rot		550	500
			600	550
			700	600
			800	700
			900	750
				850

Hygrothermische Berechnungen an einer ultraschlanken Wand

Zur Beurteilung der Verteilung der Feuchte in einer ultraschlanken Wand, die hauptsächlich aus einem hochdämmenden Material (Isopet/ Aerogel) mit zwei Holzplatten auf beiden Seiten und einer vorgehängten Falzschalung (Hinterlüftung) besteht (Bild 6) wurden mit Hilfe des Programms WUFI eindimensionale hygrothermische Simulationen durchgeführt.

BAUTEIL			
Aussenwand 001			
AUFBAU			
Falزشchalung Fi/Ta	21 mm		
Hinterlüftungslattung	27mm		
Fassadenpapier	-		
Kerto (kalibriert)	30mm		
Steg Sperrholz	100mm		
Dämmung Aerogel	100mm (zwischen Ständer)		
Kerto (kalibriert)	30mm		
Dampfbremse	-		
Gipskartonplatte	12.5mm		
BEMERKUNG			
- Fassadenschalung Eterno Old Chalet behandelt			

Bild 6. Aufbau der ultraschlanken Wand mit hochisolierendem Dämmstoff (Isopet/ Aerogel mit Wärmeleitfähigkeit 0.019 W/mK)

Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- 1- Die vorgehängte Holzschalung lässt kein Regenwasser auf die äussere Holzplatte, weshalb bei der Modellierung nur diese weggelassen wurde und dafür kein Regen auf der Aussenoberfläche zugelassen wird. Die Holzschalung ist hygrothermisch vom Rest der Wand entkoppelt (Bild 7).

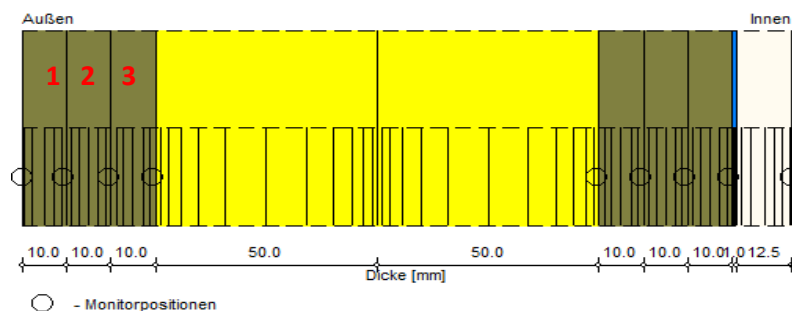


Bild 7 Model für die hygrothermische Analyse (Holz in 3 Schichten aufgeteilt)

2- Die verwendeten Materialkennwerte sind:

Material : *Isopet

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	80
Porosität	[m³/m³]	.0001
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	900
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0.019
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	10000

Material : Dampfbremse (sd=10m)

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	130.0
Porosität	[m³/m³]	0.001
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	2300.0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	2.3
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	10000.0
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Temp.	[W/mK²]	0.0002

3- Folgende Klima-Randbedingungen wurden für Aussen und Innen berücksichtigt:

Auf der Raumseite wurde ein normales Innenklima nach EN15026 und für das Aussenklima ein kaltes Jahr in Zürich (worse case) eingesetzt.

Außen (linke Seite)

Klimaort: Zürich; kaltes Jahr
Orientierung / Neigung: West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Innenklima: EN 15026
Feuchtelast normal

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand - beinhaltet langwelligen Strahlungsanteil		[m²K/W]	0.083 ja
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	----
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	Keine Absorption/Emission	[-]	----
Langwellige Strahlungsemissionszahl	Keine Absorption/Emission	[-]	----
Anhaftender Anteil des Regens	Keine Regenwasserabsorption	[-]	----
Explizite Strahlungsbilanz			nein

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Bemerkung	Einheit	Wert
Wärmeübergangswiderstand		[m²K/W]	0.125
Sd-Wert	Keine Beschichtung	[m]	----

Resultate der hygrothermischen Analyse:

Hygrothermisch gesehen ist die äussere Holzschicht die kritische Schicht da sie über das ganze Jahr dem Aussenklima ausgesetzt ist und durch den hochisolierenden Dämmstoff keine Wärme aus dem Inneren bekommt um die allfällige Feuchte austrocknen zu lassen.

Deshalb wurde die äussere Holzschicht in drei Teile aufgeteilt um den Wassergehalt nicht als Summe über die ganze Holzschicht, sondern in je einem Drittel berechnen zu können (Zahlen 1-3 im Bild 7). Dasselbe geschah für die innere Holzschicht aber diese ist nicht als kritisch zu betrachten da eine Dampfsperre davor liegt und die vom Innenraum herrührende Feuchte davon abhält in die Konstruktion zu dringen.

Die Schwankungen der Holzfeuchte in den drei Teilen 1, 2 und 3 der äusseren Schicht (Bilder 8, 9 und 10)) zeigen zwar ein periodisches Verhalten aber keine Ansammlung von Feuchte. Die Werte schwanken zwischen 62 und 96 kg/m³ für 1 (Bild 8). Bei einer Rohdichte von 480-500 kg/m³ für das verwendete Kerto-Holz ist dies eine Feuchte von 12.5 bis 20.5 Masse %. Und der Peak ist sehr Spitz und dauert sehr kurz. Also keine bedenkliche Feuchte Ansammlung selbst bei einem kalten Jahr. Auch die beiden Schichten 2 und 3 der äusseren Holzschicht schwanken in einem unkritischen Feuchtebereich.

Allerdings gilt dies **nur** wenn die Wand durch eine hinterlüftete Fassade vor Regen geschützt ist!!!

Andernfalls können die äusseren Holzschichten nicht austrocknen da sie, bedingt durch die gute Dämmung, keine Wärmezufuhr erfahren.

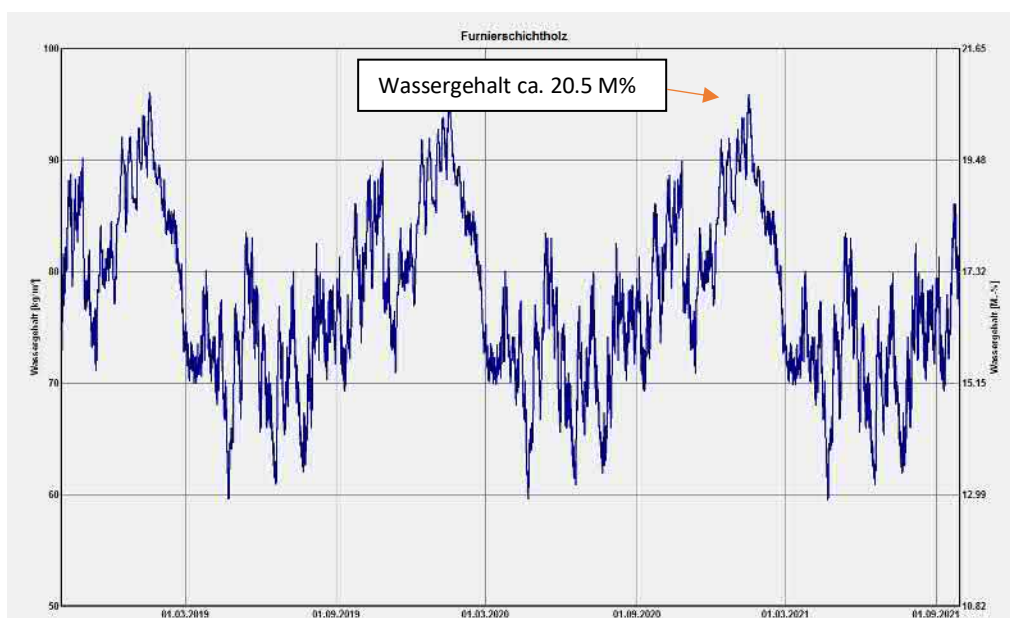


Bild 8. Wassergehalt in der Holzschicht **1** aussen über eine Periode von drei Jahren

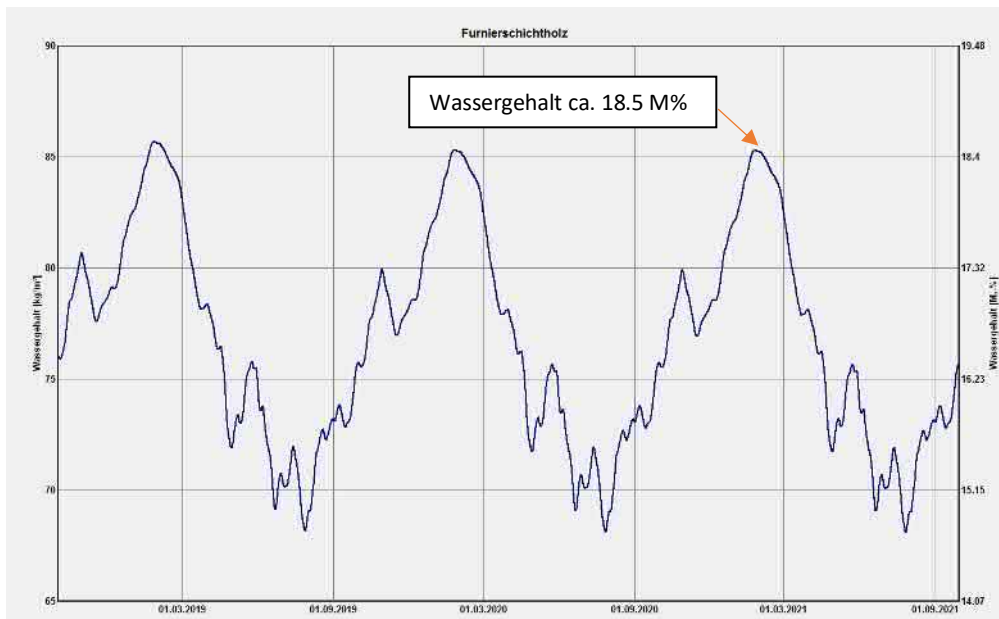


Bild 9 Wassergehalt in der Holzschicht **2** aussen über eine Periode von drei Jahren

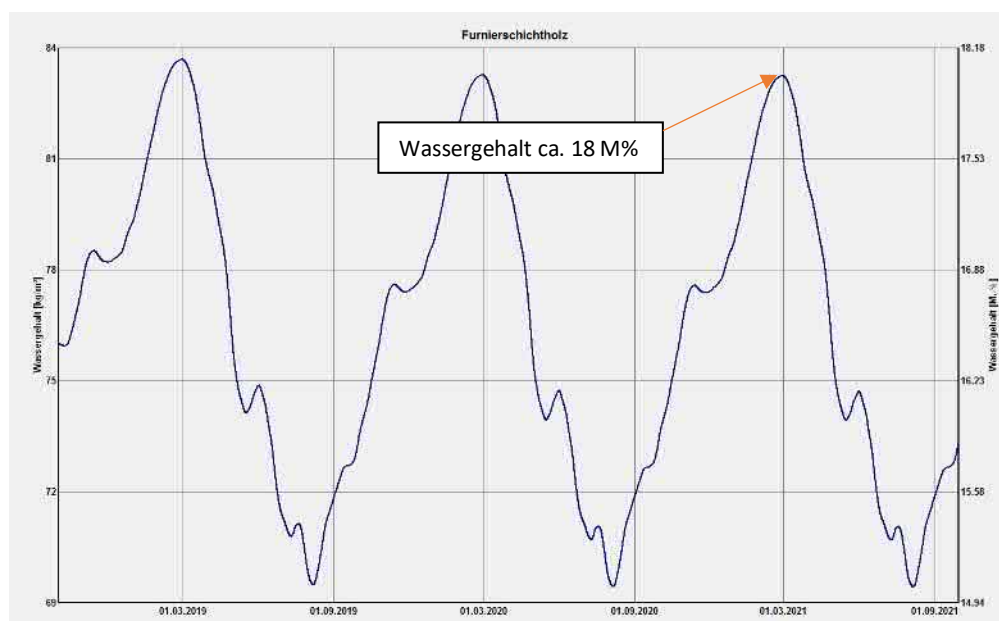


Bild 10 Wassergehalt in der Holzschicht **3** aussen über eine Periode von drei Jahren

P&D Holzbau SL

Außenwand
erstellt am 16.1.2020

Wärmeschutz

$U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

MuKEn14 Neubau*: $U < 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



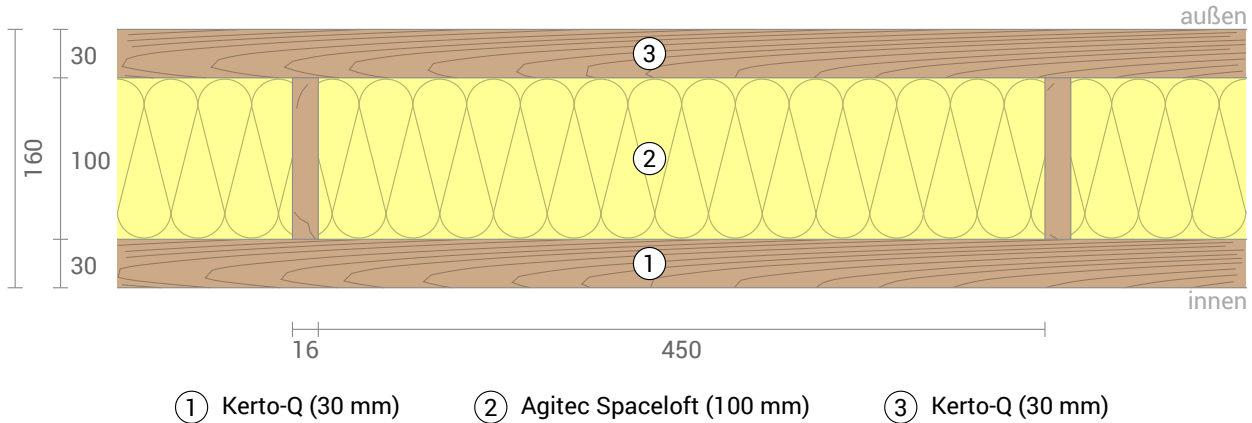
Feuchteschutz

Trocknet 48 Tage
Feuchtegehalt Holz: +1,7%
Tauwasser: 315 g/m²



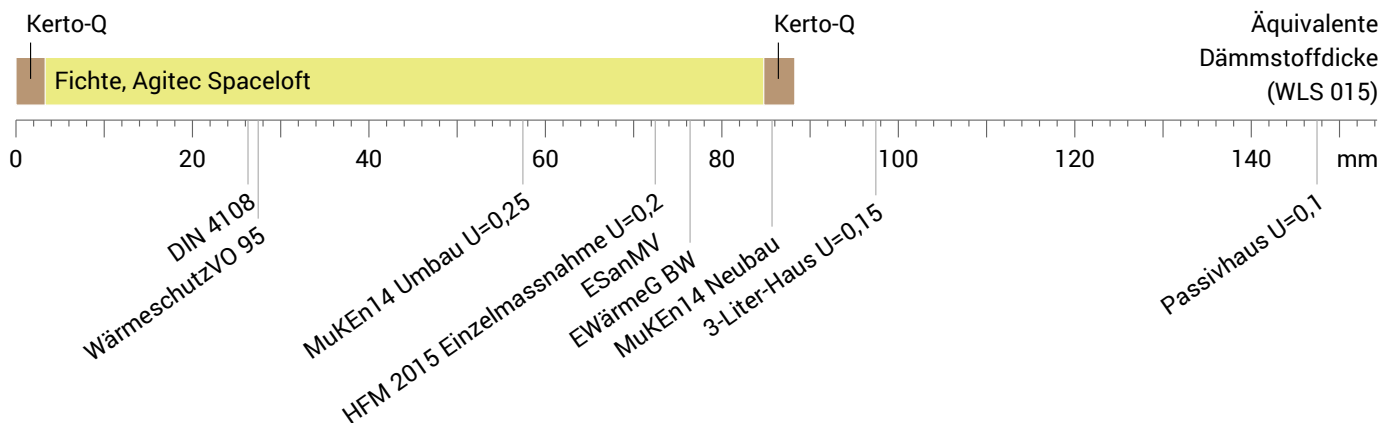
Hitzeschutz

Temperaturamplitudendämpfung: 15
Phasenverschiebung: 10,5 h
Wärmekapazität innen: 26 kJ/m²K



Dämmwirkung einzelner Schichten und Vergleich mit Richtwerten

Für die folgende Abbildung wurden die Wärmedurchgangswiderstände (d.h. die Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf einen Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeit 0,015 W/mK.



Raumluft: 20,0°C / 50%

Außenluft: -5,0°C / 80%

Oberflächentemp.: 18,4°C / -4,8°C

sd-Wert: 5,3 m

Trocknungsreserve: 269 g/m²a

Dicke: 16,0 cm

Gewicht: 52 kg/m²

Wärmekapazität: 53 kJ/m²K

☒ MuKEn14 Neubau

☒ MuKEn14 Umbauten

☒ HFM 2015

☒ ESanMV

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,130
1	Kerto-Q	3,00	0,140	0,214
2	Agitec Spaceloft	10,00	0,015	6,667
	Fichte (3,4%)	10,00	0,130	0,769
3	Kerto-Q	3,00	0,140	0,214
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040
	Gesamtes Bauteil	16		

Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung horizontal

Rse: Wärmestromrichtung horizontal, außen: Direkter Übergang zur Außenluft

Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{\text{tot;upper}} = 6,328 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{\text{tot;lower}} = 5,876 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

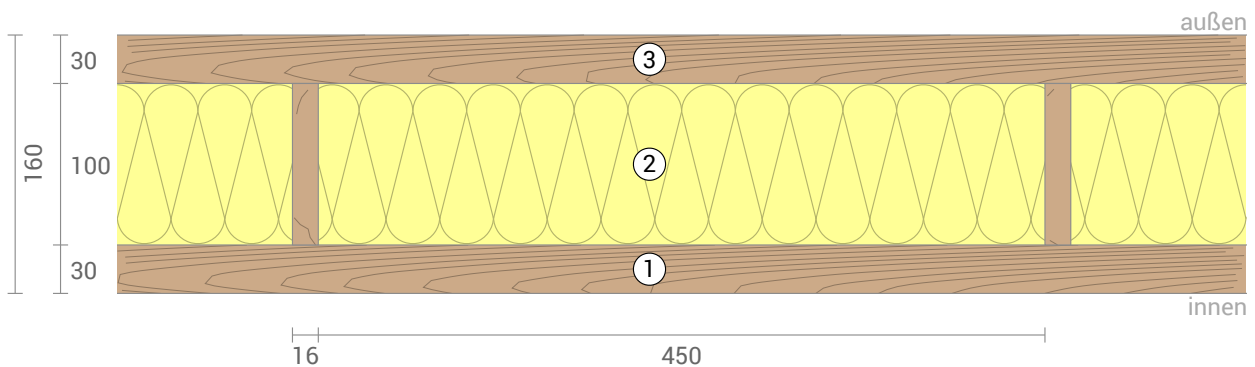
Prüfe Anwendbarkeit: $R_{\text{tot;upper}} / R_{\text{tot;lower}} = 1,077$ (maximal erlaubt: 1,5)

Das Verfahren darf angewendet werden.

Wärmedurchgangswiderstand $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot;upper}} + R_{\text{tot;lower}})/2 = 6,102 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

Abschätzung des maximalen relativen Fehlers nach Absatz 6.7.2.5: 3,7%

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_{\text{tot}} = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Jahreswärmeverlust und Klimaschutz

Wärmeverlust: 14 kWh/m² pro Heizperiode



Wärmemenge, die durch einen Quadratmeter dieses Bauteils während der Heizperiode entweicht. Bitte beachten: Wegen interner und solarer Gewinne ist der Heizwärmebedarf geringer als der Wärmeverlust.

Primärenergie (nicht erneuerbar): >1,3 kWh/m²



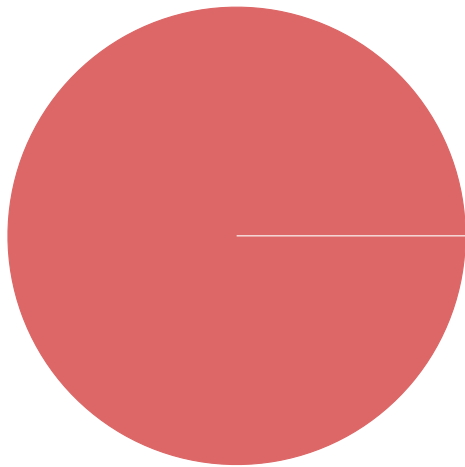
Nicht erneuerbare Primärenergie (=Energie aus fossilen Brennstoffen und Kernenergie) die zur Produktion der verwendeten Baustoffe aufgewendet wurde ("cradle to gate").

Treibhauspotential: -2,2 (?) kg CO2 Äqv./m²



Sehr gut: Für die Produktion der verwendeten Baustoffe wurden der Atmosphäre insgesamt mehr Treibhausgase entzogen als zugeführt.

Zusammensetzung des nicht erneuerbaren Primärenergieaufwands der Herstellung:



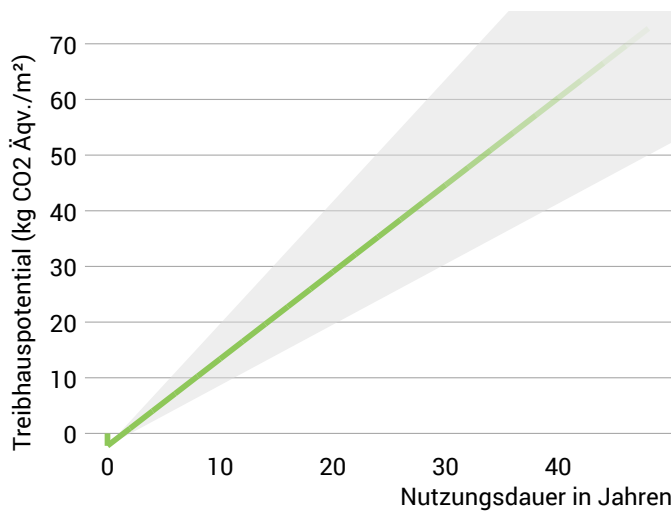
Fichte (100x16) 100%

Zusammensetzung des Treibhauspotentials der Herstellung:



Achtung: Mindestens eine Schicht konnte nicht berücksichtigt werden, weil deren Primärenergieinhalt und/oder Treibhauspotential unbekannt ist.

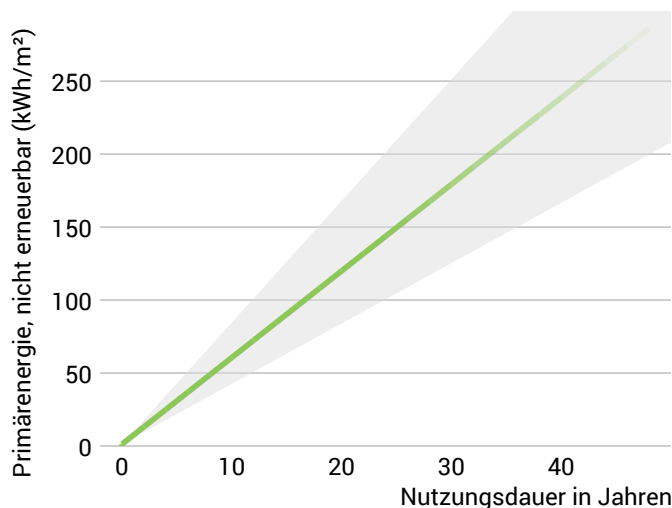
Treibhauspotential und Primärenergie für Bau und Nutzung



Die **Abbildung links** zeigt im senkrechten Teil der Kurve das Treibhauspotential der Herstellung des Bauteils. Die während der Nutzung des Gebäudes entstehenden Treibhausgasemissionen (durch die Beheizung) sind durch die schräg nach oben verlaufende Kurve dargestellt.

Die **Abbildung links unten** zeigt im senkrechten Teil der Kurve den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand für die Herstellung des Bauteils. Die während der Nutzung des Gebäudes benötigte Primärenergie (durch die Beheizung) ist durch die schräg nach oben verlaufende Kurve dargestellt.

Je länger das Bauteil unverändert genutzt wird, umso umweltfreundlicher ist es, weil der Herstellungsaufwand weniger zu den Gesamtemissionen beiträgt (angedeutet durch die Farbe der Kurve).



Wegen unbekannter solarer und interner Gewinne kann der Heizwärmebedarf nur geschätzt werden. Dementsprechend sind Primärenergieaufwand und Treibhauspotential während der Nutzungsphase nur ungenau bekannt. Für die Abschätzung wurde angenommen, dass solare und interne Gewinne mit 4 kWh/a/m^2 Bauteilfläche beitragen. Die hellgrauen Fläche kennzeichnen den Bereich, in dem die Kurve mit großer Sicherheit liegt. Für die Wärmeerzeugung wurde ein Primärenergieaufwand von $0,60 \text{ kWh}$ pro kWh Wärme und ein Treibhauspotential von $0,16 \text{ kg CO}_2 \text{ Äqv./m}^2$ pro kWh Wärme angesetzt. Wärmequelle: Wärmepumpe (Luft).

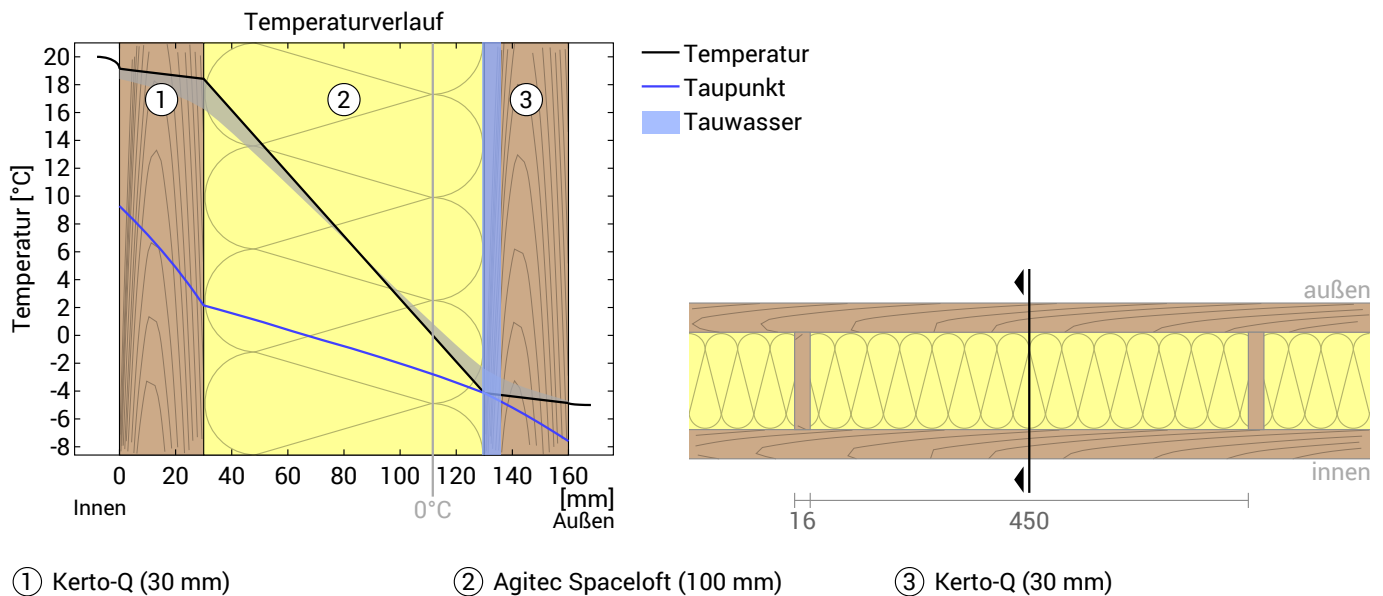
Hinweise

Achtung: Mindestens eine Schicht konnte nicht berücksichtigt werden, weil deren Primärenergieinhalt und/oder Treibhauspotential unbekannt ist.

Berechnet für den Standort Bern, Heizperiode von Mitte Oktober bis Ende April. Die Berechnung basiert auf monatlichen Temperatur-Mittelwerten. Quelle: www.klimadiagramme.de

Die dieser Berechnung zugrunde liegenden Klima- und Energiedaten können zum Teil starke Schwankungen aufweisen und im Einzelfall erheblich vom tatsächlichen Wert abweichen.

Temperaturverlauf



Links: Verlauf von Temperatur und Taupunkt an der in der rechten Abbildung markierten Stelle. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Bauteils an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus.

Rechts: Maßstäbliche Zeichnung des Bauteils.

Schichten (von innen nach außen)

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m ²]
				min	max	
	Wärmeübergangswiderstand*		0,250	18,4	20,0	
1	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	16,3	19,1	18,0
2	10 cm Agitec Spaceloft	0,015	6,667	-4,1	18,4	14,5
	10 cm Fichte (3,4%)	0,130	0,769	-2,4	16,5	1,5
3	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	-4,9	-2,4	18,0
	Wärmeübergangswiderstand*		0,040	-5,0	-4,7	
	16 cm Gesamtes Bauteil		6,040			52,0

*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 4108-3 für Feuchteschutz und Temperaturverlauf. Die Werte für die U-Wert-Berechnung finden Sie auf der Seite 'U-Wert-Berechnung'.

Oberflächentemperatur innen (min / mittel / max): 18,4°C 19,0°C 19,1°C
Oberflächentemperatur außen (min / mittel / max): -4,9°C -4,8°C -4,7°C

Feuchteschutz

Für die Berechnung der Tauwassermenge wurde das Bauteil 90 Tage lang dem folgenden konstanten Klima ausgesetzt: innen: 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit; außen: -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit. Dieses Klima entspricht DIN 4108-3.

Unter diesen Bedingungen fallen insgesamt 0,31 kg Tauwasser pro Quadratmeter an. Diese Menge trocknet im Sommer innerhalb von 48 Tagen ab (Verdunstungsperiode gemäß DIN 4108-3:2018-10).

Trocknungsreserve gemäß DIN 4108-3:2014: 269 g/(m²a)
 Von der DIN 68800-2 mindestens gefordert: 100 g/(m²a)

#	Material	sd-Wert [m]	Tauwasser		Gewicht [kg/m ²]
			[kg/m ²]	[Gew.-%]	
1	3 cm Kerto-Q	1,80	-	-	18,0
2	10 cm Agitec Spaceloft	1,10	0,31	-	14,5
	10 cm Fichte (3,4%)	2,00	-	-	1,5
3	3 cm Kerto-Q	2,40	0,31	1,7	18,0
	16 cm Gesamtes Bauteil	5,33	0,31		52,0

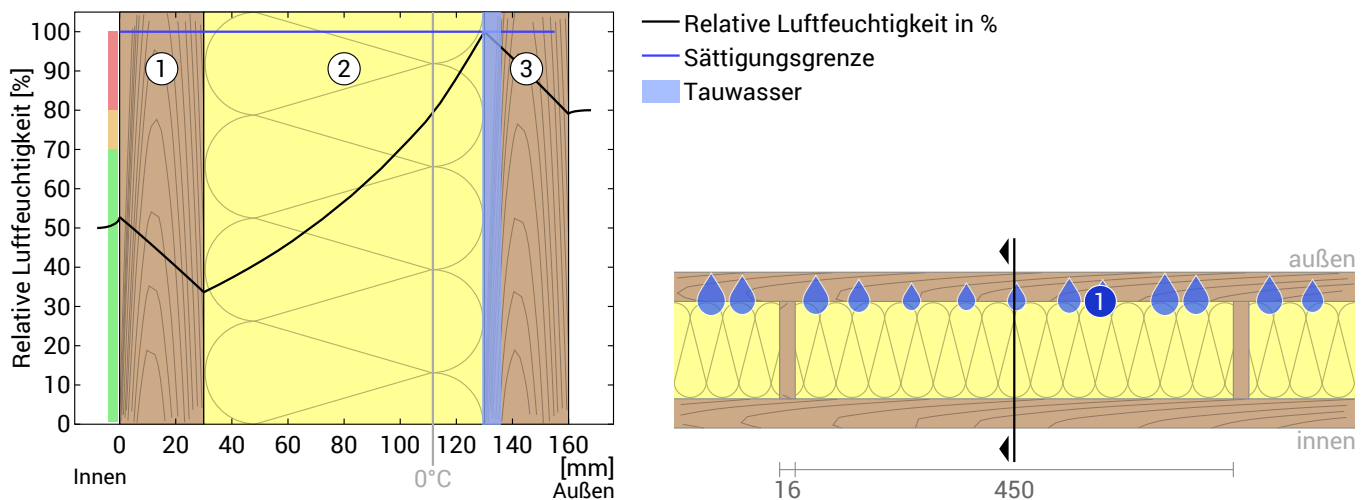
Tauwasserebenen

- ① Tauwasser: 0,31 kg/m² Betroffene Schichten: Kerto-Q, Agitec Spaceloft

Luftfeuchtigkeit

Die Oberflächentemperatur der Wandinnenseite beträgt 18,4 °C was zu einer relativen Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche von 55% führt. Unter diesen Bedingungen sollte nicht mit Schimmelbildung zu rechnen sein.

Das folgende Diagramm zeigt die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Bauteils.



- ① Kerto-Q (30 mm) ② Agitec Spaceloft (100 mm) ③ Kerto-Q (30 mm)

Hinweise: Berechnung mittels Ubakus 2D-FE Verfahren. Konvektion und die Kapillarität der Baustoffe wurden nicht berücksichtigt. Die Trocknungsdauer kann unter ungünstigen Bedingungen (Beschattung, feuchte/kühle Sommer) länger dauern als hier berechnet.

Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2014 Anhang A

Dieser Feuchteschutznachweis ist nur bei **nicht klimatisierten** Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden gültig.

Bitte beachten Sie die Hinweise am Ende dieser Feuchteschutzberechnungen.

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	sd [m]	ρ [kg/m ³]	T [°C]	ps [Pa]	Σsd [m]
Wärmeübergangswiderstand			0,250					
1	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	1,8	600	19,15	2218	0
2	10 cm Agitec Spaceloft	0,015	6,667	1,1	150	18,43	2120	1,8
3	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	2,4	600	-4,14	432	2,9
Wärmeübergangswiderstand			0,040			-4,86	406	5,3

Temperatur (T), Dampfsättigungsdruck (ps) und die Summe der sd-Werte (Σsd) gelten jeweils an den Schichtgrenzen.

Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

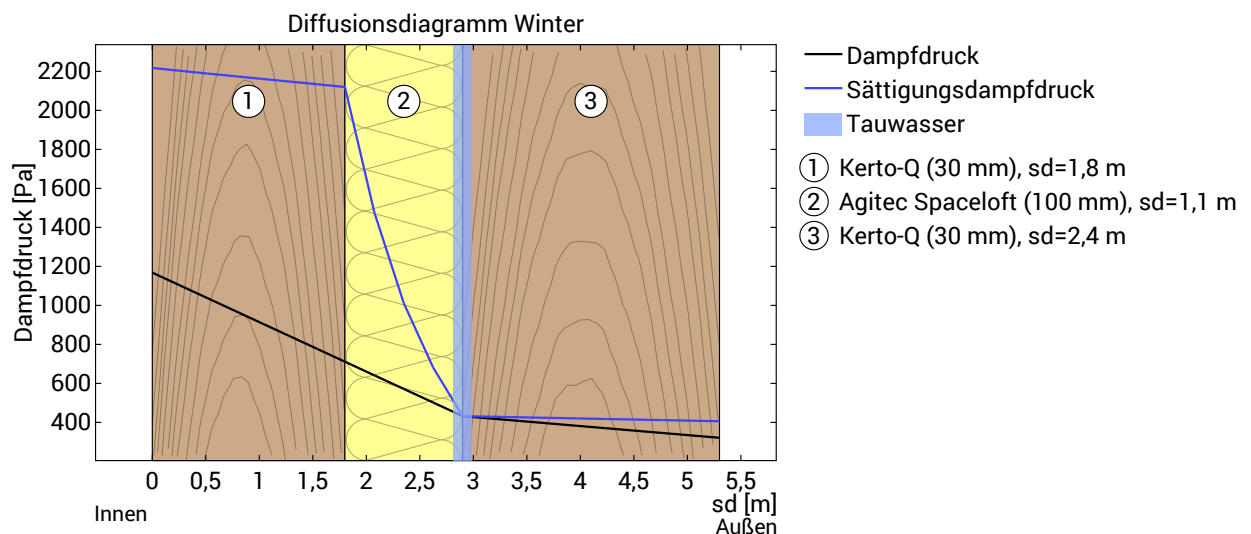
Die relative Luftfeuchtigkeit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche beträgt 53%. Anforderungen zur Vermeidung von Baustoffkorrosion hängen von Material und Beschichtung ab und wurden nicht untersucht.



Tauperiode (Winter)

Randbedingungen

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit	$p_i = 1168 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit	$p_e = 321 \text{ Pa}$
Dauer Tauperiode (90 Tage)	$t_c = 7776000 \text{ s}$
Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in ruhender Luft	$\delta_0 = 2.0\text{E-}10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$
sd-Wert (gesamtes Bauteil)	$s_{de} = 5,30 \text{ m}$



Tauwasserebene c_1 : Schichtgrenze zwischen Agitec Spaceloft und Kerto-Q
bei $sd_{c1}=2,90 \text{ m}$; $p_{c1}=432 \text{ Pa}$; $x_1=13 \text{ cm}$

Tauwassermenge: $M_c = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_i - p_{c1})/sd_{c1} - (p_{c1} - p_e)/(s_{de} - sd_{c1})) = 0,323 \text{ kg/m}^2$

Für Schicht Agitec Spaceloft wurde noch kein Wasseraufnahmekoeffizient hinterlegt. Es wird deshalb angenommen, dass mindestens eine Schicht nicht kapillar Wasseraufnahmefähig ist.

Für Schicht Kerto-Q wurde noch kein Wasseraufnahmekoeffizient hinterlegt. Es wird deshalb angenommen, dass mindestens eine Schicht nicht kapillar Wasseraufnahmefähig ist.

Die maximal erlaubte Tauwassermenge beträgt mindestens $0,5 \text{ kg/m}^2$.

Tauwasser insgesamt: $M_c = 0,323 \text{ kg/m}^2$



Erhöhung des Feuchtegehalts bei Holz und Holzwerkstoffen

Unter der Annahme, dass sich das Tauwasser vollständig auf die Schicht 'Kerto-Q' mit der Rohdichte $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ verteilt, ergibt sich folgende Zunahme des massebezogenen Feuchtegehalts Δu in M.-%:

$$\Delta u = M_c / (\rho \cdot d) \cdot 100\% = 0,323 / (600 \cdot 0,03) \cdot 100\% = 1,8\%$$

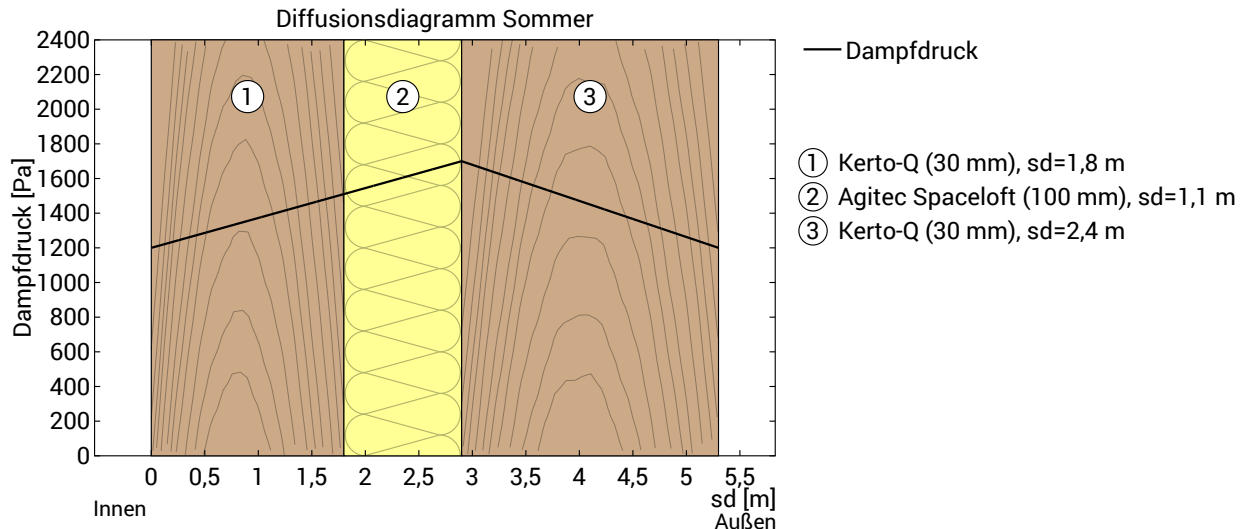
Maximal erlaubte Zunahme bei Holz: 5%



Verdunstungsperiode (Sommer)

Randbedingungen

Dampfdruck innen	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Sättigungsdampfdruck in der Tauwasserebene	$p_s = 1700 \text{ Pa}$
Dauer Verdunstungsperiode (90 Tage)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-Werte bleiben unverändert.	



Maximal mögliche Verdunstungsmenge:

$$M_{ev} = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_s - p_i)/s_{d_{c1}} + (p_s - p_e)/(s_{d_e} - s_{d_{c1}})) = \mathbf{0,592 \text{ kg/m}^2}$$

Die Tauwassermenge von $0,323 \text{ kg/m}^2$ kann vollständig trocknen.



Bewertung gemäß DIN 4108-3

Das Bauteil ist diffusionstechnisch zulässig.

Trocknungsreserve (DIN 68800-2)

$$M_r = (M_{ev} - M_c) \cdot 1000 = \mathbf{269 \text{ g/m}^2/\text{a}}$$

Mindestens gefordert bei Wänden und Decken: $100 \text{ g/m}^2/\text{a}$



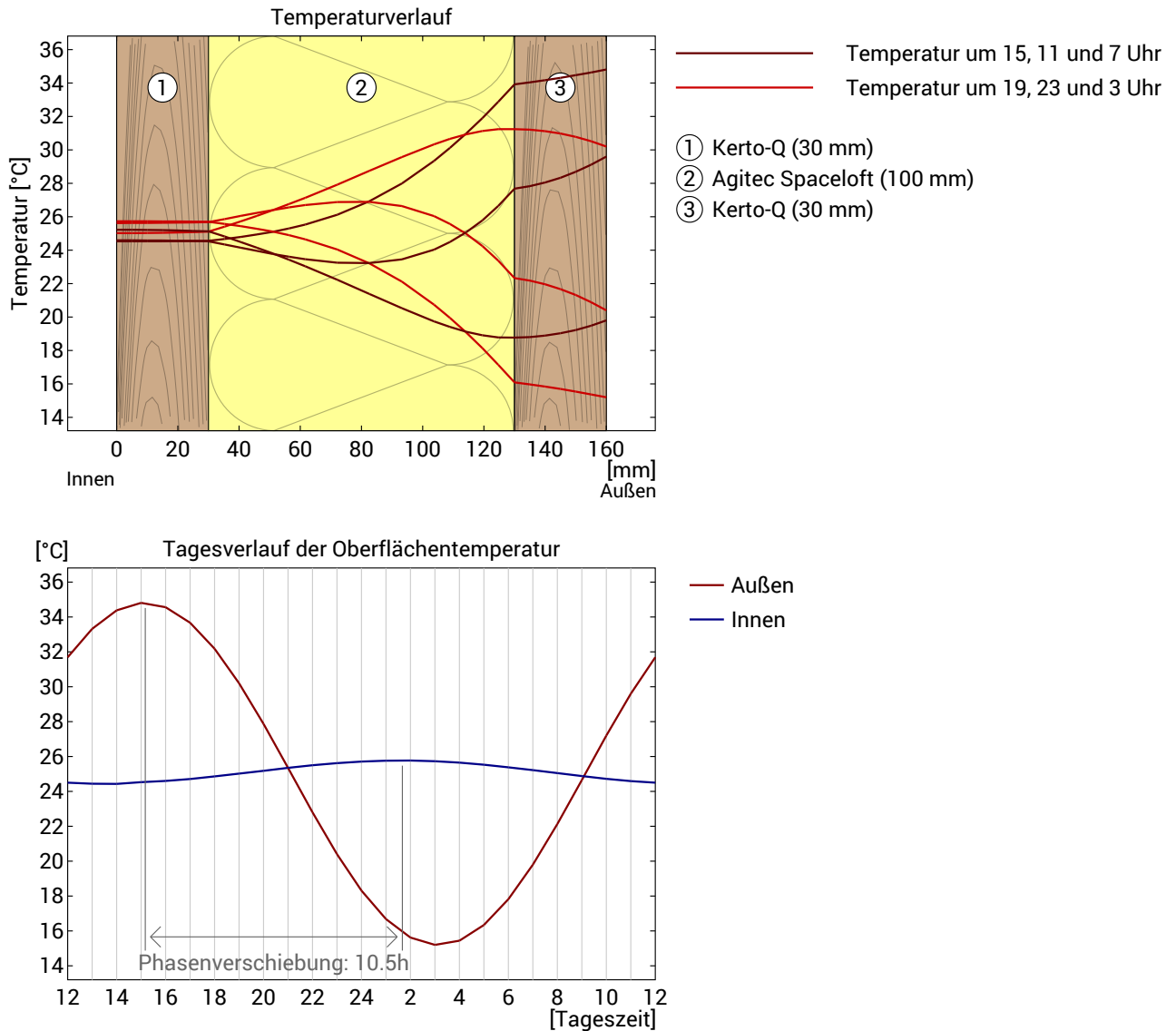
Hinweise

Bei inhomogenen Konstruktionen, wie Skelett-, Ständer- oder Rahmenbauweisen sowie bei Holzbalken-, Sparren- oder Fachwerk-Konstruktionen o.ä. sind die eindimensionalen Diffusionsberechnungen nur für den Gefachbereich nachzuweisen. Ausnahmefälle sind Sonderkonstruktionen, bei denen z.B. die diffusionshemmende Schicht auch abschnittsweise über den Außenbereich verlegt wird. In diesen Ausnahmefällen ist die hier durchgeführte Berechnung ungültig.

DIN 4108-3 beschreibt in Abschnitt 5.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist, da kein Tauwasserrisiko besteht oder das Verfahren für die Beurteilung nicht geeignet ist. Ob das hier untersuchte Bauteil darunter ist, kann mit den vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

Hitzeschutz

Die folgenden Ergebnisse sind Eigenschaften des untersuchten Bauteils allein und machen keine Aussage über den Hitzeschutz des gesamten Raums:



Obere Abbildung: Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils zu verschiedenen Zeitpunkten. Jeweils von oben nach unten, braune Linien: um 15, 11 und 7 Uhr und rote Linien um 19, 23 und 3 Uhr morgens.

Untere Abbildung: Temperatur auf der äußeren (rot) und inneren (blau) Oberfläche im Verlauf eines Tages. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Lage der Temperaturhöchstwerte. Das Maximum der inneren Oberflächentemperatur sollte möglichst während der zweiten Nachthälfte auftreten.

Phasenverschiebung*	10,5 h	Wärmespeicherfähigkeit (gesamtes Bauteil):	53 kJ/m ² K
Amplitudendämpfung**	14,6	Wärmespeicherfähigkeit der inneren Schichten:	26 kJ/m ² K
TAV***	0,068		

* Die Phasenverschiebung gibt die Zeitdauer in Stunden an, nach der das nachmittägliche Hitzemaximum die Bauteilinnenseite erreicht.

** Die Amplitudendämpfung beschreibt die Abschwächung der Temperaturwelle beim Durchgang durch das Bauteil. Ein Wert von 10 bedeutet, dass die Temperatur auf der Außenseite 10x stärker variiert, als auf der Innenseite, z.B. außen 15-35°C, innen 24-26°C.

*** Das Temperaturamplitudenverhältnis TAV ist der Kehrwert der Dämpfung: $TAV = 1/\text{Amplitudendämpfung}$

Hinweis: Der Hitzeschutz eines Raumes wird von mehreren Faktoren beeinflusst, im Wesentlichen aber von der direkten Sonneneinstrahlung durch Fenster und der Gesamtmenge an Speichermasse (darunter auch Fußboden, Innenwände und Einbauten/Möbel). Ein einzelnes Bauteil hat auf den Hitzeschutz des Raumes in der Regel nur einen sehr geringen Einfluss.

Die oben dargestellten Berechnungen wurden für einen 1-dimensionalen Querschnitt des Bauteils erstellt.

P&D Holzbau ISOPET NEU

Außenwand
erstellt am 16.1.2020

Wärmeschutz

$U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

MuKEn14 Neubau*: $U < 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Feuchteschutz

Trocknungsreserve: $401 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$

Trocknet 6 Tage

Feuchtegehalt Holz: $+0,2\%$

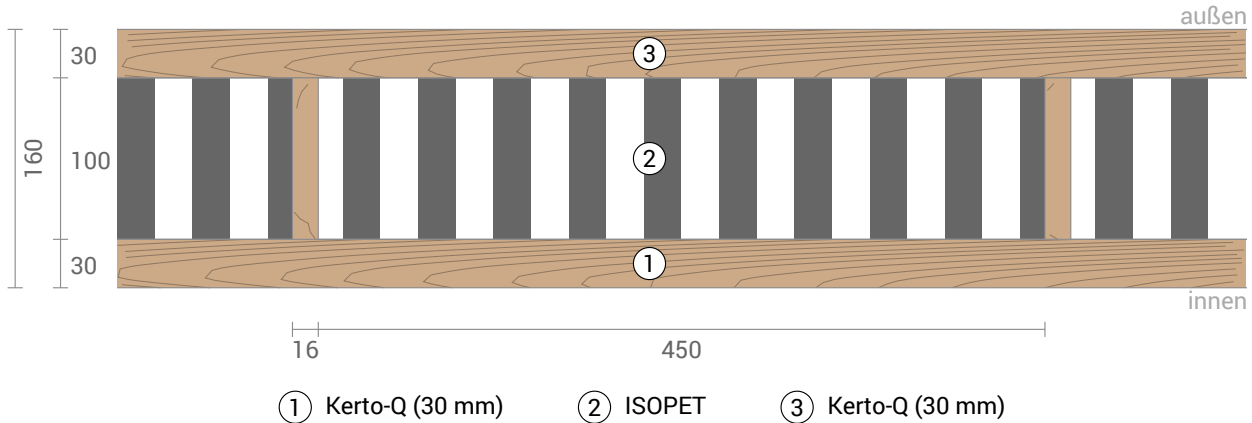


Hitzeschutz

Temperaturamplitudendämpfung: >100

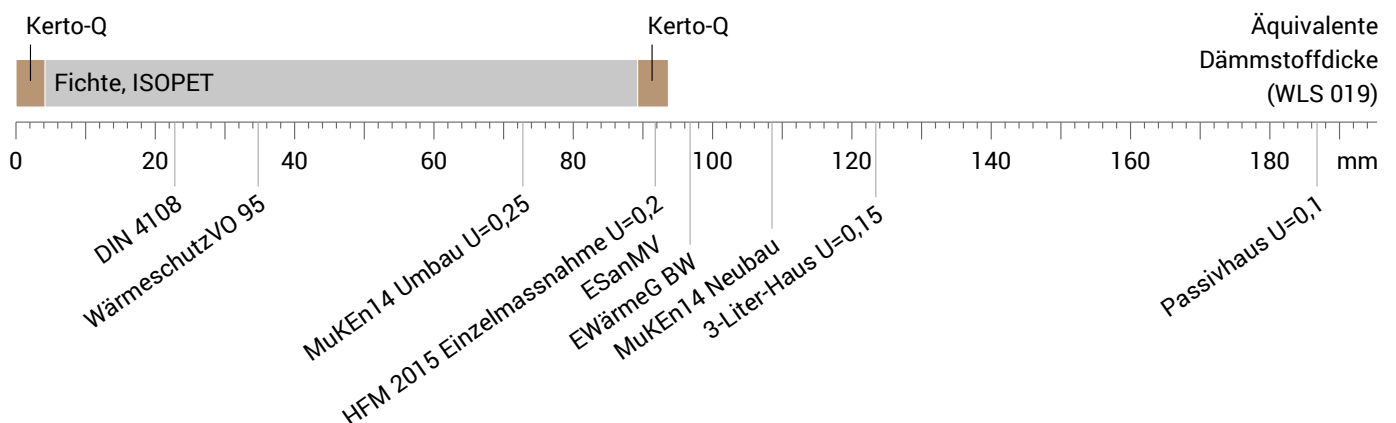
Phasenverschiebung: nicht relevant

Wärmekapazität innen: $101 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$



Dämmwirkung einzelner Schichten und Vergleich mit Richtwerten

Für die folgende Abbildung wurden die Wärmedurchgangswiderstände (d.h. die Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf einen Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeit $0,019 \text{ W}/\text{mK}$.



Raumluft: $20,0^\circ\text{C} / 50\%$

Außenluft: $-5,0^\circ\text{C} / 80\%$

Oberflächentemp.: $18,3^\circ\text{C} / -4,8^\circ\text{C}$

sd-Wert: 138,3 m

Trocknungsreserve: $401 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$

Dicke: 16,0 cm

Gewicht: $127 \text{ kg}/\text{m}^2$

Wärmekapazität: $200 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$

☐ MuKEn14 Neubau

☒ MuKEn14 Umbauten

☒ HFM 2015

☒ ESanMV

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,130
1	Kerto-Q	3,00	0,140	0,214
2	ISOPET	10,00	0,019	5,263
	Fichte (3,4%)	10,00	0,130	0,769
3	Kerto-Q	3,00	0,140	0,214
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040
	Gesamtes Bauteil	16		

Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung horizontal

Rse: Wärmestromrichtung horizontal, außen: Direkter Übergang zur Außenluft

Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{\text{tot;upper}} = 5,268 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{\text{tot;lower}} = 4,982 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

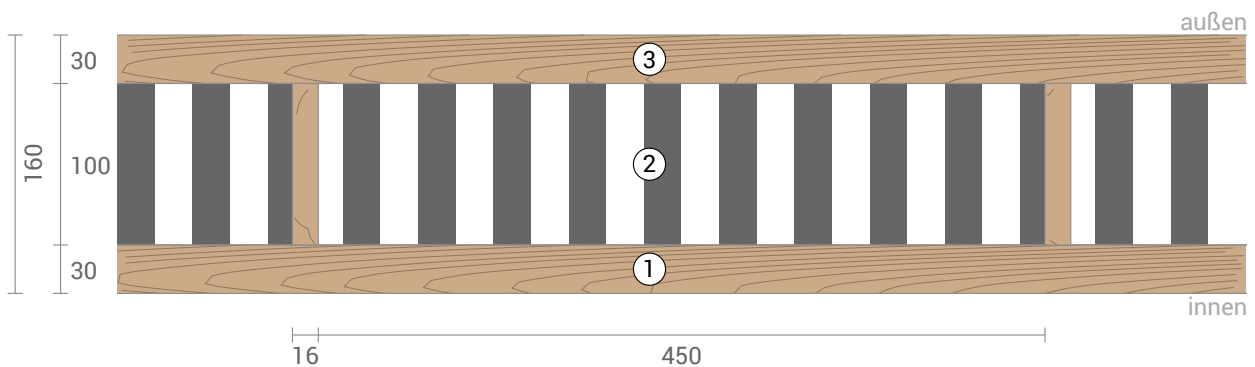
Prüfe Anwendbarkeit: $R_{\text{tot;upper}} / R_{\text{tot;lower}} = 1,057$ (maximal erlaubt: 1,5)

Das Verfahren darf angewendet werden.

Wärmedurchgangswiderstand $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot;upper}} + R_{\text{tot;lower}})/2 = 5,125 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

Abschätzung des maximalen relativen Fehlers nach Absatz 6.7.2.5: 2,8%

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_{\text{tot}} = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Jahreswärmeverlust und Klimaschutz

Wärmeverlust: $16 \text{ kWh}/\text{m}^2$ pro Heizperiode



Wärmemenge, die durch einen Quadratmeter dieses Bauteils während der Heizperiode entweicht. Bitte beachten: Wegen interner und solarer Gewinne ist der Heizwärmebedarf geringer als der Wärmeverlust.

Primärenergie (nicht erneuerbar): $>1708 \text{ kWh}/\text{m}^2$



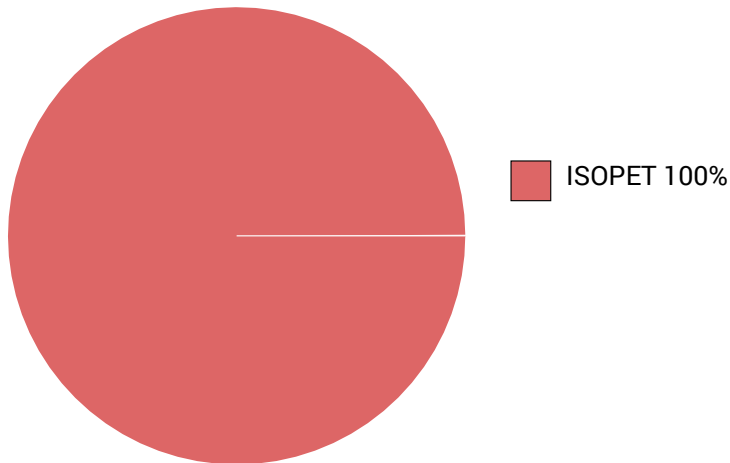
Nicht erneuerbare Primärenergie (=Energie aus fossilen Brennstoffen und Kernenergie) die zur Produktion der verwendeten Baustoffe aufgewendet wurde ("cradle to gate").

Treibhauspotential: $186 (?) \text{ kg CO}_2 \text{ Äqv.}/\text{m}^2$



Menge an freigesetzten Treibhausgasen bei der Produktion der verwendeten Baustoffe ("cradle to gate").

Zusammensetzung des nicht erneuerbaren Primärenergieaufwands der Herstellung:

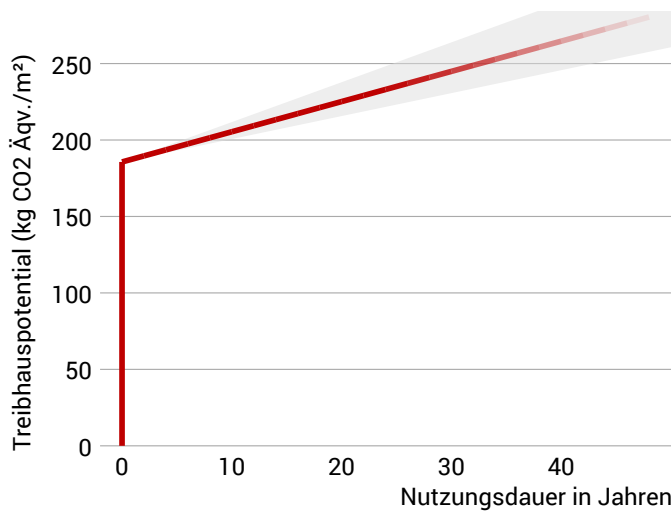


Zusammensetzung des Treibhauspotentials der Herstellung:

#2 ISOPET 188kg

Achtung: Mindestens eine Schicht konnte nicht berücksichtigt werden, weil deren Primärenergieinhalt und/oder Treibhauspotential unbekannt ist.

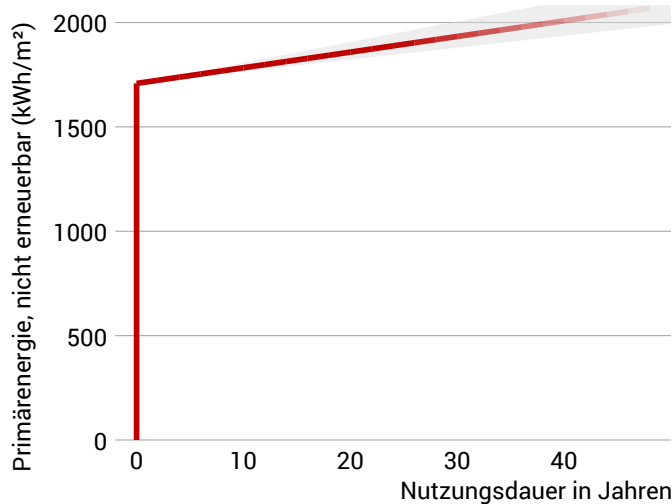
Treibhauspotential und Primärenergie für Bau und Nutzung



Die **Abbildung links** zeigt im senkrechten Teil der Kurve das Treibhauspotential der Herstellung des Bauteils. Die während der Nutzung des Gebäudes entstehenden Treibhausgasemissionen (durch die Beheizung) sind durch die schräg nach oben verlaufende Kurve dargestellt.

Die **Abbildung links unten** zeigt im senkrechten Teil der Kurve den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand für die Herstellung des Bauteils. Die während der Nutzung des Gebäudes benötigte Primärenergie (durch die Beheizung) ist durch die schräg nach oben verlaufende Kurve dargestellt.

Je länger das Bauteil unverändert genutzt wird, umso umweltfreundlicher ist es, weil der Herstellungsaufwand weniger zu den Gesamtemissionen beiträgt (angedeutet durch die Farbe der Kurve).



Wegen unbekannter solarer und interner Gewinne kann der Heizwärmebedarf nur geschätzt werden. Dementsprechend sind Primärenergieaufwand und Treibhauspotential während der Nutzungsphase nur ungenau bekannt. Für die Abschätzung wurde angenommen, dass solare und interne Gewinne mit 4 kWh/a/m^2 Bauteilfläche beitragen. Die hellgrauen Fläche kennzeichnen den Bereich, in dem die Kurve mit großer Sicherheit liegt. Für die Wärmeerzeugung wurde ein Primärenergieaufwand von $0,60 \text{ kWh pro kWh Wärme}$ und ein Treibhauspotential von $0,16 \text{ kg CO}_2 \text{ Äqv./m}^2 \text{ pro kWh Wärme}$ angesetzt. Wärmequelle: Wärmepumpe (Luft).

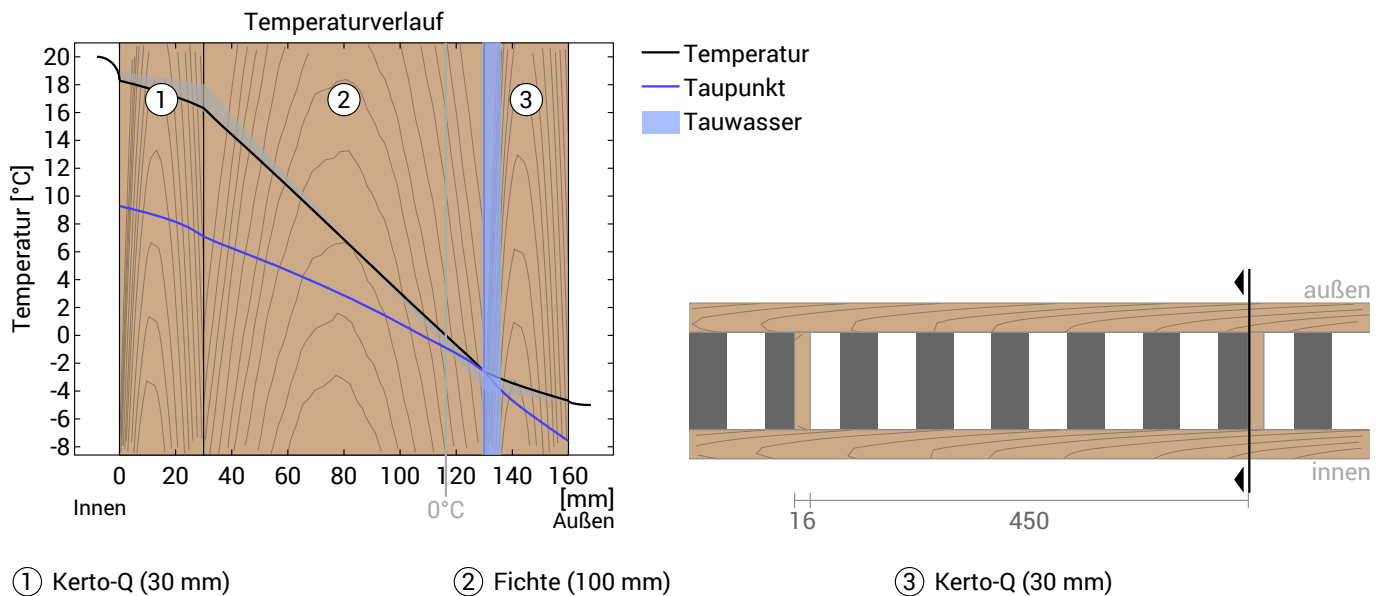
Hinweise

Achtung: Mindestens eine Schicht konnte nicht berücksichtigt werden, weil deren Primärenergieinhalt und/oder Treibhauspotential unbekannt ist.

Berechnet für den Standort Bern, Heizperiode von Mitte Oktober bis Ende April. Die Berechnung basiert auf monatlichen Temperatur-Mittelwerten. Quelle: www.klimadiagramme.de

Die dieser Berechnung zugrunde liegenden Klima- und Energiedaten können zum Teil starke Schwankungen aufweisen und im Einzelfall erheblich vom tatsächlichen Wert abweichen.

Temperaturverlauf



Links: Verlauf von Temperatur und Taupunkt an der in der rechten Abbildung markierten Stelle. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Bauteils an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus.

Rechts: Maßstäbliche Zeichnung des Bauteils.

Schichten (von innen nach außen)

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m ²]
				min	max	
	Wärmeübergangswiderstand*		0,250	18,3	20,0	
1	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	16,0	18,9	18,0
2	10 cm ISOPET	0,019	5,263	-3,9	18,0	89,8
	10 cm Fichte (3,4%)	0,130	0,769	-2,3	16,3	1,5
3	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	-4,8	-2,3	18,0
	Wärmeübergangswiderstand*		0,040	-5,0	-4,7	
	16 cm Gesamtes Bauteil		5,085			127,4

*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 4108-3 für Feuchteschutz und Temperaturverlauf. Die Werte für die U-Wert-Berechnung finden Sie auf der Seite 'U-Wert-Berechnung'.

Oberflächentemperatur innen (min / mittel / max): 18,3°C 18,8°C 18,9°C
 Oberflächentemperatur außen (min / mittel / max): -4,8°C -4,8°C -4,7°C

Feuchteschutz

Für die Berechnung der Tauwassermenge wurde das Bauteil 90 Tage lang dem folgenden konstanten Klima ausgesetzt:
innen: 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit; außen: -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit. Dieses Klima entspricht DIN 4108-3.

Unter diesen Bedingungen fallen insgesamt 0,0029 kg Tauwasser pro Quadratmeter an. Diese Menge trocknet im Sommer innerhalb von 6 Tagen ab (Verdunstungsperiode gemäß DIN 4108-3:2018-10).

Trocknungsreserve gemäß DIN 4108-3:2014: 401 g/(m²a)
Von der DIN 68800-2 mindestens gefordert: 100 g/(m²a)

#	Material	sd-Wert [m]	Tauwasser [kg/m ²] [Gew.-%]		Gewicht [kg/m ²]
1	3 cm Kerto-Q	1,80	-	-	18,0
2	10 cm ISOPET	10000	-	-	89,8
	10 cm Fichte (3,4%)	2,00	0,0024	0,2	1,5
3	3 cm Kerto-Q	2,40	0,0029	0,0	18,0
	16 cm Gesamtes Bauteil	138,32	0,0029		127,4

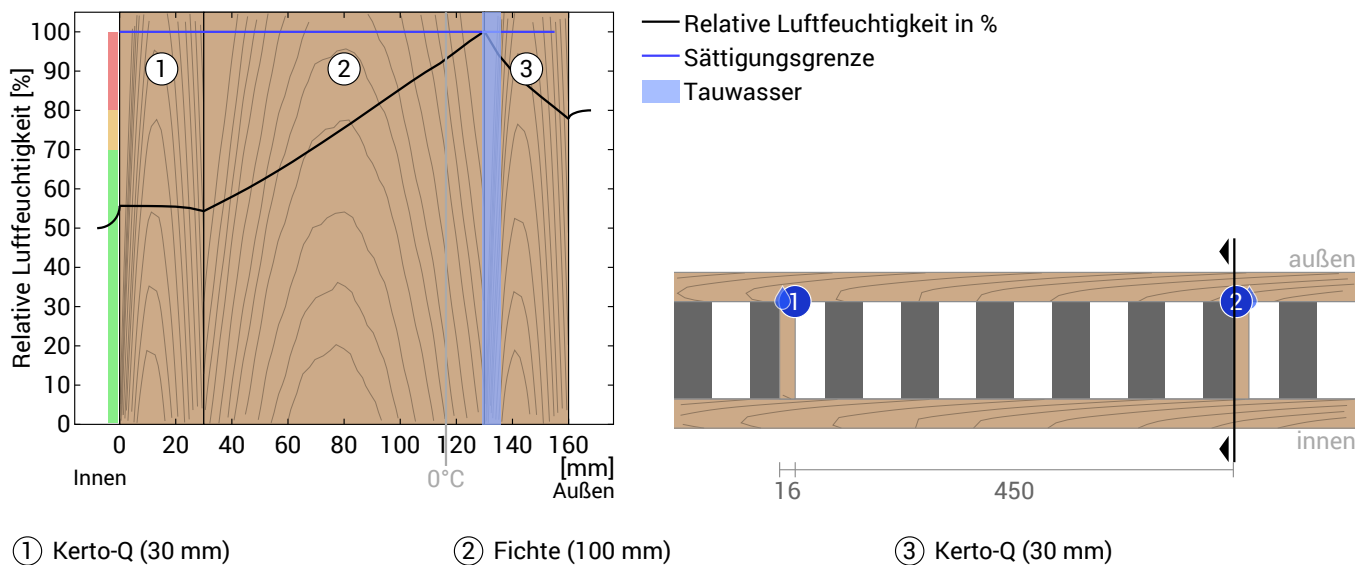
Tauwasserebenen

- ① Tauwasser: 0,001 kg/m² Betroffene Schichten: Kerto-Q, Fichte, ISOPET
- ② Tauwasser: 0,002 kg/m² Betroffene Schichten: Kerto-Q, Fichte

Luftfeuchtigkeit

Die Oberflächentemperatur der Wandinnenseite beträgt 18,3 °C was zu einer relativen Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche von 56% führt. Unter diesen Bedingungen sollte nicht mit Schimmelbildung zu rechnen sein.

Das folgende Diagramm zeigt die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Bauteils.



Hinweise: Berechnung mittels Ubakus 2D-FE Verfahren. Konvektion und die Kapillarität der Baustoffe wurden nicht berücksichtigt. Die Trocknungsdauer kann unter ungünstigen Bedingungen (Beschattung, feuchte/kühle Sommer) länger dauern als hier berechnet.

Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2014 Anhang A

Dieser Feuchteschutznachweis ist nur bei **nicht klimatisierten** Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden gültig.

Bitte beachten Sie die Hinweise am Ende dieser Feuchteschutzberechnungen.

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	sd [m]	ρ [kg/m ³]	T [°C]	ps [Pa]	Σsd [m]
Wärmeübergangswiderstand			0,250					
1	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	1,8	600	18,96	2190	0
2	10 cm ISOPET	0,019	5,263	10000	930	18,06	2071	1,8
3	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	2,4	600	-3,94	439	10002
Wärmeübergangswiderstand			0,040			-4,83	407	10004

Temperatur (T), Dampfsättigungsdruck (ps) und die Summe der sd-Werte (Σsd) gelten jeweils an den Schichtgrenzen.

Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

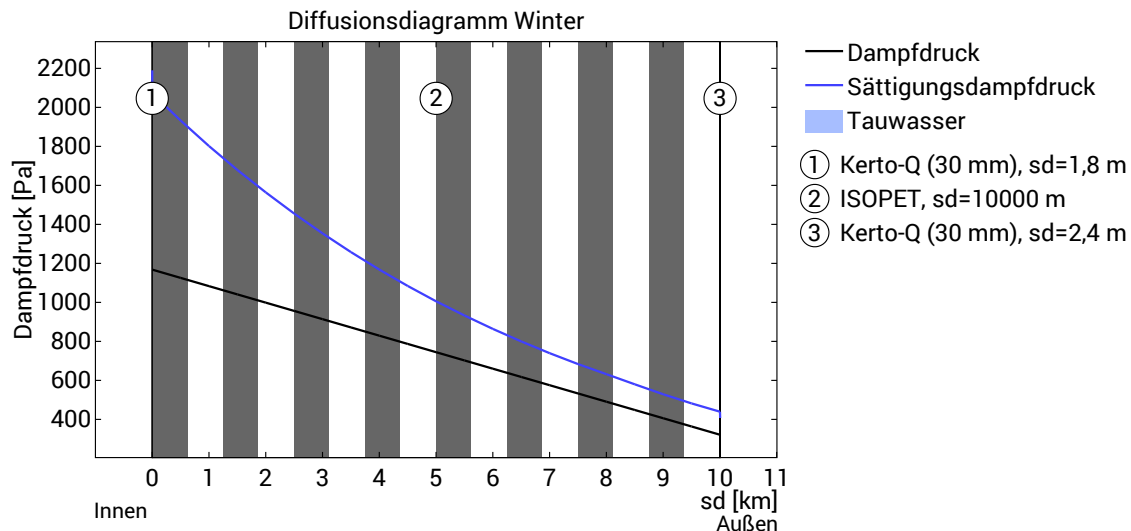
Die relative Luftfeuchtigkeit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche beträgt 53%. Anforderungen zur Vermeidung von Baustoffkorrosion hängen von Material und Beschichtung ab und wurden nicht untersucht.



Tauperiode (Winter)

Randbedingungen

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit	$p_i = 1168 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit	$p_e = 321 \text{ Pa}$
Dauer Tauperiode (90 Tage)	$t_c = 7776000 \text{ s}$
Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in ruhender Luft	$\delta_0 = 2.0E-10 \text{ kg/(m}^2\text{sPa)}$
sd-Wert (gesamtes Bauteil)	$s_{de} = 10.004,20 \text{ m}$



Unter den angenommenen Bedingungen ist der untersuchte Querschnitt frei von Tauwasserbildung im Bauteilinneren.



Berechne Verdunstungspotential für die Trocknungsreserve in der Tauperiode für die Ebene mit dem geringsten Verdunstungspotential:

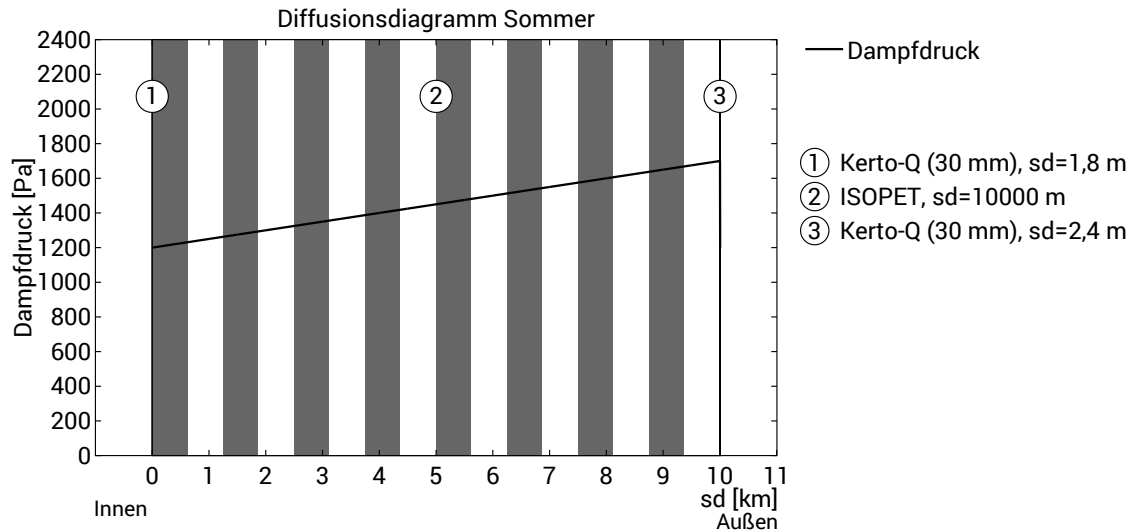
$s_d=10.001,80 \text{ m}$; $x=13 \text{ cm}$; $p_s=439 \text{ Pa}$:

Schichtgrenze zwischen ISOPET und Kerto-Q

$$M_{ev, \text{Tauperiode}} = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_s - p_i)/s_{d_{ev}} + (p_s - p_e)/(s_{de} - s_{d_{ev}})) = 0,077 \text{ kg/m}^2$$

Verdunstungsperiode (Sommer)

Randbedingungen	
Dampfdruck innen	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Sättigungsdampfdruck in der Tauwasserebene	$p_s = 1700 \text{ Pa}$
Dauer Verdunstungsperiode (90 Tage)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-Werte bleiben unverändert.	



Tauwasserfreies Bauteil: Es wird die maximal mögliche Verdunstungsmasse für die Trocknungsreserve berechnet. Betrachtet wird die Ebene mit der geringsten Verdunstungsmasse innerhalb des Holz enthaltenden Bereichs:

bei $s_d=10.001,80 \text{ m}$; $x=13 \text{ cm}$:

Schichtgrenze zwischen ISOPET und Kerto-Q

Verdunstungsmenge: $M_{ev} = \delta_0 \cdot t_{ev} \cdot [(p_s - p_i)/s_d + (p_s - p_e)/(s_{de} - s_d)] = 0,32 \text{ kg/m}^2$

Bewertung gemäß DIN 4108-3

Das Bauteil ist diffusionstechnisch zulässig.

Trocknungsreserve (DIN 68800-2)

Tauwasserfreies Bauteil: Das Verdunstungspotential der Tauperiode wird ebenfalls berücksichtigt.

Trocknungsreserve: $M_r = (M_{ev} + M_{ev, Tauperiode}) \cdot 1000 = 401 \text{ g/m}^2/\text{a}$

Mindestens gefordert bei Wänden und Decken: $100 \text{ g/m}^2/\text{a}$



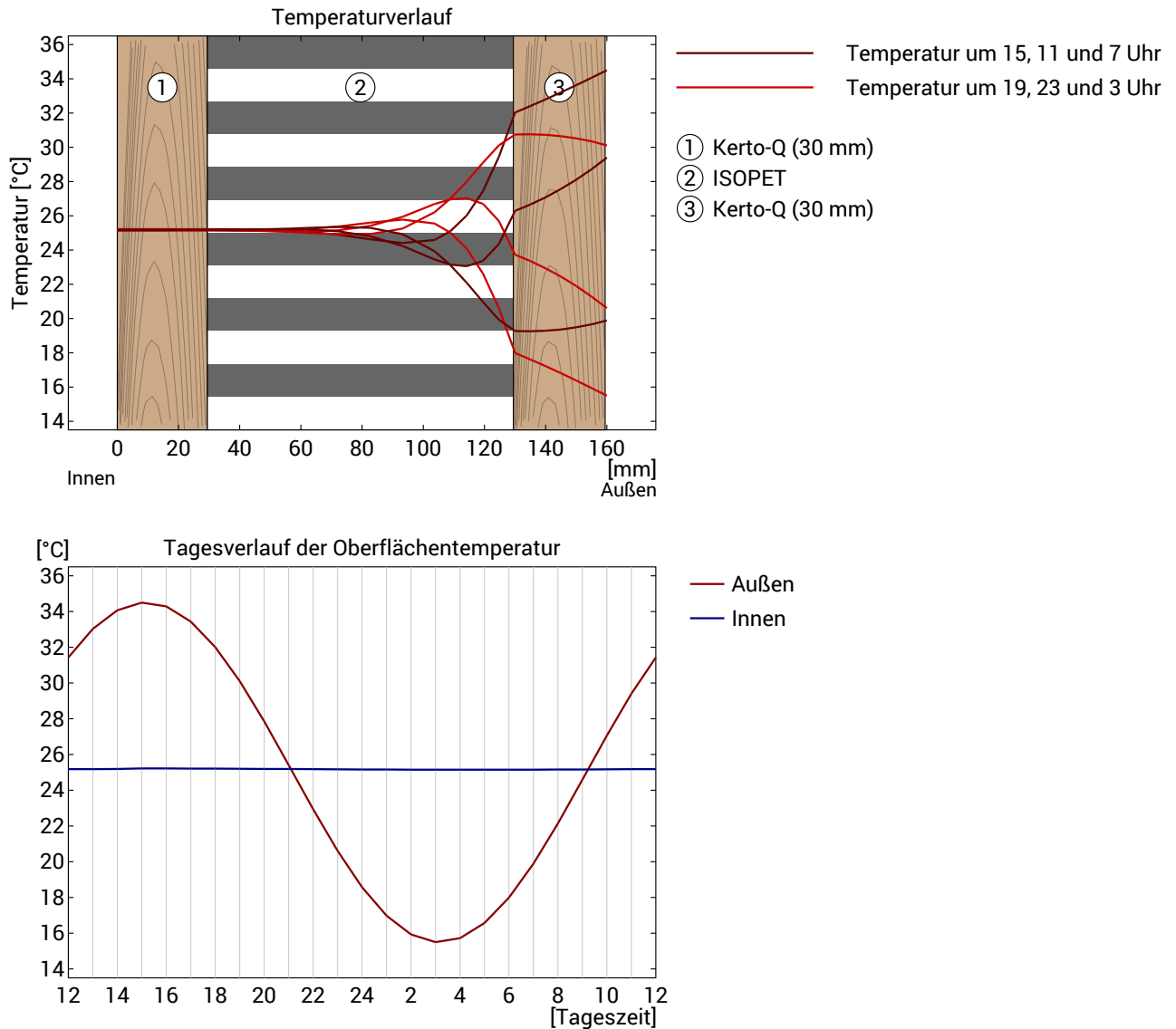
Hinweise

Bei inhomogenen Konstruktionen, wie Skelett-, Ständer- oder Rahmenbauweisen sowie bei Holzbalken-, Sparren- oder Fachwerk-Konstruktionen o.ä. sind die eindimensionalen Diffusionsberechnungen nur für den Gefachbereich nachzuweisen. Ausnahmefälle sind Sonderkonstruktionen, bei denen z.B. die diffusionshemmende Schicht auch abschnittsweise über den Außenbereich verlegt wird. In diesen Ausnahmefällen ist die hier durchgeführte Berechnung ungültig.

DIN 4108-3 beschreibt in Abschnitt 5.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist, da kein Tauwasserrisiko besteht oder das Verfahren für die Beurteilung nicht geeignet ist. Ob das hier untersuchte Bauteil darunter ist, kann mit den vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

Hitzeschutz

Die folgenden Ergebnisse sind Eigenschaften des untersuchten Bauteils allein und machen keine Aussage über den Hitzeschutz des gesamten Raums:



Obere Abbildung: Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils zu verschiedenen Zeitpunkten. Jeweils von oben nach unten, braune Linien: um 15, 11 und 7 Uhr und rote Linien um 19, 23 und 3 Uhr morgens.

Untere Abbildung: Temperatur auf der äußeren (rot) und inneren (blau) Oberfläche im Verlauf eines Tages. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Lage der Temperaturhöchstwerte. Das Maximum der inneren Oberflächentemperatur sollte möglichst während der zweiten Nachthälfte auftreten.

Phasenverschiebung*	nicht relevant	Wärmespeicherfähigkeit (gesamtes Bauteil):	200 kJ/m ² K
Amplitudendämpfung**	>100	Wärmespeicherfähigkeit der inneren Schichten:	101 kJ/m ² K
TAV***	0,004		

* Die Phasenverschiebung gibt die Zeitdauer in Stunden an, nach der das nachmittägliche Hitzemaximum die Bauteilinnenseite erreicht.

** Die Amplitudendämpfung beschreibt die Abschwächung der Temperaturwelle beim Durchgang durch das Bauteil. Ein Wert von 10 bedeutet, dass die Temperatur auf der Außenseite 10x stärker variiert, als auf der Innenseite, z.B. außen 15-35°C, innen 24-26°C.

*** Das Temperaturamplitudenverhältnis TAV ist der Kehrwert der Dämpfung: $TAV = 1/\text{Amplitudendämpfung}$

Hinweis: Der Hitzeschutz eines Raumes wird von mehreren Faktoren beeinflusst, im Wesentlichen aber von der direkten Sonneneinstrahlung durch Fenster und der Gesamtmenge an Speichermasse (darunter auch Fußboden, Innenwände und Einbauten/Möbel). Ein einzelnes Bauteil hat auf den Hitzeschutz des Raumes in der Regel nur einen sehr geringen Einfluss.

Die oben dargestellten Berechnungen wurden für einen 1-dimensionalen Querschnitt des Bauteils erstellt.

P&D Holzbau "neues" Aerogel

Außenwand
erstellt am 16.1.2020

Wärmeschutz

$U = 0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

MuKEn14 Neubau*: $U < 0,17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$



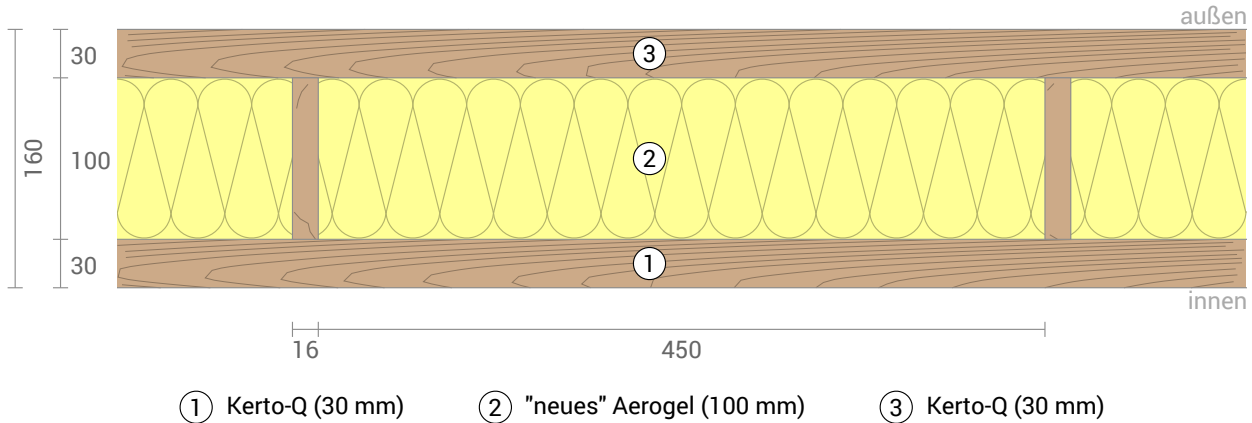
Feuchteschutz

Trocknet 49 Tage
Feuchtegehalt Holz: +1,8%
Tauwasser: 317 g/m²



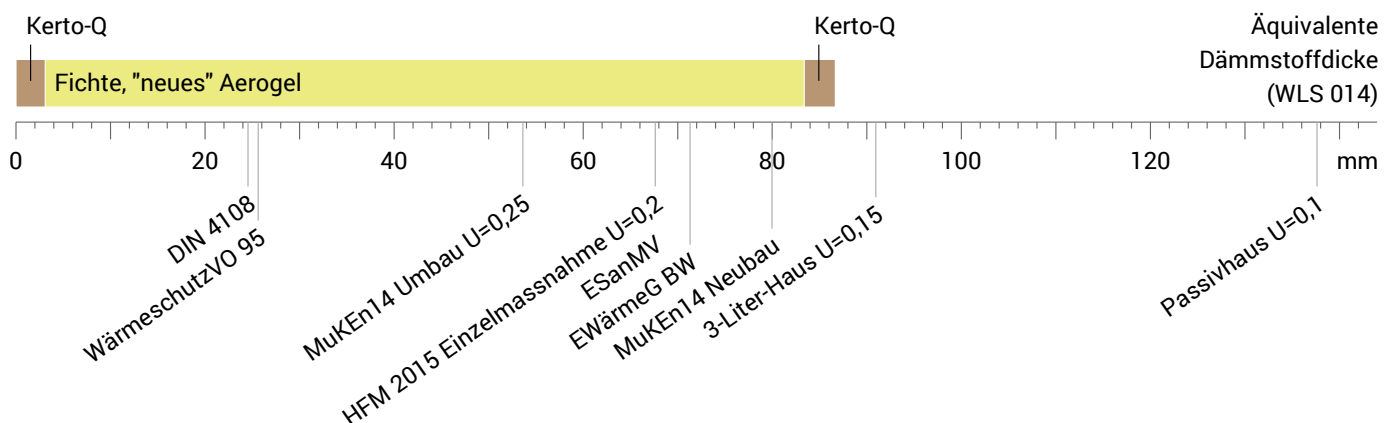
Hitzeschutz

Temperaturamplitudendämpfung: 16
Phasenverschiebung: 10,7 h
Wärmekapazität innen: 26 kJ/m²K



Dämmwirkung einzelner Schichten und Vergleich mit Richtwerten

Für die folgende Abbildung wurden die Wärmedurchgangswiderstände (d.h. die Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf einen Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeit 0,014 W/mK.



Raumluft: 20,0°C / 50%

Außenluft: -5,0°C / 80%

Oberflächentemp.: 18,4°C / -4,8°C

sd-Wert: 5,3 m

Trocknungsreserve: 267 g/m²a

Dicke: 16,0 cm

Gewicht: 52 kg/m²

Wärmekapazität: 53 kJ/m²K

☒ MuKEn14 Neubau

☒ MuKEn14 Umbauten

☒ HFM 2015

☒ ESANMV

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,130
1	Kerto-Q	3,00	0,140	0,214
2	"neues" Aerogel	10,00	0,014	7,143
	Fichte (3,4%)	10,00	0,130	0,769
3	Kerto-Q	3,00	0,140	0,214
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040
	Gesamtes Bauteil	16		

Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung horizontal

Rse: Wärmestromrichtung horizontal, außen: Direkter Übergang zur Außenluft

Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{\text{tot;upper}} = 6,674 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{\text{tot;lower}} = 6,159 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

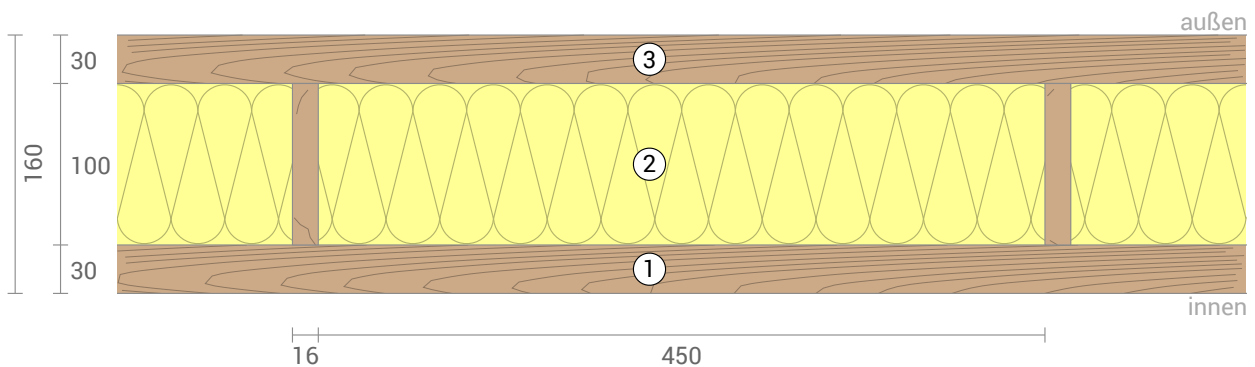
Prüfe Anwendbarkeit: $R_{\text{tot;upper}} / R_{\text{tot;lower}} = 1,083$ (maximal erlaubt: 1,5)

Das Verfahren darf angewendet werden.

Wärmedurchgangswiderstand $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot;upper}} + R_{\text{tot;lower}})/2 = 6,417 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

Abschätzung des maximalen relativen Fehlers nach Absatz 6.7.2.5: 4,0%

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_{\text{tot}} = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



P&D Holzbau "neues" Aerogel, $U=0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

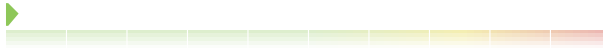
Jahreswärmeverlust und Klimaschutz

Wärmeverlust: 13 kWh/m^2 pro Heizperiode



Wärmemenge, die durch einen Quadratmeter dieses Bauteils während der Heizperiode entweicht. Bitte beachten: Wegen interner und solarer Gewinne ist der Heizwärmebedarf geringer als der Wärmeverlust.

Primärenergie (nicht erneuerbar): $>1,3 \text{ kWh/m}^2$



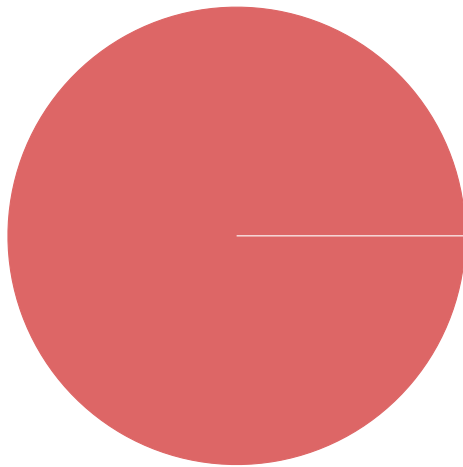
Nicht erneuerbare Primärenergie (=Energie aus fossilen Brennstoffen und Kernenergie) die zur Produktion der verwendeten Baustoffe aufgewendet wurde ("cradle to gate").

Treibhauspotential: $-2,2 \text{ (?) kg CO}_2 \text{ Äqv./m}^2$



Sehr gut: Für die Produktion der verwendeten Baustoffe wurden der Atmosphäre insgesamt mehr Treibhausgase entzogen als zugeführt.

Zusammensetzung des nicht erneuerbaren Primärenergieaufwands der Herstellung:



■ Fichte (100x16) 100%

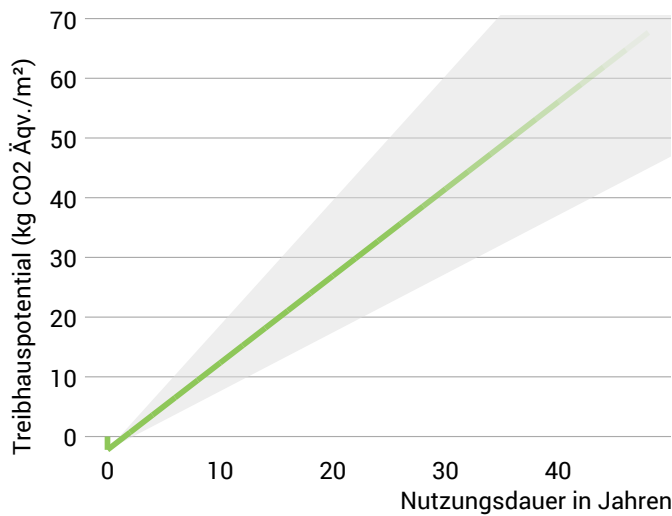
Zusammensetzung des Treibhauspotentials der Herstellung:



#2.1 Fichte -2kg

Achtung: Mindestens eine Schicht konnte nicht berücksichtigt werden, weil deren Primärenergieinhalt und/oder Treibhauspotential unbekannt ist.

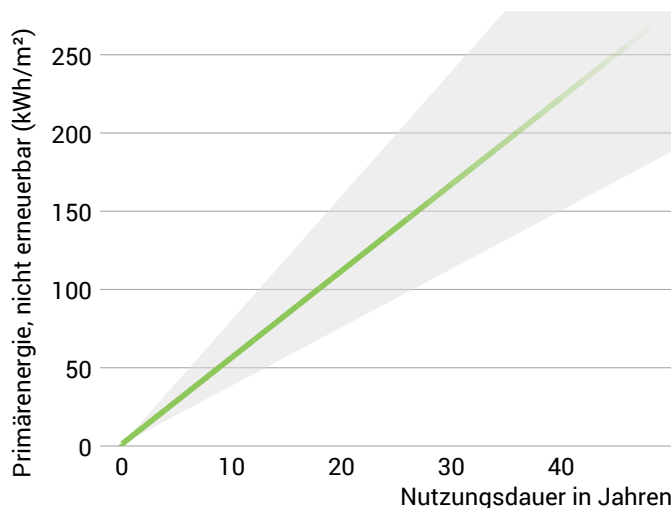
Treibhauspotential und Primärenergie für Bau und Nutzung



Die **Abbildung links** zeigt im senkrechten Teil der Kurve das Treibhauspotential der Herstellung des Bauteils. Die während der Nutzung des Gebäudes entstehenden Treibhausgasemissionen (durch die Beheizung) sind durch die schräg nach oben verlaufende Kurve dargestellt.

Die **Abbildung links unten** zeigt im senkrechten Teil der Kurve den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand für die Herstellung des Bauteils. Die während der Nutzung des Gebäudes benötigte Primärenergie (durch die Beheizung) ist durch die schräg nach oben verlaufende Kurve dargestellt.

Je länger das Bauteil unverändert genutzt wird, umso umweltfreundlicher ist es, weil der Herstellungsaufwand weniger zu den Gesamtemissionen beiträgt (angedeutet durch die Farbe der Kurve).



Wegen unbekannter solarer und interner Gewinne kann der Heizwärmebedarf nur geschätzt werden. Dementsprechend sind Primärenergieaufwand und Treibhauspotential während der Nutzungsphase nur ungenau bekannt. Für die Abschätzung wurde angenommen, dass solare und interne Gewinne mit 4 kWh/a/m^2 Bauteilfläche beitragen. Die hellgrauen Fläche kennzeichnen den Bereich, in dem die Kurve mit großer Sicherheit liegt. Für die Wärmeerzeugung wurde ein Primärenergieaufwand von $0,60 \text{ kWh pro kWh Wärme}$ und ein Treibhauspotential von $0,16 \text{ kg CO}_2 \text{ Äqv./m}^2 \text{ pro kWh Wärme}$ angesetzt. Wärmequelle: Wärmepumpe (Luft).

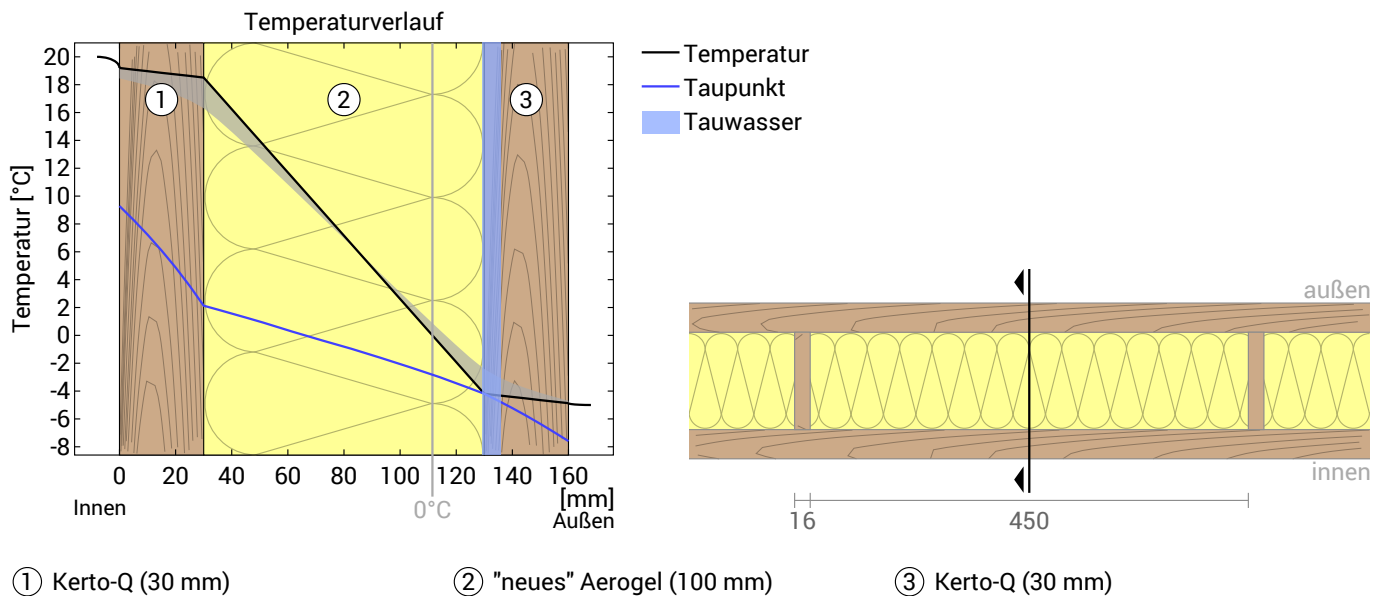
Hinweise

Achtung: Mindestens eine Schicht konnte nicht berücksichtigt werden, weil deren Primärenergieinhalt und/oder Treibhauspotential unbekannt ist.

Berechnet für den Standort Bern, Heizperiode von Mitte Oktober bis Ende April. Die Berechnung basiert auf monatlichen Temperatur-Mittelwerten. Quelle: www.klimadiagramme.de

Die dieser Berechnung zugrunde liegenden Klima- und Energiedaten können zum Teil starke Schwankungen aufweisen und im Einzelfall erheblich vom tatsächlichen Wert abweichen.

Temperaturverlauf



Links: Verlauf von Temperatur und Taupunkt an der in der rechten Abbildung markierten Stelle. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Bauteils an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus.

Rechts: Maßstäbliche Zeichnung des Bauteils.

Schichten (von innen nach außen)

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m ²]
				min	max	
	Wärmeübergangswiderstand*		0,250	18,4	20,0	
1	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	16,3	19,2	18,0
2	10 cm "neues" Aerogel	0,014	7,143	-4,2	18,5	14,5
	10 cm Fichte (3,4%)	0,130	0,769	-2,4	16,6	1,5
3	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	-4,9	-2,4	18,0
	Wärmeübergangswiderstand*		0,040	-5,0	-4,7	
	16 cm Gesamtes Bauteil		6,346			52,0

*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 4108-3 für Feuchteschutz und Temperaturverlauf. Die Werte für die U-Wert-Berechnung finden Sie auf der Seite 'U-Wert-Berechnung'.

Oberflächentemperatur innen (min / mittel / max): 18,4°C 19,0°C 19,2°C
Oberflächentemperatur außen (min / mittel / max): -4,9°C -4,8°C -4,7°C

Feuchteschutz

Für die Berechnung der Tauwassermenge wurde das Bauteil 90 Tage lang dem folgenden konstanten Klima ausgesetzt: innen: 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit; außen: -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit. Dieses Klima entspricht DIN 4108-3.

Unter diesen Bedingungen fallen insgesamt 0,32 kg Tauwasser pro Quadratmeter an. Diese Menge trocknet im Sommer innerhalb von 49 Tagen ab (Verdunstungsperiode gemäß DIN 4108-3:2018-10).

Trocknungsreserve gemäß DIN 4108-3:2014: 267 g/(m²a)
 Von der DIN 68800-2 mindestens gefordert: 100 g/(m²a)

#	Material	sd-Wert [m]	Tauwasser		Gewicht [kg/m ²]
			[kg/m ²]	[Gew.-%]	
1	3 cm Kerto-Q	1,80	-	-	18,0
2	10 cm "neues" Aerogel	1,10	0,32	-	14,5
	10 cm Fichte (3,4%)	2,00	-	-	1,5
3	3 cm Kerto-Q	2,40	0,32	1,8	18,0
	16 cm Gesamtes Bauteil	5,33	0,32		52,0

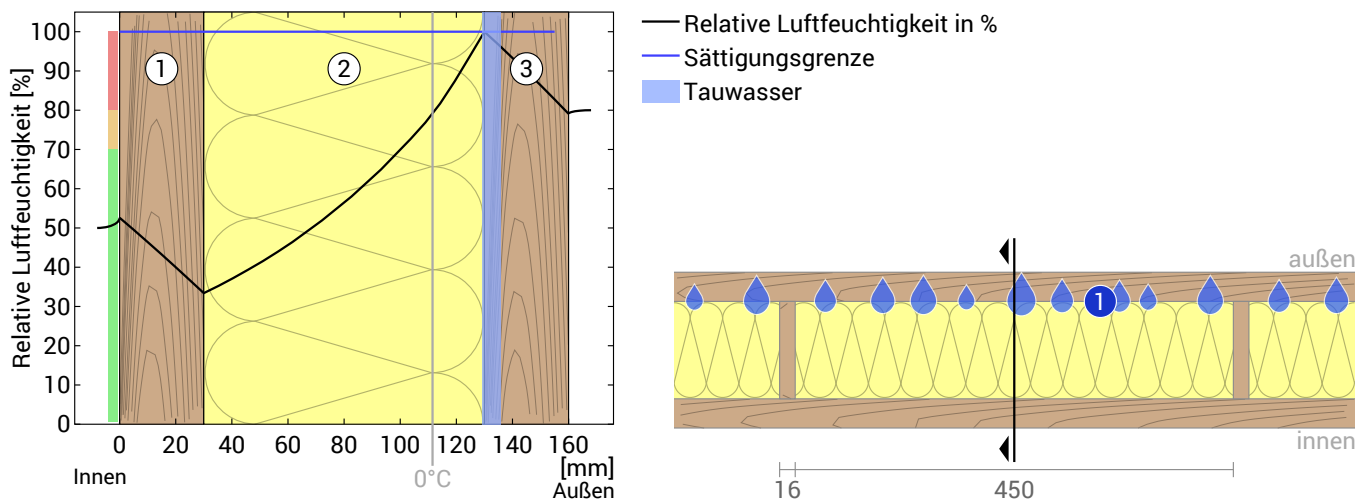
Tauwasserebenen

- ① Tauwasser: 0,32 kg/m² Betroffene Schichten: Kerto-Q, "neues" Aerogel

Luftfeuchtigkeit

Die Oberflächentemperatur der Wandinnenseite beträgt $18,4^\circ\text{C}$ was zu einer relativen Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche von 55% führt. Unter diesen Bedingungen sollte nicht mit Schimmelbildung zu rechnen sein.

Das folgende Diagramm zeigt die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Bauteils.



① Kerto-Q (30 mm)

② "neues" Aerogel (100 mm)

③ Kerto-Q (30 mm)

Hinweise: Berechnung mittels Ubakus 2D-FE Verfahren. Konvektion und die Kapillarität der Baustoffe wurden nicht berücksichtigt. Die Trocknungsdauer kann unter ungünstigen Bedingungen (Beschattung, feuchte/kühle Sommer) länger dauern als hier berechnet.

Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2014 Anhang A

Dieser Feuchteschutznachweis ist nur bei **nicht klimatisierten** Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden gültig.

Bitte beachten Sie die Hinweise am Ende dieser Feuchteschutzberechnungen.

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	sd [m]	ρ [kg/m ³]	T [°C]	ps [Pa]	Σsd [m]
Wärmeübergangswiderstand			0,250					
1	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	1,8	600	19,20	2225	0
2	10 cm "neues" Aerogel	0,014	7,143	1,1	150	18,52	2133	1,8
3	3 cm Kerto-Q	0,140	0,214	2,4	600	-4,19	430	2,9
Wärmeübergangswiderstand			0,040			-4,87	406	5,3

Temperatur (T), Dampfsättigungsdruck (ps) und die Summe der sd-Werte (Σsd) gelten jeweils an den Schichtgrenzen.

Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

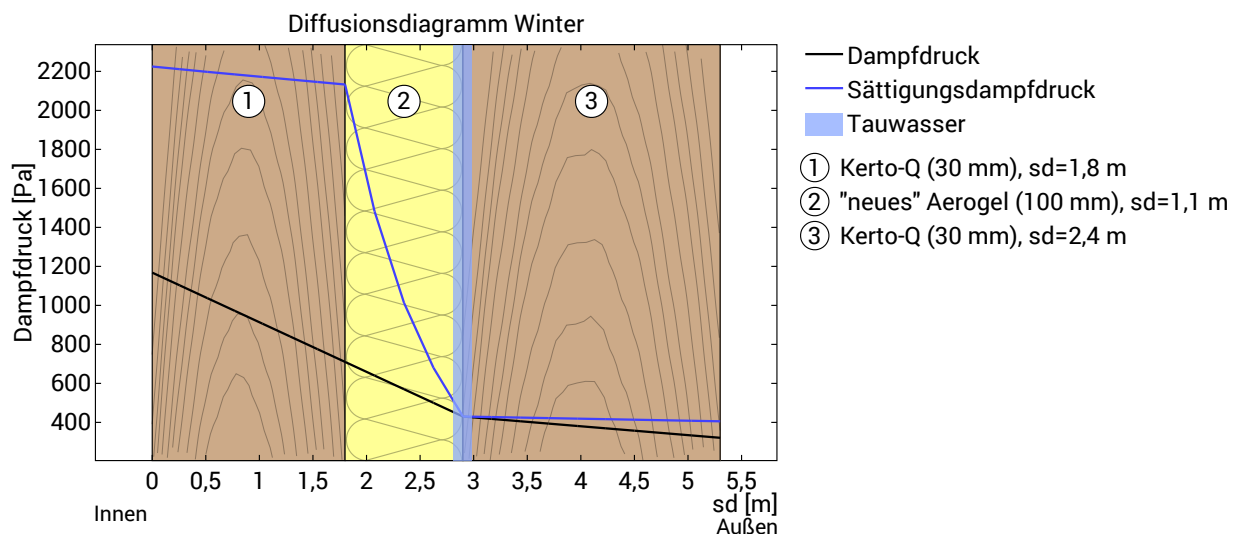
Die relative Luftfeuchtigkeit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche beträgt 52%. Anforderungen zur Vermeidung von Baustoffkorrosion hängen von Material und Beschichtung ab und wurden nicht untersucht.



Tauperiode (Winter)

Randbedingungen

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit	$p_i = 1168 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit	$p_e = 321 \text{ Pa}$
Dauer Tauperiode (90 Tage)	$t_c = 7776000 \text{ s}$
Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in ruhender Luft	$\delta_0 = 2.0 \cdot 10^{-10} \text{ kg/(m}^2\text{sPa)}$
sd-Wert (gesamtes Bauteil)	$s_d = 5,30 \text{ m}$



Tauwasserebene c_1 : Schichtgrenze zwischen "neues" Aerogel und Kerto-Q
bei $s_{d1}=2,90 \text{ m}$; $p_{c1}=430 \text{ Pa}$; $x_1=13 \text{ cm}$

Tauwassermenge: $M_c = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_i - p_{c1})/s_{d1} - (p_{c1} - p_e)/(s_d - s_{d1})) = 0,325 \text{ kg/m}^2$

Für Schicht "neues" Aerogel wurde noch kein Wasseraufnahmekoeffizient hinterlegt. Es wird deshalb angenommen, dass mindestens eine Schicht nicht kapillar Wasseraufnahmefähig ist.

Für Schicht Kerto-Q wurde noch kein Wasseraufnahmekoeffizient hinterlegt. Es wird deshalb angenommen, dass mindestens eine Schicht nicht kapillar Wasseraufnahmefähig ist.

Die maximal erlaubte Tauwassermenge beträgt mindestens $0,5 \text{ kg/m}^2$.

Tauwasser insgesamt: $M_c = 0,325 \text{ kg/m}^2$



Erhöhung des Feuchtegehalts bei Holz und Holzwerkstoffen

Unter der Annahme, dass sich das Tauwasser vollständig auf die Schicht 'Kerto-Q' mit der Rohdichte $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ verteilt, ergibt sich folgende Zunahme des massebezogenen Feuchtegehalts Δu in M.-%:

$$\Delta u = M_c / (\rho \cdot d) \cdot 100\% = 0,325 / (600 \cdot 0,03) \cdot 100\% = 1,8\%$$

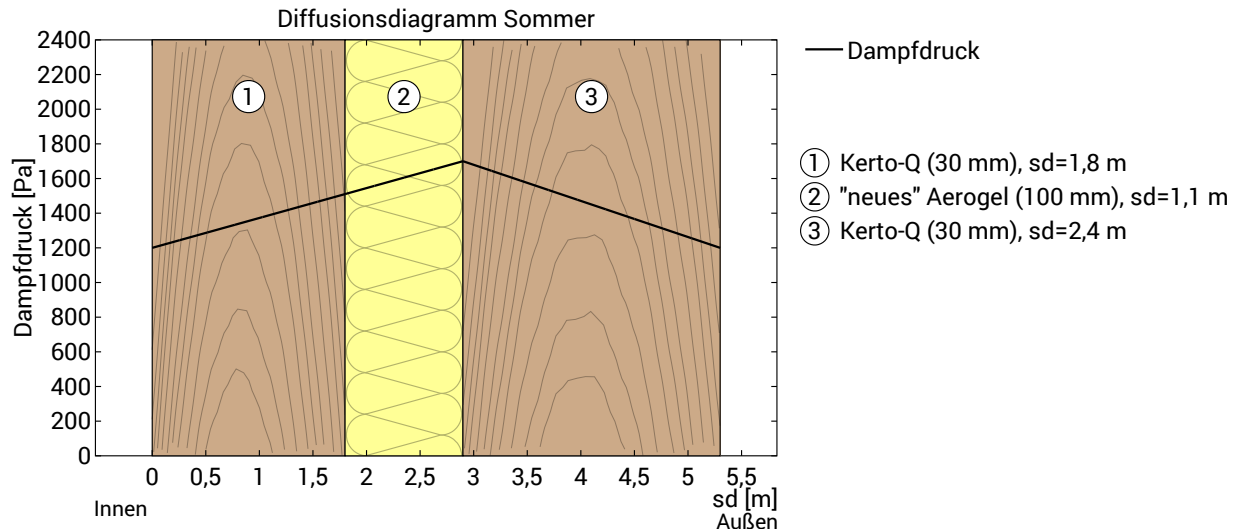
Maximal erlaubte Zunahme bei Holz: 5%



Verdunstungsperiode (Sommer)

Randbedingungen

Dampfdruck innen	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Sättigungsdampfdruck in der Tauwasserebene	$p_s = 1700 \text{ Pa}$
Dauer Verdunstungsperiode (90 Tage)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-Werte bleiben unverändert.	



Maximal mögliche Verdunstungsmenge:

$$M_{ev} = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_s - p_i)/s_{d_{c1}} + (p_s - p_e)/(s_{d_e} - s_{d_{c1}})) = \mathbf{0,592 \text{ kg/m}^2}$$

Die Tauwassermenge von $0,325 \text{ kg/m}^2$ kann vollständig trocknen.



Bewertung gemäß DIN 4108-3

Das Bauteil ist diffusionstechnisch zulässig.

Trocknungsreserve (DIN 68800-2)

$$M_r = (M_{ev} - M_c) \cdot 1000 = \mathbf{267 \text{ g/m}^2/\text{a}}$$

Mindestens gefordert bei Wänden und Decken: $100 \text{ g/m}^2/\text{a}$



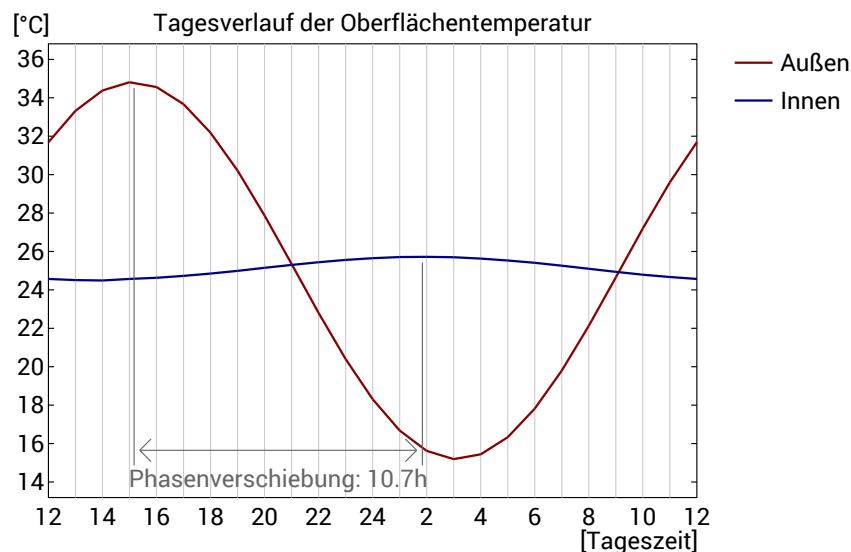
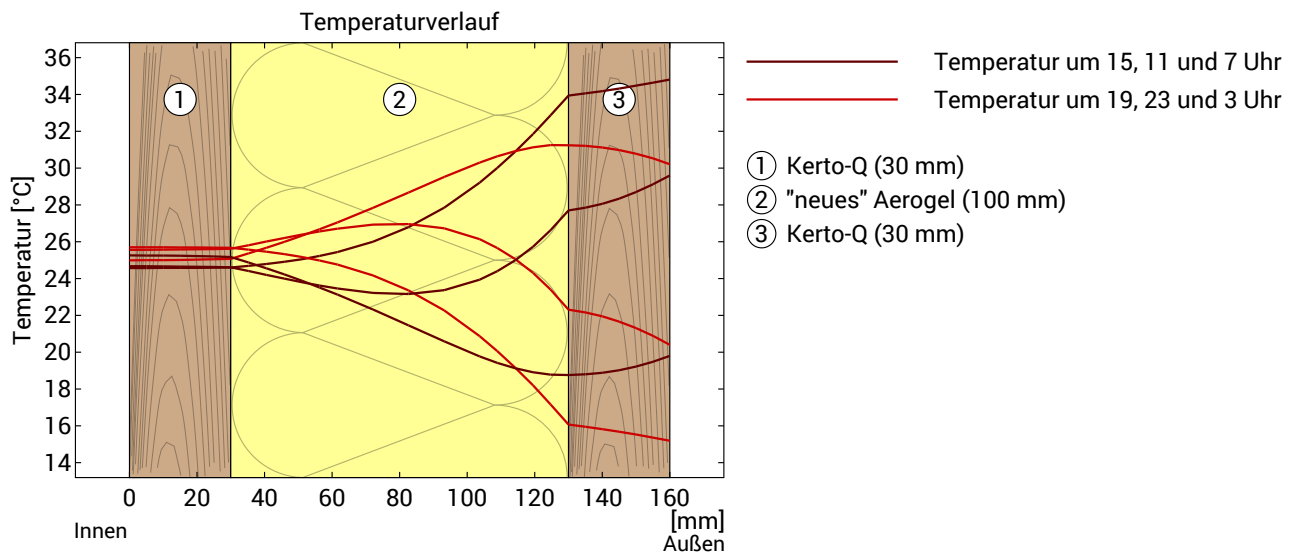
Hinweise

Bei inhomogenen Konstruktionen, wie Skelett-, Ständer- oder Rahmenbauweisen sowie bei Holzbalken-, Sparren- oder Fachwerk-Konstruktionen o.ä. sind die eindimensionalen Diffusionsberechnungen nur für den Gefachbereich nachzuweisen. Ausnahmefälle sind Sonderkonstruktionen, bei denen z.B. die diffusionshemmende Schicht auch abschnittsweise über den Außenbereich verlegt wird. In diesen Ausnahmefällen ist die hier durchgeführte Berechnung ungültig.

DIN 4108-3 beschreibt in Abschnitt 5.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist, da kein Tauwasserrisiko besteht oder das Verfahren für die Beurteilung nicht geeignet ist. Ob das hier untersuchte Bauteil darunter ist, kann mit den vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

Hitzeschutz

Die folgenden Ergebnisse sind Eigenschaften des untersuchten Bauteils allein und machen keine Aussage über den Hitzeschutz des gesamten Raums:



Obere Abbildung: Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils zu verschiedenen Zeitpunkten. Jeweils von oben nach unten, braune Linien: um 15, 11 und 7 Uhr und rote Linien um 19, 23 und 3 Uhr morgens.

Untere Abbildung: Temperatur auf der äußeren (rot) und inneren (blau) Oberfläche im Verlauf eines Tages. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Lage der Temperaturhöchstwerte. Das Maximum der inneren Oberflächentemperatur sollte möglichst während der zweiten Nachthälfte auftreten.

Phasenverschiebung*	10,7 h	Wärmespeicherfähigkeit (gesamtes Bauteil):	53 kJ/m ² K
Amplitudendämpfung**	15,9	Wärmespeicherfähigkeit der inneren Schichten:	26 kJ/m ² K
TAV***	0,063		

* Die Phasenverschiebung gibt die Zeitdauer in Stunden an, nach der das nachmittägliche Hitzemaximum die Bauteilinnenseite erreicht.

** Die Amplitudendämpfung beschreibt die Abschwächung der Temperaturwelle beim Durchgang durch das Bauteil. Ein Wert von 10 bedeutet, dass die Temperatur auf der Außenseite 10x stärker variiert, als auf der Innenseite, z.B. außen 15-35°C, innen 24-26°C.

*** Das Temperaturamplitudenverhältnis TAV ist der Kehrwert der Dämpfung: $TAV = 1/\text{Amplitudendämpfung}$

Hinweis: Der Hitzeschutz eines Raumes wird von mehreren Faktoren beeinflusst, im Wesentlichen aber von der direkten Sonneneinstrahlung durch Fenster und der Gesamtmenge an Speichermasse (darunter auch Fußboden, Innenwände und Einbauten/Möbel). Ein einzelnes Bauteil hat auf den Hitzeschutz des Raumes in der Regel nur einen sehr geringen Einfluss.

Die oben dargestellten Berechnungen wurden für einen 1-dimensionalen Querschnitt des Bauteils erstellt.

P&D Holzbau MW 034

Außenwand
erstellt am 16.1.2020

Wärmeschutz

$U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

MuKEn14 Neubau*: $U < 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Feuchteschutz

Trocknungsreserve: $50 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$

Feuchtegehalt Holz: $+4,7\%$

Trocknet 80 Tage

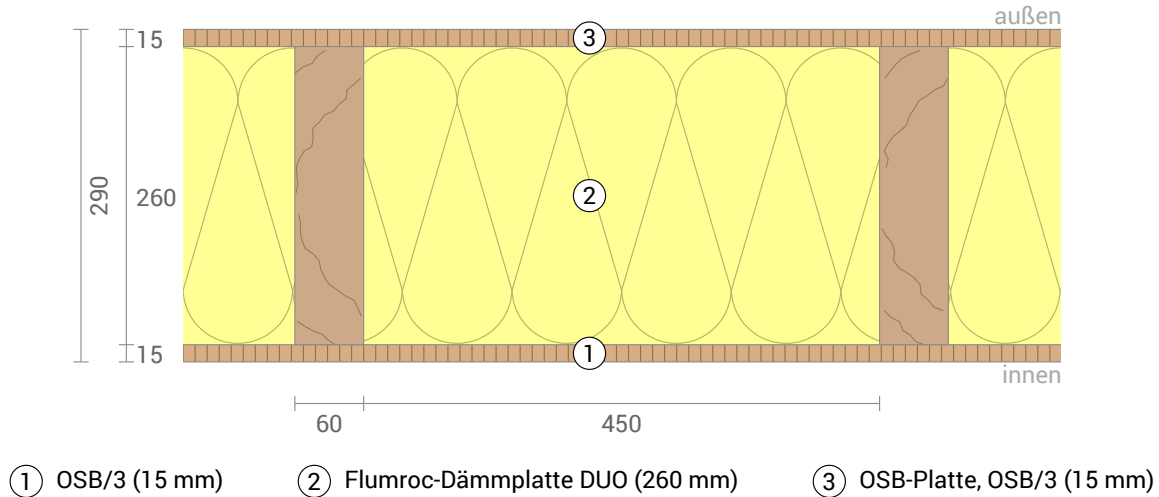


Hitzeschutz

Temperaturamplitudendämpfung: 13

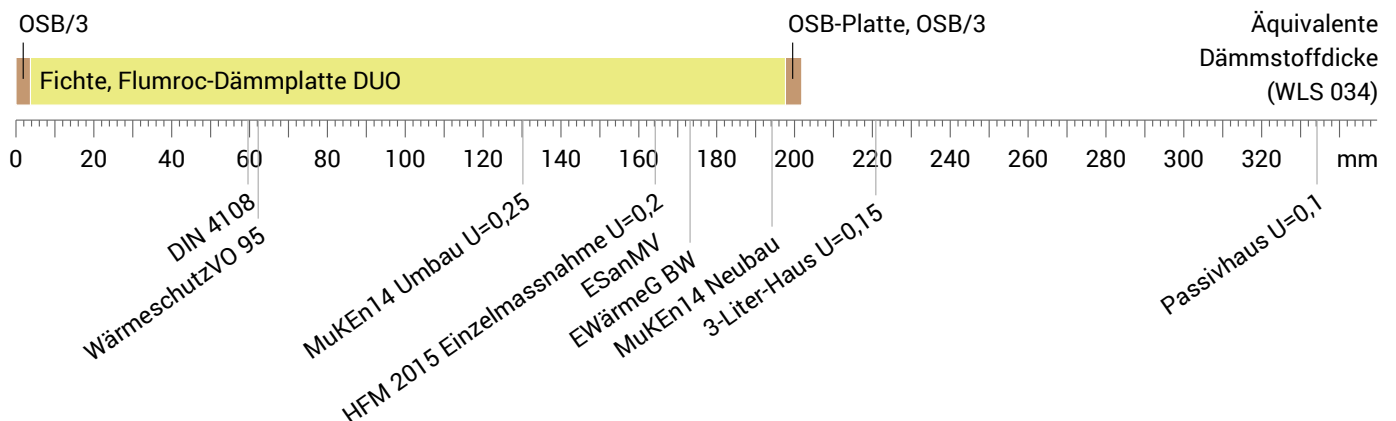
Phasenverschiebung: 9,5 h

Wärmekapazität innen: $32 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$



Dämmwirkung einzelner Schichten und Vergleich mit Richtwerten

Für die folgende Abbildung wurden die Wärmedurchgangswiderstände (d.h. die Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf einen Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeit $0,034 \text{ W}/\text{mK}$.



Raumluft: $20,0^\circ\text{C} / 50\%$

Außenluft: $-5,0^\circ\text{C} / 80\%$

Oberflächentemp.: $18,1^\circ\text{C} / -4,8^\circ\text{C}$

sd-Wert: 7,3 m

Trocknungsreserve: $50 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$

Dicke: 29,0 cm

Gewicht: $44 \text{ kg}/\text{m}^2$

Wärmekapazität: $57 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$

☒ MuKEn14 Neubau

☒ MuKEn14 Umbauten

☒ HFM 2015

☒ ESanMV

U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,130
1	OSB/3	1,50	0,140	0,107
2	Flumroc-Dämmplatte DUO	26,00	0,034	7,647
	Fichte (12%)	26,00	0,140	1,857
3	OSB-Platte, OSB/3	1,50	0,140	0,107
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040
	Gesamtes Bauteil		29	

Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung horizontal

Rse: Wärmestromrichtung horizontal, außen: Direkter Übergang zur Außenluft

Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{\text{tot;upper}} = 6,159 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{\text{tot;lower}} = 5,979 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.

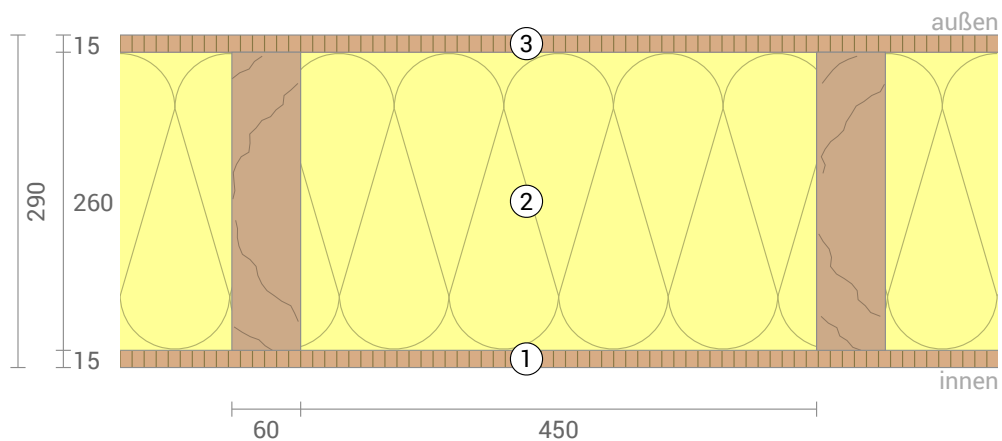
Prüfe Anwendbarkeit: $R_{\text{tot;upper}} / R_{\text{tot;lower}} = 1,030$ (maximal erlaubt: 1,5)

Das Verfahren darf angewendet werden.

Wärmedurchgangswiderstand $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot;upper}} + R_{\text{tot;lower}})/2 = 6,069 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$

Abschätzung des maximalen relativen Fehlers nach Absatz 6.7.2.5: 1,5%

Wärmedurchgangskoeffizient $U = 1/R_{\text{tot}} = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



Jahreswärmeverlust und Klimaschutz

Wärmeverlust: $14 \text{ kWh}/\text{m}^2$ pro Heizperiode



Wärmemenge, die durch einen Quadratmeter dieses Bauteils während der Heizperiode entweicht. Bitte beachten: Wegen interner und solarer Gewinne ist der Heizwärmebedarf geringer als der Wärmeverlust.

Primärenergie (nicht erneuerbar): $95 \text{ kWh}/\text{m}^2$



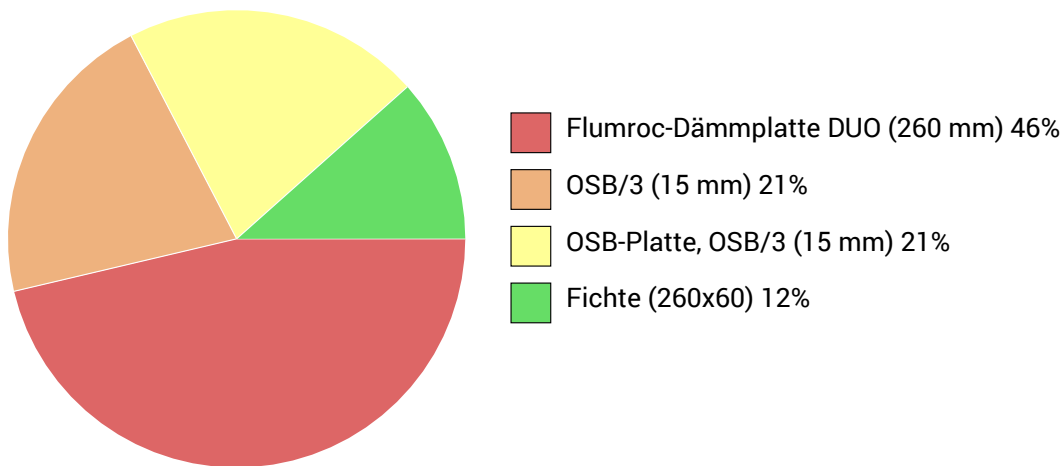
Nicht erneuerbare Primärenergie (=Energie aus fossilen Brennstoffen und Kernenergie) die zur Produktion der verwendeten Baustoffe aufgewendet wurde ("cradle to gate").

Treibhauspotential: $-38 \text{ kg CO}_2 \text{ Äqv.}/\text{m}^2$

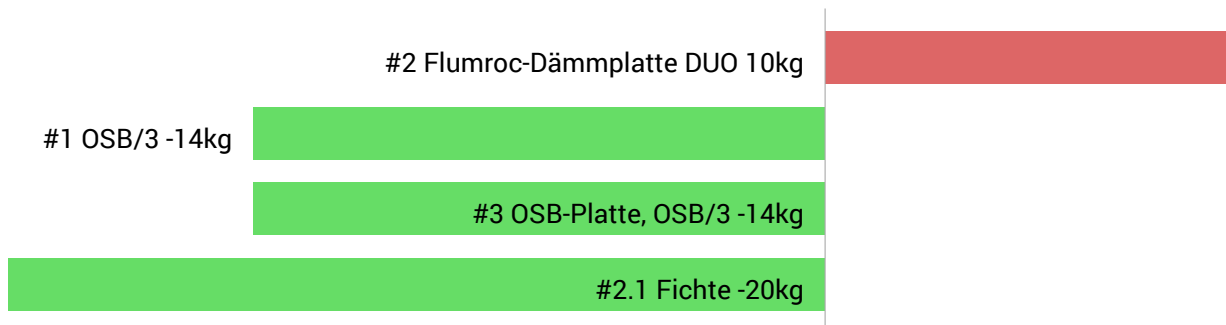


Sehr gut: Für die Produktion der verwendeten Baustoffe wurden der Atmosphäre insgesamt mehr Treibhausgase entzogen als zugeführt.

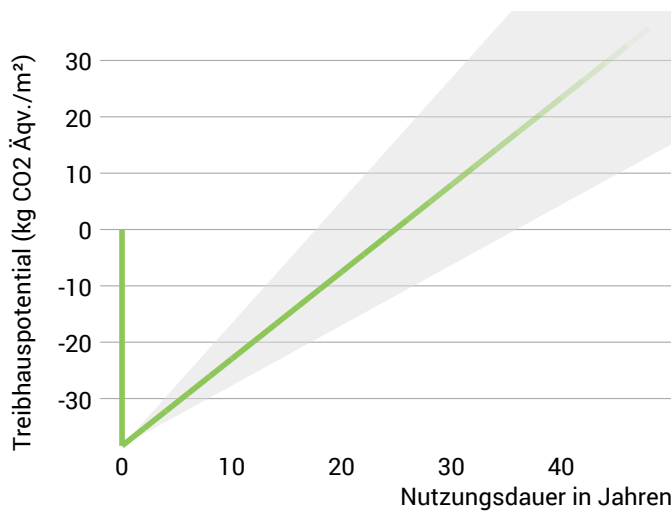
Zusammensetzung des nicht erneuerbaren Primärenergieaufwands der Herstellung:



Zusammensetzung des Treibhauspotentials der Herstellung:



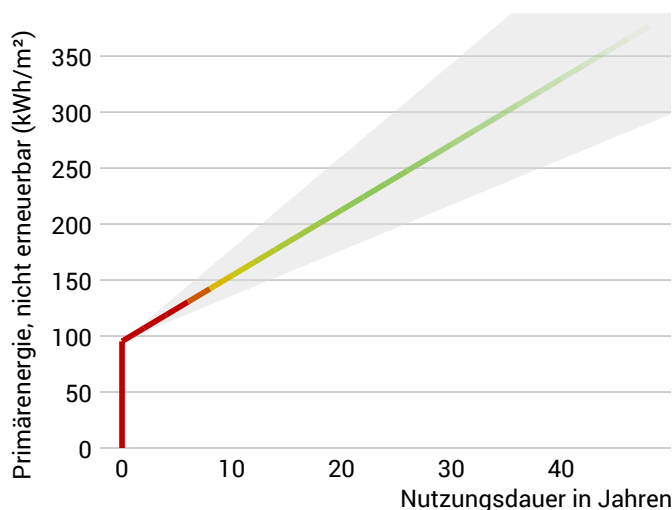
Treibhauspotential und Primärenergie für Bau und Nutzung



Die **Abbildung links** zeigt im senkrechten Teil der Kurve das Treibhauspotential der Herstellung des Bauteils. Die während der Nutzung des Gebäudes entstehenden Treibhausgasemissionen (durch die Beheizung) sind durch die schräg nach oben verlaufende Kurve dargestellt.

Die **Abbildung links unten** zeigt im senkrechten Teil der Kurve den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand für die Herstellung des Bauteils. Die während der Nutzung des Gebäudes benötigte Primärenergie (durch die Beheizung) ist durch die schräg nach oben verlaufende Kurve dargestellt.

Je länger das Bauteil unverändert genutzt wird, umso umweltfreundlicher ist es, weil der Herstellungsaufwand weniger zu den Gesamtemissionen beiträgt (angedeutet durch die Farbe der Kurve).



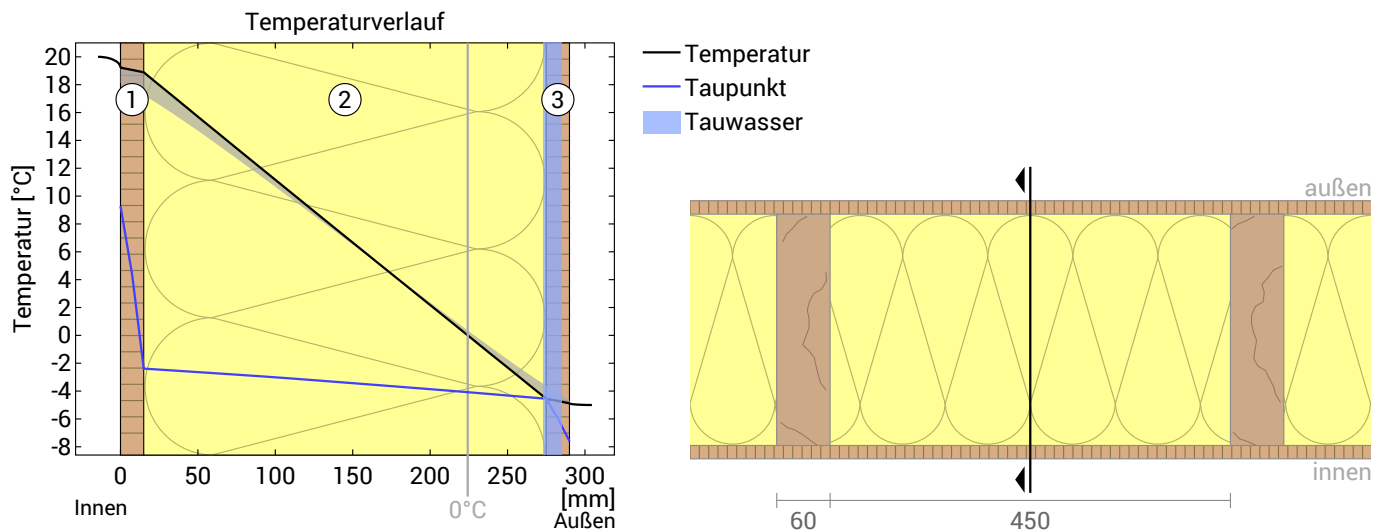
Wegen unbekannter solarer und interner Gewinne kann der Heizwärmebedarf nur geschätzt werden. Dementsprechend sind Primärenergieaufwand und Treibhauspotential während der Nutzungsphase nur ungenau bekannt. Für die Abschätzung wurde angenommen, dass solare und interne Gewinne mit 4 kWh/a/m^2 Bauteilfläche beitragen. Die hellgrauen Fläche kennzeichnen den Bereich, in dem die Kurve mit großer Sicherheit liegt. Für die Wärmeerzeugung wurde ein Primärenergieaufwand von $0,60 \text{ kWh}$ pro kWh Wärme und ein Treibhauspotential von $0,16 \text{ kg CO}_2 \text{ Äqv./m}^2$ pro kWh Wärme angesetzt. Wärmequelle: Wärmepumpe (Luft).

Hinweise

Berechnet für den Standort Bern, Heizperiode von Mitte Oktober bis Ende April. Die Berechnung basiert auf monatlichen Temperatur-Mittelwerten. Quelle: www.klimadiagramme.de

Die dieser Berechnung zugrunde liegenden Klima- und Energiedaten können zum Teil starke Schwankungen aufweisen und im Einzelfall erheblich vom tatsächlichen Wert abweichen.

Temperaturverlauf



① OSB/3 (15 mm)

② Flumroc-Dämmplatte DUO (260 mm) ③ OSB-Platte, OSB/3 (15 mm)

Links: Verlauf von Temperatur und Taupunkt an der in der rechten Abbildung markierten Stelle. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Bauteils an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus.

Rechts: Maßstäbliche Zeichnung des Bauteils.

Schichten (von innen nach außen)

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m ²]
				min	max	
	Wärmeübergangswiderstand*		0,250	18,1	20,0	
1	1,5 cm OSB/3	0,140	0,107	17,2	19,2	9,3
2	26 cm Flumroc-Dämmplatte DUO	0,034	7,647	-4,6	18,9	11,5
	26 cm Fichte (12%)	0,140	1,857	-3,7	17,6	13,8
3	1,5 cm OSB-Platte, OSB/3	0,140	0,107	-4,9	-3,6	9,0
	Wärmeübergangswiderstand*		0,040	-5,0	-4,6	
	29 cm Gesamtes Bauteil		6,093			43,5

*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 4108-3 für Feuchteschutz und Temperaturverlauf. Die Werte für die U-Wert-Berechnung finden Sie auf der Seite 'U-Wert-Berechnung'.

Oberflächentemperatur innen (min / mittel / max): 18,1°C 19,0°C 19,2°C
Oberflächentemperatur außen (min / mittel / max): -4,9°C -4,8°C -4,6°C

Feuchteschutz

Für die Berechnung der Tauwassermenge wurde das Bauteil 90 Tage lang dem folgenden konstanten Klima ausgesetzt: innen: 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit; außen: -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit. Dieses Klima entspricht DIN 4108-3.

Unter diesen Bedingungen fallen insgesamt 0,42 kg Tauwasser pro Quadratmeter an. Diese Menge würde im Sommer innerhalb von 80 Tagen verdunsten (Verdunstungsperiode gemäß DIN 4108-3:2018-10), allerdings werden einzelne Schichten stark durchfeuchtet.

Trocknungsreserve gemäß DIN 4108-3:2014: 50 g/(m²a)
 Von der DIN 68800-2 mindestens gefordert: 100 g/(m²a)
 Der Feuchteschutz dieses Bauteils wird deshalb mit mangelhaft bewertet.

#	Material	sd-Wert [m]	Tauwasser		Gewicht [kg/m ²]
			[kg/m ²]	[Gew.-%]	
1	1,5 cm OSB/3	2,25	-	-	9,3
2	26 cm Flumroc-Dämmplatte DUO	0,26	0,42	-	11,5
	26 cm Fichte (12%)	5,20	-	-	13,8
3	1,5 cm OSB-Platte, OSB/3	4,50	0,42	4,7 (!)	9,0
	29 cm Gesamtes Bauteil	7,29	0,42		43,5

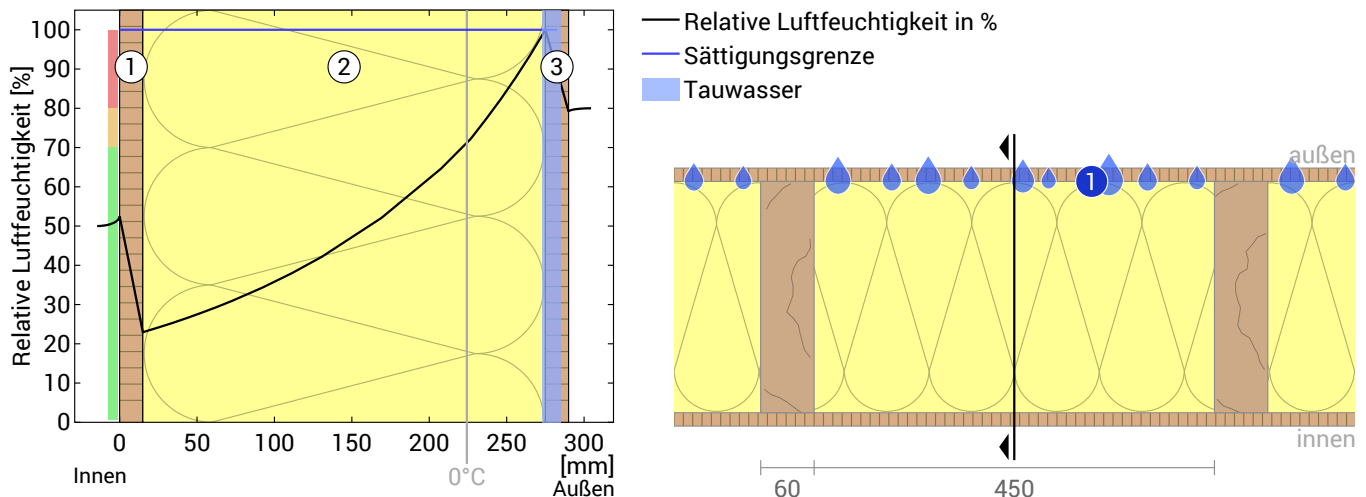
Tauwasserebenen

- ① Tauwasser: 0,42 kg/m² Betroffene Schichten: OSB-Platte, OSB/3, Flumroc-Dämmplatte DUO

Hinweis: Eine Tauwassermenge von mehr als 3% kann Ihr Bauteil nachhaltig schädigen. Um Feuchteschäden trotz größeren Tauwassermengen zu vermeiden, muss sichergestellt werden, dass sich das Tauwasser durch kapillar leitende Baustoffe im Bauteil verteilt und an der Oberfläche schnell genug abtrocknen kann.

Luftfeuchtigkeit

Die Oberflächentemperatur der Wandinnenseite beträgt 18,1 °C was zu einer relativen Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche von 56% führt. Unter diesen Bedingungen sollte nicht mit Schimmelbildung zu rechnen sein. Das folgende Diagramm zeigt die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Bauteils.



- ① OSB/3 (15 mm) ② Flumroc-Dämmplatte DUO (260 mm) ③ OSB-Platte, OSB/3 (15 mm)

Hinweise: Berechnung mittels Ubakus 2D-FE Verfahren. Konvektion und die Kapillarität der Baustoffe wurden nicht berücksichtigt. Die Trocknungsdauer kann unter ungünstigen Bedingungen (Beschattung, feuchte/kühle Sommer) länger dauern als hier berechnet.

Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2014 Anhang A

Dieser Feuchteschutznachweis ist nur bei **nicht klimatisierten** Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden gültig.

Bitte beachten Sie die Hinweise am Ende dieser Feuchteschutzberechnungen.

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	sd [m]	ρ [kg/m ³]	T [°C]	ps [Pa]	Σsd [m]
Wärmeübergangswiderstand			0,250					
1	1,5 cm OSB/3	0,140	0,107	2,25	620	19,23	2229	0
2	26 cm Flumroc-Dämmplatte DUO	0,034	7,647	0,26	50	18,90	2183	2,25
3	1,5 cm OSB-Platte, OSB/3	0,140	0,107	4,5	600	-4,55	417	2,51
Wärmeübergangswiderstand			0,040					
						-4,88	405	7,01

Temperatur (T), Dampfsättigungsdruck (ps) und die Summe der sd-Werte (Σsd) gelten jeweils an den Schichtgrenzen.

Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

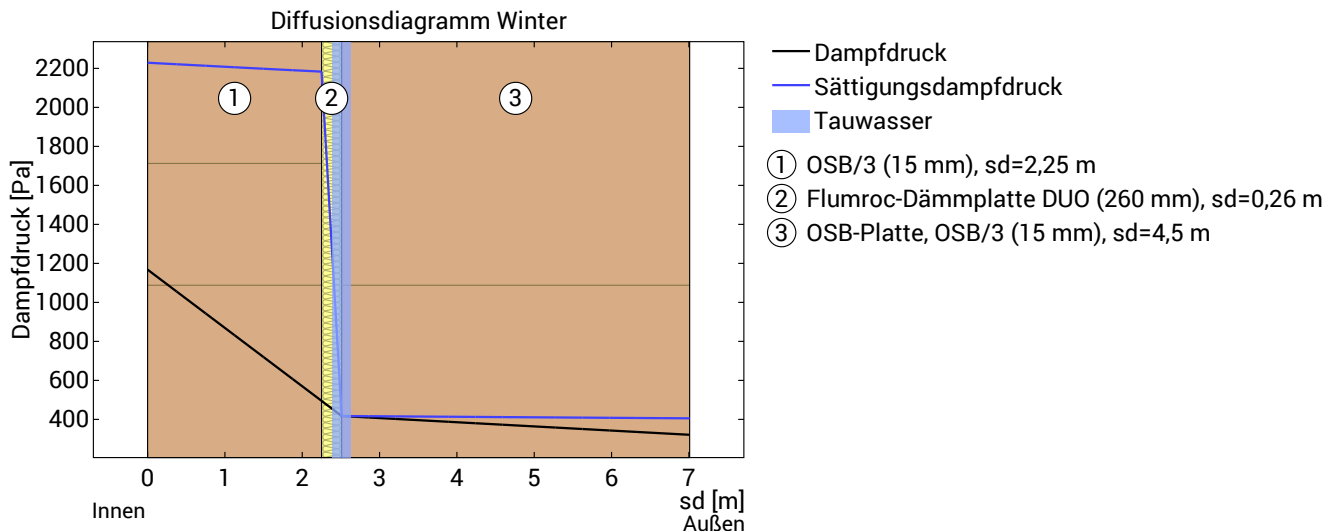
Die relative Luftfeuchtigkeit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche beträgt 52%. Anforderungen zur Vermeidung von Baustoffkorrosion hängen von Material und Beschichtung ab und wurden nicht untersucht.



Tauperiode (Winter)

Randbedingungen

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit	$p_i = 1168 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit	$p_e = 321 \text{ Pa}$
Dauer Tauperiode (90 Tage)	$t_c = 7776000 \text{ s}$
Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in ruhender Luft	$\delta_0 = 2.0\text{E-}10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$
sd-Wert (gesamtes Bauteil)	$s_d = 7,01 \text{ m}$



Tauwasserebene c_1 : Schichtgrenze zwischen Flumroc-Dämmplatte DUO und OSB-Platte, OSB/3
bei $s_{d,c_1}=2,51 \text{ m}$; $p_{c_1}=417 \text{ Pa}$; $x_1=27,5 \text{ cm}$

Tauwassermenge: $M_c = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_i - p_{c_1})/s_{d,c_1} - (p_{c_1} - p_e)/(s_d - s_{d,c_1})) = 0,432 \text{ kg/m}^2$

Für Schicht Flumroc-Dämmplatte DUO wurde noch kein Wasseraufnahmekoeffizient hinterlegt. Es wird deshalb angenommen, dass mindestens eine Schicht nicht kapillar Wasseraufnahmefähig ist.
OSB-Platte, OSB/3 wird als nicht Wasseraufnahmefähig eingestuft weil $A_w < 0.5$ ist.

Mindestens eine befeuchtete Schicht wird nicht als Wasseraufnahmefähig eingestuft. Die maximal erlaubte Tauwassermenge beträgt deshalb 0.5 kg/m^2 .

Tauwasser insgesamt: $M_c = 0,432 \text{ kg/m}^2$



Erhöhung des Feuchtegehalts bei Holz und Holzwerkstoffen

Unter der Annahme, dass sich das Tauwasser vollständig auf die Schicht 'OSB-Platte, OSB/3' mit der Rohdichte $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ verteilt, ergibt sich folgende Zunahme des massebezogenen Feuchtegehalts Δu in M.-%:

$$\Delta u = M_c / (\rho \cdot d) \cdot 100\% = 0,432 / (600 \cdot 0,015) \cdot 100\% = 4,8\%$$

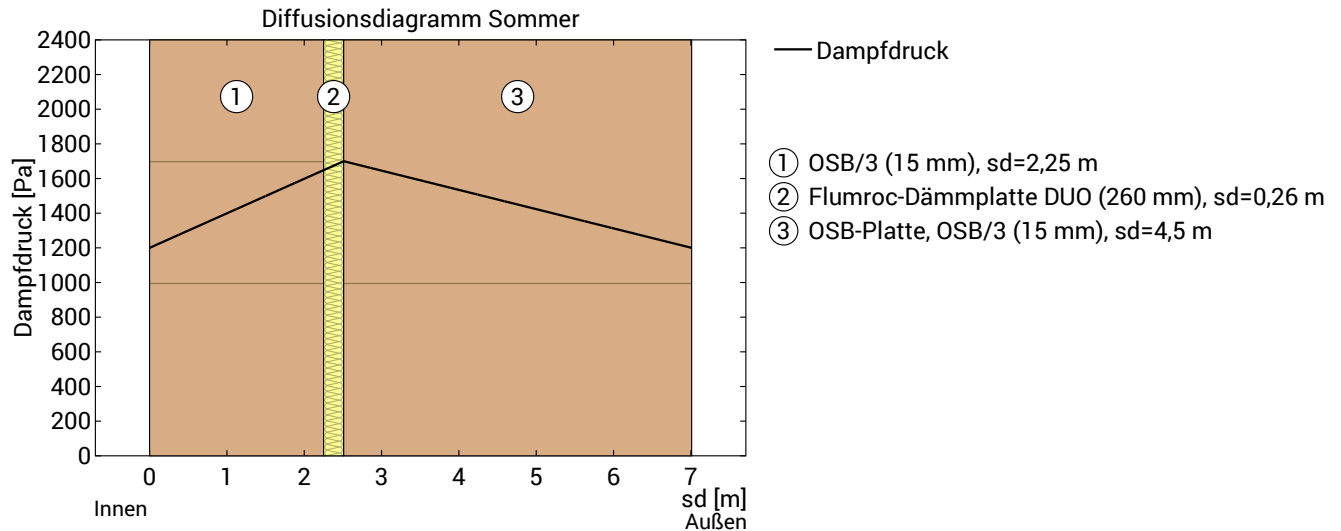
Maximal erlaubte Zunahme bei Holzwerkstoffen: 3%

Anforderung nicht erfüllt!

Verdunstungsperiode (Sommer)

Randbedingungen

Dampfdruck innen	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Sättigungsdampfdruck in der Tauwasserebene	$p_s = 1700 \text{ Pa}$
Dauer Verdunstungsperiode (90 Tage)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-Werte bleiben unverändert.	



Maximal mögliche Verdunstungsmenge:

$$M_{ev} = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_s - p_i)/s_{d_{c1}} + (p_s - p_e)/(s_{d_e} - s_{d_{c1}})) = \mathbf{0,483 \text{ kg/m}^2}$$

Die Tauwassermenge von $0,432 \text{ kg/m}^2$ kann vollständig trocknen.



Bewertung gemäß DIN 4108-3

Das Bauteil ist diffusionstechnisch nicht zulässig.

Trocknungsreserve (DIN 68800-2)

$$M_r = (M_{ev} - M_c) \cdot 1000 = \mathbf{50 \text{ g/m}^2/\text{a}}$$

Mindestens gefordert bei Wänden und Decken: $100 \text{ g/m}^2/\text{a}$

Anforderung nicht erfüllt!

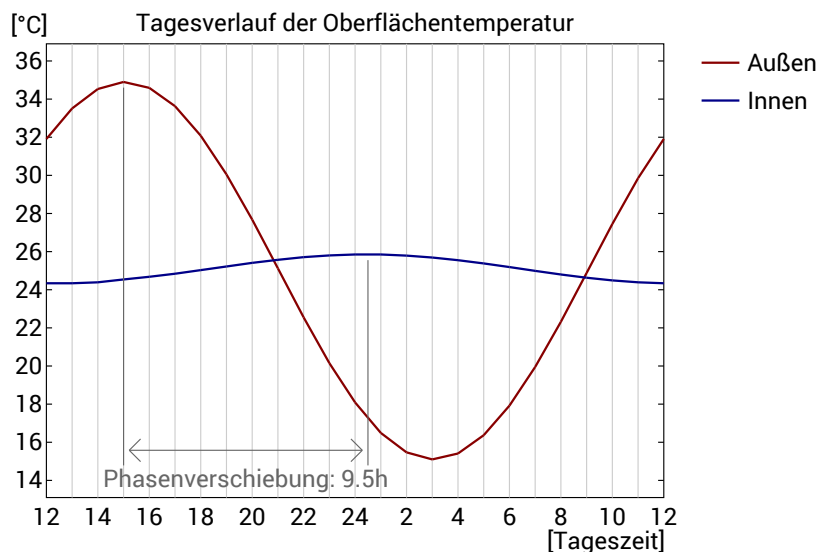
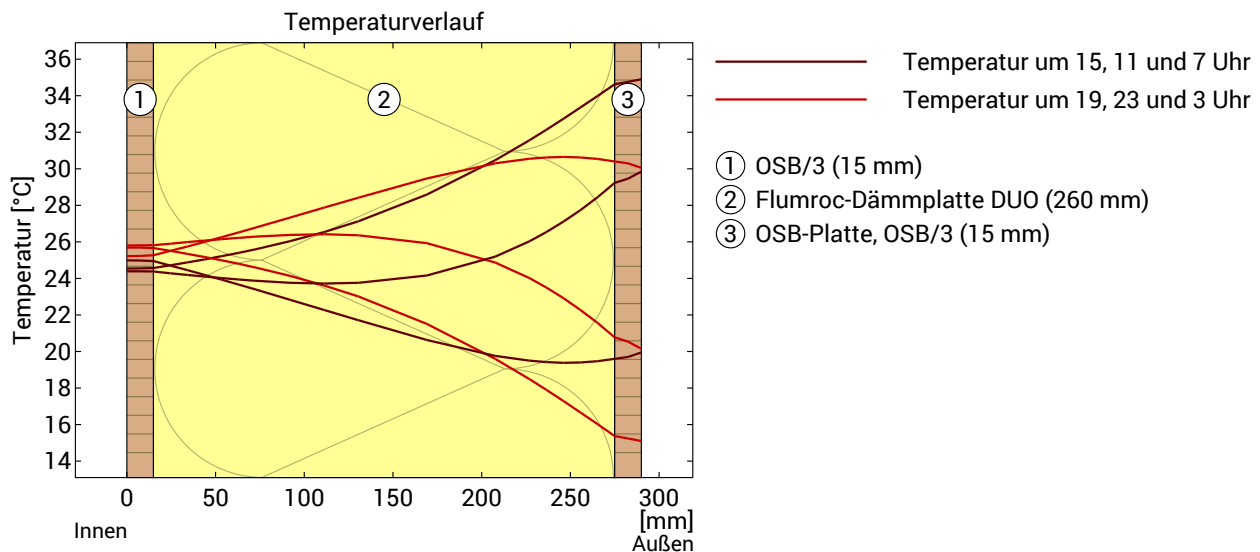
Hinweise

Bei inhomogenen Konstruktionen, wie Skelett-, Ständer- oder Rahmenbauweisen sowie bei Holzbalken-, Sparren- oder Fachwerk-Konstruktionen o.ä. sind die eindimensionalen Diffusionsberechnungen nur für den Gefachbereich nachzuweisen. Ausnahmefälle sind Sonderkonstruktionen, bei denen z.B. die diffusionshemmende Schicht auch abschnittsweise über den Außenbereich verlegt wird. In diesen Ausnahmefällen ist die hier durchgeführte Berechnung ungültig.

DIN 4108-3 beschreibt in Abschnitt 5.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist, da kein Tauwasserrisiko besteht oder das Verfahren für die Beurteilung nicht geeignet ist. Ob das hier untersuchte Bauteil darunter ist, kann mit den vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

Hitzeschutz

Die folgenden Ergebnisse sind Eigenschaften des untersuchten Bauteils allein und machen keine Aussage über den Hitzeschutz des gesamten Raums:



Obere Abbildung: Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils zu verschiedenen Zeitpunkten. Jeweils von oben nach unten, braune Linien: um 15, 11 und 7 Uhr und rote Linien um 19, 23 und 3 Uhr morgens.

Untere Abbildung: Temperatur auf der äußeren (rot) und inneren (blau) Oberfläche im Verlauf eines Tages. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Lage der Temperaturhöchstwerte. Das Maximum der inneren Oberflächentemperatur sollte möglichst während der zweiten Nachthälfte auftreten.

Phasenverschiebung*	9,5 h	Wärmespeicherfähigkeit (gesamtes Bauteil):	57 kJ/m ² K
Amplitudendämpfung**	13,0	Wärmespeicherfähigkeit der inneren Schichten:	32 kJ/m ² K
TAV***	0,077		

* Die Phasenverschiebung gibt die Zeitdauer in Stunden an, nach der das nachmittägliche Hitzemaximum die Bauteilinnenseite erreicht.

** Die Amplitudendämpfung beschreibt die Abschwächung der Temperaturwelle beim Durchgang durch das Bauteil. Ein Wert von 10 bedeutet, dass die Temperatur auf der Außenseite 10x stärker variiert, als auf der Innenseite, z.B. außen 15-35°C, innen 24-26°C.

*** Das Temperaturamplitudenverhältnis TAV ist der Kehrwert der Dämpfung: $TAV = 1/\text{Amplitudendämpfung}$

Hinweis: Der Hitzeschutz eines Raumes wird von mehreren Faktoren beeinflusst, im Wesentlichen aber von der direkten Sonneneinstrahlung durch Fenster und der Gesamtmenge an Speichermasse (darunter auch Fußboden, Innenwände und Einbauten/Möbel). Ein einzelnes Bauteil hat auf den Hitzeschutz des Raumes in der Regel nur einen sehr geringen Einfluss.

Die oben dargestellten Berechnungen wurden für einen 1-dimensionalen Querschnitt des Bauteils erstellt.