

Whitepaper

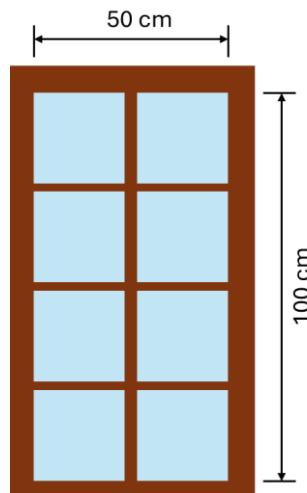
Einsatz von Vakuumgläsern zur Renovation von historischen Holzfenstern

Dr. Jochen Ganz

Basel, 1.9.2025

Zusammenfassung

In den letzten Jahren sind in Europa vermehrt Vakuumisolationsgläser auf den Markt gekommen, die gerne im Bereich von denkmalgeschützten Objekten eingesetzt werden. Die Glas-U-Werte von $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ lassen die Lösung energetisch sehr attraktiv erscheinen; auch der direkte Ersatz von Gläsern ist denkmalpflegerisch interessant.



Die thermischen Eigenschaften eines Fensters werden durch den U-Wert des Glases unzureichend abgebildet. Wir möchten daher eine Gegenüberstellung von verschiedenen Renovationsvarianten erstellen, um die weiteren Einflüsse abbilden zu können.

Anhand des nebenstehenden, einfachverglasten Fensterflügels, welcher für historische Fenster typische Proportionen und Dimensionen aufweist, wird diese Gegenüberstellung exemplarisch durchgeführt. Es werden nur Renovationsvarianten berücksichtigt, welche möglichst viel der Originalsubstanz erhält. Das Glas wird immer ersetzt.

Betrachtet wird die Lösung mit einem aufgesetzten Doppel (QL) mit einem 2- oder 3-fach Glas, zwei Stärken eines Vakuumglases (8 und 12 mm), und die Hybridversion von beiden.

Energetische Perspektive (Abbildung 1): Das Vakuumglas hat einen sehr guten U-Wert, welcher allerdings in der Praxis durch die ausgeprägte Wärmebrücke am Rand neutralisiert wird. So ist die Lösung mit einer guten Doppelverglasung energetisch etwa gleichwertig zur Lösung mit dem Vakuumglas. Wird das Einfachglas durch Vakuumgläser mit Sprossenfeld ersetzt, so ist das eine energetisch sehr ungünstige Lösung (zu viel Rand im Verhältnis zur Fläche).

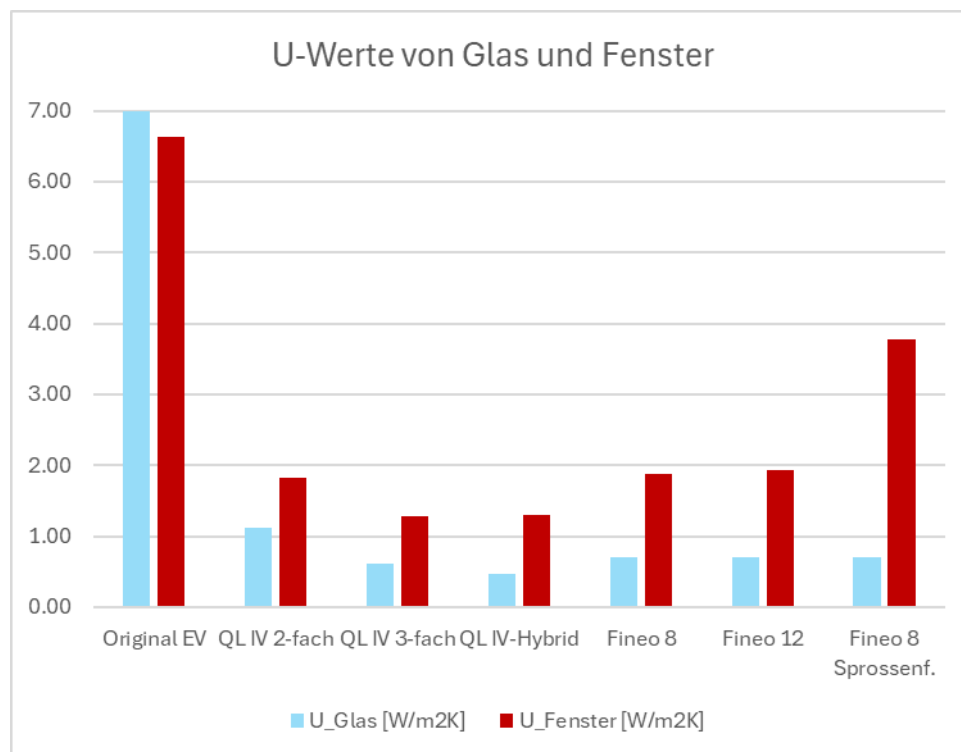


Abbildung 1: U-Werte von Glas und Fenster der verschiedenen Konfigurationen. Das Vakuumglas hat einen sehr guten U-Wert, der in der Praxis durch die ausgeprägte Wärmebrücke am Rand neutralisiert wird. So ist die Lösung mit einer guten Doppelverglasung energetisch etwa gleichwertig zur Lösung mit dem Vakuumglas. Wird das Einfachglas durch Vakuumgläser mit Sprossenfeld ersetzt, so ist das eine energetisch sehr ungünstige Lösung (zu viel Rand im Verhältnis zur Fläche).

Konfiguration	Original EV	QL IV 2-fach	QL IV 3-fach	QL IV-Hybrid	Fineo 8	Fineo 12	Fineo 8 Sprossenf.
T_Aussen [°C] @22°C & TP innen	6.4	-16.6	-27.8	-16.8	-5.7	-5.9	-2.8
Basel	2742	0	0	0	61	54	289
Bern	3424	0	0	0	194	179	534
La Chaux-de-Fonds	3820	0	0	0	404	374	901

Tabelle 1: Stunden pro Jahr, an denen die minimale Oberflächentemperaturen innen bei 22°C/ 50% rel. Feuchte die Taupunkttemperatur erreicht oder unterschreitet. Dabei ist zu beachten, dass Schimmelpilze bereits ab einer Feuchtigkeit von 70-80% wachsen. T_Aussen ist die kritische Umgebungs-Temperatur, bei der Innen am Fenster der Taupunkt erreicht wird.

Bauphysikalische und baubiologische Sicht: Die Tabelle 1 zeigt, dass der Einsatz von Vakuumgläsern in den berechneten Konfigurationen und klimatischen Umfeldern nur als Hybridglas uneingeschränkt empfohlen werden kann. Die ausgeprägte Wärmebrücke am Glasrand führt in vielen Situationen zu erhöhter Feuchtigkeit oder sogar zu Tauwasser.

Konfiguration	QL IV 2-fach	QL IV 3-fach	QL IV-Hybrid	Fineo 8	Fineo 8 Sprossenf.
Preis [%]	100%	113%	130%	103%	224%

Tabelle 2: Gesamtkosten relativ für die verschiedenen Sanierungsvarianten.

Die **Kostenbetrachtung** zeigt, dass die Lösung mit dem Vakuumglas (Tabelle 2, Fineo 8) etwa gleich teuer ist wie die Lösung mit den Zweifach-Isolierglas. D.h. die Mehrkosten für das Vakuumglas werden durch den geringeren Arbeitsaufwand kompensiert, da kein Doppel produziert werden muss.

Folgeschäden an der Baustruktur: Nachträglich Dichtungen in geometrisch nicht definierte Bauräume einzubauen können wir – auch wenn branchenüblich - nicht empfehlen, da dadurch die Gebrauchstauglichkeit und die Beständigkeit der Fenster beeinträchtigt wird.

Es gibt bauliche Situationen, wo der Einsatz einer Vakuumverglasung sinnvoll ist. Für Wohnräume kann dies aber abgesehen von einer Hybridlösung nicht empfohlen werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	5
2	Wärmedämmung	5
2.1	Grundlagen: Glas als Fläche	5
2.2	Grundlagen: Glasrand	6
2.3	Geometrie eines typischen Fensterflügels	7
2.4	Modellierung Wärmefluss	7
2.5	Sanierungsvarianten	8
2.6	Modellierte Varianten	9
2.7	Resultate	9
3	Nachträgliche Abdichtung der Originalfenster	13
3.1	Wind- und Schlagregendichtigkeit	13
3.2	Anspruch an eine Fensterrenovation	14
3.3	Zwei Dichtungsvarianten	14
3.3.1	Hohlkammerdichtung im Falz	14
3.3.2	Umlaufende Dichtung zwischen Doppel und Rahmen	16
4	Kosten	17
5	Anhang: Modellbildung für die Gläser	18
5.1	Isolierglas	18
5.2	Vakuumglas	19
5.3	Vakuumglas Hybrid	19
6	Anhang:	20
6.1	Original EV	20
6.2	QL IV Zweifach	21
6.3	QL IV Dreifach	22
6.4	QL IV-Hybrid	23
6.5	Fineo 8	24
6.6	Fineo 12	25
6.7	Fineo 8 Sprossenfelder	26
7	Anhang: Meteonorm-Stundenwerte	27
8	Anhang: Datenblätter der Verglasungen	28
8.1	Grundlagen für den Swisspacer Advance	28
8.2	Zweifach-Verglasung	29
8.3	Dreifach-Verglasung	30
8.4	Vakuumglas (Fineo AGC)	31
8.5	Vakuumglas (Fineo AGC) als Hybrid	31

1 Ausgangslage

In den letzten Jahren werden in Europa vermehrt Vakuumisolationsgläser im Bereich von denkmalgeschützten Objekten eingesetzt. Die Anwendung erscheint attraktiv: Mit Gesamtstärken von 6-8 mm sind sie nahe bei den 2-3 mm starken historischen Einfachgläsern, was zum Teil einen direkten Ersatz erlaubt. Die Glas-U-Werte von $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ lassen die Lösung auch energetisch sehr attraktiv erscheinen. Der Glas-U-Wert bezieht sich dabei nur auf den Innenbereich des Glases. Am Rand sind die beiden Glasschichten miteinander über eine Breite von typischerweise 5 mm verbunden, was eine sehr wirksame Wärmebrücke darstellt. Entsprechend empfehlen unabhängige Hochschulinstitute (IFT Rosenheim/Frauenhofer), Vakuumgläser seitlich in einem isolierenden Fensterrahmen zu versenken, so dass der Glasrand mindestens 3-4 cm überdeckt wird – was ganz neue Fensterkonstruktionen erfordern würden. Bei historischen Fenstern ist dieser Bauraum in der Regel nicht vorhanden – die Kittphase ist typischerweise 8-10 mm breit.

Beim Einsatz von Vakuumgläsern besteht zudem ein Raumproblem für die nachträglich einzusetzende Dichtung, was zu weiteren Schäden am Fenster oder Bau sowie zu Undichtigkeiten führen kann.

Diese in der Praxis häufig diskutierten und abgewogenen Herausforderungen nehmen wir zum Anlass, um uns detailliert mit den Eigenschaften von verschiedenen Lösungen zur Sanierung von historischen Holzfenstern unter der speziellen Berücksichtigung von Vakuumgläsern auseinanderzusetzen. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in folgenden Kapiteln zusammengefasst (Wärmeverluste, Tauwasser-/Kondensatbildung, Dichtungen, und Kosten).

2 Wärmedämmung

2.1 Grundlagen: Glas als Fläche

Ein Fenster soll Tageslicht ins Haus lassen, Ausblick ermöglichen, und gleichzeitig die Bewohner möglichst gut von der Umwelt abschirmen (Hitze, Kälte, Lärm, Wind und Regen).

Wärmeverluste durch die Fensterverglasung werden durch zwei Mechanismen ermöglicht: Die Wärmeleitung und die Wärmestrahlung. Beide sind von ähnlicher Bedeutung.

Die Energieverluste durch Wärmeleitung werden durch den Einsatz von Mehrfachverglasungen (Kastenfenster, Vorfenster, Doppelverglasungen) reduziert. Eine Zweifachverglasung mit Luft im Zwischenraum erreicht so einen U-Wert von ca. $2.6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Eine selektive Beschichtung, die im Infraroten die Wärmestrahlung reflektiert, kann ohne eine allzu grosse optische Beeinträchtigung die Verluste auf ca. $1.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ senken. Zusätzlich werden die Glaszwischenräume mit schweren Gasen gefüllt (Argon, Krypton), womit U-Werte bei einem Zweifach-Glas von $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht werden. Diese Technologie hat sich in den 90er Jahren in der Schweiz durchgesetzt.

Parallel dazu wurden 2-Scheiben-Gläser entwickelt, die im Scheibenzwischenraum ein gutes Vakuum aufweisen. Da die aufs Glas wirkenden Kräfte (10 Tonnen pro m^2) erheblich sind, müssen die Gläser ca. alle 2 cm mit feinen Pins abgestützt werden. Diese beeinträchtigen die Isolationsleistung (Wärmebrücken) und die Optik.

Die optische Beeinträchtigung konnte durch den Einsatz von schwarzen Pins erheblich reduziert werden. Diese stören deutlich weniger als die bisher verbreiteten Weissen. Damit werden U-Werte von $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht.

2.2 Grundlagen: Glasrand

Der U-Wert eines Glases ist ein Mass für den Energiefluss ohne Berücksichtigung des Randes. Die Branche der Isolierglashersteller hat grosse Anstrengungen unternommen, um die Energieflüsse durch den Randverbund so klein wie möglich zu machen.

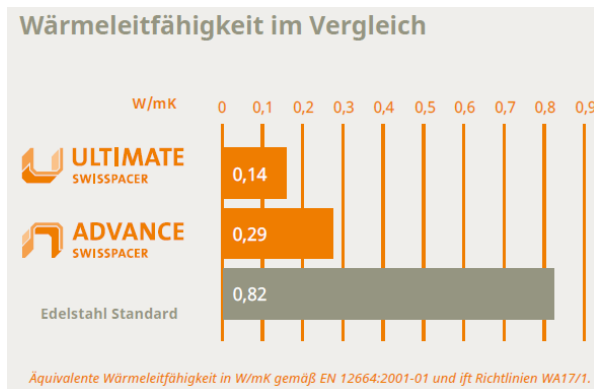


Abbildung 2: Leistungsfähigkeit eines modernen Randverbundes im Vergleich zur ursprünglichen Edelmetalllösung (Darstellung technisches Factsheet von Swispace, Vetrotech Saint-Gobain (International) AG, Kreuzlingen).

Abbildung 2 zeigt den Erfolg dieser Bemühungen eindrucklich. Man spricht in diesem Zusammenhang in der Branche auch von einer warmen Kante. Das Problem bei thermisch gut leitenden Rändern ist, dass sich an kalten Tagen Tauwasser bildet. Dies ist - neben den thermischen Verlusten - ein ästhetisches Problem (Schmutzablagerungen, Wasserflecken), beeinträchtigt langfristig das Holz des Rahmens, und der Bereich neigt auch zu Schimmelpilz-Bildung (bauökologische Beeinträchtigung).

Der Randverbund von Vakuumgläsern verbindet die beiden Glasschichten über eine Breite von ca. 5 mm miteinander. Dies stellt eine sehr wirksame Wärmebrücke dar: hier liegt Glas auf Glas mit einer 0.1-mm-starken Verklebung.

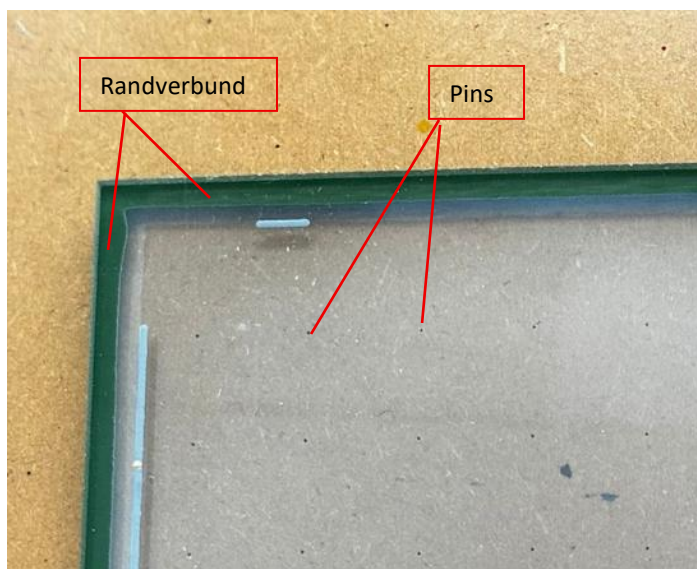


Abbildung 3: Randverbund eines Fineo 8 Glases von AGC.

2.3 Geometrie eines typischen Fensterflügels

Abbildung 4 zeigt die Geometrie des betrachteten Fensterflügels. Es sind die typischen Abmessungen wie wir sie an Gebäuden in Basel aus der Zeit um 1900 antreffen.

Im Vergleich zu einem heutigen Fenster sind die Flügelprofile mit einer Breite von 53 mm sehr schlank (heute eher im Bereich von 70 mm). Dies ermöglicht bei den historischen Fenstern ein grosses Glaslicht, welches erhalten werden soll. Dies ist insofern vorteilhaft, da eine neue Verglasung eine bessere Wärmedämmung aufweist als der Rahmen. D.h. mehr Glas und weniger Rahmen ist energetisch und ästhetisch grundsätzlich vorteilhaft.

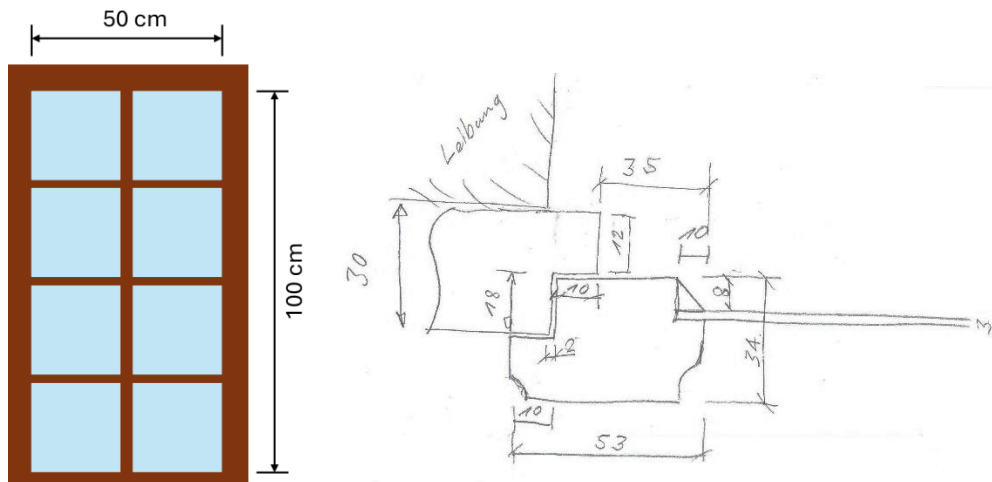


Abbildung 4: Betrachteter Fensterflügel mit dem Glaslichtmass. Rechts: Horizontaler Schnitt durch das Fensterprofil mit den wichtigsten Abmessungen in Millimeter mit dem Anschlussdetail ans Gebäude.

2.4 Modellierung Wärmefluss

Die Berechnungen zum Wärmefluss wurden mit dem Simulationsprogramm Flixo 8.2 von Infomind durchgeführt (<https://www.flixo.de/>). Dieses Tool ist seit Jahren die Referenzlösung für die Entwicklung von Fenstern und anderen Bauteilen für die Bauindustrie.

Es handelt sich dabei um eine stationäre thermische 2.5-D Simulation. D.h. es wird eine Ebene berechnet, und für die Energiefluss-Betrachtung dieses Modell einen Meter tief in den Raum expandiert. Um für den Fensterflügel repräsentative Aussagen zu erzielen, wurde angenommen, dass das Fenster aus Rahmenprofil und Glasfläche besteht. Die Ecke wird nicht gesondert behandelt. Wenn nicht angegeben, werden die Fenstersprossen nicht berücksichtigt. Die Glasfläche des Flügels beträgt 0.5 m^2 und der Umfang 3 m. Um die gleichen Flächenverhältnisse im Modell wie im Original zu erreichen, muss im Modell das Glaslicht 16.7 cm breit sein ($= 0.5 \text{ m}^2/3 \text{ m}$).

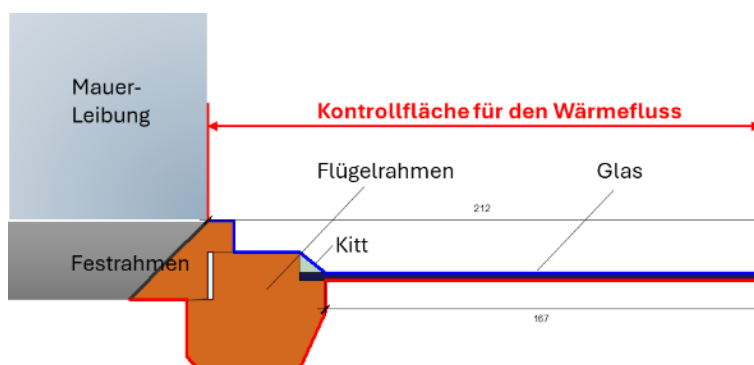


Abbildung 5: Berechneter Querschnitt (bunt). Die Kontrollfläche ist so gewählt, dass ein für das Fenster ohne Berücksichtigung der Mauerleibung repräsentativer Wärmestrom berechnet wird. Die Schnittflächen werden als Symmetrierandbedingungen definiert, d.h. ohne Wärmefluss.

2.5 Sanierungsvarianten

Abbildung 6 zeigt, wie Mehrfachgläser mit dem bestehenden Flügelrahmen kombiniert werden.

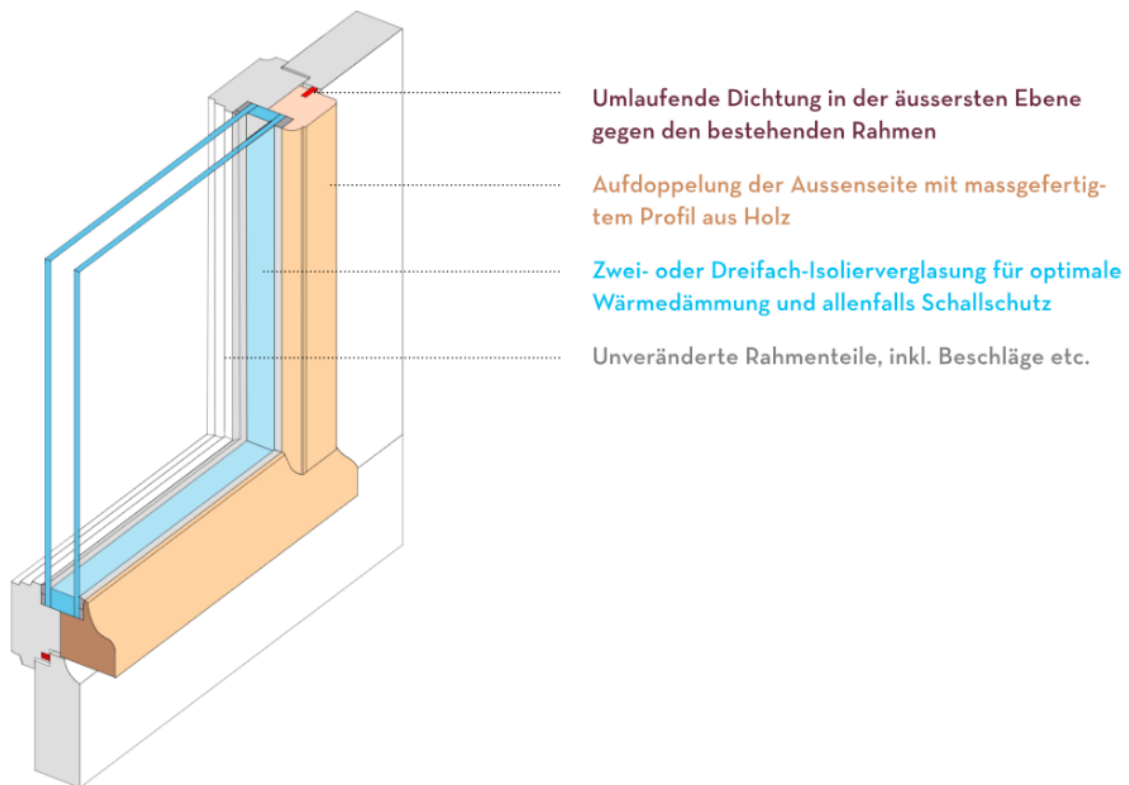


Abbildung 6: Fenstersanierung von Quadra Ligna mit äusserer Aufdopplung (Quelle: <https://www.quadraligna.ch/unser-angebot/fenster-renovieren>).

Abbildung 7 zeigt die Integration der Vakuumgläser. Diese werden direkt in den bestehenden Flügelrahmen eingekittet, nachdem der Glasfalz nachgefräst wurde. Die Verarbeitung entspricht den Vorgaben des Herstellers AGC.

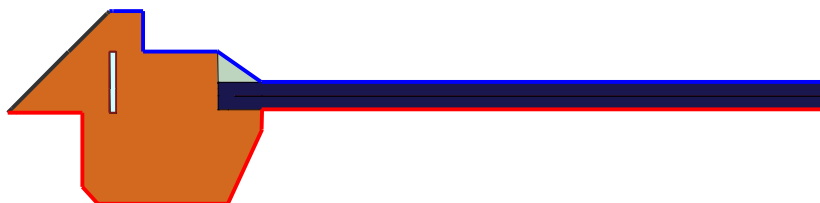


Abbildung 7: Eingesetztes Fineo 8 (AGC), 13 mm versenkt, eingekittet.

Die Modellbildung der Gläser im Detail ist im Anhang dem Kapitel 3 dokumentiert.

2.6 Modellierte Varianten

Original EV	Altes Fenster mit Eichenholzrahmen und Einfachverglasung (Abb. 5).
QL IV 2-fach	Altes Fenster ausgestattet mit einer 2-fachIsolierverglasung und aussenliegender Rahmenaufdopplung (Abb. 6).
QL IV 3-fach	Altes Fenster ausgestattet mit einer 3-fach Isolierverglasung und aussenliegender Rahmenaufdopplung.
QL IV-Hybrid	Altes Fenster ausgestattet mit einer 2-fachIsolierverglasung, wovon das eine Glas ein Fineo-Vakuumglas ist, und aussenliegender Rahmenaufdopplung.
Fineo 8	Altes Fenster ausgestattet mit einem vollflächigen 8-mm Fineo-Vakuumglas eingekittet (Abb. 7).
Fineo 12	Altes Fenster mit einem vollflächigen 12-mm Fineo-Vakuumglas eingekittet.
Fineo 8 Sprossenf.	Altes Fenster mit 8-mm Fineo-Vakuumgläsern in Sprossenfelder eingekittet.

Die Simulationen sind im Anhang (Kapitel 6) vollständig dokumentiert.

2.7 Resultate

Die Berechnungen wurden auf die folgenden Kriterien hin ausgewertet:

Energetische Verbesserung:	Ein Ziel einer Fenster-Sanierung ist immer die energetische Verbesserung der Gebäudehülle. Der mittlere U-Wert des gesamten Fensters ist dazu ein übliches Mass. Je kleiner dieser Wert ist, umso besser ist die Dämmung.
Tauwasser/Schimmelpilze:	Bauphysikalisch und auch bezüglich Raumhygiene ist Schimmelbildung ein wichtiges Kriterium. Schimmelpilze wachsen ab einer Relativen Feuchtigkeit an der Oberfläche von 70-80%. Diese wiederum hängt von der Oberflächentemperatur und der Luftfeuchtigkeit im Raum ab. Die Rauluftfeuchtigkeit selber wird durch die freigesetzte Feuchte (Menschen, Tiere, Pflanzen, Kochen, Wäschetrocknung, Luftbefeuchter, Aufstieg von Feuchtigkeit aus dem Keller etc.) und das Lüftungsverhalten beeinflusst. Da alle diese Parameter nicht von vornherein bekannt sind, kann hier nur eine Risikoabschätzung vorgenommen werden. Als Mass dazu wird das Erreichen des Taupunktes an der Bauteiloberfläche bei einer Raumtemperatur von 22°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% berechnet.

In der Folge sind die Ergebnisse auf diese Kriterien hin zusammengefasst. Tabelle 3 beschreibt die U-Werte der Gläser sowie der Fenster unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Sanierungsvarianten bzw. der Referenz-Fenstergeometrie. Weiter werden die minimale Temperatur der Oberflächen innen bei winterlichen Aussenbedingungen, sowie die Temperatur aussen beim Erreichen einer Taupunktsbedingung innen aufgeführt. Letzterer Wert wird zur Abschätzung der jährlichen Dauer, während der eine nasse Oberfläche am Fenster eintreten kann, verwendet.

Konfiguration	Original EV	QL IV 2-fach	QL IV 3-fach	QL IV-Hybrid	Fineo 8	Fineo 12	Fineo 8 Sprossenf.
U_Glas [W/m ² K]	7.00	1.12	0.61	0.46	0.70	0.70	0.70
U_Fenster [W/m ² K]	6.63	1.83	1.29	1.30	1.88	1.93	3.78
T_Min [°C] @22°C innen	-0.4	13.0	15.0	13.0	9.4	9.5	7.9
T_Aussen [°C] @22°C & TP innen	6.4	-16.6	-27.8	-16.8	-5.7	-5.9	-2.8

U_Glas [W/m²K] U-Wert des Glases ohne Berücksichtigung des Randes
 U_Fenster [W/m²K] Mittlerer Fenster-U-Wert bezogen auf die gesamte Fensterfläche inklusive Rahmen
 T_Min [°C] @22°C innen Berechnete tiefste Temperatur innen am Fenster bei 22°C innen und -10°C aussen
 T_Aussen [°C] @22°C & TP innen Aussentemperatur, bei der der Taupunkt innen am Fenster erreicht wird bei 50% RH innen.

Tabelle 3: Resultierende Fenster-U-Werte, minimale Oberflächentemperaturen innen bei 22°C (innen) und -10°C (ausen) und Aussentemperatur, bei der Innen an der Oberfläche des Fensters der Taupunkt (22°C/ 50% rel. Feuchte) erreicht wird.

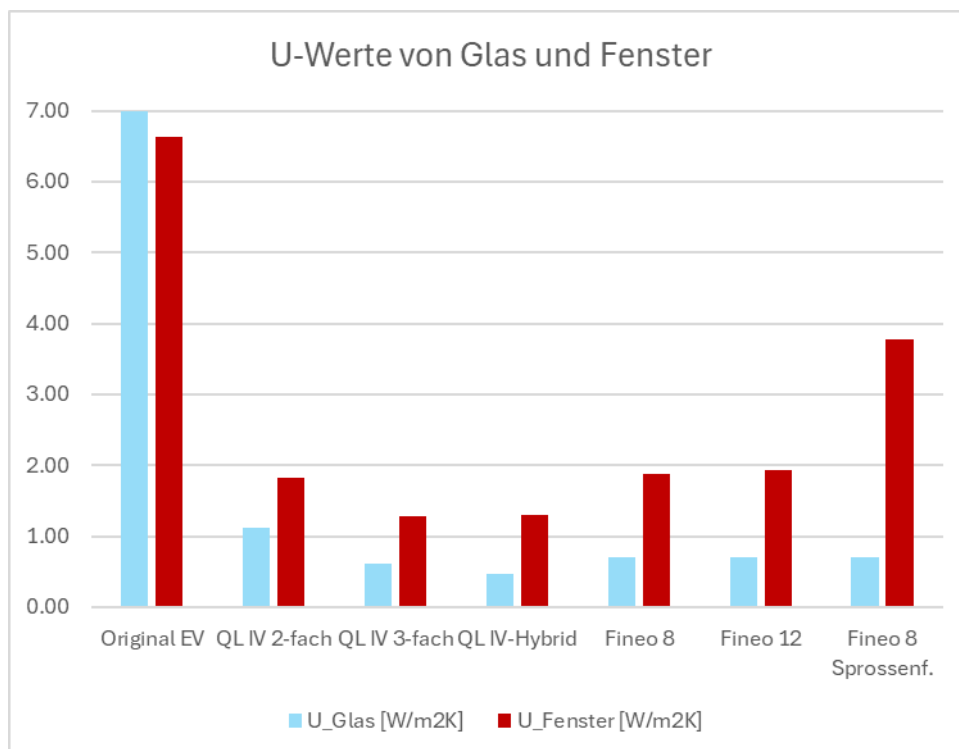


Abbildung 8: U-Werte von Glas und Fenster der verschiedenen Konfigurationen. Das Vakuumglas hat einen sehr guten U-Wert, der in der Praxis durch die ausgeprägte Wärmebrücke am Rand neutralisiert wird. So ist die Lösung mit einer guten Doppelverglasung energetisch etwa gleichwertig zur Lösung mit dem Vakuumglas. Wird das Einfachglas durch Vakuumgläser mit Sprossenfeld ersetzt, so ist das eine energetisch sehr ungünstige Lösung (zu viel Rand im Verhältnis zur Fläche).

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Original EV die einzige Variante ist, bei welcher das Glas in der Fläche thermisch die schwächste Stelle darstellt. Bei allen anderen Berechnungen ist immer die Wärmebrücke des Randverbundes, d.h. der Übergang vom Glas zum Füllgerahmen innen, die kälteste Stelle.

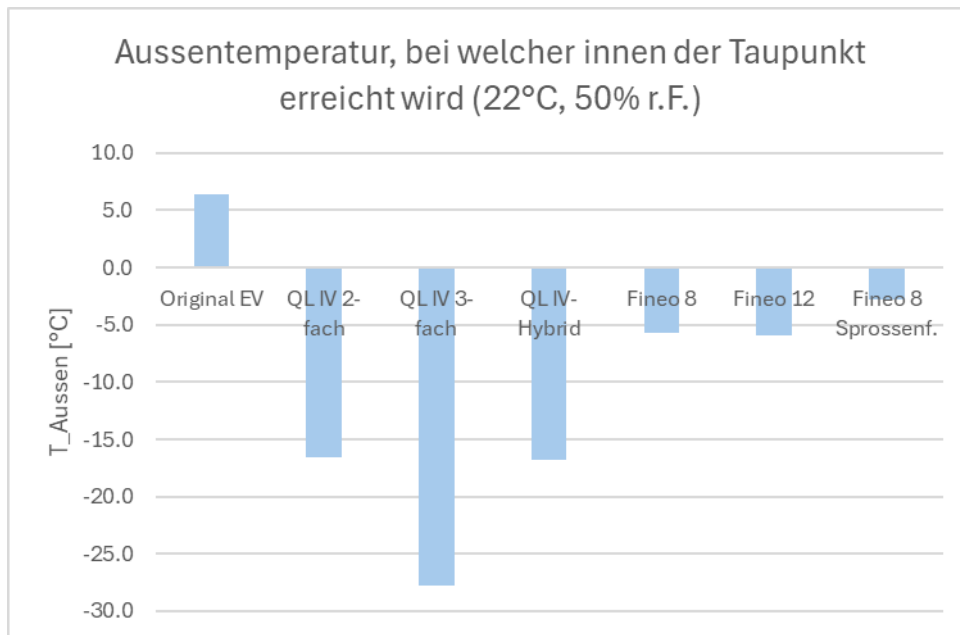


Abbildung 9: Wird innen eine Raumtemperatur von 22°C und 50% relative Luftfeuchtigkeit angenommen, so liegt der Taupunkt bei 11.1°C. Für diese Grafik wurde berechnet, bei welcher Aussentemperatur innen an der kältesten Stelle des Fensters die Taupunkttemperatur (11.1°C) erreicht wird.

Um die Abbildung 9 interpretieren zu können, muss das lokale Klima des Gebäudes berücksichtigt werden. Dazu wurden die Temperatur-Stundenwerte der Meteonorm-Daten (typisches Jahr) für verschiedene Städte ausgewertet:

- Basel (278 m ü. M.)
- Bern (543 m ü. M.)
- La Chaux-de-Fonds (992 m ü. M.)

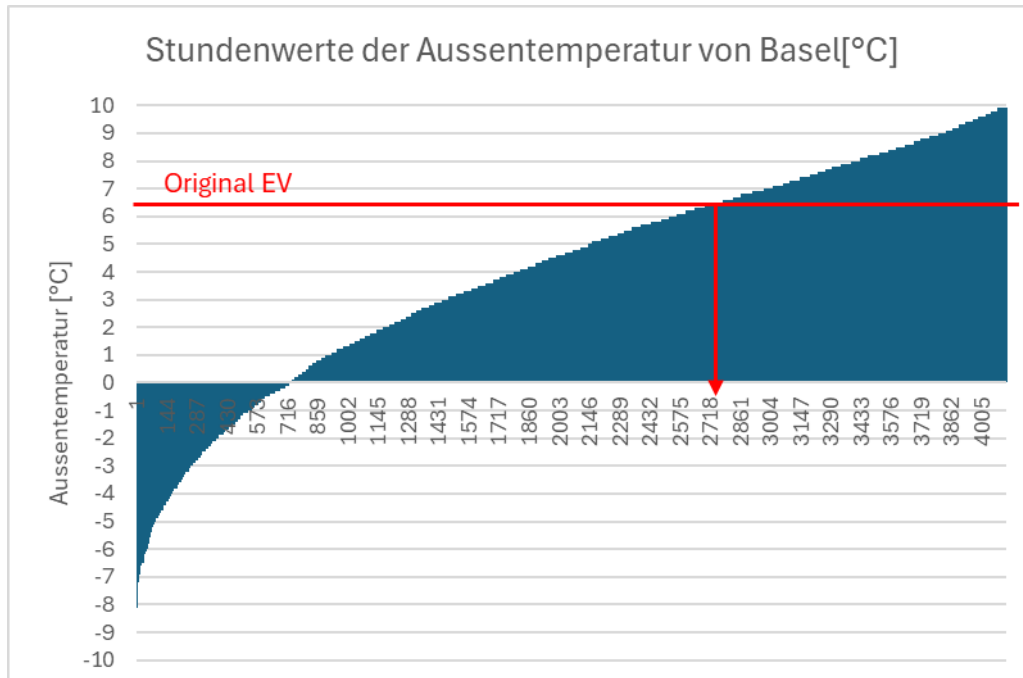


Abbildung 10: Auswertung der Klimadaten mit den Taupunkttemperaturberechnung. Dargestellt sind Stundenwerte der Temperatur aufsteigend sortiert.

Abbildung 10 zeigt exemplarisch, wie die zu erwartenden Stunden pro Jahr, für welche der Taupunkt erreicht oder unterschritten wird, ermittelt werden. Für das Original EV wird der Taupunkt bei einer Aussentemperatur von 6.4 °C erreicht. Somit wird dies in Basel während 2742 Stunden pro Jahr eintreten.

Da sich Schimmelpilze schon davor bilden, muss das Auftreten von Tauwasser während einiger Stunden pro Jahr als problematisch beurteilt werden.

Konfiguration	Original EV	QL IV 2-fach	QL IV 3- fach	QL IV- Hybrid	Fineo 8	Fineo 12	Fineo 8 Sprossenf.
T_Aussen [°C] @22°C & TP innen	6.4	-16.6	-27.8	-16.8	-5.7	-5.9	-2.8
Basel	2742	0	0	0	61	54	289
Bern	3424	0	0	0	194	179	534
La Chaux-de-Fonds	3820	0	0	0	404	374	901

Tabelle 4: Stunden pro Jahr, an denen die minimale Oberflächentemperaturen innen bei 22°C/ 50% rel. Feuchte die Taupunkttemperatur erreicht oder unterschreitet. Dabei ist zu beachten, dass Schimmelpilze bereits ab einer Feuchtigkeit von 70-80% wachsen. T_Aussen ist die kritische Umgebungs-Temperatur, bei der Innen am Fenster der Taupunkt erreicht wird.

Die Tabelle 4 zeigt, dass der Einsatz von Vakuumgläsern in den berechneten Konfigurationen und klimatischen Umfeldern nur als Hybridglas empfohlen werden kann.

3 Nachträgliche Abdichtung der Originalfenster

3.1 Wind- und Schlagregendichtigkeit

Die historischen Fenster wurden möglichst präzise und mit minimalen Spalten gefertigt, da keine elastischen Dichtungswerkstoffe verfügbar waren (vor ca. hundert Jahren konnten dementsprechend keine öffnbare, uneingeschränkt schlagregendichte Fenster hergestellt werden). Bei alten Bauten wurde mit grossen Vordächern und überstehenden Fensterstürzen bei den meisten Niederschlagsereignissen direkter Schlagregen auf das Fenster vermieden. Entsprechend gestaltete Kämpfer und Wetterschenkel verhindern Wassereintritt, sollte dennoch Regen auf die Fenster treffen. Für extreme Wetterereignisse reicht dies jedoch nicht aus. Zudem verschlechtert die Alterung des Fensters dessen Dichtigkeit weiter.



Abbildung 11: Typische Schadensbilder wetterseitig aufgrund von Wassereintritt bei Schlagregen

Gemäss Klimaprognosen ist in Zukunft mit deutlich häufigeren extremen Wetterereignissen zu rechnen – d.h. auch mit häufigerem Schlagregen auf den Fenstern.

3.2 Anspruch an eine Fensterrenovation

Ziele einer Fensterrenovation, bei der die Originalsubstanz erhalten werden soll, sind:

- Langfristiger Erhalt der historischen Bausubstanz,
- Zeitgemässer Schutz der Bewohnerinnen und Bewohner vor Umwelteinflüssen (Kälte, Hitze, Zugluft, eindringendem Wasser),
- Energetische Verbesserung des Gebäudes.

Das bedeutet, dass nicht nur wie bisher dargestellt Gläser ersetzt werden, sondern auch die Dichtigkeit der Fenster verbessert wird.

3.3 Zwei Dichtungsvarianten

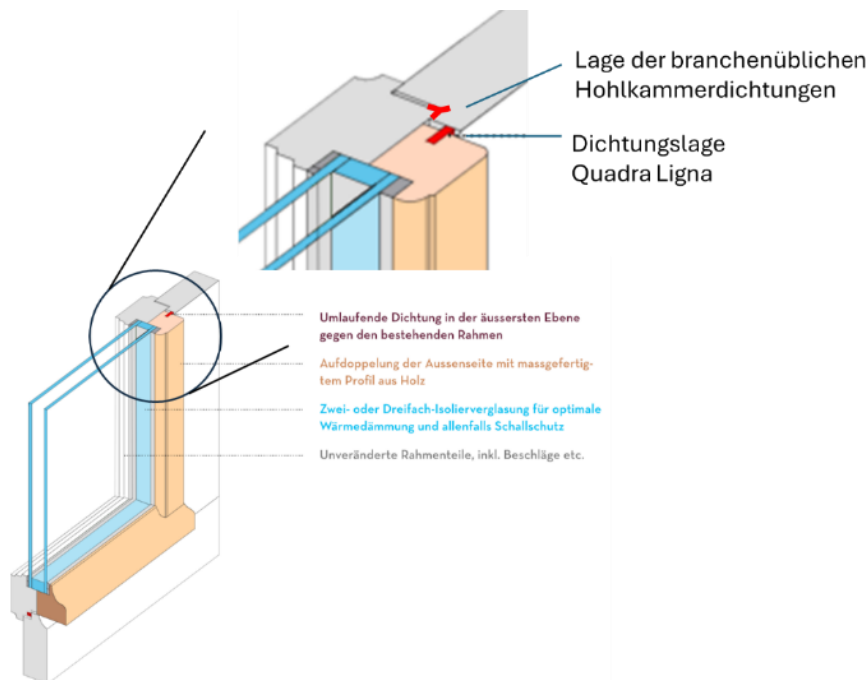


Abbildung 12: Mögliche/übliche Lagen von nachträglich eingebrachten Dichtungen.

Wenn bei der Sanierung nur ein Vakuumglas eingekittet wird, wird üblicherweise eine Hohlkammerdichtung eingegrast. Die so eingebrachte Hohlkammerdichtung verbessert die Schlagregendichtigkeit kaum, da sie eine Ebene zu tief liegt. D.h. Wasser, das an der Dichtung ankommt, läuft zwingend ins Gebäude.

Eine im aufgesetzten Holzprofil eingegrastete Dichtungsnut in Kombination mit einem definierten Spaltmass zum Rahmen erlaubt hingegen eine spannungsfreie Dichtungsplatzierung.

3.3.1 Hohlkammerdichtung im Falz

Originalfenster wurden möglichst präzise und mit minimalen Spalten gefertigt. Daraus folgt, dass für die einzubringende Hohlkammerdichtung wenig Raum zwischen Fensterflügel und Rahmen zur Verfügung steht. Die Konsequenzen sind schwer zu schliessende und beschädigte Fenster, sowie im Rahmen stehendes bzw. in das Gebäude eindringendes Wasser.

Beim Fensterflügel in Abbildung 13 ist nicht genügend Raum auf der Bandseite vorhanden, beim Schliessen des Flügels entstehen aufgrund der Hebel unkontrollierte Kräfte. Diese äussern sich darin, dass die Hohlkammerdichtung bei ausreichendem Druck plastisch verformt wird. Kurzfristig kann das zu Undichtigkeiten führen, langfristig ist mit einer nachhaltigen Schädigung der schützenswerten Fenster zu rechnen. Häufig zu beobachtende Schäden sind dabei gebrochene Rahmenfriese im Bereich der Verbindungsstellen, oder gespaltene Fensterrahmen beim eingelassenen Band.



Abbildung 13: Frisch saniertes Fenster. Bei diesem Fensterflügel ist nicht genügend Raum auf der Bandseite vorhanden. Beim Schliessen des Flügels entstehen aufgrund der Hebel unkontrollierte Kräfte. Diese führen zur Beschädigung der Hohlkammerdichtung sowie des Fensters.

Beim Fensterflügel in Abbildung 14 fehlt Raum für die Dichtung auf der Seite des Verschlusses. Die Konsequenz: Das Fenster lässt sich nur mit Mühe schliessen, indem deutlich über dem Fenstergriff das Fenster zgedrückt wird, so dass oben die Stange in die Fangklobe einfahren kann. Dies führt mittelfristig zur Beschädigung des Fensters.

Wird der Fenstergriff mit Gewalt gedreht, ohne dass das Fenster sauber zgedrückt wurde, so werden die Fangkloben verformt oder weggedrückt und das Fenster lässt sich gar nicht mehr korrekt verschliessen.

Nachträglich Dichtungen in bereits vorhandene Falze oder Spalten einzubauen empfehlen wir nicht, auch wenn es der branchenüblichen Lösung entspricht.



Abbildung 14: Bei diesem Fenster fehlt es auf der Seite des Verschlusses an Platz für die Dichtung. Die Konsequenz: Das Fenster lässt sich nur mit Mühe schliessen, indem deutlich über dem Fenstergriff das Fenster zgedrückt wird, so dass oben die Stange in die Fangklobe einfahren kann.

3.3.2 Umlaufende Dichtung zwischen Doppel und Rahmen

Bei der Herstellung des Doppels haben wir darauf geachtet, dass ein umlaufender Spalt mit konstanter Breite gegenüber dem bestehenden Rahmen gebildet wird, welchen die am Doppel fixierte Dichtung verschliesst (siehe Abbildung 15). Das erlaubt:

- gute Schlagregendichtigkeit,
- zuverlässige Abdichtung gegen Zugluft,
- geringe Schliesskräfte und dadurch höherer Bedienkomfort der Fenster,
- definierte und von aussen überprüfbare Einbausituation der Dichtung,
- sorgsamer Umgang mit der vorhandenen Bausubstanz (keine unkontrollierten Kräfte, kein in die Baustruktur eindringendes Wasser).

Die Lösung wurde von der Vorgängerfirma Fenrefo entwickelt und bewährt sich seit weit mehr als 40 Jahren. Gläser lassen sich nachträglich austauschen. Selbst wenn der Unterhalt wetterseitig über Jahrzehnte vernachlässigt wurde, konnten wir die Fenster ein weiteres Mal renovieren: das verwitterte Doppel wurde durch ein neues ersetzt und die Verglasung dem aktuellen Stand der Technik angepasst. Damit konnte gezeigt werden, dass die Methode robust und fehlertolerant ist. Somit leisten wir einen Beitrag zum Erhalt historischer Bausubstanz über mehrere Generationen.



Abbildung 15: Von aussen einsehbare und somit überprüfbare Lage der Dichtung im exakt hergestellten Dichtungsspalt zwischen bestehendem Festrahmen und neuem Doppel auf dem Fensterflügel.

4 Kosten

Für den hier gewählten Muster-Fensterflügel wurde ein Kostenvergleich aufgestellt (Tab. 5 & 6). Dabei wurden die Kosten im Verhältnis zur Zweifach-Isolationsverglasung bestimmt (Kostenbasis: Winter 2025).

Konfiguration	QL IV 2-fach	QL IV 3-fach	QL IV-Hybrid	Fineo 8	Fineo 8 Sprossenf.
Preis [%]	100%	212%	371%	235%	1353%

Tabelle 5: Relative Glaskosten für den hier betrachteten Fensterflügel. Der Vakuumglashersteller hat einen Mindestpreis, was sich in Bezug auf die Kosten für die 8 Einzelgläser in den Sprossenfelder sehr ungünstig auswirkt.

Konfiguration	QL IV 2-fach	QL IV 3-fach	QL IV-Hybrid	Fineo 8	Fineo 8 Sprossenf.
Preis [%]	100%	113%	130%	103%	224%

Tabelle 6: Gesamtkosten relativ für die verschiedenen Sanierungsvarianten.

Die Kostenbetrachtung zeigt, dass die Lösung mit dem Vakuumglas (Tabelle 6, Fineo 8) etwa gleich teuer ist wie die Lösung mit dem Zweifach-Isolierglas. D.h. die Mehrkosten für das Vakuumglas werden durch die geringeren Arbeitsaufwendungen kompensiert, da kein Doppel produziert werden muss.

5 Anhang: Modellbildung für die Gläser

5.1 Isolierglas

U-Wert Glas:

Der Wärmeleitwert der Füllung des Glaszwischenraumes wurde so gewählt, dass der U-Wert des Aufbaus dem Datenblatt von Vandaglas (Kapitel 8.2 respektive 8.3) entspricht. Flixo kann direkt eine U-Wert-Berechnung eines vorgegebenen Aufbaus unter Berücksichtigung der Randbedingungen ausgeben.

Randverbund:

Der Swisspacer Ultimate ist ein Abstandshalter, der thermisch sehr gut und in verschiedenen Farben verfügbar ist.

Es wurde ein TwoBox-Modell gewählt, wie es in der Branche Standard ist. Im Flixo ist das entsprechende Modell für den Swisspacer Ultimate bereits hinterlegt.

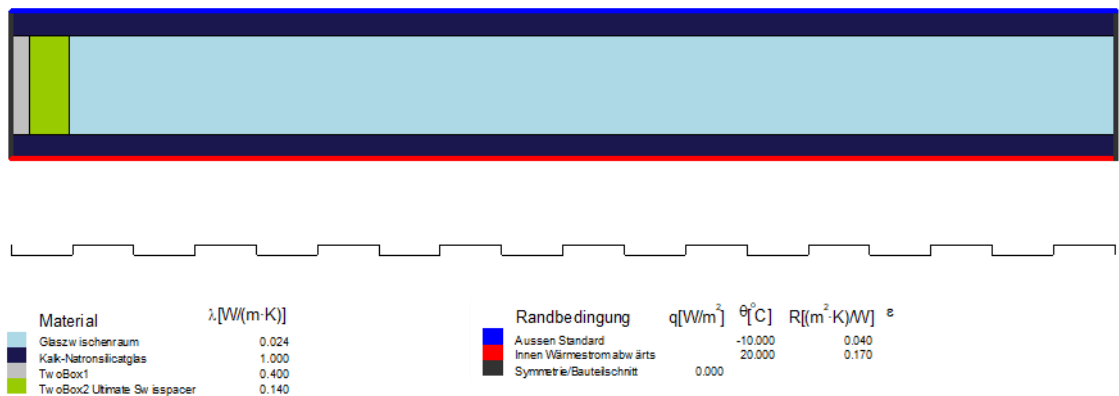


Abbildung 16: Modellierung des zweifach-Isolierglases mit allen Randbedingungen und Materialdaten.

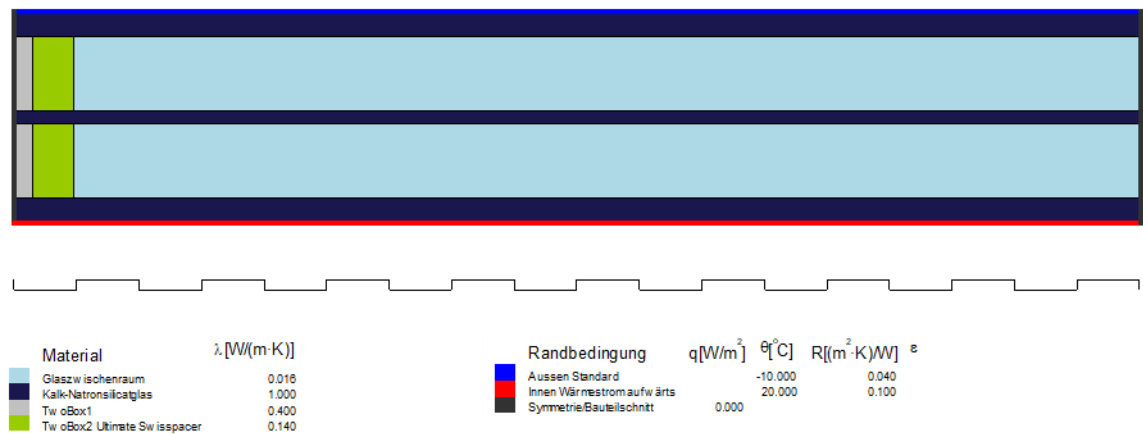


Abbildung 17: Modellierung des dreifach-Isolierglases mit allen Randbedingungen und Materialdaten.

5.2 Vakuumglas

U-Wert Glas:
Der Wärmeleitwert der Füllung des Glaszwischenraumes wurde so gewählt, dass der U-Wert des Aufbaus dem Datenblatt von AGC (Kapitel 8.4) entspricht. Flixo kann direkt eine U-Wert Berechnung eines vorgegebenen Aufbaus unter Berücksichtigung der Randbedingungen ausgeben.

Randverbund:
Der Randverbund wird mit 5 mm Glas modelliert (siehe Abbildung 18).

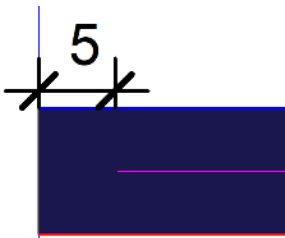


Abbildung 18: Modellierung des Randes des Vakuumglases. Der Abstand der Gläser beträgt 0.1 mm (pinke Linie), der Randverbund wird mit 5 mm Glas modelliert.

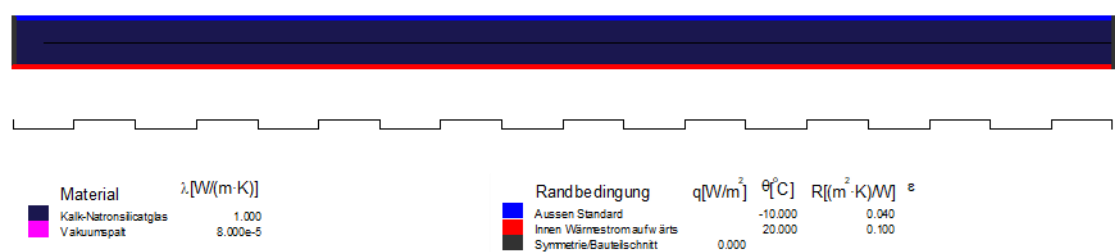


Abbildung 19: Modellierung des Vakuumglases mit allen Randbedingungen und Materialdaten.

5.3 Vakuumglas Hybrid

Beim Hybridglas wurde beim Zweifach-Glas das innere Glas durch ein Vakuumglas ersetzt und die Materialdaten des Glaszwischenraums so angepasst, dass der U-Wert den Angaben von AGC entspricht (siehe Kapitel 8.5).

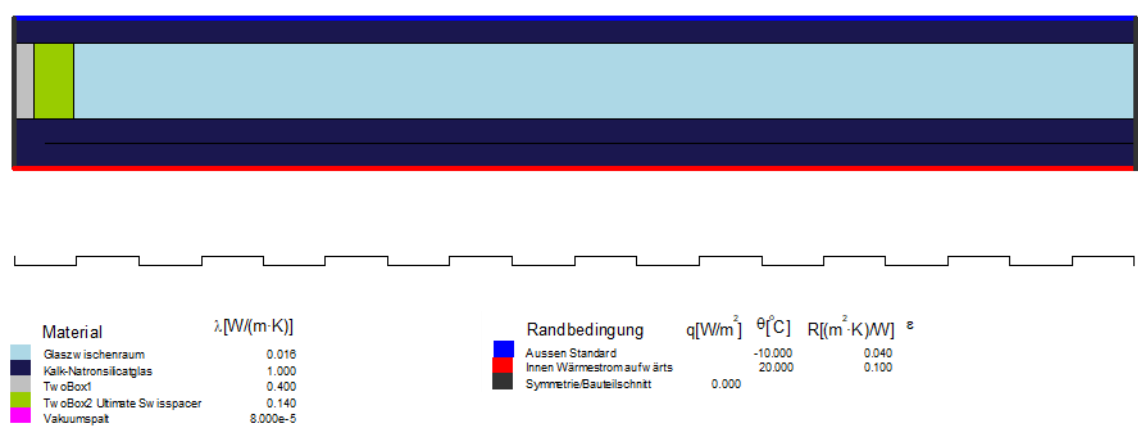


Abbildung 20: Modellierung des Vakuum-Hybrid-Glases mit allen Randbedingungen und Materialdaten.

6 Anhang:

Dokumentation der Berechnungen inklusive Randbedingungen

6.1 Original EV

Altes Fenster mit Eichenholzrahmen und Einfachverglasung

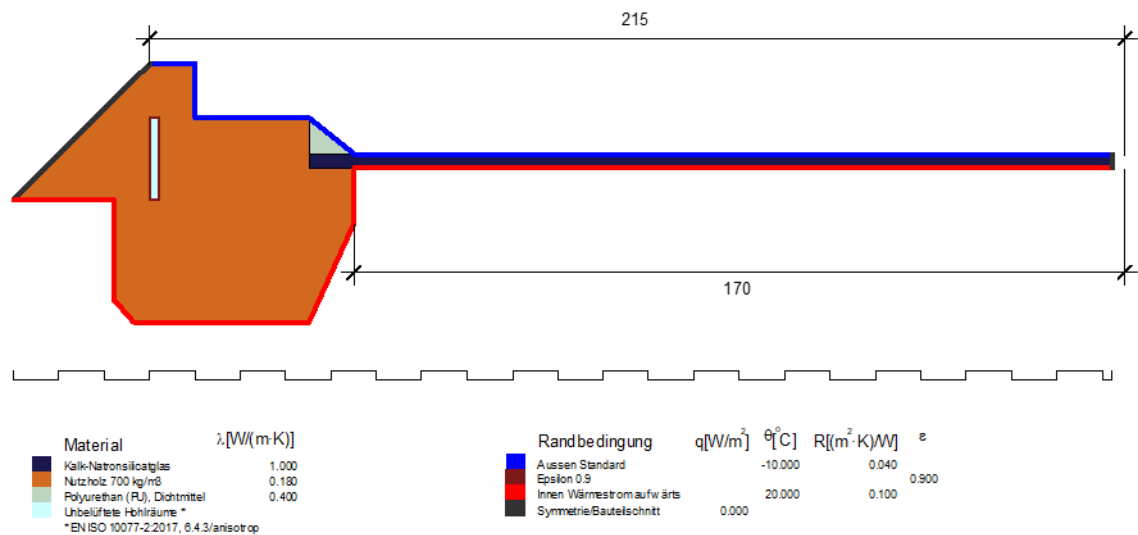


Abbildung 21: Original EV: Modellierung des Fensters mit allen Materialdaten und Randbedingungen.

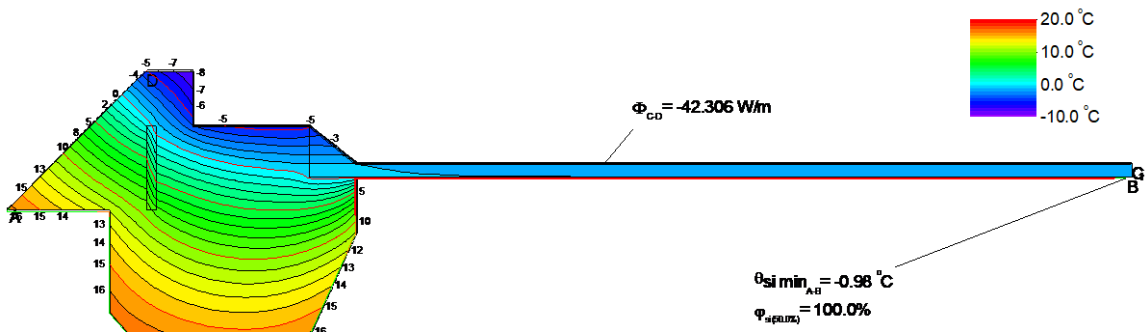


Abbildung 22: Original EV: Auswertung der Simulation mit der Minimaltemperatur A-B und des Energieflusses C-D.

6.2 QL IV Zweifach

Altes Fenster ausgestattet mit einer Zweifach-Isolierverglasung und aussenliegender Rahmenaufdopplung

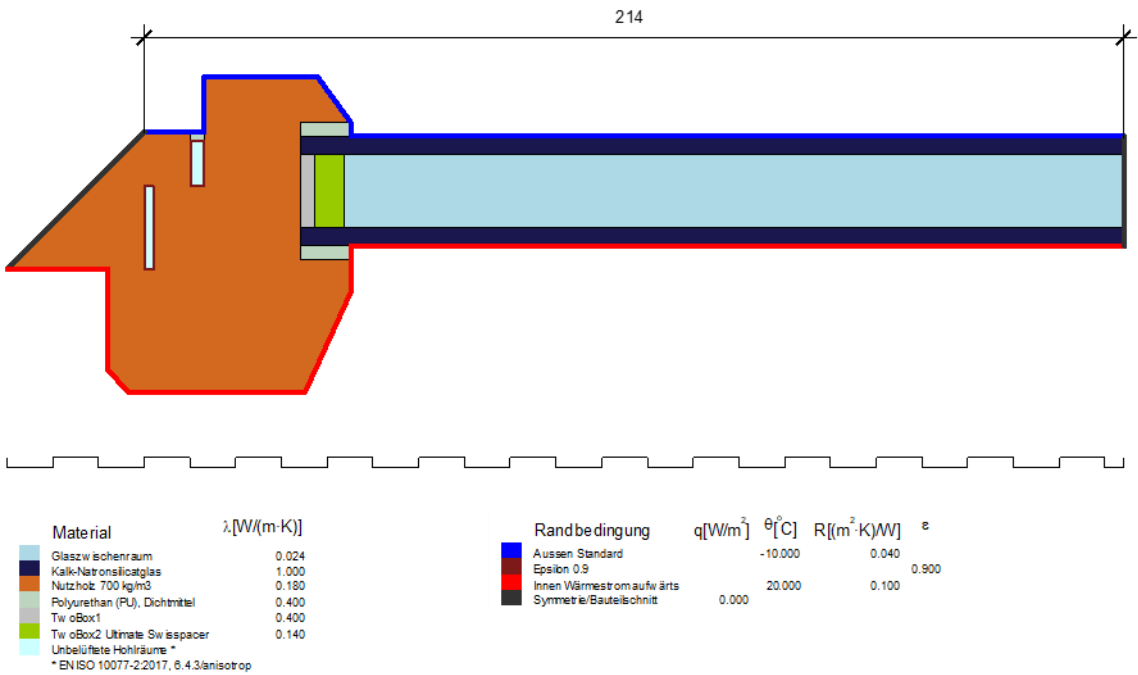


Abbildung 23: QL IV Zweifach: Modellierung des Fensters mit allen Materialdaten und Randbedingungen.

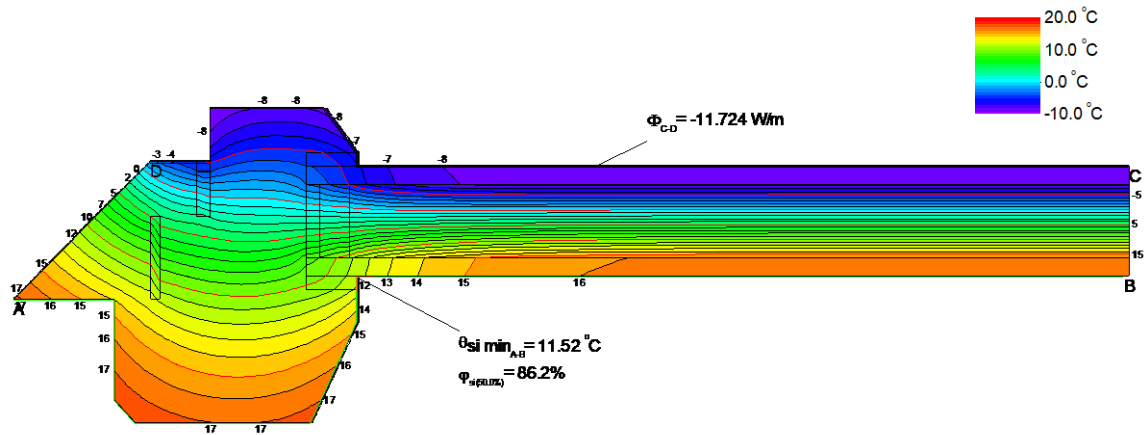


Abbildung 24: QL IV Zweifach: Auswertung der Simulation mit der Minimaltemperatur A-B und des Energieflusses C-D.

6.3 QL IV Dreifach

Altes Fenster ausgestattet mit einer Dreifach-Isolierverglasung und aussenliegender Rahmenaufdopplung

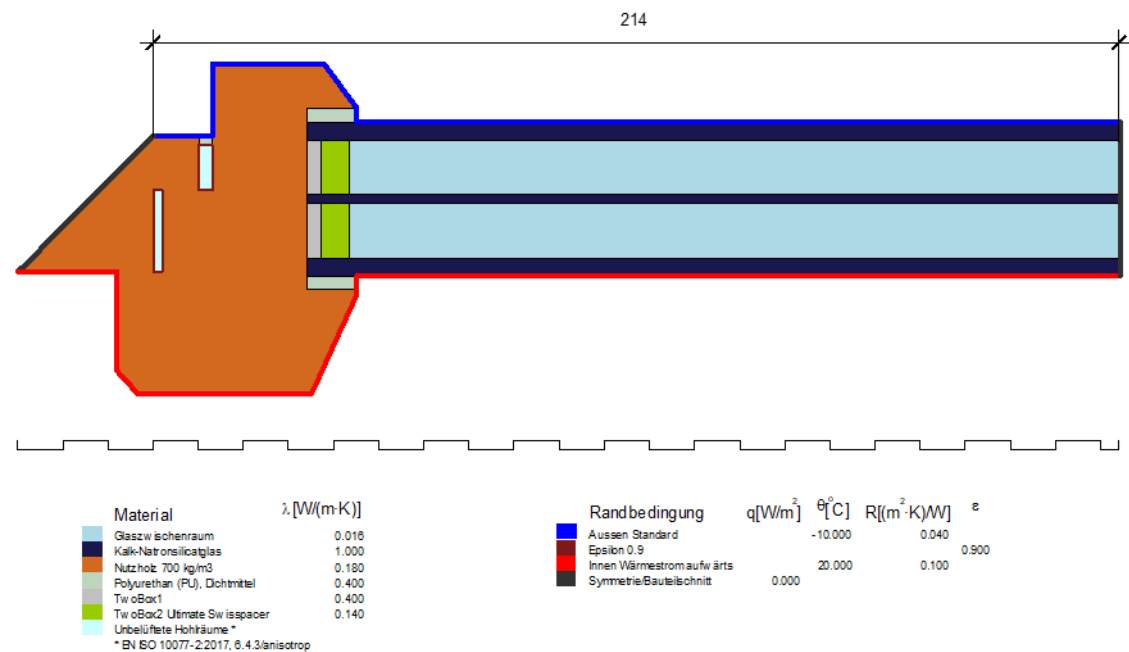


Abbildung 25: QL IV Dreifach: Modellierung des Fensters mit allen Materialdaten und Randbedingungen.

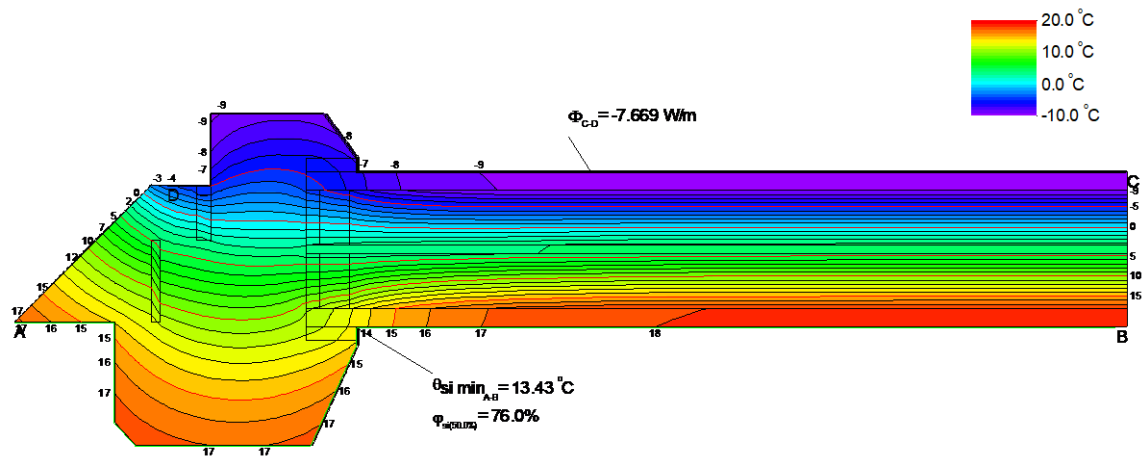


Abbildung 26: QL IV Dreifach: Auswertung der Simulation mit der Minimaltemperatur A-B und des Energieflusses C-D.

6.4 QL IV-Hybrid

Altes Fenster mit einer Zweifach-Isolierverglasung, wobei ein Glas ein Fineo-Vakuumglas ist, und einer aussenliegenden Rahmenaufdopplung

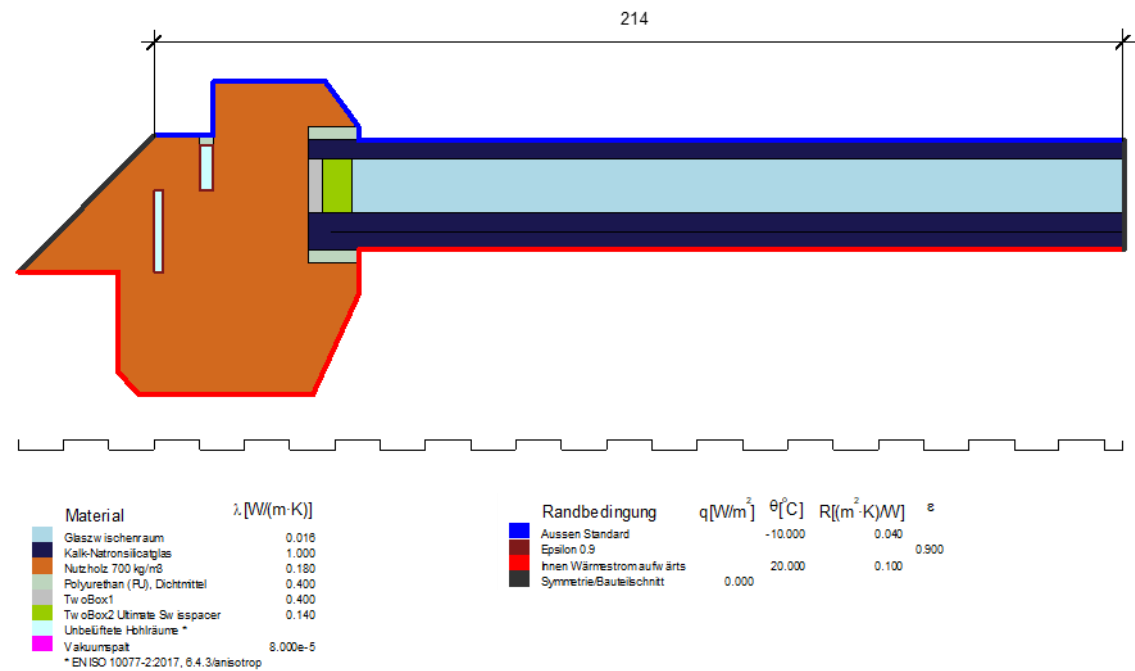


Abbildung 27: QL IV-Hybrid: Modellierung des Fensters mit allen Materialdaten und Randbedingungen.

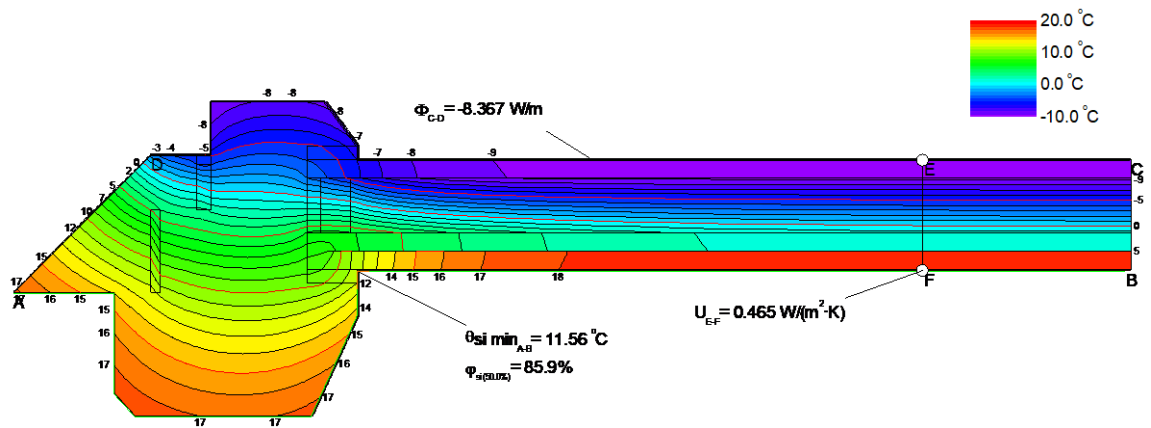


Abbildung 28: QL IV-Hybrid: Auswertung der Simulation mit der Minimaltemperatur A-B und des Energieflusses C-D.

6.5 Fineo 8

Altes Fenster mit einem vollflächigen 8-mm Fineo-Vakuumglas eingekittet.

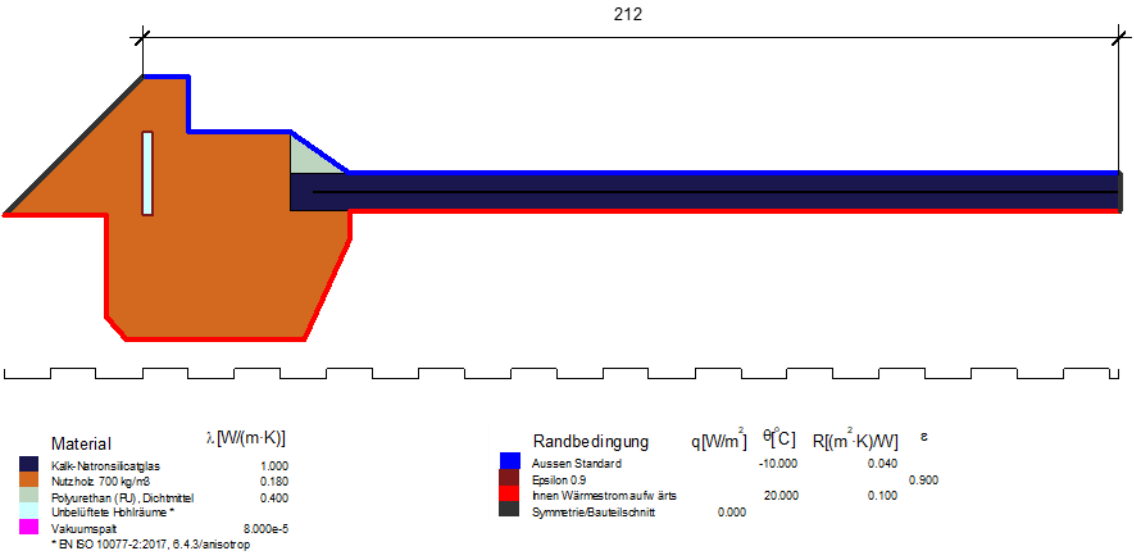


Abbildung 29: Fineo 8: Modellierung des Fensters mit allen Materialdaten und Randbedingungen.

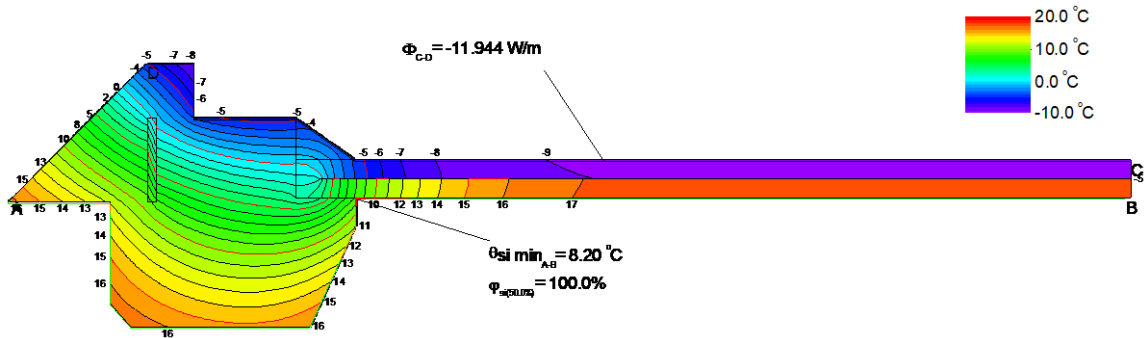


Abbildung 30: Fineo 8: Auswertung der Simulation mit der Minimaltemperatur A-B und des Energieflusses C-D.

6.6 Fineo 12

Altes Fenster mit einem vollflächigen 12-mm Fineo-Vakuumglas eingekittet.

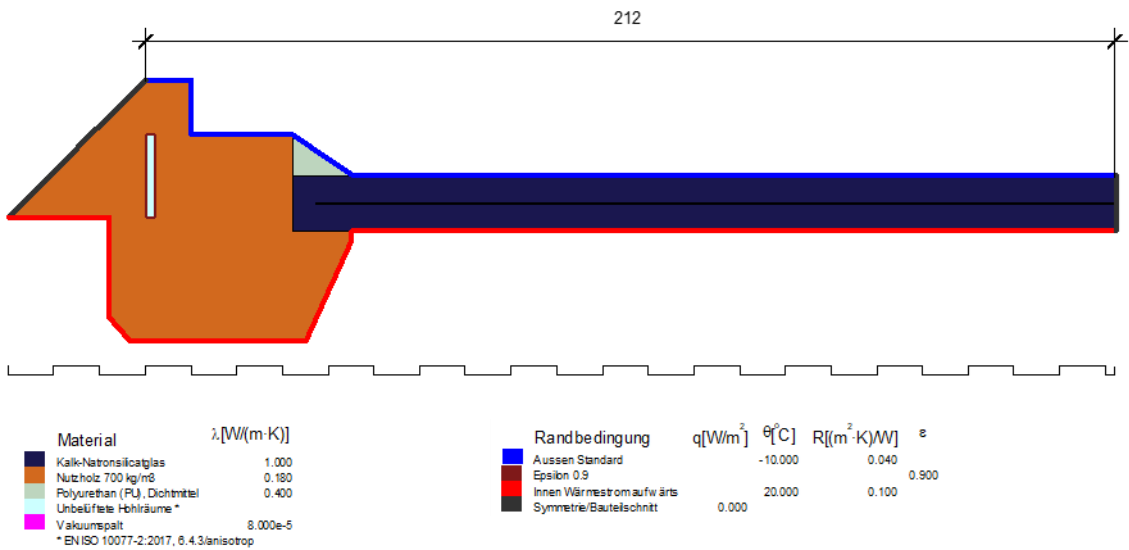


Abbildung 31: Fineo 12: Modellierung des Fensters mit allen Materialdaten und Randbedingungen.

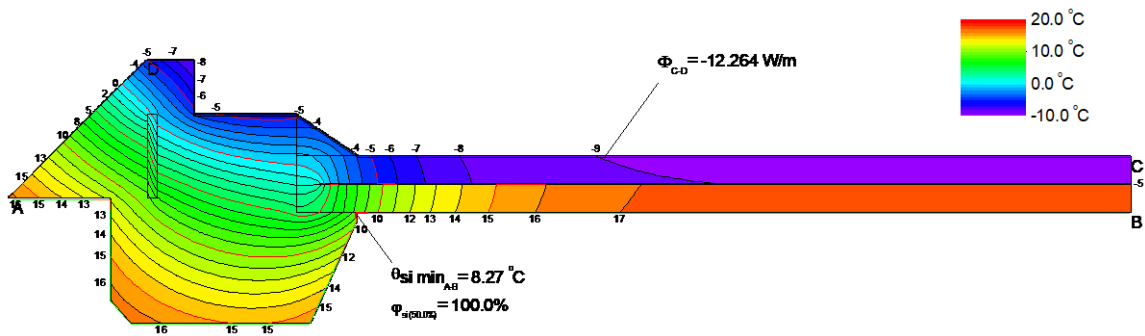


Abbildung 32: Fineo 12: Auswertung der Simulation mit der Minimaltemperatur A-B und des Energieflusses C-D.

6.7 Fineo 8 Sprossenfelder

Altes Fenster mit 8-mm Fineo-Vakuuml ser in Sprossenfelder eingekittet.

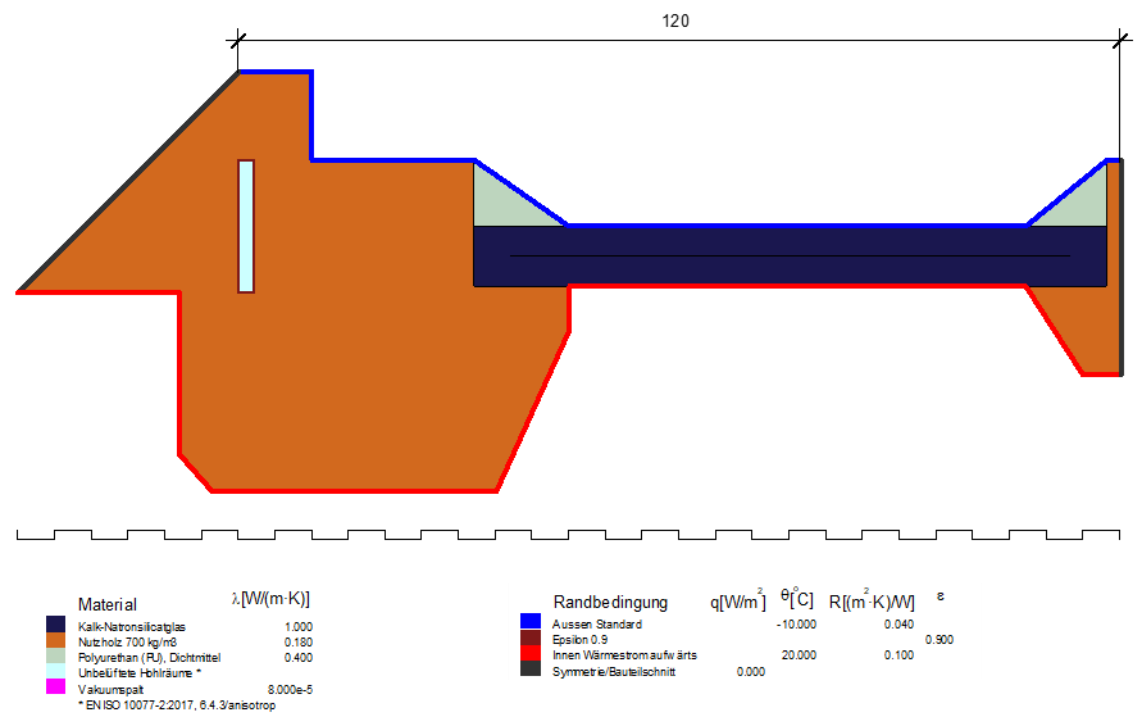


Abbildung 33: Fineo 8 Sprossenf.: Modellierung des Fensters mit allen Materialdaten und Randbedingungen.

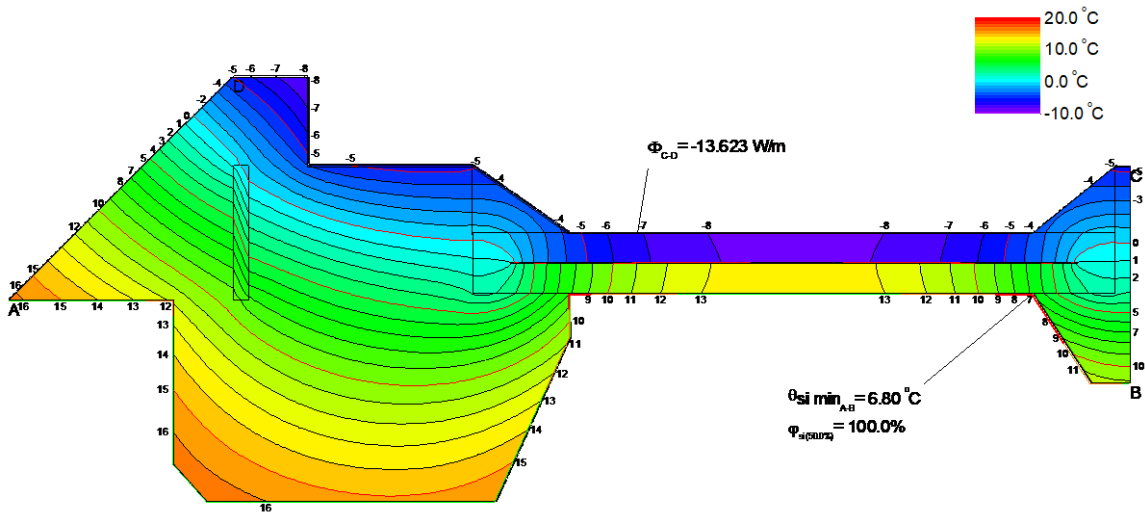


Abbildung 34: Fineo 8 Sprossenf.: Auswertung der Simulation mit der Minimaltemperatur A-B und des Energieflusses C-D.

7 Anhang: Meteonorm-Stundenwerte

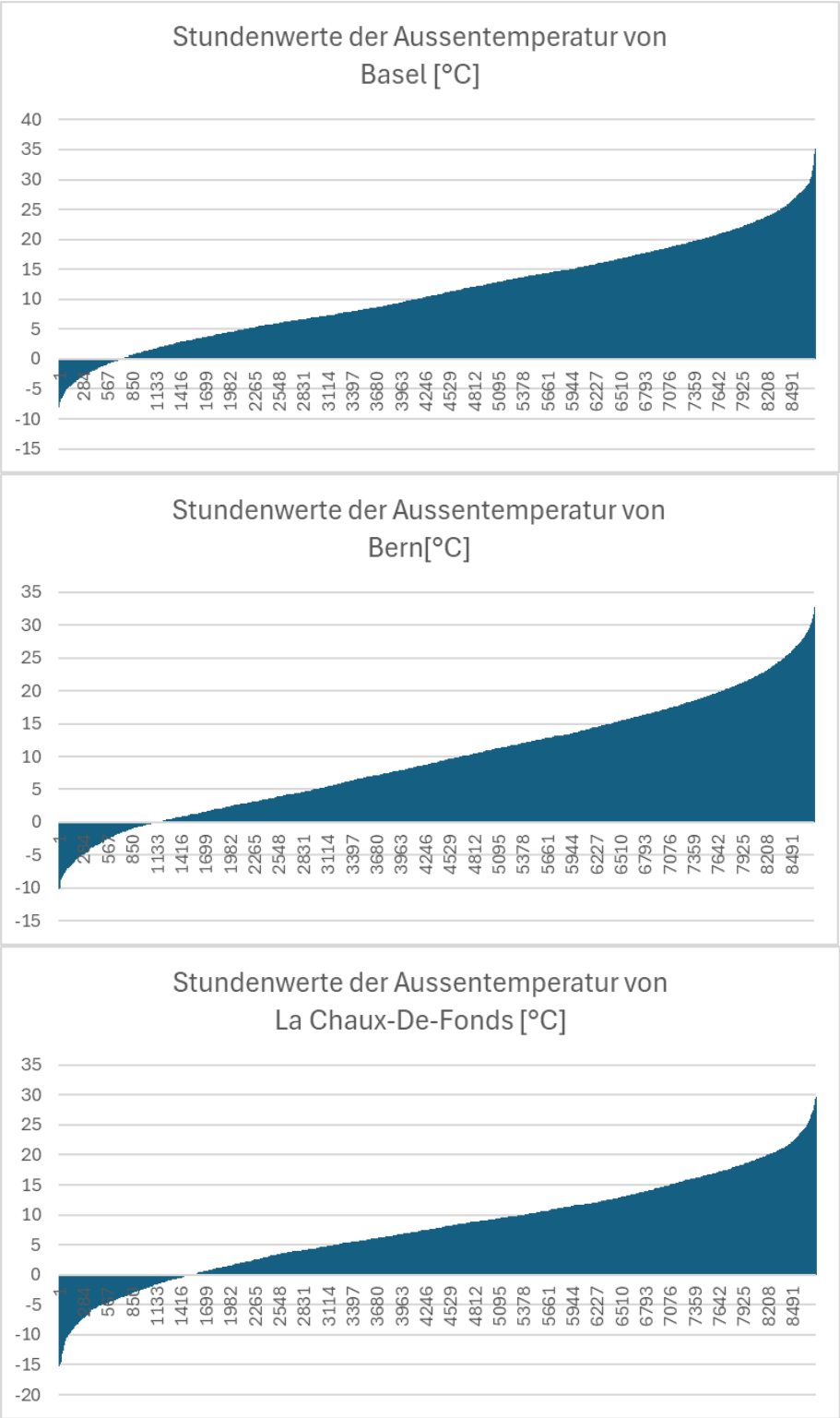


Abbildung 35: Stundenwerte der Aussentemperatur aufsteigend sortiert. X-Achsen beschriftet

8 Anhang: Datenblätter der Verglasungen

8.1 Grundlagen für den Swisspacer Advance

August 2014 – Nr. W24 – Änderungsindex 4-06/2021 – gültig bis zum 30.6.2023

ARBEITSKREIS 'WARME KANTE'





Datenblatt Psi-Werte Fenster

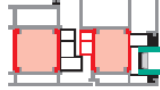





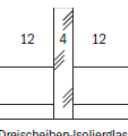
auf Basis messtechnischer Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit der Abstandhalter

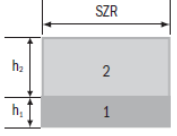
SWISSPACER

Vetrotech Saint-Gobain (International) AG
Zweigniederlassung Kreuzlingen
Sonnenwiesenstrasse 15
CH-8280 Kreuzlingen

SWISSPACER

Profil- beschreibung	Produktname	Abstandhalter Bauhöhe in mm	Material	Dicke d in mm
 		6,5	Thermisch verbesserte Aluminiumfolie / SAN-GF	~0,02
		Profilkategorie C		1,0

	Repräsentative Glasaufbauten	Metall mit thermischer Trennung	Kunststoff	Holz	Holz/Metall
Repräsentative Rahmenprofile					
Repräsentativer Psi-Wert Zweischaliges Wärmehalter W/mK	 Zweischaliges-Isolierglas $U_g=1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,047	0,039	0,039	0,042
Repräsentativer Psi-Wert Dreischaliges Wärmehalter W/mK	 Dreischaliges-Isolierglas $U_g=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$	0,042	0,037	0,037	0,040

Two Box Modell Kennwerte		Scheibenzwischenraum (SZR) in mm		$\lambda_{eq,2B}$ in W/mK	
				Box 1 · $h_1 = 3 \text{ mm}$	Box 2 · $h_2 = 6,5 \text{ mm}$
		Für alle SZR verwendbar		0,40	0,29

Erläuterungen

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit wurde nach der ift-Richtlinie WA-17/1 "Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter – Ermittlung der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit durch Messung" ermittelt. Die damit berechneten repräsentativen linearen Wärmedurchgangskoeffizienten (repräsentative Psi-Werte) gelten für typische Rahmenprofile und Verglasungen für die Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U_w) von Fenstern. Sie wurden unter den in der ift-Richtlinie WA-08/3 „Wärmetechnisch verbesserte Abstandhalter – Teil 1: Ermittlung des repräsentativen Psi-Wertes für Fensterrahmenprofile“ festgelegten Rahmenbedingungen (Rahmenprofile, Verglasung, Glaseinstand, Rückenüberdeckung, Primär- und Sekundärdichtstoff) ermittelt. Diese Richtlinie regelt auch den Gültigkeitsbereich und die Anwendung der repräsentativen Psi-Werte. Zur Vermeidung von Rundungsfehlern wurden die Psi-Werte im Datenblatt auf 0,001 W/mK angegeben. Das Verfahren zur rechnerischen Bestimmung der Psi-Werte hat eine Genauigkeit von $\pm 0,003 \text{ W/mK}$. Unterschiede von weniger als 0,005 W/mK sind nicht signifikant. Weitere Informationen sind dem Merkblatt 004/2008 "Kompass Warme Kante" des Bundesverband Flachglas zu entnehmen.

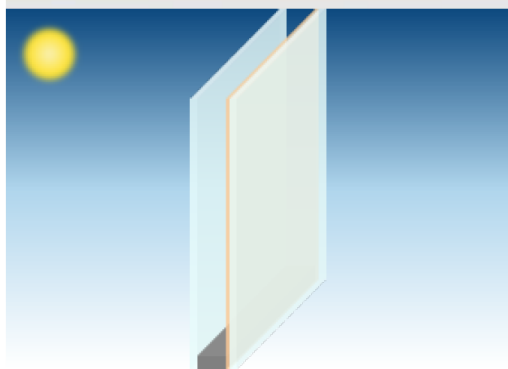
Ermittlung der Kennwerte durch:



8.2 Zweifach-Verglasung



Calumen III 1.29
Donnerstag, 6. Februar 2025



Verglasung 1	PLANICLEAR (4 mm) Annealed : Float
SZR 1	ARGON (90%) / AIR (10%) / 16 mm
Verglasung 2	ECLAZ PLANICLEAR (4 mm) Annealed : Float

Quadra Ligna V5

vandaglas AG
Leiter Anwendungstechnik
Achim Baum
Sonnenwiesenstrasse 15
8280 Kreuzlingen
Schweiz
+41 71 686 9292 +41 79 772 03 84
achim.baum@vandaglas.ch



LICHTTECHNISCHE DATEN CIE015:2018

Lichttransmission (TL %)	83.4 %
Außenreflexion (RLe%)	11.6 %
Innen (RLi%)	11.5 %



SONNENSCHUTZFAKTOREN EN410:2011

g-Wert	0.7063
Shading Coefficient (SC)	0.8118



FARBWIEDERGABE CIE015:2018

Transmission (Ra)	98.8
Reflexion (Ra)	96.0



EINBRUCHHEMMUNG EN356:1999

Ergebnis: NPD



CO2-FUßABDRUCK EN15804:2012+A2:2019

Erderwärmungspotenzial 'GWP' 33 Kg(CO2)/m² (A1-A3)



ENERGETISCHE DATEN EN410:2011

Transmission (Te)	63.8 %
Reflexion (Ree)	22.2 %
Innen (Rei)	22.2 %
Absorption (EA 1)	6.3 %
Absorption (EA 2)	7.6 %



WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENT EN673:2011

Ug 1.120 W/m².K
0° auf vertikale Position bezogen



FERTIGUNGSGRÖßE

Nennstärke	24.0 mm
Gewicht	20.0 kg/m²



WIDERSTAND PENDELSCHLAG EN12600:2002

Ergebnis: NPD



AKUSTIK EN12758:2019

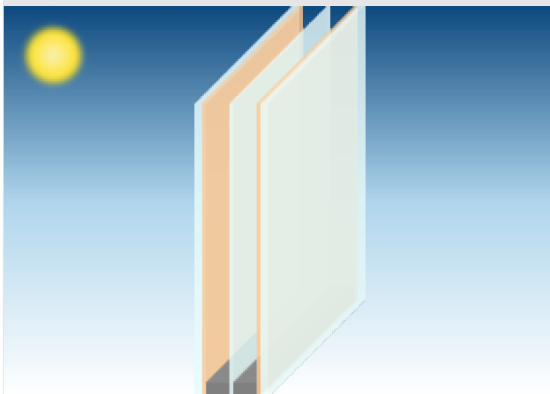
Schallwerte nach EN 12758 von Rw(C;Ctr) = 31(-1;-4) dB einer notifizierten Stelle -

OITC (ASTM E1332)	N/A
STC (ASTM E413)	N/A

8.3 Dreifach-Verglasung



Calumen III 1.29
Donnerstag, 6. Februar 2025



Verglasung 1	PLANICLEAR (4 mm) Annealed : Float ECLAZ
SZR 1	AIR (10%) / ARGON (45%) / KRYPTON (45%) / 12 mm
Verglasung 2	PLANICLEAR (2 mm) Annealed : Float
SZR 2	AIR (10%) / ARGON (45%) / KRYPTON (45%) / 12 mm
Verglasung 3	ECLAZ PLANICLEAR (4 mm) Annealed : Float

Quadra Ligna V6

vandaglas AG
Leiter Anwendungstechnik
Achim Baum
Sonnenwiesenstrasse 15
8280 Kreuzlingen
Schweiz
+41 71 686 9292
achim.baum@vandaglas.ch

SZR n ° 1: benutzerdefinierter Gas-Mix verwendet
SZR n ° 2: benutzerdefinierter Gas-Mix verwendet

LICHTTECHNISCHE DATEN CIE015:2018

Lichttransmission (TL %)	77.4 %
Außenreflexion (RLe%)	14.4 %
Innen (RLi%)	14.4 %

SONNENSCHUTZFAKTOREN EN410:2011

g-Wert	0.6028
Shading Coefficient (SC)	0.6928

FARBWIEDERGABE CIE015:2018

Transmission (Ra)	98.3
Reflexion (Ra)	93.9

EINBRUCHHEMMUNG EN356:1999

Ergebnis: NPD

CO2-FUßABDRUCK EN15804:2012+A2:2019

Erderwärmungspotenzial 'GWP' 45 Kg(CO2)/m²
(A1-A3)

ENERGETISCHE DATEN EN410:2011

Transmission (Te)	53.9 %
Reflexion (Ree)	26.6 %
Innen (Rei)	26.6 %
Absorption (EA 1)	11.9 %
Absorption (EA 2)	2 %
Absorption (EA 3)	5.6 %

WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENT EN673:2011

Ug 0.605 W/m².K
0° auf vertikale Position bezogen

FERTIGUNGSGRÖßE

Nennstärke	34.0 mm
Gewicht	25.0 kg/m²

WIDERSTAND PENDELSCHLAG EN12600:2002


Ergebnis: NPD

AKUSTIK EN12758:2019

-	Rw(...) nicht verfügbar
OITC (ASTM E1332)	N/A
STC (ASTM E413)	N/A


8.4 Vakuumglas (Fineo AGC)

LICHT- UND ENERGIEEFFIZIENZ⁽²⁾

	Gesamtdicke [mm]	EN 410				EN 673
		LT [%]	LR ext [%]	LR int [%]	g [-]	Ug [W/ (m².K)]
FINEO 6	6,7	80	14	14	0,62	0,7
FINEO 8	7,7	79	14	14	0,61	
FINEO 10	9,7	79	14	14	0,60	
FINEO 12	11,7	78	14	14	0,60	

8.5 Vakuumglas (Fineo AGC) als Hybrid

LICHT- UND ENERGIEEFFIZIENZ⁽²⁾ (ausgewählte Kombinationen)

	Gesamt- dicke [mm]	EN 410				EN 673
		LT [%]	LR ext [%]	LR int [%]	g [-]	Ug [W/ (m².K)]
FINEO Hybrid 6mm 1.0 / 10mm 90% Ar / FINEO 10	25,7	66,4	20,0	19,6	42,6	0,47
FINEO Hybrid 8mm 1.0 / 10mm 90% Ar / FINEO 10	27,7	65,8	19,7	19,6	41,9	0,47
FINEO Hybrid 8mm 1.0 / 12mm 90% Ar / FINEO 10	29,7	65,8	19,7	19,6	42	0,47
FINEO Hybrid 8mm 1.0 / 15mm 90% Ar / FINEO 10	32,7	65,8	19,7	19,6	42,2	0,47
FINEO Hybrid 8mm V72 / 10mm 90% Ar / FINEO 10	27,7	62,3	16,5	19,2	33,1	0,47