

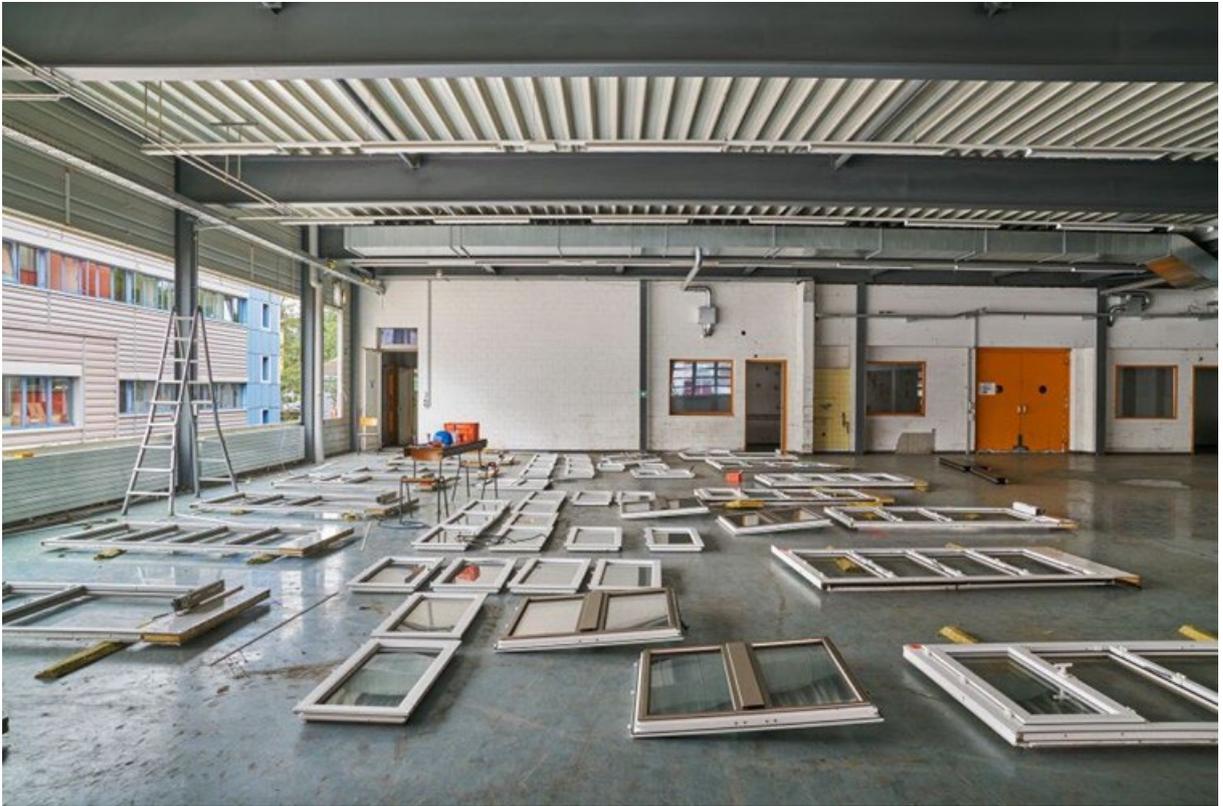


Schlussbericht vom 31.03.2025

---

## FenSanReuse

# Sanierungsverfahren und Re-Use von Fenstern – Materialpass und Wegleitung



Quelle: Baubüro in situ, Martin Zeller



**n|w** Fachhochschule Nordwestschweiz  
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik

**ZIRKULAR**



**Datum: 31.03.2025**

**Ort: Muttenz**

**Versionen**

Version 1.0 31.03.2025

Version 1.1 13.06.2025

- Anpassung Tabelle 11

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE, Sektion Energieforschung und Cleantech, CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Co-Finanzierung:**

ABZ Allgemeine Baugenossenschaft Zürich, Sabine Merz, Isabelle Meister  
F. Hoffmann-La Roche Ltd., Basel, Dirk Strohecker  
Kanton Basel-Stadt, Städtebau, Architektur, Sabine Schärer,  
Kanton Basel-Stadt, Amt für Umwelt und Energie, Bastian Burger, Kenjagul Isabaeva  
Bis 2023 Glassolutions Valerian Wicky, Achim Baum  
Ab 2024 Vandaglas AG Kreuzlingen, Achim Baum, Nils Fiedler  
4B Fenster, Hochdorf, Mike Vogt, Pirmin Odermatt, Jürgen Scandone (bis 2023)

**BFE-Projektbegleitung:**

Nadège Vetterli, Anex Ingenieure AG (2022-2023)  
Martin Ménard, Low-Tech Lab, Zürich (2023-2025)  
Andreas Eckmanns, Bundesamt für Energie (2022-2025)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502547-01



### **Subventionsempfänger/innen**

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau INEB  
Hofackerstrasse 30, 4132 Muttenz, [www.fhnw.ch/ineb](http://www.fhnw.ch/ineb)  
Zirkular GmbH, Dornacherstrasse 192, 4053 Basel, [www.zirkular.net](http://www.zirkular.net)

### **Projektteam**

Prof. Barbara Sintzel, INEB, FHNW, [barbara.sintzel@fhnw.ch](mailto:barbara.sintzel@fhnw.ch) Co-Leitung  
Gregor Steinke, INEB, FHNW, [gregor.steinke@fhnw.ch](mailto:gregor.steinke@fhnw.ch) Co-Leitung  
Kerstin Müller, Zirkular GmbH  
Basil Rudolf, Zirkular GmbH  
Prof. Achim Geissler, INEB, FHNW  
Prof. Roger Blaser, INEB, FHNW  
Christoph Sibold, INEB, FHNW  
Christoph Messmer, INEB, FHNW  
Joël Bender, INEB, FHNW  
Samuel Held, INEB, FHNW

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist das Projektteam verantwortlich.

### **Haftungsausschluss**

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen basieren auf den zum Zeitpunkt der Erstellung verfügbaren Daten und Methoden. Trotz sorgfältiger Prüfung können keine Garantien für die vollständige Richtigkeit übernommen werden. Die Autoren übernehmen keine Haftung für etwaige Folgen, die aus der Nutzung der hier präsentierten Informationen resultieren.



# Zusammenfassung

## Sanierungsverfahren und Re-Use von Fenstern – Materialpass und Wegleitung (FenSanReSe)

### 1. Ausgangslage

Der Gebäudesektor trägt wesentlich zu den globalen Treibhausgasemissionen bei, wobei Fenster eine zentrale Rolle für die Energieeffizienz von Bauwerken spielen. Die energetische Qualität der Fenster beeinflusst massgeblich die Transmissionswärmeverluste sowie die Lüftungswärmeverluste durch Undichtigkeiten. Zudem haben Fenster einen signifikanten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit in Innenräumen.

Im Jahr 2023 wurden in der Schweiz gemäss Branchenradar Fenster rund 1.74 Millionen neue Fenster verkauft, davon wurden etwa 2/3 als Fensterersatz eingesetzt [1]. Die Herstellung neuer Fenster ist mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Dies resultiert insbesondere aus der Flachglasproduktion mit Prozesstemperaturen von circa 1600 °C, sowie der Herstellung der Rahmenkomponenten. Nach einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 30 Jahren werden Fenster üblicherweise ausgetauscht, da sie nicht mehr den aktuellen Anforderungen entsprechen. Dieser regelmässige Fensterersatz führt zu einem erheblichen Ressourcenverbrauch und bindet signifikante Mengen grauer Energie und indirekten Treibhausgasemissionen.

So werden für die Erstellung eines Standard-Kunststofffensters (1.15m x 1.55 m) rund 260 kg CO<sub>2</sub>-eq. emittiert. Bei grösseren Fenstern resp. Fenstern mit Spezialverglasung können bei der Herstellung eines Fensters bis zu 1 t CO<sub>2</sub>-eq. anfallen. Die Angaben der CO<sub>2</sub> Emissionen im Bericht werden jeweils für ein Jahr angegeben, damit sie mit den Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb verglichen werden können.

### 2. Ziele

Im Rahmen des Projekts «Sanierungsverfahren und Re-Use von Fenstern – Materialpass und Wegleitung» (FenSanReSe) wird ganzheitlich untersucht, welche Möglichkeiten es gibt, Fenster mit einfachen und wirkungsvollen Massnahmen energetisch zu ertüchtigen und wann ein Fensterersatz besser ist. Es werden mögliche Ertüchtigungsverfahren hinsichtlich Energieeffizienz, grauer Energie, indirekten Treibhausgasemissionen, Wirtschaftlichkeit und Kreislauffähigkeit untersucht. Anhand von fünf Testgebäuden werden Fenster untersucht und Ertüchtigungsvarianten vorgeschlagen. Ausserdem wird eine Wegleitung und ein Materialpass entwickelt.

Das Forschungsprojekt konzentriert sich auf die energetische Ertüchtigung und Wiederverwendung von Fenstern in Öffnungen von Aussenwänden. Der Fokus liegt auf Standardfenstern aus dem Zeitraum ab den 1960er Jahre, die mit Zwei- oder Dreifach-Isolierverglasung oder Wärmeschutzverglasung ausgestattet sind. Es werden Fenster mit Holz-, Holz-Metall-, Kunststoff- oder Metallrahmen betrachtet, die typischerweise in Wohngebäuden, Bürogebäuden und Schulen eingesetzt wurden.

### 3. Fenster: Recherchen und Berechnungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zahlreiche Fenstertypen erfasst und systematisch ausgewertet. Durch die systematische Datenauswertung kann eine Übersicht über die Energieeffizienz der Bestandsfenster erstellt werden. Die grafischen Auswertungen in Kapitel 3 helfen, auf Grund der Art und des Alters von Fensterkomponenten Aussagen zu möglichen U-Werten von Verglasung und Rahmen zu machen und damit den ursprünglichen U-Wert des Fensters einzugrenzen.

Aus Sicht der Ressourcenverfügbarkeit gilt vor allem Flachglas eine erhöhte Aufmerksamkeit, da der Quarzsand in seiner hohen Qualität nur begrenzt verfügbar ist. Gleichzeitig führen die zunehmenden



Sicherheits- und Schallschutzstandards dazu, dass die Glasdicken zunehmen und die Fenster schwerer werden, was die Ressourcensituation weiter verschärft. Bei den Fensterrahmen schneiden Fenster aus Holz bezüglich indirekter Treibhausgasemissionen besonders gut ab. Sie können auch gut repariert werden. Obwohl es möglich wäre, Fenster in Einzelteile zu zerlegen und zu entsorgen, werden Fenster und Flachglas oft deponiert. Das Recyclen von Fenstern ist in der Schweiz noch nicht üblich, jedoch gibt es Firmen wie beispielsweise Velux oder 4B Fenster, die beim Fensterersatz auch die ausgebauten Fenster zurücknehmen. Bei PVC-Fenstern gibt es ein Sammelsystem mit dem Ziel, PVC im Kreislauf zu halten [2]. Es wäre auf Grund der hohen indirekten Treibhausgasemissionen der Herstellung wie auch betreffend Ressourcenschonung wichtig, die Lebensdauer von Fenstern zu verlängern und die Wiederverwendung (Re-Use) von Fenstern in der Schweiz stark auszubauen.

#### 4. Ertüchtigungsstrategien

Auf Grund von bereits realisierten Beispielen werden folgende Ertüchtigungsstrategien von Fenstern näher untersucht: Einfache Ertüchtigung (V0), Glasaufdopplung (V1), Glasersatz (V2) mit Flachglas, mit Dünnschichtglas oder mit Vakuum-Hybridglas, Renovationsfenster (V3) und Fensterersatz (V4).

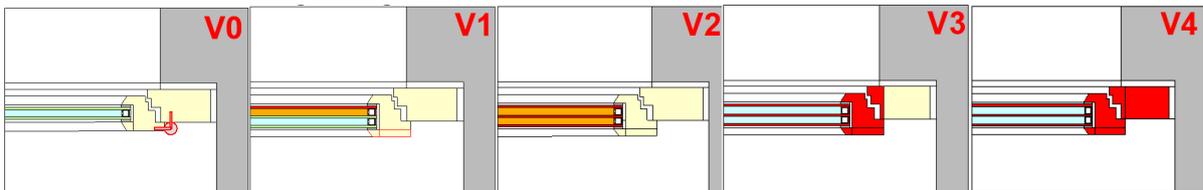


Abbildung S1: Untersuchte Ertüchtigungsstrategien von Fenstern (siehe Kapitel 4)

#### Variantenvergleich und U-Werte

Als Ausgangssituation dient ein typisches Bestandsfenster aus den 1980er Jahren. Die betrachteten Ertüchtigungsvarianten umfassen sowohl Massnahmen an der Verglasung wie Glasaufdopplung und Glasersatz als auch den vollständigen Fensterersatz. Die U-Werte sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	Ist-Zustand	Glasaufdopplung	Glasersatz 3-WS	Glasersatz Vakuum-Hybrid	Renovationsfenster	Fensterersatz Kunststofffenster
U-Wert Fenster, $U_w$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.7	1.2	0.88	0.89	0.84	0.81
U-Wert Rahmen, $U_f$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.1
U-Wert Verglasung, $U_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.7	0.9	0.6	0.47	0.6	0.6
Psi-Wert Abstandhalter, $\Psi_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	0.06	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03

Tabelle S1: U-Werte des Ist-Zustands eines typischen Bestandsfensters aus den 1980er Jahren und der betrachteten Varianten (Seite 62)

#### Variantenvergleich indirekte Treibhausgasemissionen

Eine Aufschlüsselung der indirekten Treibhausgasemissionen bei der Erstellung verschiedener Fensterertüchtigungs- und Fensterersatzvarianten, sowie des Ist-Zustands zeigt die nächste Abbildung S2. Die Emissionen werden in Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Quadratmeter Fenster und Jahr (kg CO<sub>2</sub>-



eq/(m<sup>2</sup>a)) dargestellt. Dabei werden acht verschiedene Komponenten der Emissionen betrachtet: Rahmen (inklusive Dichtung und Transport), Beschläge, Dichtung, Oberflächenbehandlung, Glas, Glasleisten, Transport (LKW 3.5-7.5t) und Entsorgung.

Massnahmen mit geringer Eingriffstiefe, wie die Glasaufdopplung oder der Glasersatz, verursachen deutlich geringere graue Treibhausgasemissionen als ein Fensterersatz. Die Glasaufdopplung verursacht beispielsweise 80 % weniger Emissionen als ein kompletter Fensterersatz mit Kunststoffrahmen.

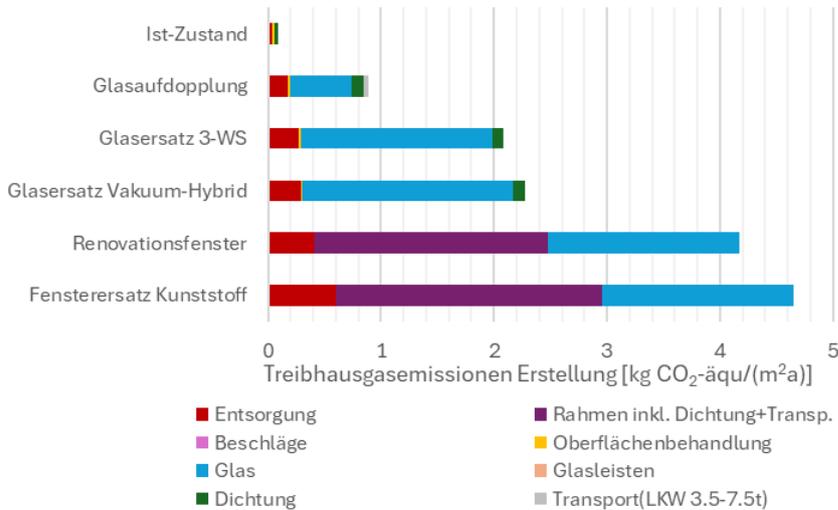


Abbildung S2: Treibhausgasemissionen Erstellung pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten. Betrachtet wird ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m)

### Variantenvergleich Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb

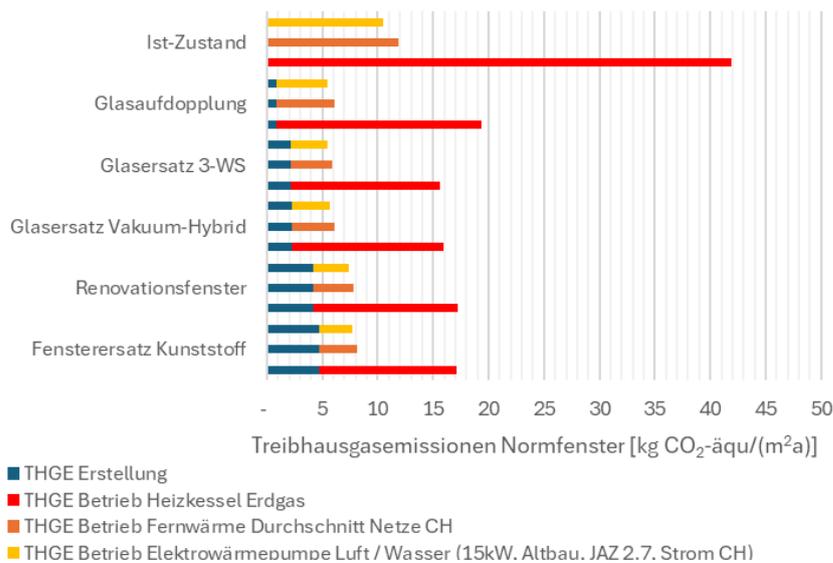


Abbildung S3: Treibhausgasemissionen Erstellung mit einer gerechneten Nutzungszeit von 30 Jahren und Betrieb (nur Transmissionswärmeverluste) für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten und Wärmeerzeuger



Die zusammenfassende Darstellung der Sanierungsvarianten in Kombination mit verschiedenen Heizsystemen zeigt Abbildung S3. Dabei wird deutlich, dass die Wahl des Heizsystems einen grösseren Einfluss auf die Gesamtemissionen hat als die spezifische Ertüchtigungsvariante.

### Ergebnisse Variantenvergleich beim Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe



Abbildung S4: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten, Wärmeversorgung mittels Luft-Wasser-Wärmepumpe.

Die Nutzung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (15 kW, JAZ 2.7) mit schweizerischem Strommix zeigt die höchste Effizienz im Systemvergleich (Abbildung S4). Die betriebsbedingten Emissionen erreichen hier die niedrigsten Werte. Bei der Betrachtung der Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb schneiden im Vergleich die Ertüchtigungsvarianten Glasaufdopplung und Glasersatz 3-WS am besten ab, dicht gefolgt vom Glasersatz mit Vakuum-Hybrid-Verglasung.

Die Kombinationen aus Glasaufdopplung oder Glasersatz und emissionsarmen Heizsystemen bieten das grösste Reduktionspotential für Treibhausgasemissionen. Die Wahl der geeigneten Ertüchtigungs- oder Ersatzmassnahme sollte daher nicht nur die energetischen Vorteile, sondern auch die ökologischen Auswirkungen der Erstellung berücksichtigen.

Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung bei der energetischen Gebäudesanierung. Es zeigt sich, dass die Kombination aus moderater Fensterertüchtigung und erneuerbarem Heizsystem oft zu besseren Gesamtergebnissen führt als eine maximale Fensterertüchtigung bei fossiler Wärmeerzeugung. Bei Wärmeerzeugersystemen mit elektrischen Wärmepumpen beeinflusst zudem der verwendete Strommix das Ergebnis.

Es wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern fünf Test-Liegenschaften für die Konzeption und mögliche Anwendung der Sanierungsverfahren von Fenstern ausgewählt: Kanton Basel-Stadt Objekte Leimenstrasse und Eglisee, Allgemeine Baugenossenschaft Zürich Objekte Zurlinden und Waidfussweg und Roche Bau 29 Basel. Es handelt sich dabei mehrheitlich um Fenster / Verglasungen von den Jahren 1995-2003, beim Bau 29 sind die Fensterrahmen im Originalzustand von 1939. Die gemessenen U-Werte der Verglasungen liegen im Bereich von 1.1-1.8 U<sub>g</sub> W/(m<sup>2</sup>K) und der Gasfüllgrad liegt im Bereich von 70-93 % mit einigen wenigen Ausreissern < 10 %. Bei den Ertüchtigungsvarianten kommen bei drei Objekten die Variante Glasaufdopplung in Frage. Die Variante Glasersatz und Renovationsfenster ist bei fast allen Objekten möglich. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden die Investitionskosten pro m<sup>2</sup> für jede Variante betrachtet. Es zeigt sich, dass die Varianten Glasersatz und -aufdopplung bei allen Objekten am günstigsten und der Fensterersatz am teuersten ist.

In Kapitel 6.1 ist eine Wegleitung verfügbar, die eine Untersuchung in drei Schritten empfiehlt, wobei bereits nach dem ersten Schritt eine Ersteinschätzung möglich wird. Die Ergebnisse der Untersuchung



können im Materialpass Kapitel 6.2 integriert werden. Kapitel 6.3 stellt Empfehlungen für die Konstruktion von neuen Fenstern dar.

## Take-home messages

Die Studie zeigt, dass der übliche Fensterersatz nach 30 Jahren bei einer ganzheitlichen Betrachtung generell hinterfragt werden muss. Viele Fenster mit Isolier- oder Wärmeschutzverglasung können ertüchtigt werden.

Um Fenster zu ertüchtigen, braucht es ein systematisches Vorgehen. In vielen Fällen kann eine einfache Glasaufdopplung oder ein Glasersatz die Energieeffizienz markant verbessern, gleichzeitig schneiden diese Varianten bezüglich den Treibhausgasemissionen von Erstellung und Betrieb und auch aus ökonomischer Sicht oft besser ab als der Fensterersatz.

Rund 85 % der Fenster landen heute in der Deponie. Um den Ressourcenverbrauch zu optimieren und Kreisläufe zu schliessen haben einige Fensterfirmen begonnen, Fenster zurückzunehmen und fachgerecht zu recyceln. Diese Initiative könnte noch weiter zu einem zirkulären Geschäftsmodell ausgebaut werden, indem beispielsweise Fenster auch ertüchtigt werden könnten.

Die strengeren Anforderungen der Normen der letzten Jahre haben den Ressourceneinsatz bei Fenstern markant erhöht. Die künftige Normenentwicklung braucht vermehrt eine Zusammenarbeit von verschiedenen Verbänden und eine ganzheitliche Betrachtung, die neue Themen wie Ressourceneffizienz und Treibhausgasemissionen in die Überlegungen miteinbezieht.



## Résumé

### Procédure de rénovation et de réutilisation des fenêtres - Passeport des matériaux et guide (FenSanReuse)

#### 1. Situation initiale

Le secteur du bâtiment contribue de manière significative aux émissions globales de gaz à effet de serre, et les fenêtres jouent un rôle central dans l'efficacité énergétique des constructions. La qualité énergétique des fenêtres influence de manière déterminante les pertes de chaleur par transmission ainsi que les pertes de chaleur par ventilation dues à des défauts d'étanchéité. De plus, les fenêtres ont une influence significative sur le confort thermique des espaces intérieurs.

En 2023, selon le radar de la branche des fenêtres, environ 1,74 million de nouvelles fenêtres ont été vendues en Suisse, dont environ 2/3 ont été utilisées pour remplacer des fenêtres [1]. La fabrication de nouvelles fenêtres est liée à une forte consommation d'énergie. Cela résulte en particulier de la production de verre plat avec des températures de processus d'environ 1600 °C, ainsi que de la fabrication des composants du cadre. Après une durée d'utilisation moyenne de 30 ans, les fenêtres sont généralement remplacées, car elles ne répondent plus aux exigences actuelles. Ce remplacement régulier des fenêtres entraîne une consommation considérable de ressources et mobilise des quantités significatives d'énergie grise et d'émissions indirectes de gaz à effet de serre.

Ainsi, la fabrication d'une fenêtre standard en plastique (1.15 m x 1.55 m) émet environ 260 kg eq. CO<sub>2</sub>. Pour les fenêtres plus grandes ou les fenêtres avec vitrage spécial, la fabrication d'une fenêtre peut générer jusqu'à 1 t eq. CO<sub>2</sub>. Les données relatives aux émissions de CO<sub>2</sub> dans le rapport sont indiquées pour une année afin de pouvoir les comparer avec les émissions de gaz à effet de serre de l'entreprise.

#### 2. Objectifs

Dans le cadre du projet « Procédés de rénovation et réutilisation des fenêtres - Passeport des matériaux et élimination » (FenSanReuse), on étudie de manière globale les possibilités d'améliorer l'efficacité énergétique des fenêtres par des mesures simples et efficaces et quand il vaut mieux remplacer les fenêtres. Les méthodes d'amélioration possibles sont examinées en termes d'efficacité énergétique, d'énergie grise, d'émissions indirectes de gaz à effet de serre, de rentabilité et de capacité de recyclage. Les fenêtres sont analysées et des variantes d'amélioration sont proposées sur la base de cinq bâtiments tests. En outre, un guide et un passeport des matériaux seront développés.

Le projet de recherche se concentre sur l'amélioration énergétique et la réutilisation des fenêtres dans les ouvertures des murs extérieurs. L'accent est mis sur les fenêtres standard datant des années 1960 et plus, équipées d'un double ou triple vitrage isolant ou d'un vitrage à isolation thermique. Les fenêtres avec des cadres en bois, en bois-métal, en plastique ou en métal, qui étaient typiquement utilisées dans les immeubles d'habitation, les immeubles de bureaux et les écoles, sont prises en considération.

#### 3. Fenêtres : recherches et calculs

Dans le cadre du présent travail, de nombreux types de fenêtres sont recensés et systématiquement évalués. L'évaluation systématique des données permet d'établir un aperçu de l'efficacité énergétique des fenêtres existantes. Les analyses graphiques du chapitre 3 permettent de déterminer les valeurs U possibles du vitrage et du cadre en fonction du type et de l'âge des composants de la fenêtre et de limiter ainsi la valeur U initiale de la fenêtre.

Du point de vue de la disponibilité des ressources, c'est surtout le verre plat qui doit faire l'objet d'une attention accrue, car la disponibilité du sable de quartz de haute qualité est limitée. Parallèlement, les normes de sécurité et d'insonorisation de plus en plus strictes entraînent une augmentation de l'épaisseur du verre et une diminution du poids des fenêtres, ce qui aggrave encore la situation en matière



de ressources. En ce qui concerne les cadres de fenêtres, les fenêtres en bois sont particulièrement performantes en termes d'émissions indirectes de gaz à effet de serre. Elles sont également faciles à rénover. Bien qu'il soit possible de démonter les fenêtres en pièces détachées et de les éliminer, les fenêtres et le verre plat sont souvent mis en décharge. Le recyclage des fenêtres n'est pas encore une pratique courante en Suisse, mais certaines entreprises, comme Velux ou 4B Fenster, reprennent également les fenêtres démontées lors de leur remplacement. Pour les fenêtres en PVC, il existe un système de collecte visant à maintenir le PVC dans le circuit [2]. Il serait important de prolonger la durée de vie des fenêtres et de développer fortement la réutilisation des fenêtres en Suisse, en raison des émissions indirectes de gaz à effet de serre liées à leur fabrication, mais aussi pour préserver les ressources.

#### 4. Stratégies d'amélioration

Sur la base d'exemples déjà réalisés, les stratégies d'amélioration suivantes des fenêtres sont examinées de plus près : amélioration simple (V0), doublement du verre (V1), remplacement du verre (V2) par du verre plat, du verre à couche mince ou du verre hybride sous vide, fenêtres de rénovation (V3) et remplacement des fenêtres (V4).

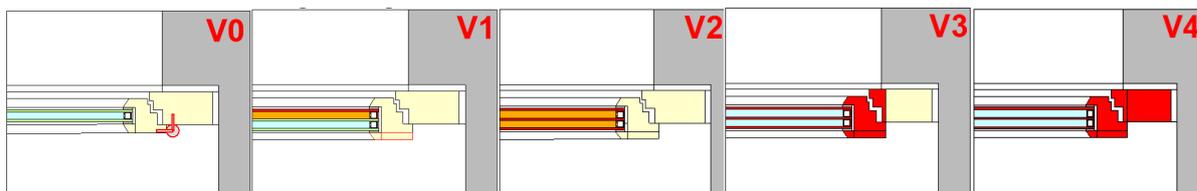


Figure S1 : Stratégies d'amélioration des fenêtres étudiées (voir chapitre 4)

#### Comparaison des variantes et valeurs U

Une fenêtre existante typique des années 1980 sert de situation de départ. Les variantes d'amélioration considérées comprennent aussi bien des mesures sur le vitrage telles que le doublage du verre et le remplacement du verre que le remplacement complet de la fenêtre. Les valeurs U sont présentées dans le tableau suivant.

	État actuel	Doublage du verre	Remplacement du verre triple vitrage thermique	Remplacement du verre Hybride sous vide	Fenêtre de Rénovation	Remplacement des fenêtres Fenêtres en PVC
Valeur U de la fenêtre, $U_w$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.7	1.2	0.88	0.89	0.84	0.81
Valeur U du cadre, $U_f$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.1
Valeur U du verre, $U_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.7	0.9	0.6	0.47	0.6	0.6
Psi-valeur Espaceur, $\Psi_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	0.06	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03

Tableau S1 : Valeurs U de l'état actuel d'une fenêtre existante typique des années 1980 et des variantes considérées. (Page 62)

#### Comparaison des variantes Émissions indirectes de gaz à effet de serre

La figure S2 suivante présente une ventilation des émissions indirectes de gaz à effet de serre lors de la construction de différentes variantes de rénovation et de remplacement de fenêtres, ainsi que de



l'état actuel. Les émissions sont représentées en kilogrammes d'équivalent CO<sub>2</sub> par mètre carré de fenêtre et par an (kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a)). Huit composantes différentes des émissions sont considérées : Cadre (y compris joint et transport), ferrures, joint, traitement de surface, verre, parclozes, transport (camion de 3,5 à 7,5 tonnes) et élimination.

Les mesures à faible profondeur d'intervention, comme le doublage du vitrage ou le remplacement du vitrage, entraînent des émissions de gaz à effet de serre nettement plus faibles que le remplacement des fenêtres. E doublage du verre, par exemple, génère 80 % d'émissions en moins que le remplacement complet d'une fenêtre par un cadre en plastique.

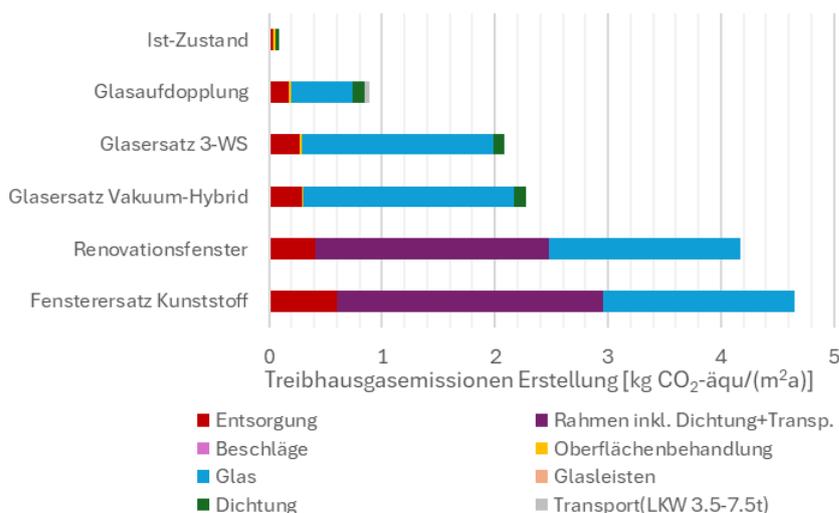


Figure S2 : missions de gaz à effet de serre lors de la construction par mètre carré de surface d'élément de construction et par an pour différentes variantes d'amélioration. On considère une fenêtre standard (deux vantaux, jour de maçonnerie 1,55 m x 1,15 m)

### Comparaison des variantes émissions de gaz à effet de serre dues à la construction et à l'exploitation

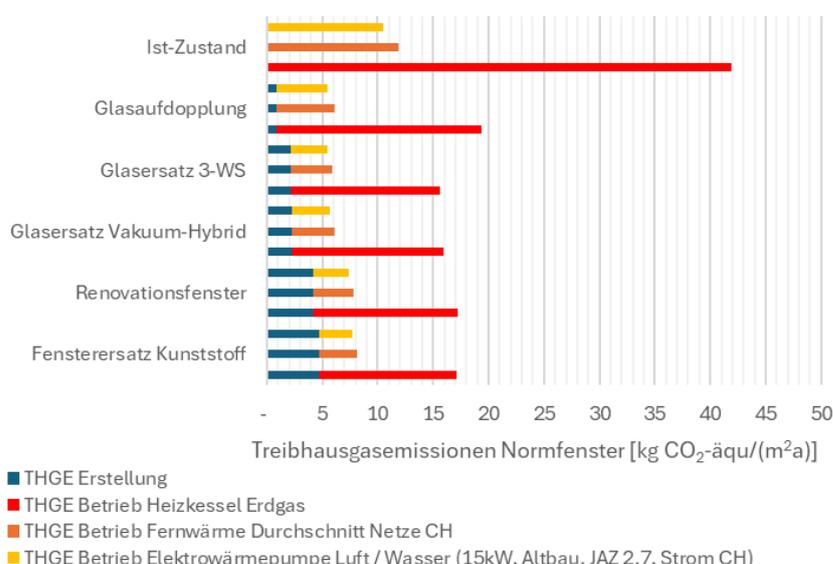


Figure S3 : missions de gaz à effet de serre pour une durée d'utilisation et d'exploitation de 30 ans (uniquement pertes de chaleur par transmission) pour une fenêtre standard ( deux vantaux, jour de maçonnerie 1,55 m x 1,15 m) par mètre carré de surface d'élément de construction et par an pour différentes variantes d'amélioration et différents générateurs de chaleur.



La figure S3 présente une synthèse des variantes de rénovation en combinaison avec différents systèmes de chauffage. Il apparaît clairement que le choix du système de chauffage a une plus grande influence sur les émissions globales que la variante d'assainissement spécifique.

### Résultats de la comparaison des variantes lors de l'utilisation d'une pompe à chaleur air-eau



Figure S4: Émissions de gaz à effet de serre pour la construction et l'exploitation d'une fenêtre standard (à deux vantaux, dimensions intérieures du mur 1,55 m x 1,15 m) par mètre carré de surface d'élément de construction et par an, pour différentes variantes d'amélioration, approvisionnement en chaleur au moyen d'une pompe à chaleur air-eau.

L'utilisation d'une pompe à chaleur air-eau (15 kW, FPS 2.7) avec un mix d'électricité suisse présente la meilleure efficacité dans la comparaison des systèmes (figure S4). Les émissions liées à l'exploitation atteignent ici les valeurs les plus faibles. Si l'on considère les émissions de gaz à effet de serre dues à la construction et à l'exploitation, ce sont les variantes de rénovation avec doublage du vitrage et remplacement du vitrage 3-WS qui obtiennent les meilleurs résultats, suivies de près par le remplacement du vitrage par un vitrage hybride sous vide.

Les combinaisons de doublage ou de remplacement du verre et de systèmes de chauffage à faibles émissions offrent le plus grand potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le choix de la mesure d'amélioration ou de remplacement appropriée devrait donc tenir compte non seulement des avantages énergétiques, mais aussi de l'impact écologique de la construction.

Les résultats mettent en évidence la nécessité d'une approche globale lors de la rénovation énergétique des bâtiments. Il s'avère que la combinaison d'une rénovation modérée des fenêtres et d'un système de chauffage renouvelable conduit souvent à de meilleurs résultats globaux qu'une rénovation maximale des fenêtres avec une production de chaleur fossile. Pour les systèmes de production de chaleur avec pompes à chaleur électriques, le mix d'électricité utilisé influence également le résultat.

## 5. Résultats des bâtiments test

En accord avec les partenaires du projet, cinq immeubles tests ont été sélectionnés pour la conception et l'application possible des méthodes de rénovation des fenêtres : Roche Bau 29 Bâle, Kan-ton Basel-Stadt Objekte Leimenstrasse et Eglisee, Allgemeine Baugenossenschaft Zürich Objekte Zurlinden et Waidfussweg. Il s'agit de fenêtres / vitrages datant des années 1995-2003. Les valeurs U mesurées des vitrages se situent dans une fourchette de 1.1-1.8 U<sub>g</sub> W/(m<sup>2</sup>K) et le taux de remplissage de gaz se situe dans une fourchette de 70-93 % avec quelques rares exceptions < 10 %. En ce qui concerne les variantes d'amélioration, la variante de doublage du verre entre en ligne de compte pour trois objets. La variante remplacement du verre et fenêtres de rénovation est possible pour presque tous les objets. Afin d'assurer la comparabilité, les coûts d'investissement par m<sup>2</sup> sont considérés pour



chaque variante. Il s'avère que les variantes de remplacement et de doublage du vitrage sont les plus avantageuses pour tous les objets et que le remplacement des fenêtres est le plus coûteux.

n guide est disponible au chapitre 6.1, qui recommande un examen en trois étapes, une première évaluation étant possible dès la première étape. Les résultats de l'analyse peuvent être intégrés dans le passeport des matériaux au chapitre 6.2. Le chapitre 6.3 présente des recommandations pour la construction de nouvelles fenêtres.

## Take-home messages

L'étude montre que le remplacement habituel des fenêtres après 30 ans doit être remis en question de manière générale dans le cadre d'une approche globale. De nombreuses fenêtres équipées de vitrages isolants ou de vitrages à isolation thermique peuvent être renforcées.

Pour rénover les fenêtres, il faut procéder de manière systématique. Dans de nombreux cas, un simple doublage ou un remplacement du vitrage peut améliorer considérablement l'efficacité énergétique, et ces variantes sont souvent plus efficaces que le remplacement des fenêtres en termes d'émissions de gaz à effet de serre lors de la construction et de l'exploitation, ainsi que du point de vue économique.

Environ 85 % des fenêtres finissent aujourd'hui à la décharge. Afin d'optimiser la consommation de ressources et de boucler les cycles, certaines entreprises de fenêtres ont commencé à reprendre les fenêtres et à les recycler de manière appropriée. Cette initiative pourrait encore être développée pour devenir un modèle commercial circulaire, en permettant par exemple de rénover les fenêtres.

Les exigences plus strictes des normes de ces dernières années ont considérablement augmenté l'utilisation des ressources pour les fenêtres. Le développement futur des normes nécessite une collaboration accrue entre les différentes associations et une approche globale qui intègre dans les réflexions de nouveaux thèmes tels que l'efficacité des ressources et les émissions de gaz à effet de serre.

(Traduction avec l'aide de DeepL)



# Summary

## Renovation and reuse of windows - material passport and guidelines (FenSanReuse)

### 1. Initial situation

The building sector makes a significant contribution to global greenhouse gas emissions, with windows playing a key role in the energy efficiency of buildings. The energy quality of windows has a significant influence on transmission heat losses and ventilation heat losses due to leaks. Windows also have a significant influence on thermal comfort indoors.

According to the window industry radar, around 1.74 million new windows were sold in Switzerland in 2023, of which around 2/3 were used as window replacements [1]. The production of new windows is associated with high energy consumption. This results in particular from the production of flat glass with process temperatures of around 1600 °C and the manufacture of frame components. After an average service life of 30 years, windows are usually replaced as they no longer meet current requirements. After an average service life of 30 years, windows are usually replaced as they no longer meet current requirements. This regular window replacement leads to a considerable consumption of resources and ties up significant amounts of gray energy and indirect greenhouse gas emissions.

For example, the production of a standard plastic window (1.15m x 1.55 m) emits around 260 kg CO<sub>2</sub>-eq. For larger windows or windows with special glazing, the production of a window can generate up to 1 t CO<sub>2</sub>-eq. The CO<sub>2</sub> emissions figures in the report are given for one year in each case so that they can be compared with the greenhouse gas emissions from operation.

### 2. Objectives

As part of the project “Refurbishment and re-use of windows - material passport and disposal” (FenSanReuse), a holistic investigation is being carried out into the options for upgrading windows with simple and effective measures to improve energy efficiency and when it is better to replace windows. Possible retrofitting methods are being examined in terms of energy efficiency, gray energy, indirect greenhouse gas emissions, cost-effectiveness and recyclability. Using five test buildings, windows are examined and retrofit options proposed. In addition, guidelines and a material passport will be developed.

The research project concentrates on the energy retrofitting and reuse of windows in openings in external walls. The focus is on standard windows from the 1960s onwards, which are fitted with double or triple insulating glazing or thermal insulation glazing. Windows with wooden, wood-metal, plastic or metal frames are considered, which were typically used in residential buildings, office buildings and schools.

### 3. Windows: research and calculations

As part of this work, numerous window types are recorded and systematically evaluated. Systematic data evaluation allows an overview of the energy efficiency of existing windows to be created. The graphical evaluations in Chapter 3 help to make statements about possible U-values of glazing and frames based on the type and age of window components and thus to narrow down the original U-value of the window.

From the point of view of resource availability, increased attention must be paid to flat glass in particular, as the availability of high-quality quartz sand is limited. At the same time, increasing safety and sound insulation standards mean that glass thicknesses are increasing and windows are becoming heavier, which further exacerbates the resource situation. When it comes to window frames, windows made of wood perform particularly well in terms of indirect greenhouse gas emissions. They can also



be easily repaired. Although it would be possible to dismantle windows into individual parts and dispose of them, windows and flat glass are often landfilled.

Das Recyceln von Fenstern ist in der Schweiz noch nicht üblich, jedoch gibt es Firmen wie beispielsweise Velux oder 4B Fenster, die beim Fensterersatz auch die ausgebauten Fenster zurücknehmen. The recycling of windows is not yet common practice in Switzerland, but there are companies such as Velux or 4B Fenster that also take back removed windows when they are replaced. There is a collection system for PVC windows with the aim of keeping PVC in circulation [2]. It would be important to extend the service life of windows and greatly expand the re-use of windows in Switzerland due to the high indirect greenhouse gas emissions from production and in terms of resource conservation.

#### 4. Upgrading strategies

Based on examples that have already been implemented, the following window upgrading strategies are examined in more detail: simple upgrading (V0), glass doubling (V1), glass replacement (V2) with flat glass, thin-film glass or vacuum-hybrid glass, renovation windows (V3) and window replacement (V4).

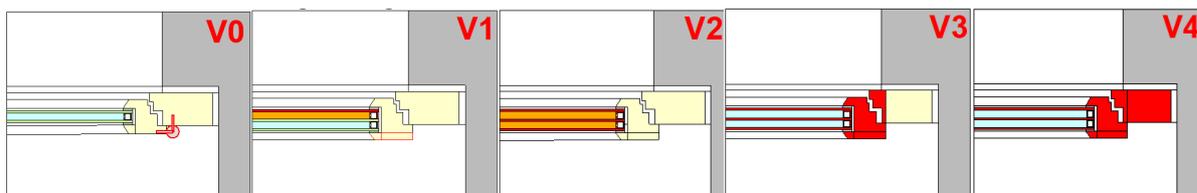


Figure S1: Window retrofit strategies examined (see Chapter 4)

#### Comparison of variants and U-values

A typical existing window from the 1980s serves as the starting point. The retrofitting variants considered include both measures on the glazing, such as glass doubling and glass replacement, as well as complete window replacement. The U-values are shown in the following table.

	Current status	Glass doubling	Glass replacement 3-TIG	Glass replacement Vacuum hybrid	Renovation-window	Window-replacement PVC window
U-value window, $U_w$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.7	1.2	0.88	0.89	0.84	0.81
U-value frame, $U_f$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.1
U-value Glass, $U_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.7	0.9	0.6	0.47	0.6	0.6
Psi-value Spacer, $\Psi_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	0.06	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03

Table S1: U-values of the actual state of a typical existing window from the 1980s and the variants under consideration. (Page 62)

#### Comparison of indirect greenhouse gas emissions

The next figure S2 shows a breakdown of the indirect greenhouse gas emissions from the construction of various window refurbishment and window replacement variants, as well as the actual state. The emissions are shown in kilograms of CO<sub>2</sub> equivalent per square meter of window and year (kg CO<sub>2</sub>-



eq/(m<sup>2</sup>a)). Eight different components of emissions are considered: Frame (including gasket and transportation), fittings, gasket, surface treatment, glass, glazing beads, transportation (truck 3.5-7.5t) and disposal.

Measures with a low level of intervention, such as glass doubling or glass replacement, cause significantly lower gray greenhouse gas emissions than window replacement. For example, double glazing causes 80 % less emissions than a complete window replacement with plastic frames.

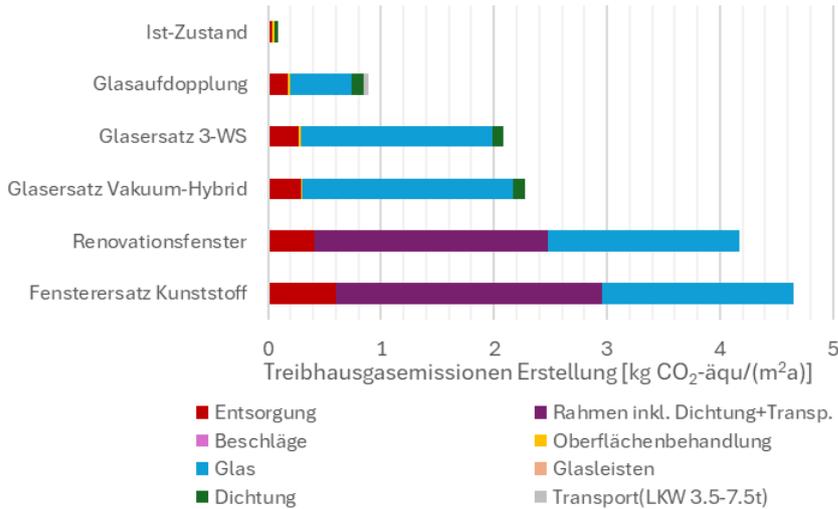


Figure S2: Greenhouse gas emissions from construction per square meter of building component area and year for different retrofitting variants. A standard window (double-leaf, wall clearance 1.55 m x 1.15 m) is considered

### Comparison of variants Greenhouse gas emissions from construction and operation

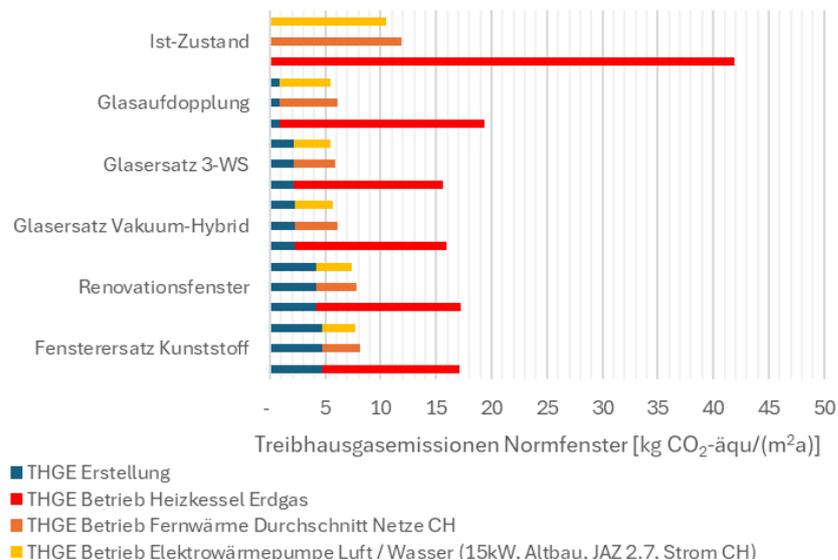


Figure S3: Greenhouse gas emissions with a calculated service life of 30 years and operation (only transmission heat losses) for a standard window (double-leaf, wall clearance 1.55 m x 1.15 m) per square meter of building component area and year for various refurbishment variants and heat generators.



Figure S3 shows a summary of the refurbishment options in combination with different heating systems. It shows clearly that the choice of heating system has a greater influence on overall emissions than the specific retrofit variant.

### Results comparison of variants when using an air-to-water heat pump

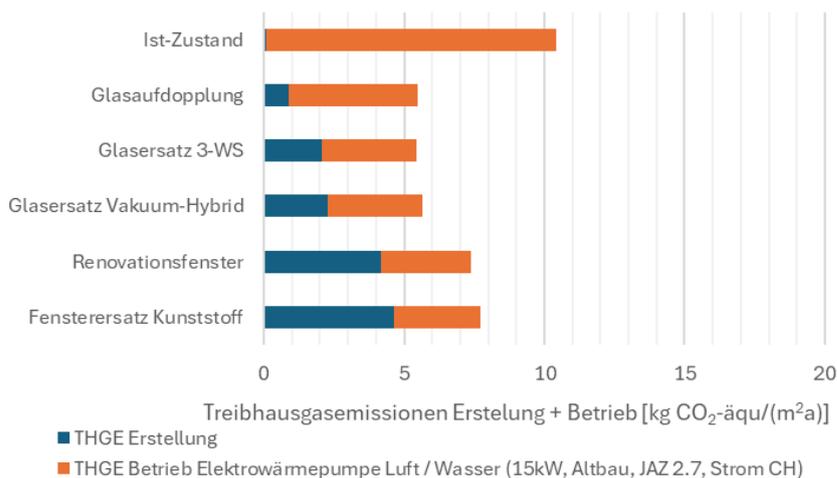


Figure S4: Greenhouse gas emissions for the construction and operation of a standard window (double-leaf, wall clearance 1.55 m x 1.15 m) per square meter of building area and year for various retrofit variants, heat supply by means of an air-to-water heat pump.

The use of an air-to-water heat pump (15 kW, SPF 2.7) with a Swiss electricity mix shows the highest efficiency in the system comparison (Figure S4). The operational emissions achieve the lowest values here. In terms of greenhouse gas emissions from construction and operation, the best results are achieved by the retrofit variants of glass insulation and glass replacement 3-WS, closely followed by glass replacement with vacuum hybrid glazing.

The combinations of glass insulation or glass replacement and low-emission heating systems offer the greatest potential for reducing greenhouse gas emissions. The choice of suitable retrofitting or replacement measures should therefore take into account not only the energy benefits but also the ecological impact of the construction.

The results illustrate the need for a holistic approach to energy-efficient building refurbishment. It can be seen that the combination of moderate window refurbishment and a renewable heating system often leads to better overall results than maximum window refurbishment with fossil heat generation. In the case of heat generator systems with electric heat pumps, the electricity mix used also influences the results.

## 5. Results test properties

In consultation with the project partners, five test properties were selected for the design and possible application of the window renovation process: Roche Bau 29 Basel, Kan-ton Basel-Stadt properties Leimenstrasse and Eglisee, Allgemeine Baugenossenschaft Zürich properties Zurlinden and Waidfussweg. These are windows / glazing from the years 1995-2003. The measured U-values of the glazing are in the range of 1.1-1.8 U<sub>g</sub> W/(m<sup>2</sup>K) and the gas filling level is in the range of 70-93 % with a few outliers < 10 %. In terms of retrofitting options, the glass doubling option was considered for three properties. The glass replacement and renovation window variant is possible for almost all properties. In order to ensure comparability, the investment costs per m<sup>2</sup> are considered for each variant. It can be seen that the glass replacement and double glazing options are the cheapest for all properties, while window replacement is the most expensive.



## 6. Guide and material passport

Chapter 6.1 contains a guide that recommends a three-step investigation, whereby an initial assessment is already possible after the first step. The results of the investigation can be integrated into the material passport in Chapter 6.2. Chapter 6.3 presents recommendations for the construction of new windows. Chapter 6.3 presents recommendations for the construction of new windows.

## Take-home messages

The study shows that the usual window replacement after 30 years must generally be questioned from a holistic perspective. Many windows with insulating or thermal insulation glazing can be upgraded.

A systematic approach is required to upgrade windows. In many cases, a simple glass doubling or glass replacement can significantly improve energy efficiency, while these options often perform better than window replacement in terms of greenhouse gas emissions during construction and operation and also from an economic point of view.

Around 85% of windows currently end up in landfill. In order to optimize resource consumption and close cycles, some window companies have started to take back windows and recycle them professionally. This initiative could be further developed into a circular business model, for example by also refurbishing windows.

The stricter requirements of the standards in recent years have significantly increased the use of resources for windows. The future development of standards requires more cooperation between different associations and a holistic approach that includes new topics such as resource efficiency and greenhouse gas emissions in the considerations.

(Translation realised with the support of DeepL)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>Take-home messages</b> .....	<b>8</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
<b>Take-home messages</b> .....	<b>13</b>
<b>Summary</b> .....	<b>14</b>
<b>Take-home messages</b> .....	<b>18</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>19</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>23</b>
<b>Glossar</b> .....	<b>24</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>26</b>
1.1 Ausgangslage und Hintergrund .....	26
1.2 Motivation des Projektes .....	26
1.3 Projektziele .....	27
1.4 Forschungsfragen.....	27
1.5 Projektabgrenzung .....	28
<b>2 Vorgehen und Methode</b> .....	<b>29</b>
2.1 Recherche der Grundlagen von bestehenden Fenstern .....	29
2.1.1 Methodik zur energetischen Beurteilung von Fenstern .....	30
2.1.2 Methodik zur Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen .....	31
2.1.3 Recherche Grundlagen von Fenstern im Bestand .....	32
2.2 Vorgehen bei der Analyse der Test-Liegschaften .....	33
2.2.1 Methodik zur Berechnung der U-Werte und Transmissionswärmeverluste .....	33
2.2.2 Vorgehen bei der U-Wert-Messung.....	33
2.2.3 Vorgehen bei der Messung des Gasfüllgrades .....	37
2.3 Vorgehen zur Erarbeitung von Materialpass und Wegleitung .....	39
2.3.1 Erarbeitung des Materialpasses .....	39
2.3.2 Erarbeitung der Wegleitung .....	39
2.3.3 Konstruktionsprinzipien für die Herstellung neuer Fenster .....	39
2.4 Vorgehen zur Kostenermittlung .....	40
2.4.1 Wirtschaftlichkeitsberechnung .....	40
2.4.2 Lebenszykluskosten .....	40
2.4.3 Erstellungs- und Unterhaltskosten sowie Erneuerungs- und Ersatzvornahmekosten .....	42
2.4.4 Lebensdauer.....	42
2.4.5 Berechnungstool Kosten und Lebensdauer .....	44



<b>3</b>	<b>Fenster: Literaturrecherche und U-Wert Berechnungen.....</b>	<b>46</b>
3.1	Eigenschaften von Fenstern.....	46
3.1.1	Grundlagen.....	46
3.1.2	Wichtige Normen und Standards.....	47
3.2	Strukturierte Datensammlung und Ergebnisse.....	49
3.2.1	Strukturierte Datensammlung.....	49
3.2.2	Fenster U-Werte.....	50
3.2.3	Fensterrahmen $U_f$ -Werte.....	51
3.2.4	Verglasung $U_g$ -Werte.....	56
3.2.5	Berechnung $U_g$ -Werte Verglasung.....	58
3.3	Ressourcenverfügbarkeit.....	59
3.3.1	Mengenauswertung.....	59
3.3.2	Fensterglas.....	60
3.3.3	Gasfüllung.....	60
3.3.4	Beschichtungen.....	60
3.3.5	Fensterrahmen.....	61
3.3.6	Beschläge.....	63
3.3.7	Fazit.....	64
3.4	Treibhausgasemissionen von Fenstern.....	65
3.4.1	Gesamtabschätzung Treibhausgasemissionen.....	66
3.5	Ökologische Bewertung von Fenstern.....	67
3.6	Wiederverwendung von Fenstern (Re-Use).....	68
3.6.1	Konzepte der Wiederverwendung.....	68
3.6.2	Ökologische und ökonomische Bewertung.....	68
3.6.3	Technische Anforderungen.....	68
3.6.4	Fenster für die Ukraine.....	68
3.6.5	Empfehlungen für die Praxis.....	68
3.6.6	Geschäftsmodelle für die Fensterwiederverwendung.....	69
3.6.7	Implementierungsstrategien.....	69
3.6.8	Ausblick.....	70
<b>4</b>	<b>Ertüchtigungsstrategien.....</b>	<b>72</b>
4.1	Ertüchtigungsvarianten.....	72
4.1.1	Übersicht der untersuchten Ertüchtigungsstrategien von Fenstern.....	73
4.1.2	Ertüchtigung Verglasung.....	74
4.1.3	Beispiel Glasaufdopplung.....	76
4.2	Betrachtung indirekte und direkte Treibhausgasemissionen.....	79
4.2.1	Indirekte Treibhausgasemissionen der Erstellung für die Ertüchtigung im Bestand.....	79
4.2.2	Treibhausgasemissionen für Erstellung und Betrieb für die Ertüchtigung im Bestand.....	81



4.3	Wiederverwendung von Fenstern (Re-Use).....	88
4.3.1	Indirekte Treibhausgasemissionen der Erstellung für Re-Use-Fenster .....	88
4.3.2	Gesamtbetrachtung Treibhausgasemissionen für Erstellung und Betrieb für Re-Use-Fenster.....	89
4.4	Kostenberechnung Normfenster.....	95
4.4.1	Kostenvergleich von verschiedenen neuen Fenstertypen .....	95
4.4.2	Kostenvergleich von verschiedenen Fenster-Ertüchtigungsvarianten .....	96
<b>5</b>	<b>Ergebnisse Test-Liegenschaften .....</b>	<b>97</b>
5.1	Untersuchte Testliegenschaften.....	97
5.2	Untersuchungen und Ergebnisse am Beispiel Egliseestrasse.....	98
5.2.1	Objektbeschreibung.....	98
5.2.2	Messungen .....	100
5.2.3	Ertüchtigungsvarianten.....	101
5.2.4	Berechnungen U-Werte und der Transmissionswärmeverluste.....	104
5.2.5	Schlussfolgerung .....	111
5.3	Ergebnisse aller Testliegenschaften .....	114
5.3.1	Messungen U-Wert Verglasungen und Gasfüllgrad Scheibenzwischenraum .....	114
5.3.2	Ergebnisse Berechnungen Test-Objekte .....	115
5.3.3	Ertüchtigungsvarianten.....	116
5.3.4	Kosten.....	117
<b>6</b>	<b>Wegleitung, Materialpass und weitere Hinweise für die Praxis.....</b>	<b>118</b>
6.1	Wegleitung Sanierung und Ertüchtigung von Fenstern.....	118
6.1.1	Einleitung .....	118
6.1.2	Kurzanalyse und Ersteinschätzung (1. Schritt) .....	119
6.1.3	Zusatzabklärungen (2. Schritt) .....	121
6.1.4	Messtechnische Beurteilung und Berechnungen (3. Schritt) .....	124
6.2	Materialpass .....	125
6.2.1	Ziel und Zweck eines Materialpass .....	125
6.2.2	Steckbrief.....	126
6.2.3	Schnelltest Re-Use (direkte Ausschlusskriterien, keine weitere Aufnahme notwendig).....	126
6.2.4	Datenbezug im Materialpass.....	126
6.2.5	Skizze .....	127
6.2.6	Tabelle aller Eigenschaften .....	128
6.3	Erkenntnisse für die Konstruktion von neuen Fenstern .....	132
6.3.1	Einführung .....	132
6.3.2	Produkt Fenster .....	132
6.3.3	Einbau.....	132
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Fazit .....</b>	<b>133</b>



<b>8</b>	<b>Ausblick und zukünftige Umsetzung .....</b>	<b>135</b>
8.1	Ertüchtigungsvarianten weiter erforschen .....	135
8.2	Materialpass und Prüfprozess mit Behörden / SIA weiterentwickeln .....	135
8.3	Ertüchtigungen von Fenster in der Bauwirtschaft etablieren.....	136
8.4	Anpassungen von baurechtlichen Vorgaben.....	136
8.5	Aus- und Weiterbildung .....	136
<b>9</b>	<b>Publikationen .....</b>	<b>137</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>138</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>142</b>
<b>12</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>146</b>
12.1	Dokumentation von einigen Fallbeispielen.....	146
12.2	Ökobilanzdaten Fensterertüchtigung .....	149
12.3	Kostenberechnung .....	150



## Abkürzungsverzeichnis

$A_f$	Netto-Rahmenfläche
$A_g$	Netto-Glasfläche
$A_w$	Netto-Fensterfläche
bfu	Beratungsstelle für Unfallverhütung
DCF	Discounted-Cash-Flow-Methode
EnFK	Energiefachstellenkonferenz
ESG	Einscheibensicherheitsglas
FPS	Facteur de performance saisonnier (JAZ Wärmepumpe)
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad einer Verglasung
GEAK	Gebäudeenergieausweis der Kantone
IV	Isolierverglasung
JAZ	Jahresarbeitszahl (Jahres-Arbeitszahl einer Wärmepumpe)
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane öffentl. Bauherren
LCC	Lebenszykluskosten (Life Cycle Costs)
LSV	Lärmschutzverordnung
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes
PVC	Polyvinylchlorid
RC	Resistance Class
RFID	Radio-frequency identification
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SIGAB	Schweizerisches Institut für Glas am Bau
SPF	Seasonal Performance Factor (JAZ Wärmepumpe)
SZR	Scheibenzwischenraum
THGE	Treibhausgasemissionen
$U_f$	Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens
$U_g$	Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung
$U_w$	Wärmedurchgangskoeffizient des gesamten Fensters
USG	Umweltschutzgesetz
VKF	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
VSG	Verbundsicherheitsglas
$\Psi_g$	Linearer Wärmebrücken-/Randverbundkoeffizient der Verglasung



## Glossar

Design for Disassembly	Ein Konzept, das darauf abzielt, Materialien, Komponenten und Systeme so zu gestalten, dass sie am Ende ihrer Lebensdauer einfach, effizient und möglichst schadensfrei zurückgebaut werden können.
Fensterersatz	Vollständiger Austausch eines alten Fensters durch ein neues Fenster.
Floatglas	Flachglas, das im Floatglasverfahren hergestellt wird.
Gasfüllgrad	Konzentration des Isoliergases (z.B. Argon, Krypton, Xenon) im Scheibenzwischenraum einer Mehrfachverglasung.
Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert)	Anteil der einfallenden Sonnenenergie, der durch die Verglasung in den Raum gelangt; setzt sich aus direkter Transmission und sekundären Wärmeeinträgen zusammen.
Glasaufdopplung	Energetische Ertüchtigungsmassnahme bei Fenstern, bei der eine bestehende Isolierverglasung mit einer zusätzlichen Glasscheibe ergänzt wird.
Glaserersatz	Austausch der bestehenden Fensterscheibe durch eine neue Verglasung, während der Rahmen erhalten bleibt.
Graue Energie	Primärenergieaufwand nicht erneuerbar, der für die Herstellung, den Transport, den Einbau und die Entsorgung von Baumaterialien und Bauteilen benötigt wird. Oft synonym mit indirekten Treibhausgasemissionen verwendet.
Heizgradtage	Kennwert, der den Heizwärmebedarf eines Gebäudes in Abhängigkeit von der Aussentemperatur beschreibt. Wird in K·d angegeben.
Indirekte Treibhausgasemissionen	CO <sub>2</sub> Emissionen (und auch Emissionen von weiteren Treibhausgasen), die bei der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, dem Transport und Logistik und der Entsorgung des Produkts entstehen (Scope 3). Manchmal werden sie auch als graue Treibhausgasemissionen bezeichnet.
Instandhaltung	Massnahmen zur Wahrung der Funktionstauglichkeit durch einfache und regelmässige Arbeiten.
Instandsetzung	Wiederherstellung der Funktions- und Gebrauchstauglichkeit mit ausreichender Sicherheit und vereinbarter Dauerhaftigkeit.
Jahresarbeitszahl (JAZ)	Verhältnis der jährlich abgegebenen Nutzwärme zur aufgenommenen elektrischen Energie einer Wärmepumpe; bildet die reale Systemeffizienz über ein Jahr ab.
KBOB-Ökobilanzdaten	Schweizer Datengrundlage für graue Energie und THGE im Baubereich; dient im Bericht zur Ökobilanzierung von Fenstern und Sanierungsvarianten.
Low-e-Beschichtung	„Low-emissivity“-Beschichtung: dünne, metallische oder metalloxidische Schicht auf der Glasoberfläche, die den Wärmedurchgang durch Strahlung reduziert und somit den U <sub>g</sub> -Wert der



	Verglasung verbessert. Häufig auf der inneren Seite des SZR positioniert.
Luftdurchlässigkeit	Mass dafür, wie viel Luft durch ein Bauteil (Fenster) bei Druckunterschieden strömt.
Materialpass	Standardisiertes Datenblatt, das alle relevanten Eigenschaften eines Fensters (Aufbau, thermische Kennwerte, Schadstoffe, CO <sub>2</sub> -Bilanz usw.) für Sanierung, Re-Use und Baubewilligungsverfahren dokumentiert.
Nutzungsdauer	Die erwartete Periode zwischen Inbetriebnahme und Ersatz eines Bauteils.
Produkt as a Service	Geschäftsmodell, bei dem die Nutzung eines Produkts (hier: Fenster) als Dienstleistung angeboten wird, einschliesslich Wartung und gegebenenfalls Ertüchtigung.
Psi-Wert ( $\Psi_g$ )	Linearer Wärmeverlust über den Glasrandverbund; geht zusammen mit $U_g$ und $U_f$ in die Berechnung des $U_w$ ein.
Re-Use (Wiederverwendung)	Die erneute Verwendung von gebrauchten Bauteilen oder Produkten in ihrer ursprünglichen Form, gegebenenfalls nach Aufbereitung.
Renovationsfenster	Speziell für die Sanierung entwickelte Fenster, die in die bestehenden Blendrahmen eingebaut werden können.
Schalldämmung ( $R_w$ )	Mass für die Fähigkeit eines Bauteils (Fenster) Schall zu dämmen, angegeben in Dezibel (dB).
Schlagregendichtheit	Widerstand eines Bauteils (Fenster) gegen das Eindringen von Wasser bei Schlagregen.
Technische Lebensdauer	Zeitspanne der Funktionsfähigkeit eines Bauteils bis zu einer starken Schädigung, bei der eine Instandsetzung technisch oder finanziell nicht mehr sinnvoll ist.
Transmissionswärmeverluste ( $Q_T$ )	Wärmeverluste, die durch die Bauteile der Gebäudehülle (wie Fenster) nach aussen abgegeben werden
U-Wert	Übergeordneter Begriff für Wärmedurchgangskoeffizienten. $U_w$ gilt für das ganze Fenster, $U_f$ für den Rahmen, $U_g$ für die Verglasung. Ein niedrigerer Wert bedeutet geringere Wärmeverluste.
Wärmeschutzverglasungen	Wärmeschutzverglasungen auch Mehrfachisolier-Verglasung, Wärmedämmverglasung genannt sind 2- oder 3-fach Verglasungen mit einer dünnen Beschichtung, Abstandhalter und einer Gasfüllung (getrocknete Luft, Argon, Xenon oder Krypton).
Zirkuläres Geschäftsmodell	Wirtschaftsmodell, das darauf abzielt, Produkte und Materialien so lange wie möglich in Kreisläufen zu halten, um Abfall zu minimieren und Ressourcen zu schonen.



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Der Gebäudesektor trägt wesentlich zu den globalen Treibhausgasemissionen bei, wobei Fenster eine zentrale Rolle für die Energieeffizienz von Bauwerken spielen. Die energetische Qualität der Fenster beeinflusst massgeblich die Transmissionswärmeverluste sowie die Lüftungswärmeverluste durch Undichtigkeiten. Zudem haben Fenster einen signifikanten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit in Innenräumen.

Die Herstellung neuer Fenster ist mit einem hohen Energieaufwand verbunden. Dies resultiert insbesondere aus der Flachglas Produktion mit Prozesstemperaturen von circa 1600 °C sowie der Herstellung der Rahmenkomponenten [3]. Nach einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 30 Jahren werden Fenster üblicherweise ausgetauscht, da sie nicht mehr den aktuellen Anforderungen an U-Werte, visuellen Komfort, Dichtigkeit und Schallschutz entsprechen. Dieser regelmässige Fensterersatz führt zu einem erheblichen Ressourcenverbrauch und bindet signifikante Mengen grauer Energie und indirekten Treibhausgasemissionen.

Dank umfangreicher Anstrengungen wie z.B. dem Gebäudeprogramm, sind die Emissionen aus dem Gebäudebetrieb in der Schweiz stark gesunken. Heute sind die Betriebsemissionen ungefähr gleich hoch wie die Erstellungsemissionen. Diese Entwicklung unterstreicht die zunehmende Bedeutung einer ganzheitlichen Betrachtung des Ressourceneinsatzes über den gesamten Lebenszyklus von Gebäudekomponenten.

In der Schweiz besteht bei etwa einer Million sanierungsbedürftiger Gebäude ein erhebliches Potenzial für energetische Verbesserungen im Fensterbestand. Bisherige Ansätze zur energetischen Optimierung setzen überwiegend auf einen vollständigen Fensterersatz, was mit hohen Kosten und Ressourcenverbrauch verbunden ist. Effiziente Alternativen zur kostengünstigen und ressourcenschonenden Verbesserung bestehender Fenster sind bisher nur begrenzt verfügbar, obwohl bei Re-Use-Projekten bereits erste Erfahrungen mit der Erhaltung und Ertüchtigung von Fenstern vorliegen. Anders ist es im Bereich der Denkmalpflege, da gibt es bereits Dokumentationen, die aufzeigen, wie Fenster saniert werden können [4], [5].

## 1.2 Motivation des Projektes

Die energetische und technische Ertüchtigung bestehender Fenster bietet ein grosses Potenzial zur Ressourcenschonung und Reduktion von Treibhausgasemissionen. Die Verbesserung der energetischen Eigenschaften führt durch geringere Transmissionswärmeverluste und eine erhöhte Luftdichtigkeit zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs. Gleichzeitig steigert die höhere raumseitige Oberflächentemperatur der Fenster im Winter die thermische Behaglichkeit bei reduzierter Raumlufttemperatur. Durch den Erhalt bestehender Fensterkomponenten können zudem bedeutende Mengen grauer Energie und indirekter Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Fensterersatz eingespart werden.

Die aktuelle Bewertung des energetischen Zustands von Bestandsfenstern basiert überwiegend auf groben Literaturwerten. Die energetische Qualität der eingebauten Fenster variiert erheblich, bedingt durch unterschiedliche Konstruktionsweisen, Materialien und Herstellungszeiträume. Standardisierte Analysemethoden und fundierte Bewertungssysteme für die energetische und technische Ertüchtigung von Bestandsfenstern fehlen bisher weitgehend.

Die Entwicklung standardisierter Verfahren zur Fensterertüchtigung soll die Sanierungsrate erhöhen und zur Stärkung nachhaltiger Baudienstleistungen beitragen. Die Einbindung von Unternehmen der Fensterbranche fördert den direkten Praxistransfer und die Innovationsfähigkeit der Branche. Die Projektergebnisse leisten damit einen Beitrag zur Ressourcenschonung und Reduktion von Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor (siehe USG Kap. 5, Art. 10h und Kap. 7, Abschnitt 4, Art. 35j [6]).



## 1.3 Projektziele

Dieses Forschungsprojekt zielt darauf ab, Verfahren zur Ertüchtigung bestehender Fenster zu untersuchen, die sowohl ökologisch als auch ökonomisch nachhaltiger sind. Im Fokus stehen die Verbesserung der Energieeffizienz, die Treibhausgasemissionen, die Steigerung der Dauerhaftigkeit sowie die Schonung von Ressourcen durch die Wiederverwendung von Fenstern und Fensterkomponenten.

### **Untersuchung von Sanierungs- und Ertüchtigungsverfahren für Fenster:**

Ziel ist es, praxiserprobte Methoden zur Sanierung bestehender Fenster zu analysieren, um Energieeffizienz der Fenster zu verbessern.

### **Berücksichtigung ganzheitlicher Nachhaltigkeitskriterien:**

Die Verfahren sollen unter den Aspekten Energieeffizienz (Minimierung des Energieverlusts), Reduktion der Treibhausgasemissionen in Herstellung und Betrieb, Wirtschaftlichkeit, Langlebigkeit sowie Kreislauffähigkeit der Materialien optimiert werden. Ziel ist es, ökologisch und ökonomisch nachhaltige Lösungen zu erreichen.

### **Analyse und Bewertung der Fenster in fünf Test-Liegenschaften:**

Anhand einer Auswahl von fünf Test-Liegenschaften werden bestehende Fensterstrukturen untersucht, um geeignete Sanierungsvarianten zu evaluieren.

### **Erarbeitung einer Wegleitung für Sanierungsverfahren:**

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird eine praxisorientierte Wegleitung erstellt, die standardisierte Vorgehensweisen für die Sanierung von Fenstern enthält. Diese soll als Entscheidungshilfe dienen.

### **Entwicklung eines Materialpasses:**

Für die Bewertung und Dokumentation der eingesetzten Materialien wird ein Materialpass erstellt, der die Materialzusammensetzung, Umweltauswirkungen, Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit systematisch erfasst. Dieser Pass unterstützt die transparente Nachverfolgbarkeit und die Förderung von Kreislaufwirtschaft im Bausektor.

## 1.4 Forschungsfragen

Zur Erreichung der Projektziele werden vier zentrale Forschungsfragen definiert:

### **1. Auswahl der Sanierungsverfahren**

Mit welchen Sanierungsverfahren können Fenster (Rahmen und Gläser) bereits heute ertüchtigt werden und wann ist ein Fenster-Ersatz angezeigt?

Diese Frage zielt darauf ab, praktisch realisierbare Verfahren wie die Aufdopplung von Verglasungen, den Glaserersatz oder den Einsatz von Renovationsfenstern hinsichtlich Treibhausgasemissionen in Erstellung und Betrieb zu untersuchen. Die Verfahren können sowohl für die energetische Ertüchtigung von Fenstern im Rahmen von Erneuerungen von Gebäuden wie auch für die Wiederverwendung von Fenstern (Re-Use) angewendet werden.

### **2. Vorabklärungen für Sanierungsverfahren**

Welche Untersuchungen sind für die Erfassung des Ist-Zustands erforderlich und welche Sanierungsverfahren erweisen sich unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsdimensionen als vorteilhaft?

Im Rahmen von fünf Testgebäuden soll die Weiterverwendung der Fenster untersucht und konzipiert werden. Dabei soll herausgefunden werden, wann es sich lohnt Fenster zu ertüchtigen und wann ein Fensterersatz angebracht ist.

Die verschiedenen Verfahren werden durch U-Wert-Berechnungen und -Messungen sowie die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen bewertet. In einer Lebenszyklusanalyse über 30 Jahre werden



die Sanierungsverfahren dem Fensterersatz gegenübergestellt, wobei sowohl energetische und ökologische Aspekte als auch die Wirtschaftlichkeit analysiert werden.

### **3. Einsatz von Re-Use Fenstern im Rahmen von Baubewilligungsverfahren**

Was braucht es, damit Re-Use Fenster im Rahmen von Baubewilligungen beurteilt und wieder eingesetzt werden können? Es soll untersucht werden, wie Fenster als Grundlage für die Wiederverwendung (Re-Use) überprüft werden müssen, damit ausreichende Informationen für den Zustand und die Qualität des Fensters vorhanden sind und die Fenster mit einem behördentauglichen Materialpass für das Baubewilligungsverfahren ausgestattet werden können.

### **4. Konstruktionsprinzipien für neue Fenster**

Wie müssen Fenster konstruiert werden, damit sie einfach repariert und die Materialien wiederverwendet werden können? Ziel ist die systematische Zusammenstellung von Massnahmen zur Verbesserung der Reparierbarkeit, Verlängerung der Lebensdauer und Förderung der Dauerhaftigkeit von Fenstern.

## **1.5 Projektbegrenzung**

Das Forschungsprojekt befasst mit der energetischen Ertüchtigung und Wiederverwendung von Fenstern in Öffnungen von Aussenwänden. Der Fokus liegt auf Standardfenstern, die ab Mitte der 1960er Jahre hergestellt wurden mit Zwei- oder Dreifach-Isolierverglasung oder Wärmeschutzverglasung. Es werden Fenster mit Holz-, Holz-Metall-, Kunststoff- oder Metallrahmen betrachtet, die typischerweise in Wohngebäuden, Büro- und Industriegebäuden und Schulen eingesetzt werden.

Von der Untersuchung ausgeschlossen sind Verbundfenster, historische Fensterkonstruktionen mit Einfachverglasung sowie Kastenfenster mit mehreren Fensterebenen. Ebenfalls nicht Gegenstand der Untersuchungen sind Fassadensysteme, Pfosten-Riegel-Konstruktionen, Dachfenster und Wintergartenkonstruktionen. Denkmalgeschützte Fenster werden aufgrund ihrer speziellen Anforderungen und Rahmenbedingungen nicht berücksichtigt.

Die Bewertung der Fenster erfolgt primär unter bauphysikalischen Gesichtspunkten, insbesondere hinsichtlich der energetischen Qualität und der feuchtetechnischen Eigenschaften. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Verbesserung der Wärmedämmung, die Optimierung der Luftdichtheit sowie die Reduktion von Wärmebrücken. Aspekte des Schallschutzes, des Brandschutzes und der Sicherheit werden berücksichtigt, soweit sie für die Gesamtbewertung relevant sind, jedoch nicht vertiefend untersucht. Gestalterische und denkmalpflegerische Aspekte sind nicht Bestandteil der Untersuchungen.

Die entwickelten Methoden und Bewertungssysteme zielen auf eine praktische Anwendbarkeit in der Gebäudesanierung ab und berücksichtigen die spezifischen Anforderungen der fokussierten Gebäudenutzungen.



## 2 Vorgehen und Methode

### 2.1 Recherche der Grundlagen von bestehenden Fenstern

Die Grundlagen zur Beurteilung der energetischen und technischen Qualität bestehender Fenster sollen erarbeitet werden. Über eine Literaturstudie und mittels Befragung von Expertinnen und Experten werden Sanierungsverfahren von Fenstern (Rahmen und Verglasungen) zusammengetragen, geprüft und es wird eine Auswahl getroffen, welche Verfahren näher untersucht werden. Probleme in der Alterung, Verschleiss von Komponenten und Hindernisse bei der Reparierfähigkeit von Fenstern werden eruiert und beschrieben. Fallbeispiele bereits ausgeführter energetischer Ertüchtigungen bestehender Fenster werden dokumentiert.

Die Abbildung 1 zeigt Sanierungsvarianten von Fenstern. Untersucht werden insbesondere die Varianten Rahmen und Verglasungen.

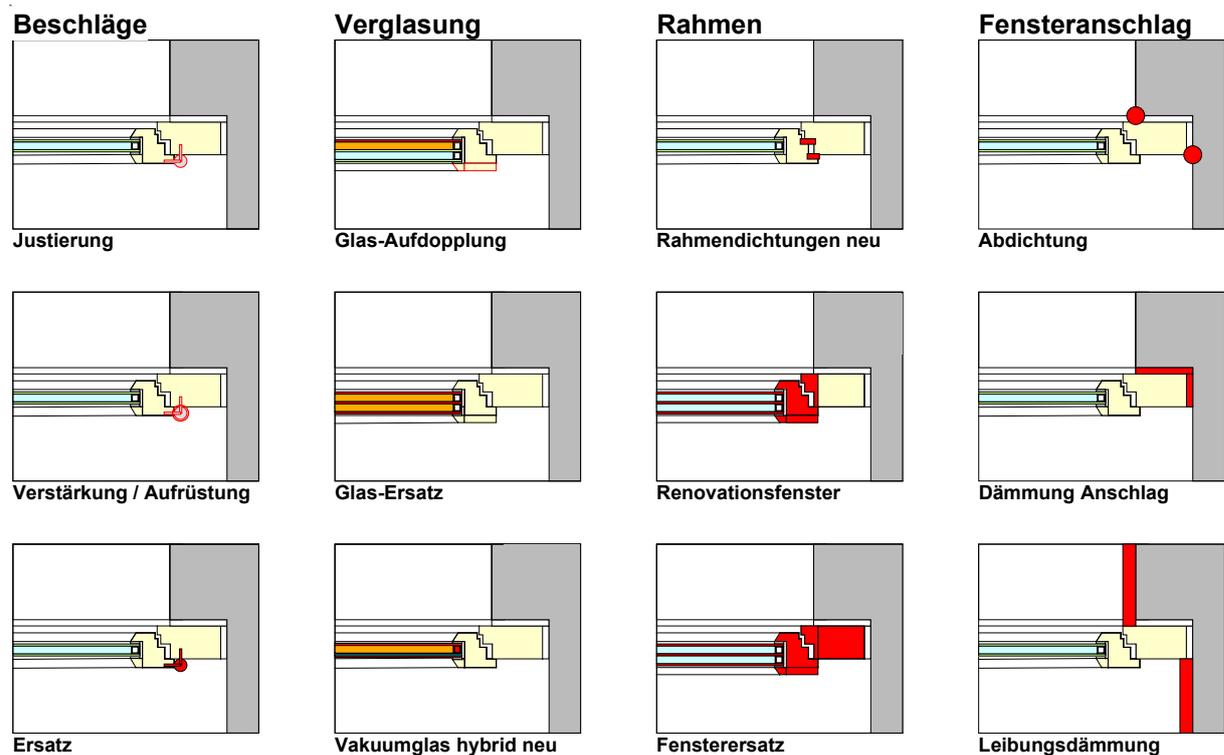


Abbildung 1: Energetische Optimierung von Fenstern im Bestand (INEB)

Zu Beginn werden Recherchen betreffend Grundlagen zu Fenstern im Bestand und für Sanierungsmassnahmen durchgeführt. Mit den gesammelten Daten und Informationen wird eine Datensammlung aufgebaut, in der Energiekennwerte für ganze Fenster, für einzelne Fensterkomponenten und für Sanierungsmassnahmen berechnet werden.



## 2.1.1 Methodik zur energetischen Beurteilung von Fenstern

### Energieflüsse am Fenster

Die Beurteilung der Fenster, bzw. der Sanierungsmassnahmen erfolgt anhand eines Vergleichs der Wärmeverluste im Betrieb (Transmissionswärmeverluste  $Q_T$ ) und der daraus resultierenden Treibhausgasemissionen mit den indirekten Treibhausgasemissionen für die Erstellung der Fenster. Solare Wärmeeinträge werden nicht berücksichtigt, der Gesamtenergiedurchlassgrad ( $g$ ) der Gläser sowie der energieäquivalente U-Wert  $U_{w,eq}$  bei Herstellung wird aber in der Datensammlung sofern verfügbar erfasst.

### Energieflüsse im Betrieb

Basis für die Berechnung der Wärmeverluste bildet der Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters  $U_w$  in  $W/(m^2K)$ , berechnet nach Norm EN ISO 10077-1. Der U-Wert des Fensters bezieht sich auf das lichte Mass der Wandöffnung ( $A_w$ ). Diese Fläche wird im Merkblatt Fenster der EnFK als Netto-Fensterabmessung bezeichnet (siehe Abbildung 2). Der U-Wert des Fensters wird ermittelt aus den Wärmeflüssen der Fensterkomponenten Fensterglas ( $U_g$ ) und Glasrandverbund ( $\Psi_g$ ) und des Fensterrahmens ( $U_f$ ), berechnet gemäss EN ISO 10077-2.

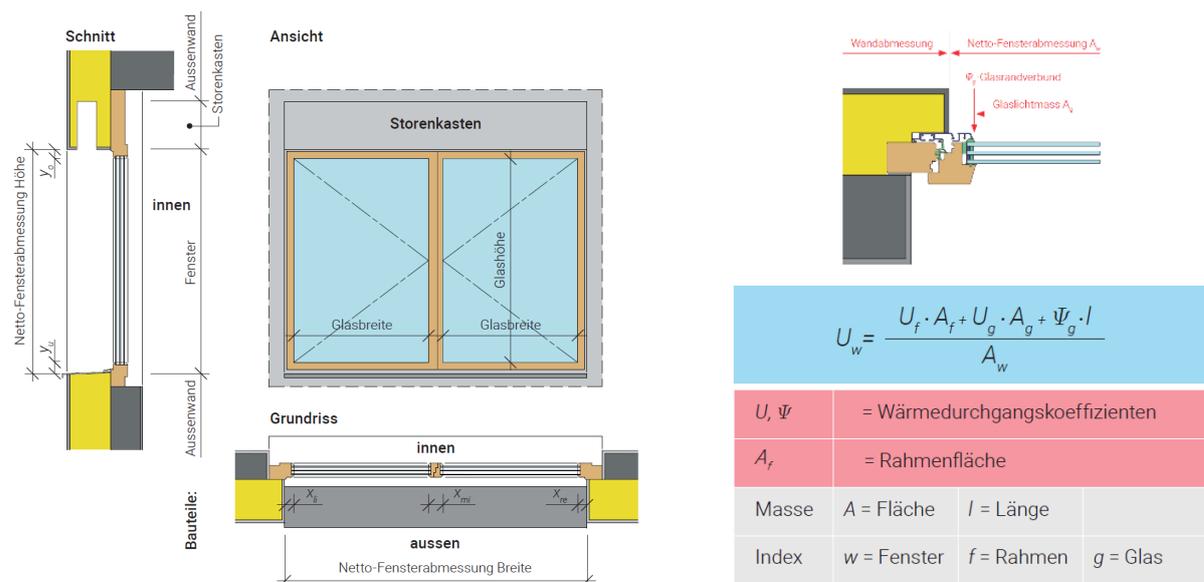


Abbildung 2: Auszug EnFK, Merkblatt Fenster 2021

Die Fensterfläche mit Netto-Abmessungen bildet die Modellgrenze der Berechnung der Betriebsenergie. Bei der grauen Energie wird das Fenster mit Aussenabmessungen (Fenstermasse) erfasst. Die Energiebilanzierung erfolgt für das Fenster allein. Wärmebrückenverluste beim Fensteranslag werden nicht berücksichtigt.



## 2.1.2 Methodik zur Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen

Für die Fenster, Fensterrahmen und Verglasungen werden die indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung gemäss Merkblatt SIA 2032:2020 «Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden» [7] auf der Datenbasis KBOB-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» 2009:2022 [8] ermittelt. Es wird mit einer Lebensdauer (Amortisationszeit) von 30 Jahren gerechnet. Die Berechnungen werden auf Grundlage der Methodik des Fensterrechners Firma treeze Ltd. durchgeführt [9]. Gemäss SIA werden bei der Ökobilanzierung von Re-Use-Komponenten die Entsorgungsemissionen des gesamten Bauteils am Ende der Nutzungsdauer berücksichtigt, unabhängig davon, ob Teile des ursprünglichen Fensters wiederverwendet wurden. Die Transporte für den Fenster-Re-Use werden in der Ökobilanzierung gemäss KBOB Empfehlung Ökobilanzdaten im Baubereich [7] berücksichtigt. Die Transporte vom Quellobjekt über den Fensterbauer bis hin zum Lager verursachen Emissionen, die gemäss der Systemgrenze einbezogen werden.

Der Fenster-Re-Use-Prozess umfasst folgende Transporte:

- Quellobjekt zum Fensterbauer: Transport der demontierten Fenster zur Aufbereitung.
- Optionaler Transport der Verglasung zum Isolierglashersteller und zurück zum Fensterbauer: Nur bei erforderlicher Verglasungsverbesserung durch Aufdopplung.
- Optionaler Transport der neuen Verglasung vom Isolierglashersteller zum Fensterbauer: Nur bei erforderlicher Verglasungsverbesserung durch Glasersatz. Transport ausserhalb der Systemgrenze.
- Fensterbauer zum Zwischenlager (z.B. Bauteilbörse): Zwischenlagerung nach Aufbereitung.
- Zwischenlager zum Zielobjekt: Transport der Re-Use-Fenster zur Wiedermontage. Transport ausserhalb der Systemgrenze.

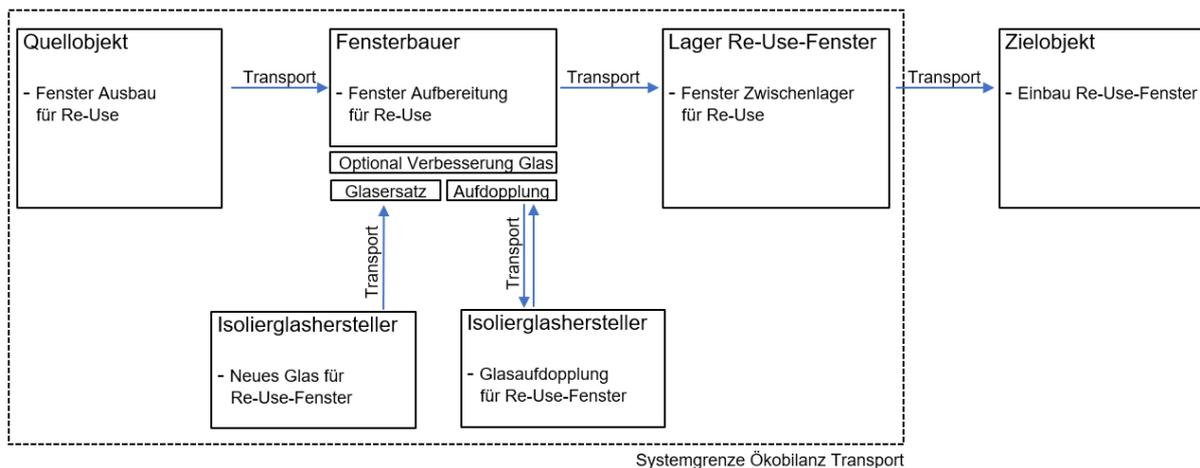


Abbildung 3: Berücksichtigung von Transporten bei Fenster-Re-Use in der Ökobilanzierung.

Die Ökobilanzierung der Transporte berücksichtigt:

- Transportentfernung: Die Distanz zwischen den Stationen ist entscheidend für die Emissionen. Es wird im Durchschnitt eine einfache Entfernung von 50 km angenommen.
- Fahrzeugtyp: Die Emissionen variieren je nach Fahrzeuggrösse und Effizienz. Für die Berechnungen wird ein LKW mit 3.5-7.5 t angenommen.
- Transportgewicht: Die Masse des Fensters oder der Verglasung wird in der Berechnung berücksichtigt.



### 2.1.3 Recherche Grundlagen von Fenstern im Bestand

#### Vorgehen

Die Recherche zu Grundlagen von Fenstern wird mit Unterstützung der beteiligten Industriepartner durchgeführt. Kenngrössen, deren Ermittlung und Anforderungen in Normen, Verordnungen, Gesetzen werden zusammengestellt.

Als Grundlage für die Analyse bestehender Fenster wird eine Recherche und Aufbereitung historischer Daten von Anforderungen, Literaturangaben und Herstellerdaten von Fenstern durchgeführt. Dabei werden unter anderem U-Werte von Fenstern  $U_w$ , Verglasungen  $U_g$ , Fensterrahmen  $U_f$ , und g-Werte von Verglasungen in einer Datensammlung erfasst.

Die detaillierte Grundlagenrecherche dient der Feststellung der technischen und energetischen Eigenschaften der Fenster im Bestand der letzten Jahrzehnte. Der Fokus liegt auf Flügel-Fenster mit Isolier- bzw. Wärmeschutz-Verglasungen mit zwei oder drei durch Glasrandverbunde fest verbundene Gläser.

Die Heterogenität der Daten, die flexible Nutzung von Energie- Kennwerten und wünschbare weitergehende Analysemöglichkeiten erforderten den Aufbau einer entsprechenden Datensammlung.

Die Informationen und weiteren Kennwerte wurden tabellarisch gesammelt und es können jederzeit weitere Datensätze integriert werden.

Allenfalls wird die Sanierungsvariante durch eine neue zusätzliche Fensterebene in den Katalog aufgenommen und noch näher betrachtet. Während der Literaturstudie und Datenrecherche wird die Beurteilungsmethodik entwickelt, angewendet und laufend verfeinert.

#### Datengrundlagen

Es liegt ein breites Spektrum von Daten vor, die aus sehr unterschiedlichen Informationsquellen stammen. Es gibt Kennwerte für einzelne Fensterkomponenten, sowie ganzen Fenstern. Die Datenqualität erscheint sehr heterogen. Einerseits liegen im Detail nachvollziehbare Produktdaten mit Plandarstellungen vor, andererseits gibt es auch nur pauschale Angaben ohne Verweis auf eine Fenstergeometrie oder die Fenstermaterialien sind gänzlich unbekannt.

Um die Datenerhebung transparent zu halten und die genaue Herkunft der Kennwerte immer nachvollziehbar bleibt, werden die Datensätze neben der Referenzierung mit dem Quelldokument auch gemäss folgender Liste in Abbildung 4 kategorisiert:

Q-PR-00	Produktdaten
Q-AN-00	Anforderungswerte
Q-HI-00	Hilfsmittel, Tools
Q-FA-00	Fachbücher, -artikel
Q-ME-00	Messwerte
Q-BE-00	Berechnungswerte
Q-FO-00	Forschungsberichte, Studien
Q-XY-00	Diverse

Abbildung 4: Typen von Datenquellen



## 2.2 Vorgehen bei der Analyse der Test-Liegenschaften

Es werden fünf Liegenschaften mit sanierungsbedürftigen Fenstern untersucht. Dabei werden vorhandene Unterlagen ausgewertet und es finden Begehungen statt. Mittels vor-Ort-Messungen können U-Werte und Gasfüllgrade der Scheibenzwischenräume bestimmt werden. Die Abmessungen des Isolierglasaufbaus werden mit Hilfe eines portablen Messgeräts gemessen. Ausserdem wird bei den Begehungen durch die Projektpartner der technische Zustand der Fensterbeschläge beurteilt.

Die Ermittlung des gesamten U-Wertes eines Fensters ( $U_w$ -Wert) erfolgt mit einer rechnerischen Berücksichtigung des Rahmen-U-Wertes  $U_f$  zum gemessenen  $U_g$ -Wert der Verglasung. Die Sanierungsverfahren werden in Bezug auf U-Wert-Verbesserungen, eingesparter Energie und Treibhausgasemissionen sowie Lebenszykluskosten bewertet, um herauszufinden, wann es sich lohnt, Fenster zu ertüchtigen und wann ein Fensterersatz angezeigt ist.

### 2.2.1 Methodik zur Berechnung der U-Werte und Transmissionswärmeverluste

Die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster ( $U_w$  in  $W/(m^2K)$ ) erfolgt nach der Methode der SN EN ISO 10077-2. Die Wärmeschutz-Kenndaten der Fensterkomponenten (Fensterrahmen, Verglasung und Glasrandverbund) im Bestand werden mit allen verfügbaren Informationsquellen (Massaufnahmen vor Ort, Baubeschriebe, Detailplänen, Produktdatenblätter, Herstellerangaben und weitergehenden Analysemethoden (vor-Ort-Messungen von Glas-U-Wert, Gasfüllgrad Verglasung) und mittels weitergehender Berechnungen ( $U_g$  mit glaCE,  $U_f$  und  $\Psi_g$  mit 2dim-thermische Bauteilanalyse (flixo) ermittelt. Die Transmissionswärmeverluste werden berechnet mit den Heizgradtagwerten der nächstgelegenen Klimastation.

Verbleibende kleinere Unsicherheiten bei der Einschätzung des Wärmeschutzes im Bestand werden durch die Angabe eines Bereichs der Resultate aufgefangen. Diese Unsicherheiten fallen vornehmlich beim Bestand ins Gewicht, bei der Ertüchtigung kann der Bereich enger definiert werden. Während bei den Transmissionswärmeverlusten eines Fensters im Bestand Unsicherheiten von bis zu 20% aufgrund fehlender Herstellerangaben oder Messungen möglich sind, kann dieser Wert bei den Ertüchtigungsvarianten mit vorhandenen Herstellerangaben bis auf wenige Prozent reduziert werden. In der Beurteilung der Effizienzsteigerung der Ertüchtigungsvarianten bleibt aber immer eine gewisse Unsicherheit bestehen.

### 2.2.2 Vorgehen bei der U-Wert-Messung

An den Fenstern der Test-Liegenschaften werden während der Heizperiode stichprobenartig in-situ  $U_g$ -Wert-Messungen der Verglasungen vorgenommen. Die Werte der Verglasungen werden gemäss Norm ISO 9869-1:2014 gemessen.

Die vor-Ort  $U_g$ -Wert-Messung erfolgt mit Hilfe vom Messsystem gOMS II von GreenTEG AG.

#### Beschreibung des Messsystems

Das gOMS II ist ein tragbares und wetterfestes Messsystem, speziell entwickelt für den Einsatz bei temporären Messungen unter anspruchsvollen Bedingungen. Eine Basisstation kann bis zu 10 Messknoten über eine Sub-GHz-Funkverbindung (868/915 MHz) vernetzen. Die erfassten Messdaten werden direkt in der Basisstation gespeichert.

Die Plug-and-Play-Konfiguration von gOMS II macht es zu einer geeigneten Lösung für schnelle und genaue Messungen über mehrere Tage bis Monate mit der Möglichkeit der Echtzeitüberwachung.

Anwendungsbereiche:

- U-Wert-Messung nach ISO 9869
- R-Wert-Messung nach ISO 9869



- Überwachung des Wärmestroms, der Oberflächentemperatur und der Umgebungstemperatur auf einer ausgewählten Fläche (Innen- und Aussenanwendung)

Es werden Messungen von mindestens drei aufeinanderfolgenden Nächten gemittelt [10].

Die Komponenten sind Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt. Die Messkomponenten haben die Schutzart IP 67 und einen Temperatureinsatzbereich von -40 bis +80 °C [11].



Abbildung 5: Nodes und Basisstation [11]



Abbildung 6: Temperaturfühler für Innen-/Aussentemperatur [11]



Abbildung 7: Wärmestrom- und Oberflächentemperatur-Sensor (links) und Aussen-Oberflächentemperatur-Sensor (rechts) [11]

Abmessungen (L x B x H)	(mm)	30 x 30 x 3,3
Genauigkeit Temperaturmessung	(°C)	+/- 0,1
Auflösung Temperatursensor	(°C)	0,01
Genauigkeit Wärmestrommessung	(%)	+/- 3
Auflösung Wärmestromsensor	(W/m <sup>2</sup> )	0,09
Messbarer Wärmestrombereich	(kW/m <sup>2</sup> )	+/- 1,6

Tabelle 1: Spezifikation Wärmestrom-/Oberflächentemperatur-Sensor [11]

Die Abmessungen der Wärmestrom- und Oberflächentemperatur-Sensoren sind klein, sodass auch kleinere Fenster gemessen werden können.



Material	Einheit	Chromium-Nickel-Stahl
Dimension (d x l)	(mm)	5 x 50
Genauigkeit	(°C)	+/- 0.1
Auflösung	(°C)	0.01

Tabelle 2: Digitaler Temperatursensor für Aussen- und Innenlufttemperatur

Der Aufbau der  $U_g$ -Wertmesseinrichtung ist in der folgenden Abbildung 8 ersichtlich. Erkennbar sind die Node-Sender, die Oberflächensensoren und die im Normabstand der Scheiben platzierten Temperaturfühler.



Abbildung 8: Aufbau GreenTEG U-Wertmessung der Verglasung Roche Bau 29 1. OG als Beispiel (INEB)

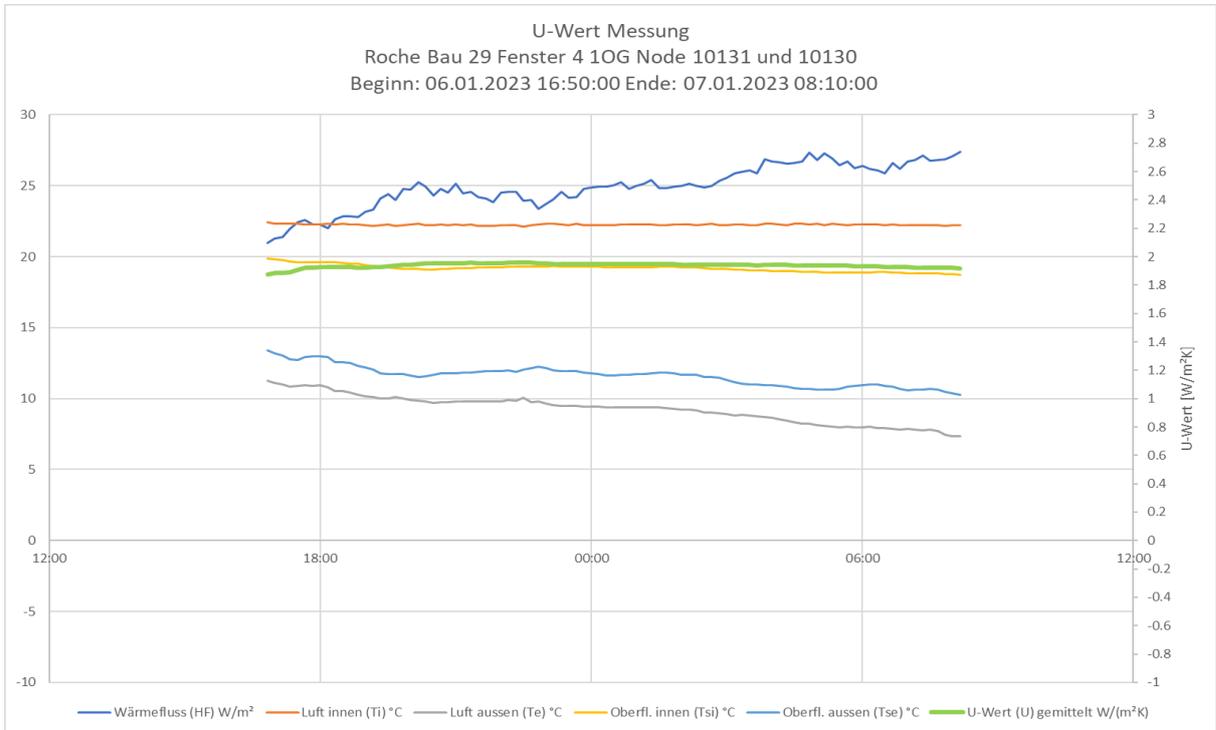


Abbildung 9: Aufzeichnung  $U_g$ -Wertmessung einer Nacht Roche Bau 29 Fenster 4 1OG als Beispiel (INEB)

Abbildung 9 zeigt den nächtlichen Verlauf des Wärmestroms in Funktion der Temperaturen der Aus- sen-/Innenluft. Der  $U_g$ -Wert wird rechnerisch mit dem gemessenen spezifischen Wärmestrom und der Temperaturdifferenz aussen zu innen als Quotient bei Messende bestimmt. Es findet dabei eine Mittelung statt.

Um Messeinflüsse aufgrund aussenklimatischer und betrieblicher Bedingungen des Raumes auszu- mitteln wird der  $U_g$ -Wert als Mittelwert der einzelnen Nachtmessungen gemäss Tabelle 3: Beispiel- rechnung des  $U_g$ -Wert Mittelwerts Fenster 4 1OG Roche Bau 29 gerechnet. Im Beispiel wird ein  $U_g$ - Wert von 1.93 W/(m<sup>2</sup>K) bestimmt.

Messung	05.01.2023 09:50 bis	09.01.2023 11:10
Resultate	U (W/(m <sup>2</sup> K))	Abweichung (%)
Nacht 1	1.93	0.07
Nacht 2	1.92	-0.7
Nacht 3	1.92	-0.53
Nacht 4	1.96	1.15
Mittelwert	1.93	

Tabelle 3: Beispielrechnung des  $U_g$ -Wert Mittelwerts Fenster 4 1OG Roche Bau 29



### 2.2.3 Vorgehen bei der Messung des Gasfüllgrades

Die Messungen des Gasfüllgrades wurden mit dem Gerät «Sparklike Laser Portable®» der Firma Sparklike Oy durchgeführt, das vom Industriepartner Vandaglas AG zur Verfügung gestellt wurde (siehe Abbildung 12). Hierbei handelt es sich um ein nicht-destruktives Messgerät zur Messung des Gasfüllgrades für zwei- und dreifach verglaste Fenster. Gemessen wird die Konzentration des Sauerstoffs, worüber dann die Konzentration der Isoliergase bestimmt werden kann. Die zugrundeliegende Technologie basiert auf Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), einer Spezialanwendung der Laserspektroskopie. Der Messvorgang dauert pro Messpunkt zwischen 18 und 28 Sekunden. [12]



Abbildung 10: Sparklike Laser Portable Sensor ©Sparklike [12]

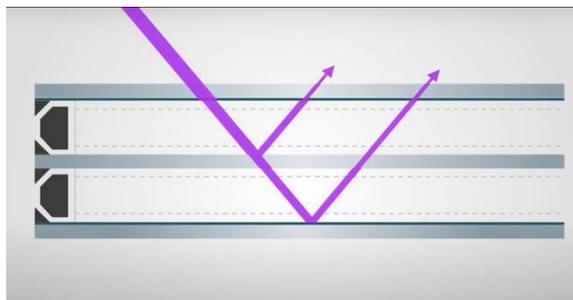


Abbildung 11: Laser-Strahlengang ©Sparklike [12]



Abbildung 12: Messeinrichtung Sparklike Laser Portable® [12]

Abbildung 10 zeigt den Sensorkopf, welcher während der Messung leicht an die Scheibenoberfläche gedrückt wird. Auf Abbildung 11 ist der Messstrahlengang des Lasers zu erkennen. Die Reflexionen, welche ein charakteristisches Muster in Funktion der Konstruktion und der Gasfüllgrade zeigen, werden gemessen und ausgewertet.

Die Wellenlänge des Lasers wird auf eine Absorptionslinie des Sauerstoffs im Gashohlraum abgestimmt. Durch Erkennung der Abnahme der Signalintensität berechnet das Gerät die Gaskonzentration des Füllgases, in der Regel Argon oder Krypton. Diese Technologie ermöglicht genaue Messungen durch Beschichtungen und Laminierungen hindurch.

Der Laser misst durch eine Beschichtung hindurch, wenn der Transmissionsgrad der Beschichtung bei einer Wellenlänge von 760 nm über 30% liegt. Nicht alle Scheiben müssen diese Anforderung erfüllen, sondern nur die Scheiben, durch die der Laser geht, d.h. die erste Scheibe bei Doppelverglasung



und die ersten beiden bei Dreifachverglasung. Der Laser braucht die letzte Scheibe nicht zu durchdringen, um die Gaskonzentration korrekt zu messen.

Die vom ift Rosenheim durchgeführten unabhängigen Studien verglichen die nicht-invasiven Gasmesstechnologien von Sparklike – «Sparklike Laser Portable®» und «Sparklike Handheld®» - mit der Gaschromatographie, dem Standardverfahren der Industrie. Ziel der Tests war es, die Zuverlässigkeit und Praxistauglichkeit dieser Methoden zu demonstrieren [13].

Das Sparklike Handheld® nutzt im Gegensatz die Plasma-Emissionsspektroskopie, bei der ein Hochspannungsfunke zwischen Glasscheiben erzeugt wird, um Argon Atome zur Lichtemission anzuregen. Diese Emission wird analysiert, um die Gaskonzentration zu bestimmen. Während das Handheld-Gerät bei Doppelverglasungen sehr effektiv ist, ist es bei Messungen durch Beschichtungen mit niedrigem Emissionsgrad eingeschränkt. Hier zeigt das Laser Messprinzip Vorteile.

Messdauer:	18–21 s / Doppel-Verglasung 22–28 s / Dreifach-Verglasung (abhängig von den Einstellungen und der Struktur der Isolierverglasung)
Messwiederholbarkeit (Konfidenzintervall 95 %)	2% *
Maximale Dicke der Isolierverglasung:	51 mm (von Fläche 1 bis Fläche 3 bei Doppel-Verglasung, von Fläche 1 bis Fläche 5 bei Dreifach-Verglasung)
Scheibendicken-Bereich:	3-12 mm (2-23 mm; bei manueller Geräteeinstellung)
Scheibenzwischenraum-Bereich:	8-22 mm (4-40 mm; bei manueller Geräteeinstellung)
Messbereich:	1–97%

(\*) in Abhängigkeit des Glastransmissions-Spektrums

Tabelle 4: Mess-Spezifikationen Sparklike Laser Portable

Einflüsse auf die Messgenauigkeit:

Wiederholte Messungen von Verglasungsmustern zeigten eine gewisse Streuung der ermittelten Gasfüllgrade in Abhängigkeit der jeweiligen Messtage. Ebenso spielt die Messebene, bzw. -oberfläche einen leichten Einfluss, also ob innen oder aussen gemessen wird. Dieser Einfluss kommt von der Lage und Art der Beschichtung her. [14].

Fazit:

Für die Bestimmung des Gasfüllgrads im Rahmen einer Re-Use Anwendung sind die Streuungen jedoch vernachlässigbar. Das Sparklike Laser Portable® eignet sich sehr gut für vor-Ort Messungen.



## **2.3 Vorgehen zur Erarbeitung von Materialpass und Wegleitung**

### **2.3.1 Erarbeitung des Materialpasses**

Basierend auf den Vorgaben aus Normen und den Ergebnissen aus den Kapiteln 3 bis 5 des vorliegenden Berichts wird ein Materialpass entwickelt mit den Kenngrössen, die für verschiedene Anwendungen im Laufe von Fenstersanierung und Wiederverwendung von Fenstern wichtig sind, unter anderem für den Baubewilligungsprozess. Zur Ermittlung dieser Kenngrössen werden sowohl Parameter von neu hergestellten Fenstern als auch von Re-Use-Fenstern gesammelt und mit den Projektergebnissen abgeglichen. Diverse Datenblätter, Ausschreibungen von Bauteilbörsen und auch ergänzende Informationen der Projektpartner dienen hierzu als Grundlage.

In einem zweiten Schritt werden mehrere Workshops im Rahmen des Projektteams durchgeführt, um die gesammelten Eigenschaften zu gliedern und zu priorisieren. Insbesondere wird definiert, welche Kenngrössen und Schritte zu welchem Prozesszeitpunkt relevant sind.

### **2.3.2 Erarbeitung der Wegleitung**

Aus den Erkenntnissen der Begehungen, der verschiedenen Berechnungen und der Literaturrecherche wird eine Wegleitung in verschiedenen Workshops des Projektteams entwickelt, in welcher Sanierungsverfahren in Abhängigkeit des Fenstertyps und des Alters des Fensters abgebildet werden. Darin wird auch dargelegt, wann ein Fenster-Ersatz ökologisch sinnvoll ist. Zudem geht es um den Umgang mit sanierten Fenstern unter Einbezug des Materialpasses, der unter anderem den Einsatz von Re-Use-Fenstern im Baubewilligungsverfahren ermöglichen soll.

Die Wegleitung behandelt die Ertüchtigung von Fenstern im Bestand, also die Optimierung der Fenster direkt im vorhandenen Gebäude, sowie die Wiederverwendung (Re-Use) von Fenstern, bei der Fenster aus einem Quellgebäude demontiert und in ein neues Zielgebäude integriert werden. Themenübergreifend werden die gemeinsamen rechtlichen Rahmenbedingungen, die Analyse und Erfassung der Fenster sowie die Ertüchtigungsverfahren dargestellt.

### **2.3.3 Konstruktionsprinzipien für die Herstellung neuer Fenster**

Darüber hinaus sollen Konstruktionsprinzipien für die Hersteller neuer Fenster gesammelt werden. Sie sollen Hinweise geben, wie Fenster konstruiert werden müssen, damit sie generell besser gewartet bzw. repariert werden können. Generell angestrebt wird hierbei 'Design for Disassembly'. Dieses Konzept zielt darauf ab, Materialien, Komponenten und Systeme so zu gestalten, dass sie am Ende ihrer Lebensdauer einfach, effizient und möglichst schadenfrei zurückgebaut werden können. Ziel ist es, die Wiederverwendbarkeit, Reparaturfähigkeit und das Recycling der verwendeten Materialien zu maximieren und Abfälle zu minimieren.



## 2.4 Vorgehen zur Kostenermittlung

### 2.4.1 Wirtschaftlichkeitsberechnung

Eine Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt nicht nur die anfänglichen Investitionskosten, sondern auch die über den gesamten Lebenszyklus entstehenden Kosten, um fundierte und nachhaltige Entscheidungen zu ermöglichen. Wir gehen in der vorliegenden Arbeit vor allem auf die Erstellungs- und Erneuerungs- respektive Ersatzvornahmekosten ein. Sie bilden eine wichtige Grundlage für einen Kostenvergleich von Projektvarianten mit Ertüchtigungs- und -Ersatzvarianten von Fenstern.

### 2.4.2 Lebenszykluskosten

Unter den Lebenszykluskosten, in Englisch Life Cycle Costs (LCC), werden alle über einen Lebenszyklus eines Bauwerks, Bauelementes oder Bauteils anfallenden Kosten verstanden. Somit beinhalten die Lebenszykluskosten die Erstellungs-, Änderungs- und Beseitigungs-, Wartungs- und Unterhaltskosten (inkl. Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten), Erneuerungs- und Ersatzvornahmekosten sowie die Verwertungskosten. Je nach Gebäudenutzung sind auch Provisorien, Umzugs- und Einlagerungskosten, Einnahmehausfälle, Umtriebskosten und Entschädigungen zu berücksichtigen.

Die Erstellungskosten beinhalten alle Investitionen, welche für die Planung und Realisierung des Projektes erforderlich sind. Diese beinhalten somit alle direkten Baukosten (Materialien, Transporte, Montagen usw. bis zu den Altlasten), alle Honorarkosten, alle Perimeterbeiträge (Beiträge an Strassen und Wege) und Anschlussgebühren sowie die Bauzeitfinanzierung. Bei den Wartungs- und Unterhaltskosten sowie Erneuerungs- und Ersatzvornahmekosten und den Verwertungskosten trifft dies ebenfalls zu.

$$LZK = I + B + \sum_{i=1}^n N_i + \sum_{k=1}^m U_k + \sum_{y=1}^p E_p + V$$

Formel zur Berechnung der Lebenszykluskosten

hierbei gilt:

I	Investitionssumme [CHF]
B	ggf. Änderungs- und Beseitigungskosten [CHF]
N	Nutzungskosten [CHF]
U	Unterhaltskosten [CHF]
E	Instandsetzungs-/Erneuerungskosten [CHF]
V	Verwertungskosten [CHF]
n	Anzahl der Nutzungsphasen [St.]
m	Anzahl der Unterhaltmassnahmen [St.]
p	Anzahl der Modernisierungen [St.]

Für die Ermittlung der Lebenszykluskosten stehen grundsätzlich zwei unterschiedliche Methoden (quantitative oder qualitative Methode) zur Wahl. Zudem können die Lebenszykluskosten statisch oder dynamisch ermittelt werden. Bei der LCC-Berechnung kann weiter zwischen einer Nominalkosten-Betrachtung (statisch) und einer Kapitalwert-Betrachtung (dynamisch) unterschieden werden.



In unserem Fall wird eine dynamische Kostenbetrachtung nach der Discounted-Cash-Flow-Methode (DCF-Methode) angewendet. Hierbei werden die Kapitalkosten in der Diskontierung berücksichtigt und nicht separat ausgewiesen.

Lebenszykluskosten sind ein fiktives Szenario, welches aufgrund vieler Einflüsse eine hohe Ungenauigkeit aufweisen können. Trotz Rückblick in der Kostenentwicklung im Schweizer Bausektor können diese Einflüsse nicht vorhersehbar gemacht werden. Da jedoch alle Vergleichsvarianten denselben Unsicherheiten unterliegen, eignen sich Lebenszykluskosten dennoch für eine Kostenoptimierung oder einen Variantenvergleich.

Auch können unterschiedliche fiktive Szenarien erarbeitet werden. Das effektive Szenario hängt oft von der Beurteilung und den wirtschaftlichen Absichten der Eigentümer ab. So werden in der Praxis oft zu einem zu früheren Zeitpunkt, d.h. vor dem Ende der Nutzungsphase eines Bauteils, Massnahmen ergriffen. Dies ist in Abbildung 13 als Szenario 1 abgebildet. Das Szenario 2 beinhaltet Massnahmen am Ende der Nutzungsphase. Aber auch das Szenario 3 ist in der Praxis anzutreffen, nämlich dann, wenn Bauteile über die Nutzungsphase genutzt werden, bis eine Schädigung mit Folgeschäden eintritt.

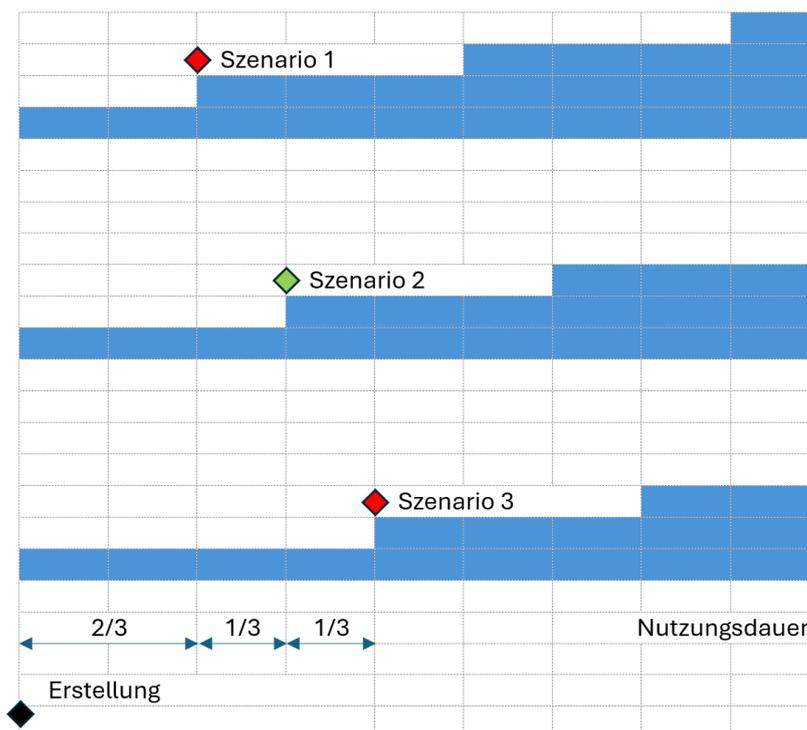


Abbildung 13: Vergleich der Szenarien

Die Lebenszykluskosten werden nicht nur durch die Wahl des geeigneten Szenarios beeinflusst. Speziell in der dynamischen Betrachtung sind die Zeitpunkte der jeweiligen Massnahmen von Bedeutung. So müssen im Sinne der Wartung in kleineren Intervallen in Abhängigkeit der jeweiligen Ausgangslage Kosten aufgewendet werden (siehe Abbildung 13). Diese Wartungskosten sind in der vorliegenden Betrachtung nicht detailliert nachgewiesen, sondern in den jeweiligen Massnahmen integriert.

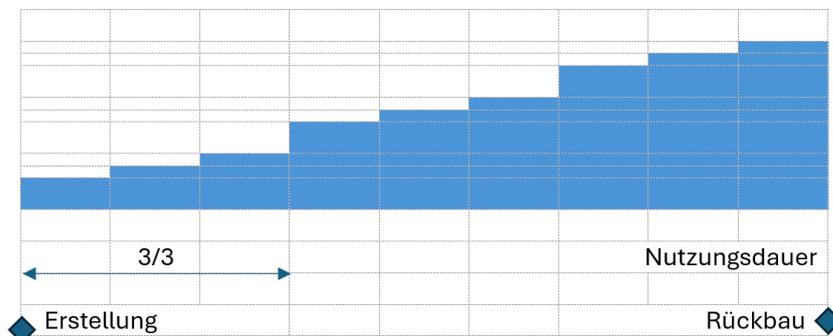


Abbildung 14: Veranschaulichung der kontinuierlichen Massnahmen in kleinen Intervallen

### 2.4.3 Erstellungs- und Unterhaltskosten sowie Erneuerungs- und Ersatzvornahmekosten

In der Praxis liegt aktuell das Hauptaugenmerk auf den Investitionskosten. Die Unterhalts-, Erhaltungs- und Ersatzvornahmekosten werden oft mit einem prozentualen Kennwert aus den Investitionskosten berücksichtigt. Wenn kein prozentualer Kennwert zur Anwendung kommt, müssen die jeweiligen Kosten ermittelt werden. Dies kann zu einer Vielzahl von nicht erkennbaren Fehlern führen, da die Mehrheit der Anwender von Lebenszykluskosten-Berechnungen die effektiven Einflussfaktoren und Teilkennwerte nicht kennen.

Alternativ zu Kennwerten können Kostenrichtwerte ermittelt werden. Dies setzt jedoch eine vertiefte Auseinandersetzung mit Unterhalts-, Erhaltungs- und Ersatzvornahmemassnahmen auseinander. In der Bearbeitung der Kosten wird auf Kostenrichtwerte (zusammengesetzte und indexierte Kostenkennwerte) basierend auf Kostenkennwerten (ermittelte Kennwerte aus Rückkalkulationen von realisierten Projekten) zurückgegriffen.

In Abhängigkeit von der geforderten Granularität kann es auch sinnvoll sein, nur die Kosten unterschiedlicher Ertüchtigungsvarianten, ohne Verwertungs- und Nutzungskosten miteinander zu vergleichen. Hierbei gilt es aber zu beachten, dass jede Variante eine unterschiedliche Lebensdauer nach sich zieht. Wird beispielsweise bei einem Fenster der Ist-Zustand beibehalten, so ist davon auszugehen, dass die entsprechende Rest-Lebensdauer deutlich kürzer sein wird als bei einem Glasersatz oder dem Einsatz eines Renovationsfensters. Insofern ist es bei dieser vereinfachten Betrachtungsweise zentral, dass nicht nur die Erstellungskosten betrachtet werden, sondern auch die resultierende Rest-Lebensdauer.

### 2.4.4 Lebensdauer

Bei der Nutzungsdauer handelt es sich um die „effektiv zu erwartende Periode zwischen der Inbetriebnahme und dem Ersatz eines Bau- oder Anlagenteils. Die Nutzungsdauer ist begrenzt durch die technische Lebensdauer oder durch einen allfälligen Ersatz auf Grund veränderter Bedürfnisse (Komfort, Ästhetik, neue Nutzung usw.) oder verbesserter Ausführung (grössere Leistungsfähigkeit, bessere Energiebilanz usw.).“

Als technische Lebensdauer wird die Zeitspanne der Funktionsfähigkeit bis zum Erreichen einer starken Schadhaftheit, bei der eine Instandsetzung aus technischen (oder finanziellen) Gründen nicht mehr unternommen werden kann.



Mit einem regelmässigen Unterhalt kann die technische Lebensdauer eines Bauteils, Bauelementes oder Gebäudes verlängert werden. Als Unterhalt versteht man das Wahren bzw. Wiederherstellen der Substanz ohne wesentliche Veränderung der Nutzung und/oder des ursprünglichen Wertes. Zum Unterhalt zählen die Instandhaltung und Instandsetzung. Bei der Instandhaltung geht es insbesondere um das Wahren der Funktionstauglichkeit durch einfache und regelmässige Massnahmen. Bei der Instandsetzung geht es um die Wiederherstellung der Funktions- und Gebrauchstauglichkeit mit ausreichender Sicherheit und vereinbarter Dauerhaftigkeit.

Bei einem Eingreifen in die Substanz mit wesentlicher Veränderung der Nutzung und/oder des ursprünglichen Wertes spricht man von Erneuerung.

Findet jedoch ein Abbruch oder eine Demontage von nicht mehr funktions- und/oder gebrauchstauglicher Bauteile/-elemente statt, so spricht man von einem Ersatz.

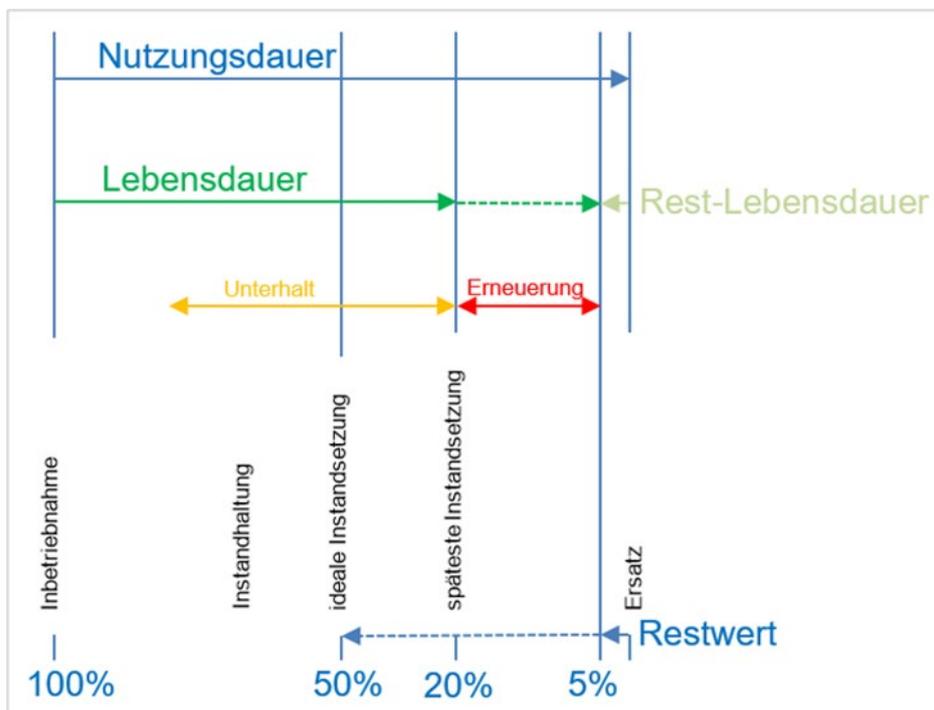


Abbildung 15: Darstellung der Begrifflichkeiten

Für die Ermittlung der technischen Lebensdauer kann auf Normen, Empfehlungen von Verbänden, Behörden oder dgl. zurückgegriffen. Diese sind jedoch oft, so erscheint es zumindest dem Verfasser, aus wirtschaftlichen und nicht technischen oder ökologischen Überlegungen hergeleitet. Erfahrungsgemäss überschreiten Bauteile die technische Lebensdauer oft erheblich.

Ebenfalls so oft werden jedoch Bauteile zu einem Zeitpunkt ersetzt, bei welchen die Lebensdauer bei weitem noch nicht erreicht wurde. Dies kann unter Umständen aus wirtschaftlichen Überlegungen Sinn machen, muss aus ökologischer Sicht jedoch hinterfragt werden. Auch hinterfragt werden darf, dass viele Bauteile nicht einmal einen Drittel der technischen Lebensdauer erreichen, weil eine substantielle Schädigung die Funktion, Gebrauchstauglichkeit und/oder Sicherheit beeinträchtigt.



Bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten ist wichtig zu erkennen, dass Bauteile mit einer hohen Lebensdauer von Vorteil sind. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Bauteile je nach Konstruktionsart, Materialwahl und Nutzungsintensität unterschiedliche Alterungsverhalten und somit eine differenzierte Lebensdauer aufweisen.

## 2.4.5 Berechnungstool Kosten und Lebensdauer

Im vorliegenden Projekt wurde die Erstellungs- und Erneuerungs- respektive Ersatzvornahmekosten der unterschiedlichen Varianten angeschaut in Abhängigkeit der Lebensdauer. Dafür wurde auch ein Tool erstellt.

Das Tool berücksichtigt für die Berechnung des Kostenrichtwertes einen ermittelten Kostenkennwert aus einer Vielzahl von realisierten Projekten, das Einbaujahr (nur rückwirkend durch Indexierung auf Basis des Zürcher Wohnbauindex), die Einbauregion (indexiert nach dem Baupreisindex des Bundesamtes für Konjunktur), die Bestellmenge (indexiert auf Basis von Rückfragen bei Unternehmungen), die Fensterposition (indexiert unter Berücksichtigung der erforderlichen baulichen Massnahmen in Abhängigkeit der Position), das Rahmenmaterial (indexiert auf Basis von Kostenkennwerten), die Fenstergrosse und das Fensterformat (indexiert auf Basis von Kostenkennwerten) und die Fenstergliederung (indexiert auf Basis von Kostenkennwerten). Der jeweils ermittelte Kostenrichtwert wurde für fiktive Beispiele erstellt und mit realisierten Projekten verglichen und als zielführend für eine Genauigkeit von  $\pm 15\%$  (Kostenschätzung) für x-beliebige Gebäude und eine Genauigkeit von  $\pm 10\%$  (Kostenvoranschlag) für kleine bis mittelgrosse Wohnbauten klassifiziert.

Für die Ermittlung von Erneuerungs- und Ersatzvornahmen wurden zusätzlich die Faktoren Massnahmen an Flügel/Rahmen und Verglasung oder am Fenster (Betrachtung als gesamtes Element) und weiteren Zusatzmassnahmen (bauliche Korrekturmassnahmen, z.B. an den Leibungen) berücksichtigt.

Zur Ermittlung der Lebensdauer wurden die Planungs-, Material- und Ausführungsqualität, Wartung resp. Unterhalt (ausgeführt oder nicht ausgeführt), der Einbauzeitpunkt, die Fensterposition, das Rahmenmaterial und eine allfällige Behandlung, der Verglasungstyp und Einbau sowie die Art der Beschläge berücksichtigt. Die Berechnung der Lebensdauer konnte direkt an den Anwendungsbeispielen (bekanntes Alter und Zustandsbeurteilung durch die Begehung) kontrolliert werden.

<b>Lebensdauer</b>					
Basis-Lebensdaueransatz					
	30				
Planungsqualität		Materialqualität		Ausführungsqualität	
Wert	Faktor	Wert	Faktor	Wert	Faktor
A - sehr gut	1.2	A - hochwertig	1.2	A - nach Lehrbuch	1.2
B - durchschnittlich	1	B - mittelmässig	1	B - normal	1
B - schlecht	0.9	C - minderwertig	0.9	C - minderwertig	0.9

Abbildung 16: Bildausschnitt zur Visualisierung der Berechnung der Lebensdauer (Indexierung)



<b>Investitionskosten</b>				
Einbaujahr	Einbauregion	Bestellmenge	Fensterlage	Typ des Fensterrahmens
2003	E - Zürich	D - sehr gross (> 50 St.)	B - mittig	A1 - Fichte/Tanne
<b>Abgeschätzte Investitionskosten [CHF/m<sup>2</sup>]</b>		<b>CHF 275.40/m<sup>2</sup></b>		
<b>Lebensdauer [a]</b>				
Planungsqualität	Materialqualität	Ausführungsqualität	Wartung und Unterhalt	Einbauzeitpunkt
A - sehr gut	A - hochwertig	A - nach Lehrbuch	A - geplant	E - nach 1999
<b>Abgeschätzte minimale Lebensdauer (Eintritt Unterhalt)</b>		<b>32.845824 a</b>		
<b>Unterhalts-/Instandsetzungskosten</b>				
Massnahme Rahmen/Flügel	Massnahme Verglasung	Massnahme Fenster	Massnahme Abfall	Zusatzmassnahmen
C - Dichtung an Wand einbauen	D - Glasersatz durch 3-fach	C - Ersatz durch neues Fenster	B - Deponie	B - Leibungen innen kor
<b>Abgeschätzte Unterhaltskosten über Lebensdauer [CHF/m<sup>2</sup>]</b>		<b>CHF 1'029.68</b>		

Abbildung 17: Bildausschnitt zur Visualisierung des Berechnungs-Tools

Nicht mitberücksichtigt wurden Kostenentwicklungen nach Ablauf der Lebensdauer. Ohne bauliche Massnahmen könnte das Bauteil und angrenzende Bauteile Schaden nehmen und somit zu erheblichen Sanierungskosten führen. Diese Variante wurde explizit ausgeklammert.



## 3 Fenster: Literaturrecherche und U-Wert Berechnungen

### 3.1 Eigenschaften von Fenstern

#### 3.1.1 Grundlagen

Fenster sind zentrale Bauelemente eines Gebäudes, die sowohl funktionale Anforderungen (Tageslicht, Ausblick, Lüftung), bauphysikalische Anforderungen (Gebäudehülle) als auch ästhetische Anforderungen erfüllen. Hier sind die wichtigsten Grundlagen, die bei der Planung, Sanierung und Analyse von Fenstern zu berücksichtigen sind:

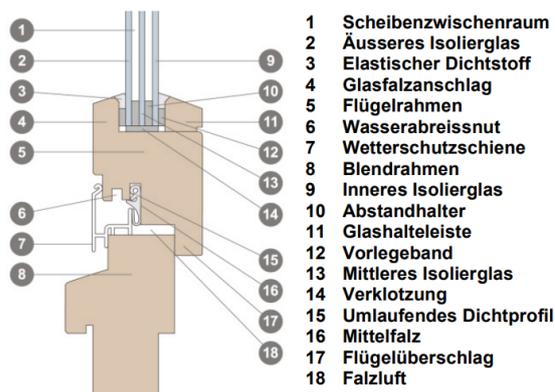
#### Aufbau eines Fensters

Ein Fenster besteht typischerweise aus:

- Rahmen: Der tragende Teil, meist aus Holz, Aluminium, Kunststoff oder einer Kombination beispielsweise Holz-Aluminium
- Verglasung: Entscheidend für Wärmedämmung, Schallschutz und Sicherheit (z. B. Einfach-, Zweifach- oder Dreifachverglasung, Sicherheitsglas).
- Beschläge: Mechanische Elemente, die das Öffnen, Schliessen und Verriegeln ermöglichen.
- Dichtungen: Verhindern Luft- und Wassereintritt.
- Abstandhalter: Halten die Glasschichten bei Mehrfachverglasungen auf Abstand und beeinflussen die Energieeffizienz.

#### Fachbegriffe

Fensterschnitt:



Fensteransicht:

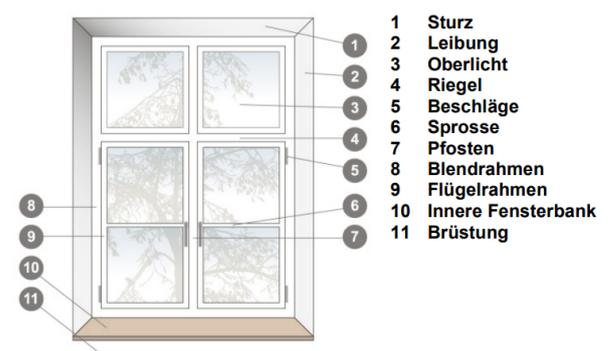


Abbildung 18: Fachbegriffe zum Fenster [15]



## Technische Eigenschaften

### a) Wärmeschutz

Der U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) gibt an, wie gut das Fenster Wärme isoliert. Moderne Fenster haben U-Werte von ca. 0.8–1.1 W/(m<sup>2</sup>K).

### b) Schallschutz

Der Schallschutz wird mit der Schalldämmung  $R_w$  in Dezibel (dB) angegeben.  $R_w$  wird verwendet, um die Schalldämmung von Bauteilen zu bewerten und sicherzustellen, dass sie den Anforderungen an den Schallschutz entsprechen.

### c) Sicherheit

Verwendung von Verbundsicherheitsglas (VSG) oder Einscheibensicherheitsglas (ESG) für Schutz gegen Durchfall oder Einbruch.  
Widerstandsklassen (z. B. RC2 oder RC3) für einbruchhemmende Fenster.

### d) Luftdurchlässigkeit und Wasserdichtigkeit

Fenster müssen gemäss EN 12207 (Luftdurchlässigkeit) und EN 12208 (Schlagregendichtheit) getestet werden, um Zugluft und Wassereintritt zu verhindern.

## 3.1.2 Wichtige Normen und Standards

Fenster müssen den aktuellen baurechtlichen Anforderungen und Normen entsprechen:

### a) Energieeffizienz und Dichtheit

Fenster müssen ausreichend gegen Luftdurchlässigkeit und Wassereintritt abgedichtet sein, um Energieverluste zu minimieren und Schäden an der Bausubstanz zu vermeiden. Anforderungen an die Wärmedämmung und Dichtheit richten sich nach den Klimabedingungen der Region und den Vorgaben der SIA-Normen (SIA 380/1 für Energieeffizienz). Wichtig sind die Vorschriften gemäss den kantonalen Energiegesetzen, die oft auf den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN) basieren [16]. Die Anforderungen für Fenster wurden in den letzten Jahren verschärft und entsprechen dem heutigen Stand der Technik.

	MuKEN 2014 / Entwurf MuKEN 2025	MuKEN 2008
U-Werte Neubau	1.0	1.3
U-Werte Sanierung*	1.0	1.3

\* Wenn vorhandene Fenster saniert werden (z. B. durch den Austausch der Verglasung oder das Nachrüsten von Dichtungen), sollten diese wenn immer möglich die oben genannten U-Wert-Anforderungen erreichen.

Tabelle 5: Einzelbauteilgrenzwerte bei Neubauten und Sanierungen [16]

### b) Luftdichtheit und Wärmedurchgangskoeffizient von Fenstern

Gemäss SIA 180 müssen Fenster einen maximal zulässigen U-Wert von 2.4 W/(m<sup>2</sup>·K) [17]. und die Anforderungen an eine luftdichte Gebäudehülle erfüllen [18].



### c) Schallschutz

Die SIA 181 regelt die Anforderungen an den Schallschutz innerhalb von Gebäuden und gegenüber Aussenlärm. Fenster müssen in der Lage sein, die erforderlichen Schallpegeldifferenzen sicherzustellen, die sich aus der Lage des Gebäudes ergeben (z. B. Nähe zu Verkehrsquellen). Ergänzend definiert die Lärmschutzverordnung (LSV) Lärmgrenzwerte, die in Kombination mit der SIA 181 die Anforderungen an Fenster in lärmbelasteten Gebieten beeinflussen. Die folgende Grafik zeigt verschiedene Glasaufbauten und deren Schalldämm-Masse an.

Typ	Spezifikation Fenster Scheibenaufbauten in mm	$R'_w + C_{tr}$				
		25-29	30-34	35-39	40-44	45-50
Standard- fenster	Normalglas 2-fach 4/16/4	■				
	Normalglas 3-fach 4/16/4/16/4		■			
	Schallschutzglas 3-fach 8/12/4/12/4			■		
	Schallschutzglas VSG 9/12/4/12/4				■	
Spezial- konstruktionen	Schallschutzglas VSG 9/12/4/12/VSG 9				■	
	Kastenfenster 2-fach + Zusatzglas ausssen					■
	Hebe-Schiebefenster		■			
	Dachflächenfenster		■			

Abbildung 19: Schalldämm-Masse von verschiedenen Scheibenaufbauten [19]

### c) Brandschutz

Für Brandschutzverglasungen macht die Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF entsprechende Vorgaben. Bei Unsicherheiten soll die zuständige Brandschutzbehörde des Kantons kontaktiert werden.

### d) Sicherheitsvorgaben

In der Schweiz gibt es Anforderungen zu Sicherheitsthemen, die in der SIA 358 «Geländer und Brüstungen» und in den SIGAB-Richtlinien (siehe SIGAB-Richtlinie 002, SR 002) integriert sind. In der SIA 358 gilt die 90 cm Brüstungshöhe, falls die Leibung des Fensters 20 cm tief ist, ansonsten gilt die Brüstungshöhe von einem Meter [20], [21].

Gemäss Richtlinie SIGAB 002 „Sicherheit mit Glas“ muss die Verglasung zur Absturzhemmung und zum Personenschutz mit speziellem Sicherheitsglas ausgeführt werden, sofern die Höhe ab Boden bis zur Unterkante Glaslicht weniger als 100 cm beträgt. Hier wurde in der SIGAB Richtlinie die Empfehlung der bfu Beratungsstelle für Unfallverhütung übernommen.

Bei bestehenden Fenstern gilt generell der Bestandesschutz, sofern nicht eine Gefährdung oder ein erheblicher Mangel vorliegt. Wird die Verglasung ersetzt, so wird empfohlen, die Anforderungen der SIGAB umzusetzen.

Fazit: Die strengeren Anforderungen der Normen der letzten Jahre haben den Ressourceneinsatz bei Fenstern markant erhöht. So wurde der U-Wert von bestehenden Fenstern mit der MuKE n 2014 die Einzelbauteilgrenzwerte von 1.3 auf 1.0 W/(m<sup>2</sup>K) verschärft, damit erfüllen manche ertüchtigten Fenster die Vorgabe nicht mehr und es braucht je nach Einschätzung der Baubewilligungsbehörde einen Systemnachweis als Grundlage für die Baubewilligung. Ausserdem wird heute auf Grund der SIGAB Richtlinie viel öfter Sicherheitsverglasungen verlangt, was ebenfalls den Ressourceneinsatz erhöht und die Ertüchtigung von Fenstern erschwert. Die künftige Normenentwicklung braucht vermehrt eine Zusammenarbeit von verschiedenen Verbänden und eine ganzheitliche Betrachtung. Wichtige Anforderungen wie Ressourceneffizienz und geringe Treibhausgasemissionen sollen in die Regelungen miteinbezogen werden.



## 3.2 Strukturierte Datensammlung und Ergebnisse

### 3.2.1 Strukturierte Datensammlung

Die Recherche zu den Fensterdaten hat zu folgenden wichtigen Informationen geführt:

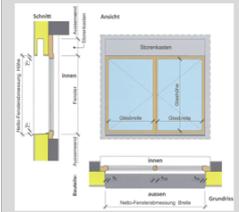
Projekt	Fensterkomponente / Optionen	Kennwerte Betriebsenergie	Kennwerte graue Energie						
<b>Bezeichnung</b> Gebäudetyp Baualter Situation	<b>Fenster</b> 	<b>Baujahr</b> <b>Fenster-U-Wert <math>U_w</math> (W/m<sup>2</sup>K)</b> <b>Abmessungen Fenster</b> Breite / Höhe Höhe Sturz Breite Leibung Höhe Brüstung Breite Mittelpartie Höhe Kämpfer	<b>Graue Energie</b> erneuerbar Nicht erneuerbar Herstellung, Transport <b>CO<sub>2</sub> / THG</b>						
	<b>Glas-paket</b> <table border="1"> <tr> <td><b>Anzahl Gläser:</b></td> <td>2 3</td> </tr> <tr> <td><b>SZR: Füllung:</b></td> <td>Luft Edelgas</td> </tr> <tr> <td><b>IR-Beschichtung</b></td> <td>1 2</td> </tr> </table>	<b>Anzahl Gläser:</b>	2 3	<b>SZR: Füllung:</b>	Luft Edelgas	<b>IR-Beschichtung</b>	1 2	Elementdicke (ED, mm) <b>Glas-U-Wert <math>U_g</math> (W/m<sup>2</sup>K)</b> Glas-Fläche $A_g$ (m <sup>2</sup> ) Gesamtenergiedurchlassgrad $g$ (-) Emissivität $\epsilon$ (-)	<b>Graue Energie</b> erneuerbar Nicht erneuerbar Herstellung, Transport <b>CO<sub>2</sub> / THG</b>
	<b>Anzahl Gläser:</b>	2 3							
	<b>SZR: Füllung:</b>	Luft Edelgas							
<b>IR-Beschichtung</b>	1 2								
<b>Rahmen</b> <table border="1"> <tr><td>Holz</td></tr> <tr><td>Holz-Metall</td></tr> <tr><td>Kunststoff</td></tr> <tr><td>Metall</td></tr> <tr><td>Weitere Hybrid</td></tr> </table>	Holz	Holz-Metall	Kunststoff	Metall	Weitere Hybrid	Glas-Falztiefe (mm) <b>Rahmen-U-Wert <math>U_f</math></b> Rahmen-Fläche $A_f$ <b>Info Beschläge</b>	<b>Graue Energie</b> erneuerbar Nicht erneuerbar Herstellung, Transport <b>CO<sub>2</sub> / THG</b>		
Holz									
Holz-Metall									
Kunststoff									
Metall									
Weitere Hybrid									
<b>Glasrand-verbund</b> <table border="1"> <tr><td>Aluminium</td></tr> <tr><td>Edelstahl</td></tr> <tr><td>GFK</td></tr> <tr><td>Elastomer</td></tr> </table>	Aluminium	Edelstahl	GFK	Elastomer	Linearer Psi-Wert $\Psi_g$ (W/mK) Länge Glasrand $l_g$ (m)	Linearer Psi-Wert $\Psi_g$ (W/mK) Länge Glasrand $l_g$ (m)			
Aluminium									
Edelstahl									
GFK									
Elastomer									

Abbildung 20: Disposition der Datensammlung. Bild: INEB

Die Abbildung 20 zeigt die derzeit in der Datensammlung erfassten Informationen und Werte im Überblick.

Neben den allgemeinen Informationen eines Bauprojekts, dem jedes Fenster zugeordnet werden kann, gibt es im Wesentlichen vier Bereiche, jeweils für das ganze Fenster und die drei Fensterkomponenten Glaspaket, Glasrandverbund und Fensterrahmen und mit den jeweiligen Varianten. Jede Fensterkomponente und auch ganze Fenster werden mit ihren geometrischen Eigenschaften und den Energie-Kennwerten erfasst. Die Bereiche sind verknüpft, so dass die Energiebilanz eines Fensters aus seinen Komponenten berechnet werden kann. Oder es kann angezeigt werden, aus welchen Komponenten ein Fenster besteht.

Die Grundlagenrecherche befördert einige neue Erkenntnisse. Die folgenden Erläuterungen und Diagramme zeigen eine Übersicht der erfassten Daten. Im Anschluss werden die Resultate kommentiert und vorläufige zusammenfassende Erkenntnisse formuliert.



### 3.2.2 Fenster U-Werte

Die erfassten Daten ganzer Fenster ( $U_w$ ) stammen aus Forschungspublikationen, aus Fachartikeln in Bauphysik-Publikationen und Produkteangaben der Fensterhersteller. Die für die Fenster-U-Werte ( $U_w$ ) entscheidende Fenstergeometrie (Grösse, Format, Rahmen- und Glasanteile, Länge Glasrandverbund) ist oft nicht spezifiziert. Zusätzlich werden im folgenden Diagramm Anforderungswerte (rot) aus Wärmedämmvorschriften, SIA-Normen und der Energiegesetzgebung dargestellt.

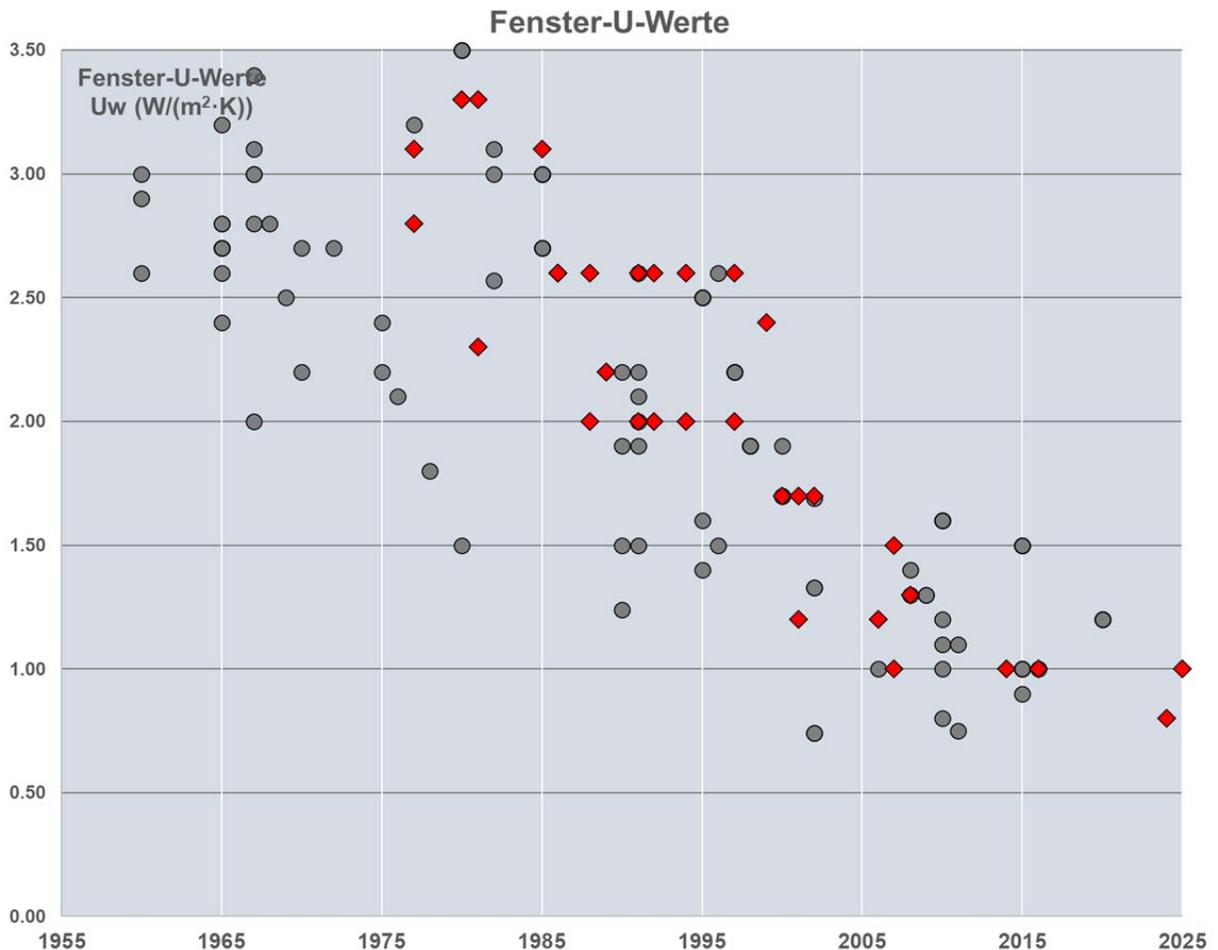


Abbildung 21: in Datensammlung erfasste Fenster-U-Werte ( $U_w$ ): Produktwerte (grau), Anforderungswerte (rot)

Durch die vielen differierenden Fensterkomponenten als auch die verschiedenen und teilweise unbekanntes Fensterabmessungen ist der Vergleich der Fenster-U-Werte nicht aussagekräftig. Einige Aussagen können aber getroffen werden:

- Der Wärmeschutz der Fenster wurde in den letzten 50 Jahren um bis zu Faktor 3 verbessert.
- Die Effizienzsteigerung hat sich seit dem Jahr 2000 markant verbessert.
- Die Verglasung hat den grössten Beitrag zur Effizienzsteigerung geleistet.
- Wie bei den Anforderungswerten erfolgte die Effizienzsteigerung in mehreren Stufen.



### 3.2.3 Fensterrahmen $U_f$ -Werte

Die Fensterrahmen zeigen typische Entwicklungsschritte mit sinkenden  $U_f$ -Werten im Lauf der Zeit in Abhängigkeit der Rahmenmaterialien. Entscheidend für den Wärmeschutz des ganzen Fensters ist neben den  $U_f$ -Werten der einzelnen Komponenten auch die Rahmenfläche (lichtoptimierte Fenster).

#### Fensterrahmen aus Holz

Die Stärke des Rahmenholzes entscheidet im Wesentlichen über den Wärmeschutz des Rahmens. So lag der  $U_f$ -Wert eines Holzrahmens beim Übergang von der Doppel- zur Isolierverglasung im Zeitraum 1960 bis 1980 bei einer typischen Stärke von 53 mm mit  $U_f=1.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Eine Rahmenstärke in den 1980ern von rund 60mm brachte mehr Stabilität für die Aufnahme der schwereren Isolierverglasungen und einen U-Wert bis  $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Heute wird mit ca. 80mm Rahmenstärke ein Rahmen-U-Wert von 1.4 erreicht. Eine starke Durchdringung des schweizerischen Marktes haben massive Fensterrahmenprofile im Stil von Passivhaus-Fenstern mit Rahmen-U-Werten unter  $1.0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  nicht erreicht. Alternativ haben «lichtoptimierte» Fenster eine grössere Verbreitung gefunden. Mit relativ hohen Rahmen-U-Werten  $U_f$  um  $1.4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , dafür mit deutlich kleinerer Rahmenfläche kann der Fenster-U-Wert etwa im selben Mass gesenkt werden.

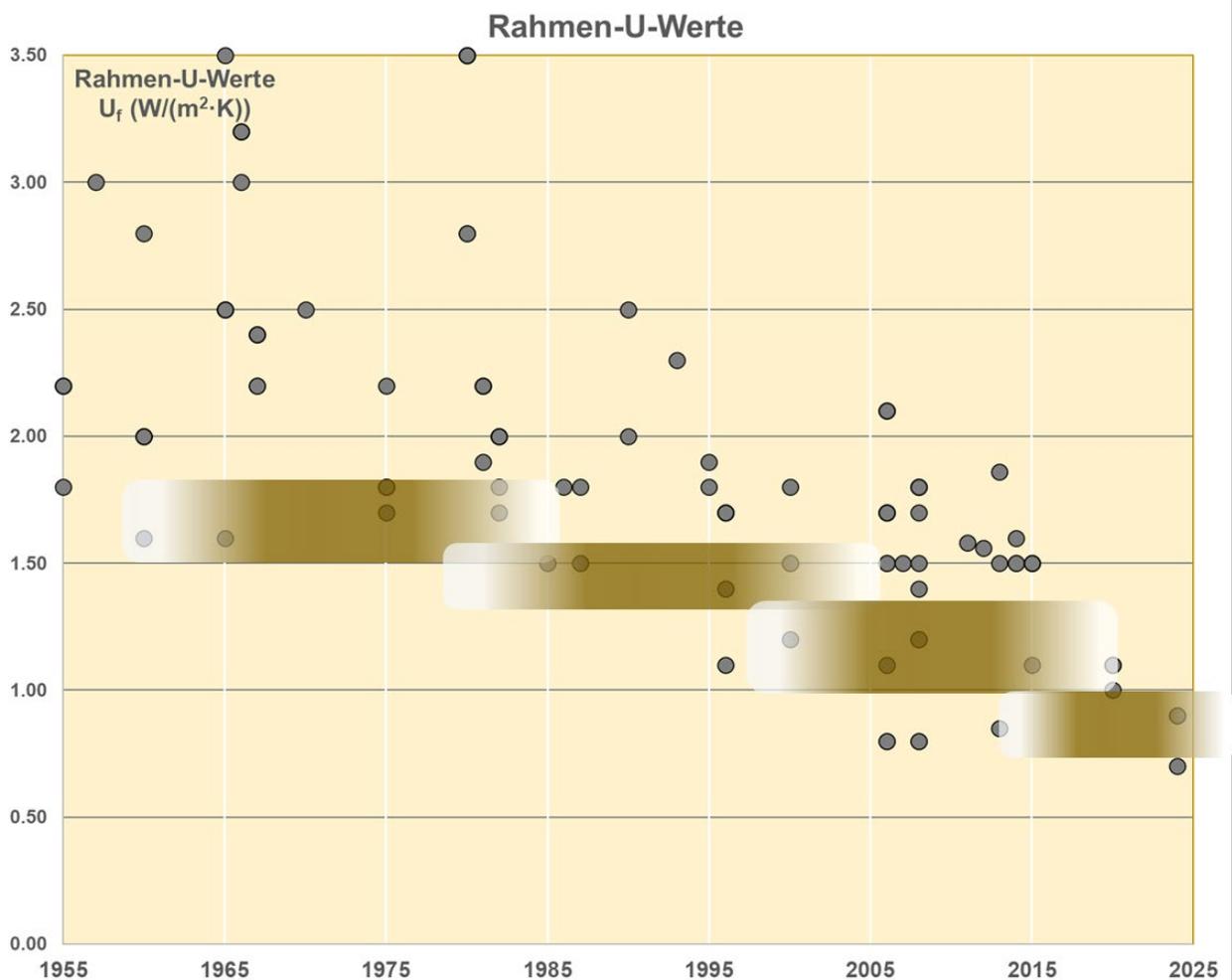


Abbildung 22: Timeline der Fensterrahmen in Holz mit Bereichen der Rahmen-U-Werte  $U_f$ , Bild: INEB



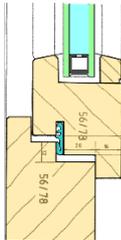
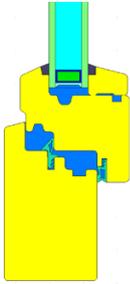
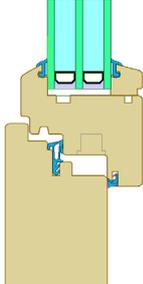
				
Baujahr	1960 - 1985	1980 - 2005	2000 - 2020	2015 -
Rahmenstärke	50-60 mm	60-70 mm	70-80 mm	>80 mm
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> K))	1.8 – 1.5	1.6 – 1.4	1.4 – 1.0	<1.0

Tabelle 6: U-Werte Fensterrahmen aus Holz.

### Fensterrahmen aus Holz-Metall

Bereits in den 1960er-Jahren gab es erste Ansätze, den Witterungsschutz der klassischen Fensterrahmen in Holz durch ein äussere Aluminium-Abdeckung zu verbessern. Nach einiger Entwicklungszeit, in der der Wetterschutz verbessert wurde, ohne den Wärmeschutz durch das Aluminium deutlich zu verschlechtern, kam der Marktdurchbruch in der Schweiz in den 1980er-Jahren. Der Rahmen-U-Wert lag in dieser Zeit noch leicht höher als bei Holzrahmen, mit einer stetigen Optimierung der Rahmengometrie mit geringeren Wärmebrückeneffekten sind die Holz-Metall-Rahmen den reinen Holzrahmen thermisch ebenbürtig und es werden Rahmen-U-Werte bis 1.0 W/(m<sup>2</sup>·K) erreicht. Wie bei den anderen Rahmenmaterialien gibt es ausserdem weitere Optimierungen durch zusätzliche Wärmedämmschichten im Rahmenprofil und der  $U_w$ -Wert des eingebauten Fensters kann durch die Minimierung der sichtbaren Rahmenfläche («lichtoptimierte» Fenster) zusätzlich gesenkt werden.

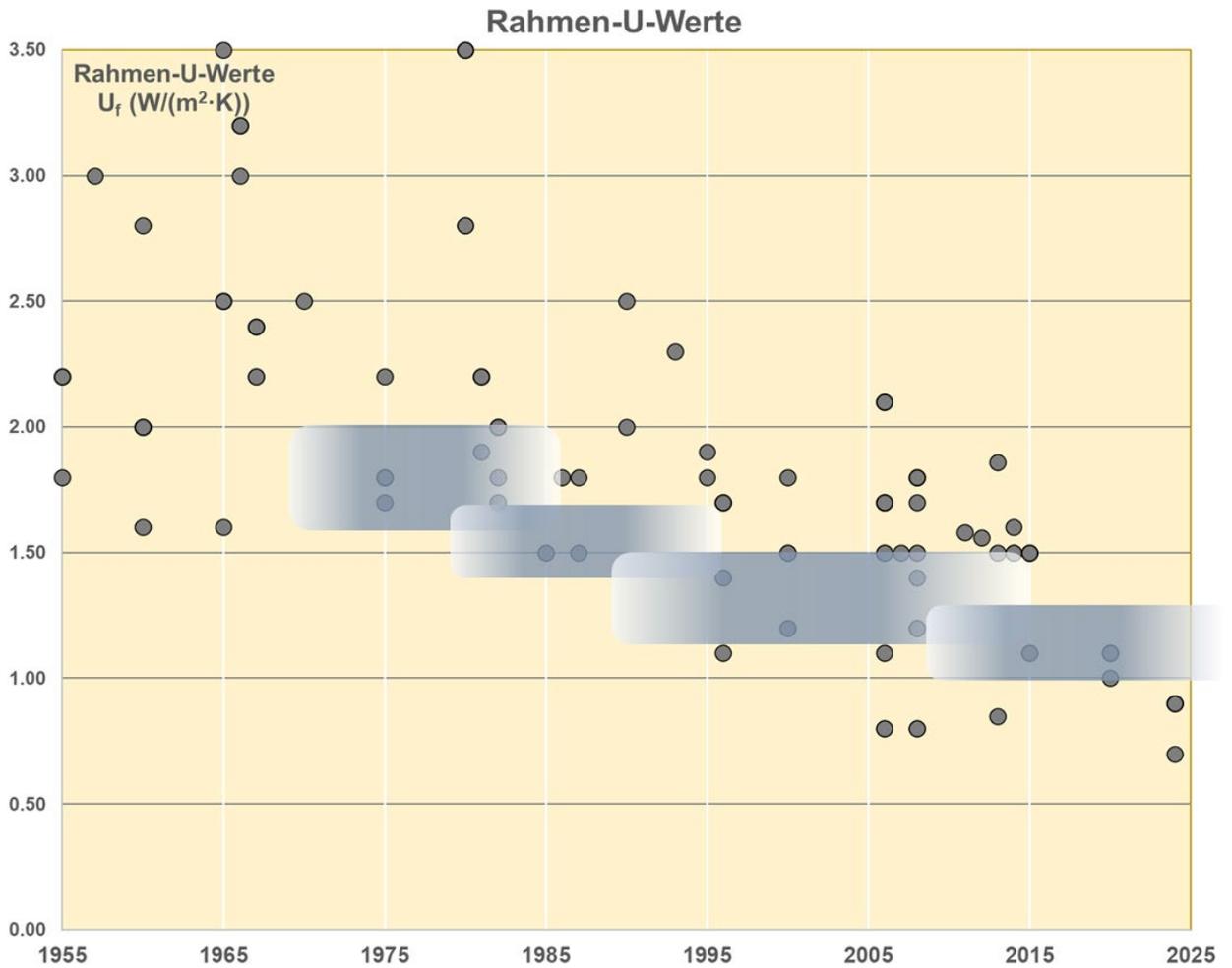


Abbildung 23: Timeline der Fensterrahmen aus Holz-Metall mit Bereichen der Rahmen-U-Werte  $U_f$ . Bild: INEB

Baujahr	1970 - 1985	1980 - 1995	1990 - 2015	2010 - 2024
Bautiefe (inkl. Alu)	>50 mm	>60 mm	>80 mm	>100 mm
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> ·K))	2.0 – 1.6	1.7 – 1.4	1.5 – 1.2	1.3 – 1.0

Tabelle 7:  $U_f$ -Werte Holz-Metallrahmen



## Fensterrahmen aus Metall

Der Wärmeschutz von Metallrahmen nahm einen entscheidenden Schritt mit der Einführung der thermischen Trennung der Metallprofile gegen Ende der 1970er-Jahre und der Rahmen-U-Wert ( $U_f$ ) sank von rund  $3.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  auf die Hälfte. Ab dann brachten kleine Verbesserung im Mikrobereich der Rahmenprofile, beispielsweise mit stärkerer thermischer Trennung, mit optimierten Hohlräumen oder mit bis zu 3 Dichtungsebenen, eine stetige Verbesserung der Rahmen, so dass heute grossflächige Fassaden in Metall und Glas mit fast vergleichbarem Wärmeschutz wie bei anderen Rahmenmaterialien realisiert werden können.

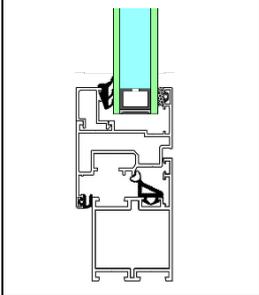
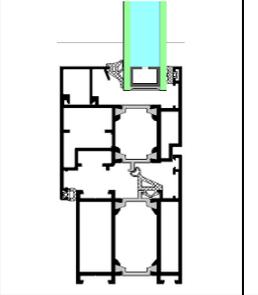
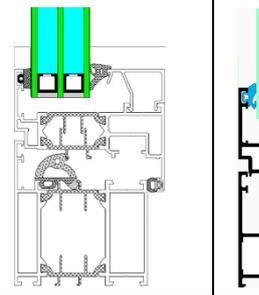
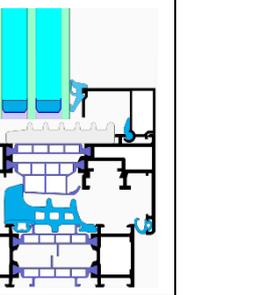
				
Baujahr	1965 - 1985	1980 - 2005	2000 - 2015	2010-2025
Typ	Nicht thermisch getrennt	Mit thermischer Trennung	Mit thermischer Trennung	Optimierte thermische Trennung
$U_f \text{ (W}/(\text{m}^2\text{K}))$	3.6 – 2.8	2.4 – 1.4	1.6-1.3	1.4-0.75

Tabelle 8: U-Werte Fensterrahmen aus Metall

## Fensterrahmen aus Kunststoff

Bereits in den 1950er-Jahren kamen die ersten Fenster mit Kunststoffrahmen auf den Markt. Marktreif wurden sie aber erst nach einer Entwicklungsphase in den 1980er-Jahren. Die Fensterrahmen aus Hart-PVC verfügten bereits über 3 hintereinanderliegende Luftkammern mit einem Stahlprofil in der mittleren Kammer zur Aussteifung des Fensterflügels. Der Rahmen-U-Wert  $U_f$  lag im Bereich von  $1.5$  bis  $1.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Mit den steigenden Wärmeschutzanforderungen in den 1980er-Jahren wurden die Kunststoffrahmen stetig und schnell weiterentwickelt und mit fünf Kammern wurde bald ein U-Wert von  $1.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und nach der Jahrtausendwende mit sieben Kammern bereits ein U-Wert  $U_f$  von knapp über  $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  erreicht. Durch weitere Entwicklungsschritte, wie der thermisch optimierten Anordnung der bis zu 8 Luftkammern, durch gedämmte Kammern oder thermisch getrennten Rahmenverstärkungen konnte der Rahmen-U-Wert von Kunststofffenstern in den letzten 10 Jahren bis auf  $U_f = 0.8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gesenkt werden.

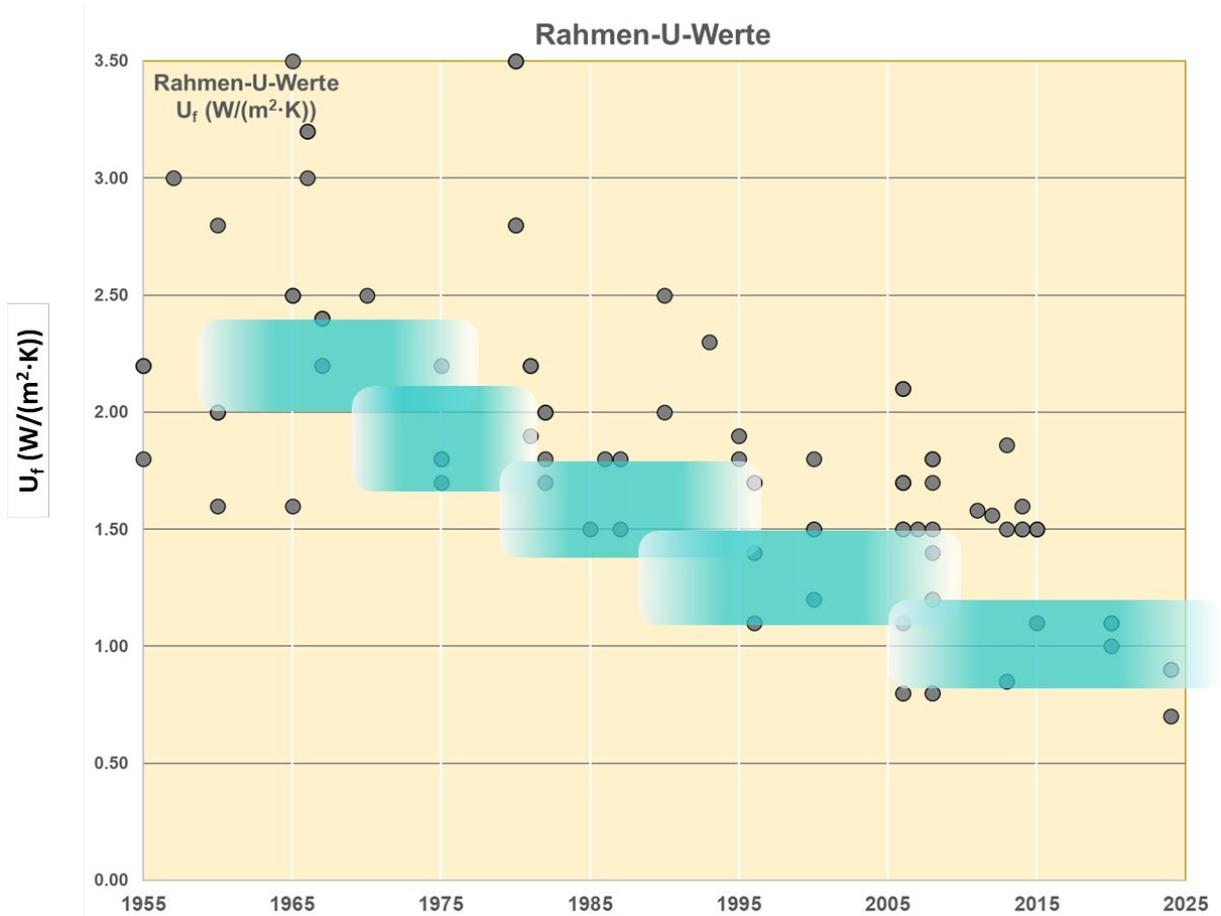


Abbildung 24: Timeline Fensterrahmen Kunststoff mit Bereichen der Rahmen-U-Werte  $U_f$ , Bild: INEB

Baujahr	1960 - 1975	1970-1995	1990 - 2015	2010- 2025
Anzahl Luftkammern	1-3	3-5	5-7	7-8, optimiert
$U_f$ (W/(m <sup>2</sup> K))	2.4 - 2.0	2.1 – 1.4	1.5 - 1.1	0.8 - 1.2

Tabelle 9: U-Werte Kunststoff-Fensterrahmen



### 3.2.4 Verglasung $U_g$ -Werte

Der  $U_g$ -Wert einer Mehrscheiben-Isolierverglasung ist im Wesentlichen abhängig von der Anzahl der Glasscheiben und Scheibenzwischenräume (SZR), der Gasfüllung in den SZR und der Art und Position Infrarot reflektierender Low-E-Beschichtungen auf den Gläsern. Die Entwicklung der Isolierverglasungen wurde durch die steigenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden geprägt. Die technologische Entwicklung vollzog sich dabei in zwei Phasen, die sich in ihrem konstruktiven Aufbau und ihren energetischen Eigenschaften unterscheiden.

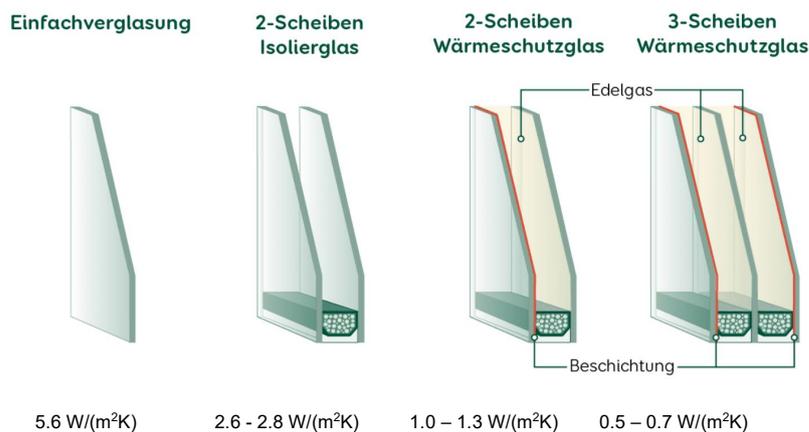


Abbildung 25:  $U_g$ -Werte verschiedener Verglasungen, Bild: be Around GmbH

#### 2-fach Isolierverglasung ohne Low-E Beschichtung

Die erste Generation der Isolierverglasungen dominierte den Markt bis in die frühen 1990er Jahre. Es wurden meist 2-fach Isolierverglasung mit 4 mm Floatglas und einem 6–12 mm breiten, luftgefüllten Scheibenzwischenraum und seltener 3-fach Isolierverglasung ohne Low-E-Beschichtung, die aus drei 4 mm Floatglas Scheiben und zwei 8–10 mm breiten, luftgefüllten Scheibenzwischenräumen bestand, eingesetzt. Beide Systeme nutzten Aluminium-Abstandhalter mit Trocknungsmittel und einen zweistufigen Randverbund zur Stabilisierung.

Die energetischen Eigenschaften wurden durch die verwendeten Materialien begrenzt: Der  $U_g$ -Wert lag bei 2.6–2.8  $W/(m^2K)$  für 2-fach- und bei 1.8–2.0  $W/(m^2K)$  für 3-fach-Verglasungen. Die g-Werte erreichten 0.75–0.78 bzw. 0.65–0.70, und die Lichttransmission betrug 0.80–0.82 bzw. 0.70–0.75.

#### 2-fach und 3-fach Wärmeschutzverglasung mit Low-E (ab Anfang 1990er Jahre)

Die Einführung spektral selektiver Low-E Beschichtungen Anfang der 1980er Jahre war ein technologischer Sprung in der Isolierglastechnologie. Diese Innovation ermöglichte eine signifikante Reduktion der Strahlungswärmeverluste bei gleichzeitig hoher Transmission im sichtbaren Spektralbereich. Die 2-fach Wärmeschutzverglasung etablierte sich als neuer Standard, gekennzeichnet durch kontinuierliche Optimierungen des Gesamtsystems:

- Optimierung des Scheibenzwischenraums auf 12-16 mm
- Einsatz von Edelgasfüllungen
- Integration thermisch optimierter Abstandhalter ab 1995
- schrittweise Verbesserung der Beschichtungstechnologie



Die technische Entwicklung der Wärmeschutzverglasungen erfolgte in mehreren Stufen. Die erste Generation mit pyrolytischer Beschichtung (1985-1990) erreichte  $U_g$ -Werte von 1.7-2.0  $W/(m^2K)$ . Die Einführung der Magnetron-Sputter-Beschichtung verbesserte den  $U_g$ -Wert auf 1.3-1.5  $W/(m^2K)$  bei  $g$ -Werten von 0.65-0.68 und einer Lichttransmission von 0.75-0.78. Als Edelgasfüllung wurden früher häufig Argon, selten Krypton und sehr selten Xenon eingesetzt. Derzeit wird aus Verfügbarkeits- und Kostengründen meist Argon verwendet. Der Gasfüllgrad des SZR beträgt bei der Herstellung ca. 90-95% Edelgas und 5-10% Luft.

Ende der 1990er Jahre etablierte sich die 3-fach Wärmeschutzverglasung mit  $U_g$ -Werten von 0.7-0.9  $W/(m^2K)$ ,  $g$ -Werten von 0.50-0.55 und einer Lichttransmission von 0.70-0.72. Nach dem Jahr 2000 wurden die Systeme weiter optimiert: 2-fach Verglasungen erreichen heute  $U_g$ -Werte von 1.0  $W/(m^2K)$ , 3-fach Verglasungen 0.5-0.6  $W/(m^2K)$ . Die Werte der recherchierten Daten weisen eine grosse Streuung auf (Abbildung 26).

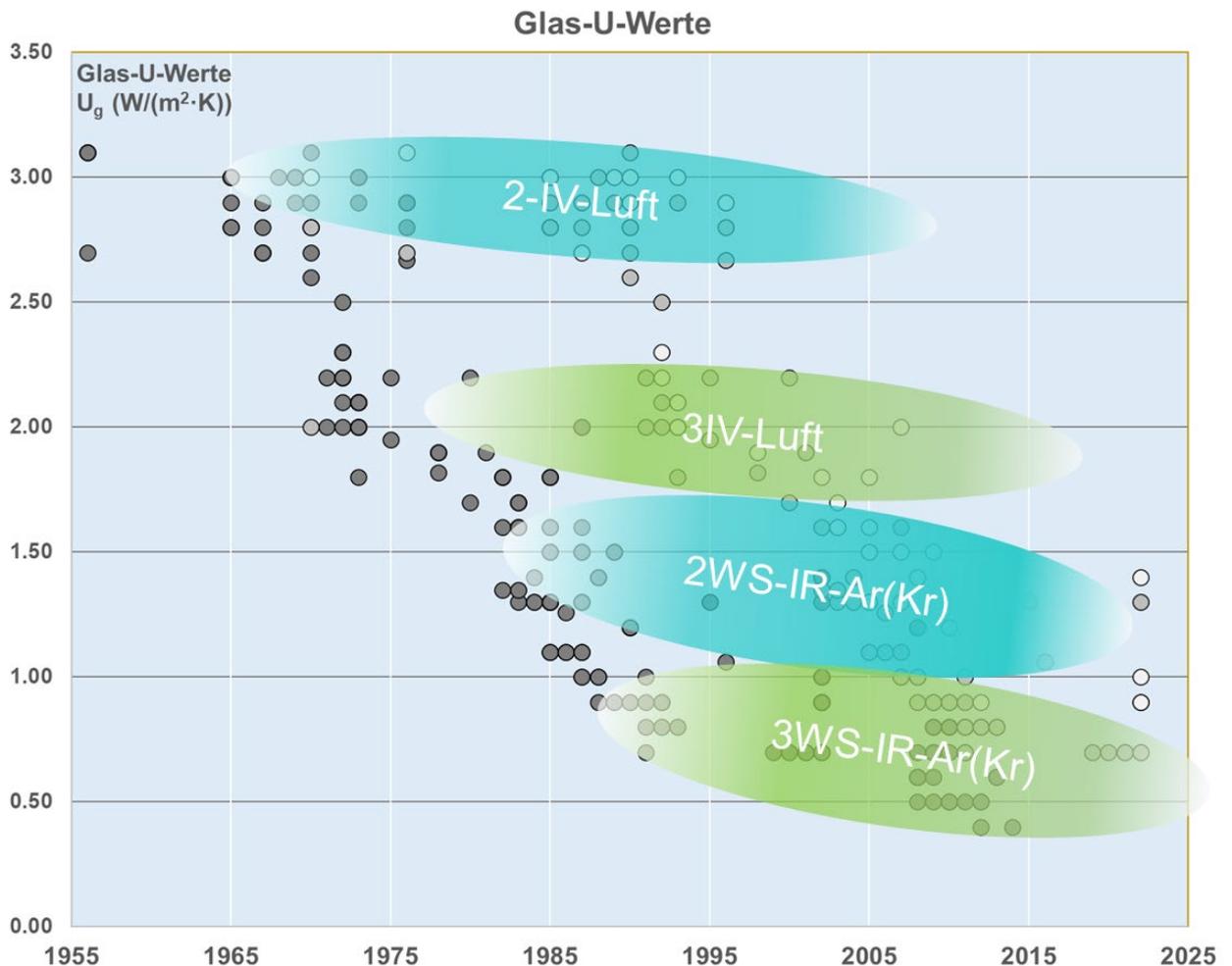


Abbildung 26: Glas-U-Werte: Datensammlung und U-Wert-Bereiche in Abhängigkeit von Emissivität und (Edel)Gasfüllung. Bild: INEB

Tabelle 10: U-Werte und  $g$ -Werte von Isolier- und Wärmeschutzverglasungen zeigt eine Zusammenfassung von  $U_g$ -Werten und  $g$ -Werten von Isolier- und Wärmeschutzverglasungen.



	2-fach Iso- lierglas	3-fach Iso- lierglas	2-fach Wärme- schutzglas 1. Gen.	2-fach Wärme- schutzglas 2. Gen.	2-fach Wärme- schutzglas 3. Gen.	3-fach Wärme- schutzglas
	1978-1995	1985-1995	1985-1999	1995-2000	1995-2024	199x-2024
Low-E	nein	nein	ja (pyrolytisch)	ja (Magnetron)	ja (Magnetron)	ja (Magnetron)
Gasfü- llung SZR	Luft	Luft	Edelgas Ar, Kr,Xe	Edelgas Ar, Kr,Xe	Edelgas Ar, Kr	Edelgas Ar, Kr
$U_g$ W/(m <sup>2</sup> K)	2.7-3.1	1.8-2.1	1.4-1.8	1.2-1.5	1.0-1.1	0.5-0.7
g-Wert	0.78	0.7	0.58-0.60	0.59-0.63	0.60-0.65	0.45-0.61

Tabelle 10: U-Werte und g-Werte von Isolier- und Wärmeschutzverglasungen

### 3.2.5 Berechnung $U_g$ -Werte Verglasung

Zur Einordnung und Validierung der Recherchedaten wurde der U-Wert verschiedener Verglasungen rechnerisch ermittelt. Abbildung 27 zeigt den berechneten  $U_g$ -Wert verschiedener 2-fach Verglasungen (4mm Floatglas/16mm SZR/4mm Floatglas) in Abhängigkeit vom Argon-Gasfüllgrad des SZR. Der  $U_g$ -Wert einer 2-fach Isolierverglasung mit zweimal 4 mm Floatglas mit einer Low-E-Beschichtung und einem SZR von 16 mm liegt in Abhängigkeit vom Gasfüllgrad im SZR und der Art der Beschichtung zwischen 1.0 und 1.5 W/(m<sup>2</sup>K), für eine 2-fach-Verglasung ohne Low-E-Beschichtung liegt der berechnete  $U_g$ -Wert zwischen 2.6 und 2.7 W/(m<sup>2</sup>K). Die Argon-Gasfüllung verbessert den U-Wert bei Gläsern ohne Beschichtung im betrachteten Isolierglasaufbau um 0.11 W/(m<sup>2</sup>K), bei Gläsern mit Low-E Beschichtung um 0.22 bis 0.25 W/(m<sup>2</sup>K). Durch die verschiedenen Low-E Beschichtungen reduziert sich der  $U_g$ -Wert im Vergleich zum Isolierglas mit unbeschichtetem Glas von ca. 2.7 W/(m<sup>2</sup>K) abhängig vom Gasfüllgrad um 1.2 bis 1.6 W/(m<sup>2</sup>K) auf 1.0 bis 1.5 W/(m<sup>2</sup>K).

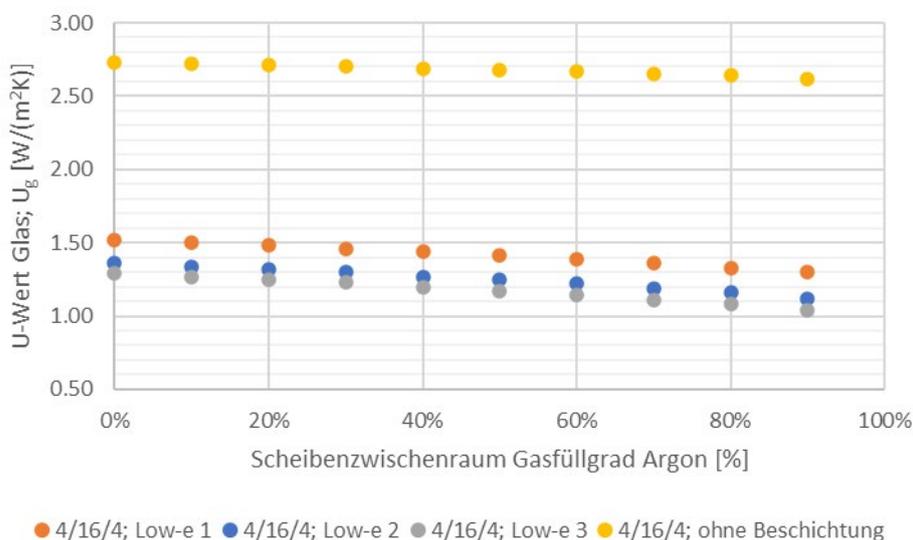


Abbildung 27:  $U_g$ -Werte verschiedener 2-fach-Verglasungen in Abhängigkeit vom Gasfüllgrad, Bild: INEB

Fazit: Mithilfe der vorliegenden Datensammlung kann eine Übersicht der Bestandsfenster erstellt werden. Die grafischen Auswertungen helfen, eine auf Grund des Alters von Fenstern Annahmen zu U-Werten der Verglasung zu treffen. Für konkrete Fenster können Zustandsanalysen erstellt und verschiedene Sanierungsmassnahmen energetisch beurteilt und verglichen werden.



## 3.3 Ressourcenverfügbarkeit

### 3.3.1 Mengenauswertung

#### Jährlicher Verbrauch Schweiz

Im Jahr 2023 wurden in der Schweiz gemäss Branchenradar Fenster rund 1.74 Millionen neue Fenstereinheiten (1.3 x 1.3 m) verkauft. Dabei wurden Fenster wie sie gewöhnlich im Hochbau verwendet werden berücksichtigt, jedoch keine Kellerfenster und Dachflächenfenster [22]. Es wird davon ausgegangen, dass von diesen 1.74 Millionen verkauften Fenstereinheiten, 1,1 Mio. als Fensterersatz eingesetzt wurden [1].

#### Marktanteil der Fenstertypen

Nach einer Marktanalyse des Branchenradars, die auf Statista veröffentlicht und dargestellt wurde, stellen sich die Marktanteile der verschiedenen Fenstertypen in der Schweiz wie folgt dar: Kunststoff-Fenster: 47 %, Holz/Aluminium-Fenster: 29 %, Aluminium-Fenster: 13 % und Holz-Fenster: 11 %. [23]

#### Isolierverglasung

Die Importmenge an Isolierglas betrug im Jahr 2023 26'807 Tonnen. Mengenmässig stammten 29 % der importierten Isoliergläser aus Deutschland, 19.8 % aus Österreich, 9.1 % aus Italien, 8.1 % aus Polen, 5.3 % aus Frankreich, 22.7 % Herkunft unbekannt. Insgesamt wurden Isoliergläser im Wert von 101.8 Mio. CHF importiert. [24] In der Schweiz werden keine Flachgläser hergestellt, alle importierten Produkte werden veredelt und an den Endkunden weiterverkauft [25].

#### PVC-Fensterprodukte

Die zur Herstellung von Fensterrahmen benötigten Kunststoffprofile stammen zu 84 % aus Deutschland, je 2 % aus Italien und Österreich, 1 % aus Frankreich und 10 % werden aus anderen Ländern importiert. Insgesamt wurden im Jahr 2023 6'852 Tonnen PVC-Fensterprofile importiert. Die Kosten für den Import der Profile belaufen sich auf 30.1 Mio. CHF.

Neben den Kunststoffprofilen wurden auch ganze Fenster importiert. Von den 39'595 Tonnen Kunststofffenstern wurden 34.4 % in der Slowakei, 12.7 % in Polen, 12 % in Deutschland, 9.8 % in Österreich und 3.1 % in Italien hergestellt. Das restliche Drittel der importierten Kunststofffenster wurde als «Restliche» deklariert, deren Herstellungsland unbekannt ist. Der Wert der importierten Kunststofffenster belief sich auf 216,7 Mio. CHF. Der Gesamtimport von Kunststoffprodukten aus dem Ausland beträgt 46'447 Tonnen und hat einen Gesamtwert von 246.8 Mio. CHF. [24]

#### Holz für Fensterprodukte

Der gesamte Holzimport für Fenster, Fenstertüren, Rahmen und Verkleidungen aus Holz beträgt 16'243 Tonnen. 44.6 % der Produkte wurden aus Deutschland, 21 % aus Dänemark, 16.1 % aus Österreich, 5 % aus Polen und 1 % aus Frankreich importiert. Bei den restlichen 12,4 % ist die Herkunft unbekannt. Insgesamt wurden für den Import von Holzprodukten 136.4 Mio. CHF ausgegeben. [24]

#### Aluminium für Fensterprodukte

Der Gesamtimport für Tore, Türen, Fenster (inkl. Rahmen, Verkleidungen und Schwellen) aus Aluminium betrug im Jahr 2023, 10'436 Tonnen. Davon wurde der grösste Anteil mit 36.3 % aus Deutschland importiert, 10.3 % stammten aus Italien, 10.2 % aus Polen, 6.2 % aus Österreich und 5.2% aus der Türkei, bei 22.7 % konnte die Herkunft nicht eruiert werden. Insgesamt wurden 138.6 Mio. CHF für die Einfuhr von Fenstern, Toren und Türen aus Aluminium ausgegeben. [24]



### 3.3.2 Fensterglas

#### Herstellung

Fensterglas, ein Flachglas (resp. Floatglas), wird im Floatglasverfahren hergestellt. Hauptbestandteile sind Quarzsand, Soda, Kalk, Dolomit und recyceltes Glas [26]. Der Quarzsand muss 99% rein sein für die notwendige Transparenz. Dies wird durch Waschen, Schwermetallentfernung und Korngrössensortierung erreicht. Die vollautomatische Produktion verläuft kontinuierlich und beginnt mit dem Schmelzen der Rohstoffe bei 1'600 °C. Die Schmelze wird auf ein Zinnbad geleitet, wo sie eine glatte Oberfläche erhält und in einem Kühltunnel auf 60 °C abgekühlt wird [26]. Floatglas wird danach weiterverarbeitet zu Isolierglas, Sicherheitsglas (ESG, VSG), Brandschutzglas und Sonnenschutzglas [26].

#### Rohstoffverfügbarkeit

Wichtigster Rohstoff ist Quarzsand. Die grössten Exporteure sind die USA, Belgien und Deutschland. Weitere grosse Vorkommen gibt es in Australien und China [27]. Da Quarzsand nicht nur in der Glasindustrie eine zentrale Rolle spielt, wird weltweit mehr Quarzsand verbraucht, als auf natürliche Weise nachgebildet werden kann [28]. Die Erdkruste besteht zu etwa 25,8 Gewichtsprozent aus Silizium. Silizium kommt hauptsächlich in Form von silikatischen Mineralien oder als reines Siliziumdioxid vor [29]. Trotz dieser hohen Verfügbarkeit in der Erdkruste sind Quarzsandvorkommen, die den strengen Qualitätsanforderungen der Industrie genügen, äusserst selten. Die erforderliche Reinheit und Korngrösse kann nur durch aufwendige Aufbereitungstechniken wie Magnet- oder Schwerkraftabscheider erreicht werden [30].

#### Recycling

Floatglas ist ein vielseitig einsetzbares Produkt, das je nach Anwendung mit unterschiedlichen Beschichtungen versehen wird [26]. Aufgrund hoher Qualitätsanforderungen werden gebrauchte Fenstergläser nur zu etwa 19 % recycelt, da Verunreinigungen und unterschiedliche Zusammensetzungen den Herstellungsprozess negativ beeinflussen [31]. Die in der Produktion eingesetzten Glasscherben stammen daher meist aus Produktionsabfällen. Fensterglasscherben können aber auch in anderen Bereichen wiederverwendet werden, z.B. zur Herstellung von Behälterglas (45 %) oder Glaswolle (32 %) [32]. Ein Grossteil aller Fensterscheiben, die beim Rückbau oder bei Renovationen ersetzt werden, landen heute oft kleingeschlagen auf der Deponie. Die Recyclingquote liegt gemäss Bundesamt für Umwelt BAFU lediglich bei 15-20% [33].

### 3.3.3 Gasfüllung

Für Fensterscheiben mit Wärmeschutz werden Zweifach- oder Dreifachverglasungen genutzt, deren Zwischenräume mit Edelgasen wie Argon gefüllt sind, da diese Wärmeverluste besser verhindern [34]. Edelgase sind reaktionsträge, nicht brennbar und für Mensch und Umwelt ungiftig. Argon ist das am häufigsten verwendete Edelgas im Scheibenzwischenraum (SZR), da es in grossen Mengen verfügbar ist. Krypton und Xenon werden seltener verwendet, obwohl sie bessere Wärmedämmeigenschaften besitzen. Die Wärmeleitfähigkeit von Luft beträgt bei einer Temperatur von 20°C 0,0262 W/(mK), während Argon (0,01772 W/(mK)), Krypton (0,00949 W/(mK)) und Xenon (0,00569 W/(mK)) deutlich besser isolieren. Edelgase werden per Linde-Verfahren durch Verdichtung, Abkühlung und Destillation von Luft gewonnen [35], [36].

### 3.3.4 Beschichtungen

Es gibt eine Vielzahl von Verfahren zur ein- oder beidseitigen Beschichtung von Flachglas. Nach DIN EN 1096-1 lassen sich die Glasbeschichtungstechniken in physikalische und chemische Verfahren unterteilen. Beim sogenannten Hardcoating (Online-Verfahren) werden die Beschichtungen während des



Floatglasprozesses auf die noch flüssige Glasoberfläche aufgebracht. Nach dem Abkühlen des Glases bildet sich eine feste und dauerhafte Verbindung zwischen Glas und Beschichtung. Ein weiteres Beschichtungsverfahren wird nach Abschluss der Glasproduktion angewendet (Offline-Beschichtung). Dabei werden mehrere Schichten entweder durch Aufdampfen oder durch moderne Kathodenzerstäubungsverfahren, die ein Vakuum erfordern, aufgebracht. Beim chemischen Verfahren wird die Beschichtung durch Reaktion mit Flüssigkeit, Dampf oder Pulver mittels einer pyrolytischen Reaktion auf die meist heisse Glasoberfläche aufgebracht. Es gibt zahlreiche Verfahren, die je nach gewünschter Funktion eingesetzt werden, von Sichtschutz und Lichtreflexion bis hin zu rein ästhetischen Zwecken [36].

### **Recycling**

Neuere Erkenntnisse zeigen, dass beschichtetes Flachglas den Recyclingprozess weniger beeinträchtigt als bisher angenommen. Der Eintrag von Beschichtungen führt zu keinen nennenswerten Problemen im Prozess. Es ist lediglich darauf zu achten, dass das Flachglas sortenrein getrennt wird und möglichst frei von Fremdstoffen wie Keramik, anderen Glassorten oder Porzellan ist, da diese Stoffe den Prozess stören [37].

### **3.3.5 Fensterrahmen**

In den folgenden Abschnitten werden die drei Hauptmaterialien beschrieben, die für die Fensterrahmenherstellung verwendet werden. Thematisch wurde nach Herkunft, Ressourcenverfügbarkeit, Herstellung und Entsorgung/ Recycling aufgeteilt. Je nach Material wie zum Beispiel Holz wurden noch weitere Abschnitte ergänzt, um relevante Aspekte zu beschreiben.

#### **a) Holz**

##### **Ökologische Betrachtung**

Holz als Fensterrahmen hat keine negativen Auswirkungen auf das Ökosystem. Zertifizierungen wie PEFC und/oder FSC garantieren die Verwendung von Holz aus nachhaltiger Waldbewirtschaftung [38], [39]. Holzprodukte müssen vor natürlichen Alterungs- und Zersetzungsprozessen, die durch Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen, Witterung und Sonneneinstrahlung oder durch Käfer, Larven und Pilze begünstigt werden, geschützt werden. Dies kann durch baulichen Schutz (primäre Massnahme) und durch die Wahl einer geeigneten Holzart (sekundäre Massnahme) geschehen. Der letzte Schritt ist das Auftragen eines Schutzanstrichs (tertiäre Massnahme). Die Schutzschicht besteht in der Regel aus einem Bio- und Fungizid, um die Fenster vor biologischem Abbau zu schützen.

##### **Herkunft und Gewinnung - Nachhaltige Waldwirtschaft**

32% der Fläche der Schweiz sind mit Wald bedeckt. Holz kann dann nachhaltig bezeichnet werden, wenn es aus einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung stammt. Dies bedeutet, dass Bäume selektiv gefällt werden, so dass eine natürliche Verjüngung stattfinden kann. Auf diese Weise können in der Schweiz jährlich 7-8 Mio. m<sup>3</sup> Holz geerntet werden. Um den jährlichen Bedarf von 10-11 Mio. m<sup>3</sup> zu decken, werden jedoch ca. 3-5 Mio. m<sup>3</sup> aus dem nahen Ausland importiert [40], [41]. Holzfenster werden heute oft in Kombination mit Aluminium hergestellt, das als mechanischer Witterungsschutz dient.

##### **Holzart (Anforderungen für den Einsatz)**

Holzfenster können aus verschiedenen Holzarten gefertigt werden. Eiche und Lärche sind Holzarten, die sehr witterungsbeständig sind. Da das Holz oft lackiert wird, um den Witterungsschutz zu erhöhen, ist die Holzart zweitrangig [42], [43].



### **Herstellung**

Für die Herstellung von Holzrahmen wird das Holz nach dem Ernten, getrocknet und auf die gewünschte Grösse zugeschnitten. Anschliessend werden die einzelnen Rahmenteile mit Glas, Beschlägen und Dichtungen zusammengefügt. Bei Holzfenstern ist ein konstruktiver Witterungsschutz von Vorteil. Wenn möglich soll auf Holzschutzmittel verzichtet werden. Früher wurden Fenster oft mit giftigen Holzschutzmitteln behandelt. Daher können ältere Fenster erhöhte Konzentrationen von kritischen Schwermetallen, Halogenen oder Schwefel aufweisen [44].

### **Entsorgung und Recycling**

Holzfenster können aufgrund der Eigenschaften des Holzes gut wiederverwendet werden. Zuerst sollten jedoch, falls vorhanden Schadstoffe entfernt werden [45], [46]. Das Recyceln von Fenstern ist in der Schweiz nicht üblich, jedoch gibt es bereits einige Firmen, die ihre Fenster nach dem Auswechseln ins Werk zurücknehmen. Holzfenster könnten in ihre Bestandteile zerlegt und die Bestandteile separat entsorgt werden. Oft landet behandeltes oder lackiertes Holz im Sonderabfall, da die Aufbereitung und Weiterverarbeitung teurer ist als die Verbrennung oder Deponierung [47]. Bei Holz-Aluminium Fenstern wird das Recycling erschwert, da die Materialien mit zusätzlichem Aufwand getrennt werden müssen. Auch sie werden häufig deponiert [46].

## **b) Aluminium**

### **Herkunft und Gewinnung**

Aluminium wird aus Bauxit hergestellt. Die weltweiten Bauxitvorkommen werden auf etwa 25 Milliarden Tonnen geschätzt. Die Vorkommen verteilen sich auf etwa 60 Länder. Bauxit wird im Tagebau gewonnen [48]. Mit dem «Bayer-Verfahren» wird das Aluminiumoxid abgetrennt. Dabei entsteht giftiger Rotschlamm, für den es meist keine Verwendung gibt. Da Bauxit häufig in Schwellen- und Entwicklungsländern mit geringen Umweltstandards abgebaut wird, entstehen Umweltprobleme wie beispielsweise Verunreinigung des Trinkwassers [49]. Zur Weiterverarbeitung wird das Aluminiumoxid im Elektrolyseofen unter Zugabe von Kohlenstoff bei 950 °C geschmolzen, wobei pro kg Aluminium zwischen 13 und 15 kWh elektrische Energie aufgewendet werden müssen [50]. Dieses Verfahren ermöglicht eine weltweite Produktion von über 70 Millionen Tonnen pro Jahr. Das flüssige Aluminium wird zu Barren gegossen, die im Strangpressverfahren zu Profilen weiterverarbeitet werden.

### **Herstellung**

Die Aluminiumstäbe werden anschliessend maschinell zu Fensterrahmen zusammengefügt. Die Eckverbindungen der Rahmen untereinander erfolgen meist durch Kleben und zusätzliches Verschrauben, Verpressen oder Fixieren mit Spannstiften. Die Herstellung erfolgt weitgehend maschinell. In grösseren Betrieben ist die gesamte Produktion in einer Fertigungshalle konzentriert, um die Transportwege möglichst kurz zu halten.

### **Recycling**

Für Fensterrahmen aus Aluminium hat das BAFU eine Studie über die Entsorgungsketten im Baubereich durchgeführt. Das Fazit war, dass Nichteisenmetalle zu 95 % recycelt werden können. Die Probleme bei Fensterrahmen und Fenstergläsern liegen in der Aufbereitung [51]. Für ein effizientes Recyclingverfahren ohne Qualitätsverluste, wird eine sortenreine Trennung vorausgesetzt, was bei Fenstern nur schwer in einem wirtschaftlichen Rahmen umsetzbar ist [31], [52], [53]. Es gibt aber auch Studien, die zeigen, dass Aluminiumfester schon seit längerem in einem Kreislauf gehalten werden [54]. Um ohne Qualitätsverlust recyceln zu können müssen diese Legierungen sortenrein getrennt werden. Somit kommt es auch beim Aluminiumrecycling zu einem Downcycling [55].



### c) PVC

#### **Herstellung**

PVC wird durch chemische Prozesse aus zwei Komponenten hergestellt: Erdöl/Erdgas und Steinsalz (Halit). Aus Erdöl oder Erdgas wird durch Cracken Ethylen gewonnen. Durch Elektrolyse wird aus Steinsalz elementares Chlor und Natronlauge gewonnen. Ethylen und Chlor verbinden sich zum Monomer Vinylchlorid. Durch Polymerisation entsteht Polyvinylchlorid (PVC) [56].

Für die Herstellung von Fensterrahmen wird vor allem Hart-PVC verwendet, der im Unterschied zu Weich-PVC keine Weichmacher enthält. Zur Optimierung der physikalischen und chemischen Eigenschaften werden dem Roh-PVC Zuschlagsstoffe wie Titanoxid als Weisspigment, Kreide als Füllstoff zur Erhöhung der Steifigkeit oder Stabilisatoren die den Abbau durch UV-Strahlen verhindern beigegeben [57]. Die Fensterprofile werden üblicherweise im Spritzguss- oder im Stangenpressverfahren hergestellt. Durch die thermoplastischen Eigenschaften von PVC kann ein Fensterrahmen schnell und stabil zusammengeschweisst werden [58]

#### **Rohstoffverfügbarkeit**

Erdöl ist ein fossiler Energieträger, der nicht nur zur Herstellung von Kunststoffen verwendet wird. Es wird vermutet, dass die Erdölreserven beim derzeitigen Verbrauch zwischen 2050 und 2060 erschöpft sein könnten [59]. Steinsalz ist ein Evaporit- und Sedimentgestein, das durch chemische Sedimentation aus Meerwasser oder durch Verdunstung von mineralreichem Grundwasser entstanden ist. Steinsalzlagerstätten sind weltweit verbreitet und kommen vor allem in Trockengebieten auch an der Oberfläche vor. Viele unterirdische Steinsalzlagerstätten wurden bei Erdölbohrungen entdeckt [60].

#### **Entsorgung**

PVC-Fenster können recycelt werden. Die Deponierung ist kritisch, da sich PVC nur sehr langsam zersetzt und schliesslich als Mikroplastik im Grundwasser landen könnte [61]. Auch die Verbrennung von PVC ist keine geeignete Lösung, da Chlor zu Schadstoffen wie Salzsäure (HCl) und Dioxinen führen kann [62].

#### **Recycling**

Rewindow und VEKA-Umwelttechnik recyceln PVC-Fenster. Das PVC-Granulat kann sortenrein gewonnen werden und wird für die Herstellung der Kerne neuer PVC-Fensterrahmen verwendet.

### **3.3.6 Beschläge**

#### **Herstellung**

Je nach Gewicht des Fensters, werden Beschläge aus verzinktem Stahl, Edelstahl oder Aluminium verwendet [63]. Beschläge aus Stahl können, um sie vor Witterung zu schützen, zusätzlich verzinkt werden. Hier unterscheidet man zwischen der Feuerverzinkung (50 und 150  $\mu\text{m}$ ) und der galvanischen Verzinkung (Schichtdicke von 8 - 15  $\mu\text{m}$ ) [64], [65]. Das Gewicht von Beschlägen aus verzinktem Stahl für ein Normfenster beträgt ca. 4.2 – 6.5 kg. Die Herstellung für Aluminiumbeschlägen analog zu Kapitel 3.3.5 Absatz b.

#### **Rohstoffverfügbarkeit**

Stahl ist ein Rohstoff, der sehr gut verfügbar ist, da Eisen, das Ursprungsmaterial mit einem Masseanteil von 5% in der Erdkruste vorkommt. Zudem bleibt Stahl nahezu unendlich im Materialkreislauf, da es sich sehr gut recycelieren lässt [66]. Zink ist ein häufiges Element in der Erdkruste, mit einem Gehalt von 0.0076% auf der Erdkruste. Es wird an Erze gebunden gefunden. Die grössten Zink Förderer sind China, Australien und Peru. Die Rohstoffverfügbarkeit von Aluminium wird Seite 62 beschrieben.



### **Recycling**

Viele der älteren Fensterbeschläge (>20 Jahre) werden nicht mehr produziert und sind heute nicht mehr erhältlich. Ein guter Unterhalt ist daher wichtig für eine lange Lebensdauer. Allfällige Schäden können sie von spezialisierten Unternehmen repariert werden. Wenn die Defekte sich nicht mehr reparieren lassen, werden Stahl, Aluminium und auch verzinkter Stahl ohne Qualitätsverlust recycelt. Beschläge mit einer defekten Zinkschicht, aber intakter funktionsweise können auch neu verzinkt werden [64]. Dies geht mit einer geringeren Belastung auf die Umwelt einher, als die Deponierung und das Ersetzen der Beschläge [67].

### **3.3.7 Fazit**

#### **Ressourcenverbrauch**

Bei rund 1.74 Mio. verkauften Fenstereinheiten ist der Ressourceneinsatz für Fenster in der Schweiz sehr hoch. Aus Sicht der Ressourcenverfügbarkeit gilt vor allem Flachglas eine erhöhte Aufmerksamkeit, da der Quarzsand in seiner hohen Qualität nur begrenzt verfügbar ist. Gleichzeitig führen die zunehmenden Sicherheits- und Schallschutzstandards dazu, dass die Glasdicken zunehmen und die Fenster schwerer werden, was die Ressourcensituation weiter verschärft. Bei den Fensterrahmen schneiden Fenster aus Holz bezüglich indirekter Treibhausgasemissionen besonders gut ab. Sie können auch gut repariert werden.

#### **Recycling**

Obwohl es möglich wäre, Fenster in Einzelteile zu zerlegen und zu entsorgen, werden Fenster und Flachglas oft deponiert, was vermutlich auch günstiger ist. Das Recyceln von Fenstern ist in der Schweiz noch nicht üblich, jedoch gibt es Firmen wie beispielsweise Velux, 4B Fenster, die beim Fensterersatz auch gleich die ausgebauten Fenster mitnehmen. Bei PVC-Fenstern gibt es ein Sammelsystem mit dem Ziel, PVC im Kreislauf zu halten [2]. Aluminiumfenster sind theoretisch zu 100% recycelbar. Quantitative Angaben zum Recycling von Aluminiumfenstern konnten nicht gefunden werden. Holzfenster werden nach der Trennung vom Fensterglas häufig thermisch verwertet oder deponiert.



### 3.4 Treibhausgasemissionen von Fenstern

In der Ökobilanzierung nach SIA 2032:2020 beträgt die Amortisationszeit für Fenster standardmässig 30 Jahre. Die absoluten Erstellungsemissionen erfolgen zum Zeitpunkt der Sanierung resp. des Fensterersatzes. Die Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen auf Werte pro Jahr macht es möglich, Treibhausgasemissionen der Erstellung im Vergleich mit der dadurch eingesparten Treibhausgasemissionen des Betriebs zu vergleichen.

#### Treibhausgasemissionen von Fensterrahmen

Bezüglich dem Rahmenmaterial schneiden bezüglich Treibhausgasemissionen der Herstellung und Entsorgung die Holzfenster am besten ab, gefolgt von PVC und Holz-Metallfenstern. Am meisten Treibhausgasemissionen entstehen bei Aluminiumfenstern.

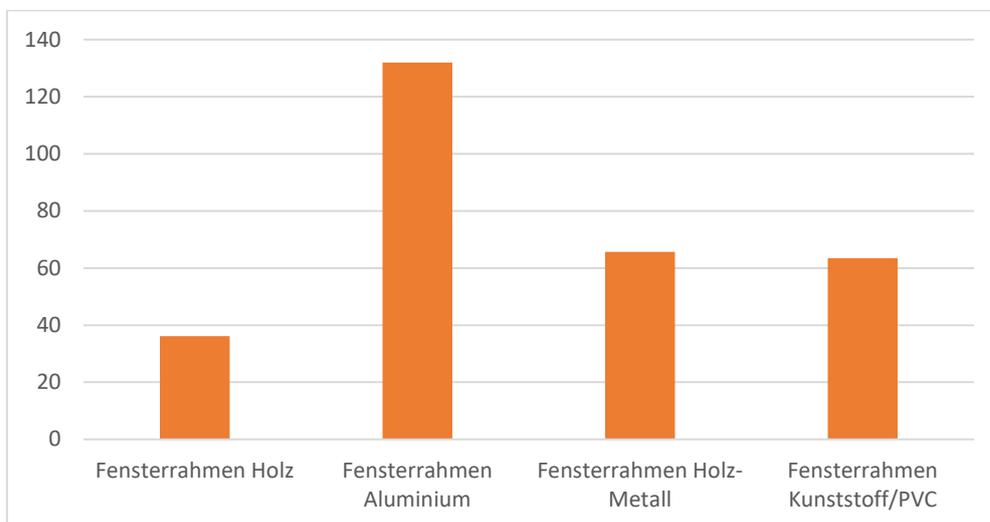


Abbildung 28: Treibhausgasemissionen pro m<sup>2</sup> Fensterrahmen [kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>] [8]

#### Treibhausgasemissionen von Isolierverglasungen

Bei der Isolierverglasung spielen betreffend Treibhausgasemissionen die Anzahl Gläser und deren Dicke eine wichtige Rolle. Verbundsicherheits-Gläser schneiden deutlich schlechter ab. Sie bestehen jeweils aus zwei Glasschichten mit dazwischenliegender Folie [8].

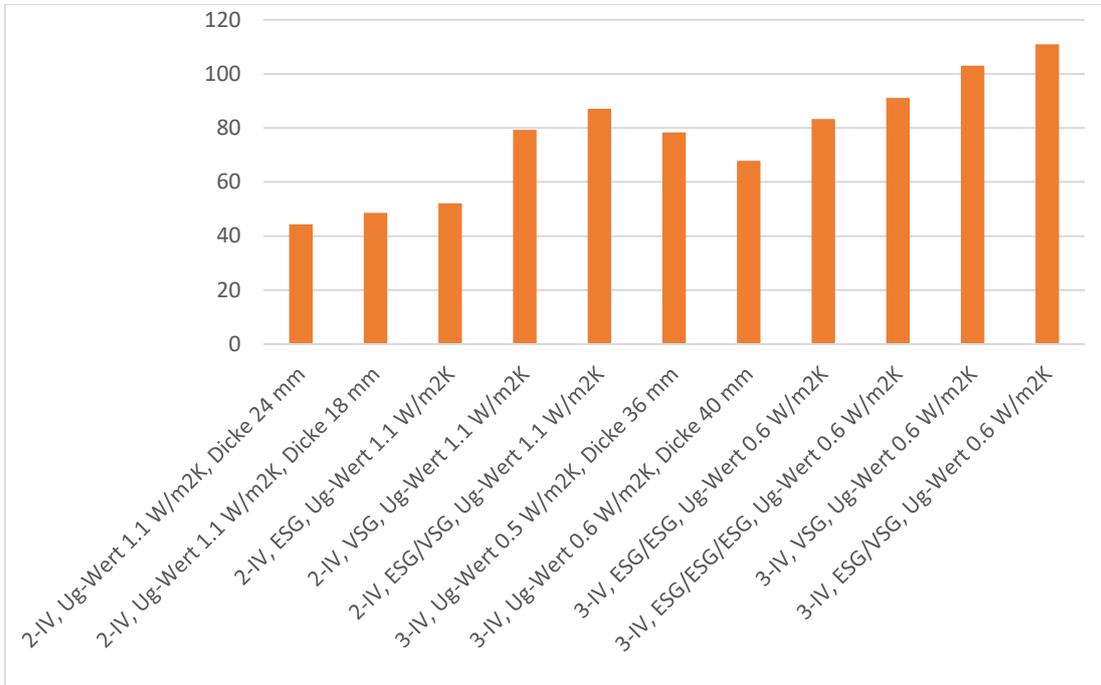


Abbildung 29: Treibhausgasemissionen pro m<sup>2</sup> Isolierverglasung [kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>] [8]

### 3.4.1 Gesamtabschätzung Treibhausgasemissionen

Basierend auf den Marktdaten von 1.74 Millionen verkauften Fenstereinheiten pro Jahr lassen sich die Treibhausgasemissionen der Fensterproduktion in der Schweiz abschätzen. Eine Fenstereinheit entspricht in der Marktstatistik dabei einem standardisierten Fenster mit den Abmessungen 1.30 m x 1.30 m (1.69 m<sup>2</sup>). Die Tabelle 11 zeigt die Berechnung der jährlichen Treibhausgasemissionen, aufgeschlüsselt nach Rahmenmaterialien:

Rahmentyp	Marktanteil	Fenstereinheiten	THGE pro Fenstereinheit gemäss Fensterrechner [kg CO <sub>2</sub> -eq]	Jährliche THGE [t CO <sub>2</sub> -eq]
Kunststoff	47%	817'800	193.5	158'244
Holz-Alu	29%	504'600	197.7	99'759
Aluminium	13%	226'200	315.8	71'434
Holz	11%	191'400	154.7	29'610
<b>Gesamt</b>	<b>100%</b>	<b>1'740'000</b>	<b>0</b>	<b>359'047</b>

Tabelle 11: Berechnung der jährlichen Treibhausgasemissionen, aufgeschlüsselt nach Rahmenmaterialien

Die Berechnungen zeigen, dass der Absatz von Fenstern in der Schweiz jährlich etwa 360'000 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq verursacht. Da etwa zwei Drittel der produzierten Fenster (1.1 Millionen Einheiten) als Ersatz eingesetzt werden, ergibt sich ein theoretisches Einsparpotenzial durch Wiederverwendung und Ertüchtigung von bis zu 230'000 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq pro Jahr. Diese Zahlen verdeutlichen die hohe Relevanz von Strategien zur Fensterwiederverwendung für den Klimaschutz im Bausektor.



### 3.5 Ökologische Bewertung von Fenstern

Ecobau beurteilt Materialien leistungsbezogen[68]. Die ecoBKP beinhalten Vorgaben für ökologische und gesunde Baumaterialien, Vorgaben für Verarbeitungsprozesse sowie Erläuterungen und Links. Dabei werden zu Fenstern folgende Empfehlungen abgegeben:

- Bei der Planung eines Abbruchs oder Umbaus sind die wieder verwendbaren Materialien wie beispielsweise Fenster rechtzeitig zu identifizieren, deren Wiederverwendung vor Ort einzuplanen oder diese weiter zu vermitteln (z.B. über Bauteilbörse) [69].
- Bei der Fensterauswahl werden in erster Priorität Holzfenster Minergie-Module und in zweiter Priorität Holz-Metallfenster Minergie-Module empfohlen. Imprägnierung ist nur für Nadelholz erforderlich und sollte lediglich pilz- und bläuewidrig eingestellt sein [70].
- Die Materialisierung des Glasrandverbunds wird in erster Priorität Randverbund aus Kunststoff/Butyl („warme Kante“) und in zweiter Priorität Randverbund aus Edelstahl empfohlen [70].
- Holzfenster sollen im Innenraum mit Produkten ohne Lösemittel (max. 1%) oder wassererdünnbare Produkte gestrichen werden [70].
- Montage: Die Fenster sollen mechanisch befestigt werden [70].
- Abdichtung: Komprimband, Fensteranschlussfolien mit Verklebung ohne Lösemittel (max. 1%). Stopfen von Hohlräumen: Seiden- oder Mineralfaserzopf, Schaumstoff-Rundschnur (jeweils ohne krebserzeugende Bestandteile) [70].

Die ökologischen Empfehlungen basieren auf der Methodik ecobau (Best of class Methodik). Sie zeigt auf, welche Kriterien bei Fenstern relevant sind und beurteilt werden müssen und welche nicht relevant sind [71].

Produktgruppen		Mindestanforderungen	Herstellung				Verarbeitung und Nutzung							Entsorgung	Bemerkungen
			Graue Energie	Treibhausgasemissionen	Nachhaltige Rohstoffgewinnung	Lösemittel	Gesundheits-/umweltrelevante Bestandteile	Biozide	Abspaltprodukte	Formaldehydemissionen	Schwermetalle	Halogengehalt	Einfluss auf Betriebsenergie		
PG 03a	<b>Fenster und Fensterprofile aus Holz oder Holz/Metall</b>														Graue Energie und Treibhausgasemissionen werden nur für den Fensterrahmen bewertet. Formaldehydemissionen werden als Mindestanforderung bewertet.
	Bewertung	b	b	b	b	b(e)	b(e)	b(e)	b(e)	b	b(e)	b(e)	b	b	
	Gewichtung		0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
PG 03b	<b>Fenster und Fensterprofile aus Kunststoff oder Metall</b>														Graue Energie und Treibhausgasemissionen werden nur für den Fensterrahmen bewertet. Schwermetallemissionen werden als Mindestanforderung bewertet.
	Bewertung	b	b	b	b(e)	b(e)	b	b(e)	b(e)	b(e)	b	b	b	b	
	Gewichtung		0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

Legende:

- b** bewerten Abzug 0, 1 oder 2 Punkte
- b(e)** bewerten, i.d.R. immer erfüllt
- nr** nicht relevant Abzug 0 Punkte
- e** immer erfüllt Abzug 0 Punkte
- ne** nie erfüllt Abzug 1 oder 2 Punkte

Abbildung 30: Ökologische Beurteilung von Fenstern gemäss Methodik ecobau (2024) [71]



## **3.6 Wiederverwendung von Fenstern (Re-Use)**

Die Wiederverwendung von Fenstern stellt einen wichtigen Aspekt der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen dar und bietet Potenzial zur Ressourcenschonung sowie zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Es wurden verschiedene Strategien zur Wiederverwendung von Fenstern analysiert und bewertet.

### **3.6.1 Konzepte der Wiederverwendung**

Die Wiederverwendung von Fenstern kann auf zwei Arten erfolgen: Bei der direkten Wiederverwendung wird das komplette Fenster in seiner ursprünglichen Form, gegebenenfalls nach einer Ertüchtigung, erneut eingesetzt.

Die komponentenbasierte Wiederverwendung nutzt hingegen einzelne Bestandteile wie Rahmen oder Verglasung für neue Fenster oder andere Bauprodukte. Welche Strategie geeignet ist, hängt vom Zustand und der technischen Spezifikation des Ausgangsfensters wie auch der Rückbaumöglichkeiten ab.

### **3.6.2 Ökologische und ökonomische Bewertung**

Die Wiederverwendung von Fenstern reduziert den Bedarf an Primärrohstoffen wie Glas, Metall und Holz signifikant. Da insbesondere die Glasherstellung sehr energieintensiv ist, können durch Re-Use erhebliche Mengen an Treibhausgasemissionen eingespart werden. Wiederverwendete Fenster können auch wirtschaftliche Vorteile bieten, vor allem durch eingesparte Material- und Entsorgungskosten.

### **3.6.3 Technische Anforderungen**

Entscheidend für eine erfolgreiche Wiederverwendung ist die technische Prüfung der Fenster. Zentrale Aspekte sind:

- Der technische Zustand von Rahmen, Verglasung und Beschlägen
- Die energetischen Eigenschaften, insbesondere der U-Wert und g-Wert
- Die Kompatibilität mit aktuellen Normen und Standards
- Die Möglichkeiten zur energetischen Ertüchtigung
- Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen

Besonders Fenster ab den 1990er Jahren mit Wärmeschutzverglasung eignen sich für die Wiederverwendung, da sie bereits akzeptable energetische Standards aufweisen.

### **3.6.4 Fenster für die Ukraine**

Mit der Initiative 'Fenster für die Ukraine' rettet der Verein RE-WIN gebrauchte, aber noch gut erhaltene Fenster in der Schweiz vor der Verschrottung. Diesen Fenstern wird in der Ukraine, wo sie dringend benötigt werden, ein zweites Leben gegeben [72].

### **3.6.5 Empfehlungen für die Praxis**

Für eine erfolgreiche Implementierung von Fenster-Re-Use werden folgende Massnahmen empfohlen:



- Die Inventarisierung und Dokumentation der technischen Eigenschaften von Bestandsfenstern bildet die Grundlage für Wiederverwendungsentscheidungen. Der entwickelte Materialpass (siehe Kapitel 6.2) stellt hierfür ein geeignetes Instrument dar.
- Die fachgerechte Demontage, die Zustandsprüfung nach Demontage und Zwischenlagerung ist entscheidend für die Qualitätssicherung. Schulungen für Fachkräfte sowie geeignete Lager- und Transportkonzepte sind erforderlich.
- Die energetische Ertüchtigung wiederverwendeter Fenster kann anhand der in Kapitel 4 beschriebenen Verfahren erfolgen. Die Wahl der Ertüchtigungsstrategie muss dabei die spezifischen Eigenschaften des Fensters sowie die Anforderungen am Zielort berücksichtigen.

Hinweis Zeitfaktor:

Im Gegensatz zum konventionellen Rückbau / Abbruch erfordert die Wiederverwendung ein gewisses Zeitfenster von der Erfassung der Bauteile über die Vermittlung bis zur definitiven Entscheidung für einen selektiven Rückbau. Deshalb ist es wichtig, möglichst frühzeitig, den Prozess aufzugleisen.

### **3.6.6 Geschäftsmodelle für die Fensterwiederverwendung**

Die Implementierung der Fensterwiederverwendung erfordert geeignete Geschäftsmodelle, die technische, logistische und wirtschaftliche Aspekte integrieren.

#### **Fensterhersteller als zentrale Akteure**

Etablierte Fensterhersteller verfügen über ideale Voraussetzungen für die Integration von Wiederverwendungskonzepten. Ihr technisches Know-how ermöglicht die fachgerechte Prüfung, Aufarbeitung und Modifikation gebrauchter Fenster. Die vorhandene Infrastruktur für Produktion, Lagerung und Vertrieb kann für wiederverwendete Fenster mitgenutzt werden. Durch die Entwicklung spezialisierter Geschäftsbereiche für Fensterwiederverwendung können Hersteller ihr Nachhaltigkeitsprofil stärken und neue Märkte erschliessen.

#### **Erweiterung bestehender Wertschöpfungsketten für Bau- und Abbruchunternehmen**

Bau- und Abbruchunternehmen können ihre Expertise betreffend Fensterwiederverwendung erweitern und den zerstörungsfreien Rückbau in ihre bestehenden Prozesse integrieren. Ihre Expertise im selektiven Rückbau ermöglicht die schonende Demontage wiederverwendbarer Fenster. Der direkte Zugang zu Bestandsfenstern vereinfacht die Beschaffung. Durch Kooperationen mit Aufbereitungs- und Vertriebspartnern können geschlossene Wertschöpfungsketten entstehen.

### **3.6.7 Implementierungsstrategien**

Die erfolgreiche Etablierung der Fensterwiederverwendung erfordert systematische Implementierungsstrategien auf verschiedenen Ebenen.

#### **Aufbau von Netzwerken**

Zentral ist die Entwicklung von Kooperationsnetzwerken zwischen den relevanten Akteuren mit dem Ziel, neue kreislauffähige Prozesse zu entwickeln und implementieren:

- Fensterhersteller für die technische Aufbereitung
- Bau- und Abbruchunternehmen für die Beschaffung
- Architekten und Planer für die Vermittlung und Integration in Bauprojekte
- Baustoffhändler für Lagerung und Vertrieb
- Prüfinstitute für Qualitätssicherung



Diese Kooperationen ermöglichen effiziente Prozesse von der Demontage bis zum Wiedereinbau und ermöglichen neue Geschäftsmodelle.

### **Qualifizierung und Wissenstransfer**

Wichtig ist es, kreislauffähiges Bauen bereits in die Ausbildung von Fachpersonen zu integrieren. Ausserdem spielt auch die Schulung von Fachkräften im selektiven Rückbau eine wichtige Rolle. Die Aufbereitung von Fenstern bildet die Basis für hochwertige Wiederverwendung. Ergänzend sind Weiterbildungen für Planende und Fachpersonen aus Architekten zur Integration wiederverwendeter Fenster notwendig. Die Weiterentwicklung von Leitfäden und Planungshilfen unterstützt den Wissenstransfer in die Praxis.

### **Pilotprojekte und Skalierung**

Die praktische Umsetzung sollte schrittweise über Pilotprojekte erfolgen. Diese ermöglichen das Sammeln von Erfahrungen und die Optimierung der Prozesse. Auf dieser Basis kann eine systematische Skalierung der Fensterwiederverwendung erfolgen. Die dokumentierten Beispiele in Kapitel 12.1 zeigen das Potenzial dieses Ansatzes.

### **3.6.8 Ausblick**

Bei rund 1.74 Millionen verkauftenistereinheiten pro Jahr, von denen etwa 1.1 Millionen als Fensterersatz eingesetzt werden, ergibt sich ein bedeutendes theoretisches Wiederverwendungspotenzial. Derzeit wird jedoch der überwiegende Anteil der Fenster deponiert.

Mengenpotenzial und Treibhausgasemissionen:

- Bei einer konservativen Schätzung von 20% wiederverwendbaren Fenstern aus dem jährlichen Fensterersatz könnten etwa 220'000 Fenster pro Jahr dem Kreislauf zugeführt werden
- Durch die Wiederverwendung eines Standardfensters können je nach Variante zwischen 2.8 und 4.3 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) eingespart werden.
- Bei einer durchschnittlichen Grösse eineristereinheit von 1.7 m<sup>2</sup> ergibt dies ein jährliches Einsparpotenzial von 31'000 bis 48'000 Tonnen CO<sub>2</sub>-eq pro Jahr.

Wirtschaftliche Aspekte:

- Die Investitionskosten für die Ertüchtigung wiederverwendeter Fenster liegen bei etwa 200-390 CHF/m<sup>2</sup> je nach gewählter Variante. Dies ist deutlich günstiger als ein Fensterersatz mit 470 CHF/m<sup>2</sup>
- Für die Etablierung professioneller Wiederverwendungs-Strukturen sind Investitionen in Logistik, Lagerung und Aufbereitungsanlagen erforderlich
- Die Finanzierung könnte durch öffentliche Förderung (z.B. Klimafonds) sowie private Investitionen erfolgen

Handlungsbedarf und Verantwortlichkeiten:

Fensterhersteller und -händler:

- Aufbau von Rücknahme- und Aufbereitungssystemen
- Integration von Re-Use in bestehende Produktionsabläufe
- Entwicklung von Qualitätssicherungssystemen



Branchenverbände:

- Entwicklung standardisierter Prüf- und Dokumentationsverfahren
- Erarbeitung technischer Richtlinien
- Aus- und Weiterbildungsangebote

Behörden und Gesetzgeber:

- Anpassung baurechtlicher Vorgaben zur Erleichterung der Fensterwiederverwendung
- Integration von Re-Use-Kriterien in Ausschreibungen
- Schaffung finanzieller Anreize (Förderung)

Forschung und Entwicklung:

- Optimierung von Ertüchtigungsverfahren
- Entwicklung digitaler Tools für Materialpass und Dokumentation
- Monitoring und Evaluation von Pilotprojekten

Die erfolgreiche Implementierung erfordert das Zusammenwirken aller Akteure. Erste Beispiele zeigen, dass die Wiederverwendung von Fenstern technisch machbar und wirtschaftlich darstellbar ist.



## 4 Ertüchtigungsstrategien

### 4.1 Ertüchtigungsvarianten

Im Folgenden Abschnitt werden Ertüchtigungsstrategien von Standardfenstern aus dem Zeitraum ab Mitte der 1960er Jahre untersucht, die mit Zwei- oder Dreifach-Isolierverglasung oder Wärmeschutzverglasung ausgestattet sind. Es werden Fenster mit Holz-, Holz-Metall-, Kunststoff- oder Metallrahmen betrachtet, die typischerweise in Wohngebäuden, Bürogebäuden und Schulen eingesetzt werden.

Auf Grund von bereits realisierten Beispielen (siehe Anhang A) wurden folgende Ertüchtigungsstrategien von Fenstern näher untersucht:

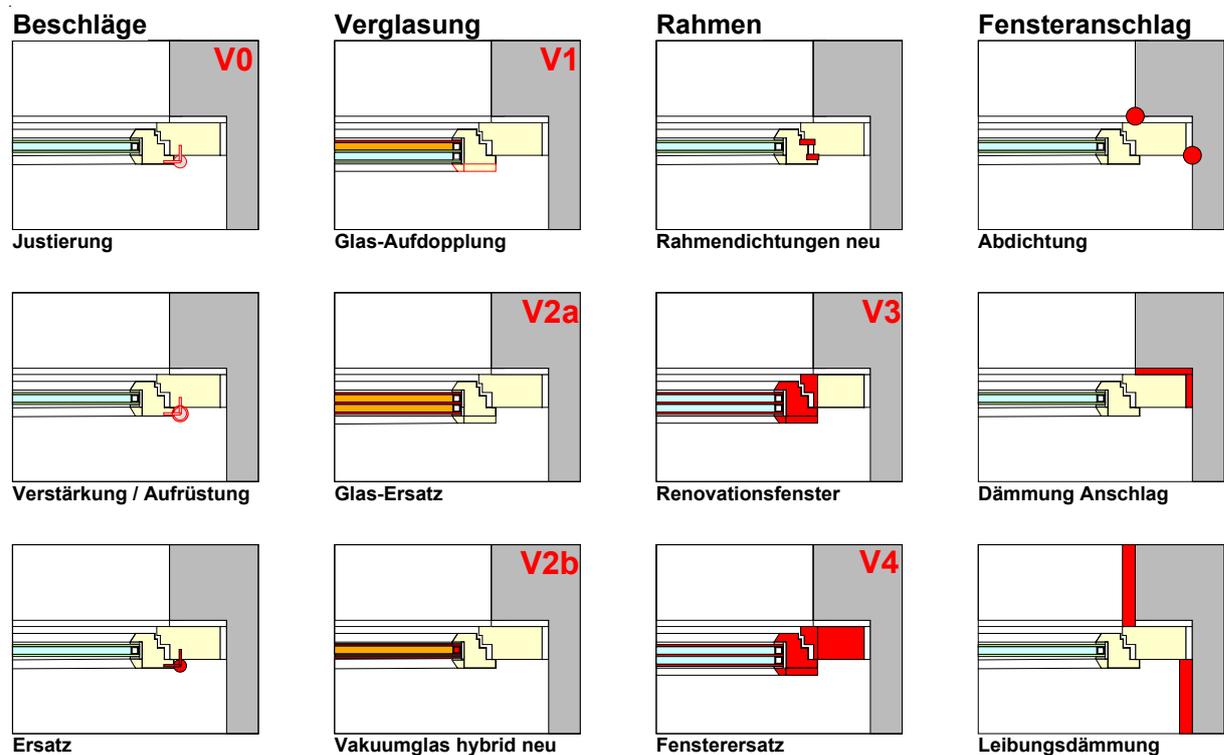


Abbildung 31: Näher untersuchte Ertüchtigungsvarianten von Fenstern (NEB)



#### 4.1.1 Übersicht der untersuchten Ertüchtigungsstrategien von Fenstern

Es werden folgende Ertüchtigungsstrategien von Fenstern und Verglasungen genauer untersucht.

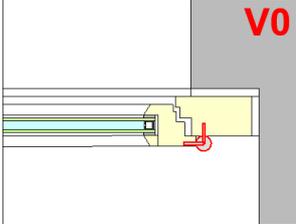
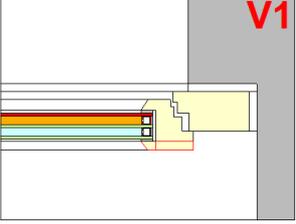
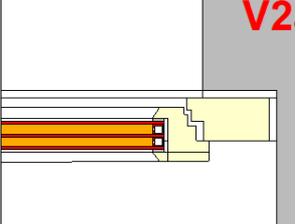
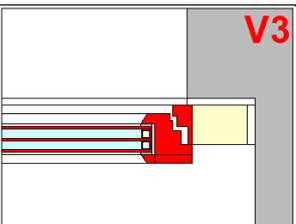
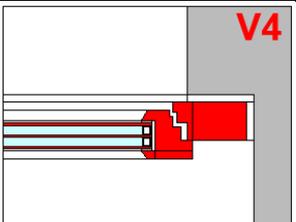
<p><b>V0: Einfache Ertüchtigung</b> Fenster und Rahmen säubern, Anstriche prüfen und erneuern. Fensterdichtungen austauschen oder erneuern, um Zugluft und Wärmeverluste zu reduzieren. Bei älteren Fenstern zusätzliche Dichtprofile einsetzen. Scharniere und Beschläge überprüfen und nachjustieren. Beschädigten Beschläge austauschen.</p>	
<p><b>V1: Glasaufdopplung</b> Bestehende 2-fach-Isolierverglasungen können durch die Ergänzung einer dritten Glasscheibe mit Low-E-Beschichtung energetisch verbessert werden. Dazu wird die Isolierverglasung ausgebaut und im Werk mit einer zusätzlichen beschichteten Glasscheibe ergänzt, mit Gas befüllt und neu gefasst.</p>	
<p><b>V2: Glasersatz</b> Ein Glasersatz bei Fenstern ist notwendig, wenn die Fensterscheibe beschädigt ist und ausgetauscht werden muss. Dabei wird nur die Glasscheibe ersetzt, während der Rahmen erhalten bleibt. Der Glasersatz kann mit normalem Flachglas, mit Dünnschichtglas oder mit Vakuum-Hybridglas erfolgen.</p>	
<p><b>V3: Renovationsfenster</b> Ein Renovationsfenster ist speziell für die Sanierung bestehender Gebäude konzipiert und wird auf Mass angefertigt. Der Vorteil von Renovationsfenstern besteht darin, dass sie in die bestehenden Blendrahmen eingebaut werden können, wodurch aufwendige Ausbauarbeiten vermieden werden.</p>	
<p><b>V4: Fensterersatz</b> Zusätzlich wird als Vergleichsvariante auch der Fensterersatz berücksichtigt.</p>	

Tabelle 12: Verschiedene Varianten von Fensterertüchtigungen (Grafiken INEB)

Um die Varianten vergleichen zu können, werden der U-Wert von Verglasungen und Fenster und die indirekten Treibhausgasemissionen der Ertüchtigungsmassnahmen ermittelt. Zudem werden weitere Parameter gegenübergestellt, z.B. Ressourceneinsatz, Realisierbarkeit und Kosten. Für den Vergleich



der Massnahmen werden unter anderem Treibhausgasemissionen aus der Erstellung und dem Betrieb gemeinsam betrachtet. Je nach Einbausituation müssen auch Anforderungen an Schallschutz, Sicherheit und Brandschutz berücksichtigt werden.

#### **4.1.2 Ertüchtigung Verglasung**

Bei der energetischen Ertüchtigung bestehender Fenster stehen verschiedene Strategien zur Verbesserung der Verglasung zur Verfügung. Die Wahl der optimalen Ertüchtigungsvariante wird dabei durch die Art und den Zustand der vorhandenen Verglasung sowie die Beschaffenheit des Rahmens bestimmt. Entscheidend sind insbesondere der Glasaufbau, das Alter und der Erhaltungszustand der bestehenden Isolierverglasung sowie die statischen Eigenschaften, das Rahmenmaterial und die Glasfalzgeometrie des Rahmens.

Die verschiedenen Ertüchtigungsvarianten unterscheiden sich sowohl in ihrer Eingriffstiefe und ihrem energetischen Verbesserungspotential als auch in ihren Anforderungen an die bestehende Konstruktion. Diese reichen von der Glasaufdopplung bis hin zum Austausch der Verglasung (Glasersatz) oder innovativen Lösungen wie dem Auftrennen und Neuzusammenbau bestehender Isolierverglasungen. Die sorgfältige Analyse der technischen Ausgangsbedingungen ist entscheidend für die erfolgreiche energetische Optimierung der Fenster. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten der Ertüchtigung der Verglasung kurz beschrieben.

##### **Auftrennen bestehender Isolierverglasungen und Neufassung als Wärmeschutzverglasung**

Eine innovative Lösung stellt das Auftrennen der bestehenden Isolierverglasung und einer Neufassung als Wärmeschutzglas dar [73]. Bei diesem Verfahren können beispielsweise bestehende 2-fach-Isolierverglasungen aufgetrennt und die ursprünglichen unbeschichteten Scheiben mit einer oder zwei neuen Low-E beschichteten Scheiben zu einer 2-WS oder 3-WS kombiniert werden. Aus einer bestehenden 2-WS kann nach dem Auftrennen und Reinigen eine neuwertige 2-WS oder 3-WS hergestellt werden. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an die jeweiligen Anforderungen. Die Scheiben werden nach der Reinigung mit einem neuen Randverbund versehen und mit Edelgas gefüllt. Dieses Verfahren verbindet die Vorteile der Materialerhaltung mit den energetischen Vorteilen moderner Beschichtungstechnologie.

##### **Glasaufdopplung von 2-IV zu 3-WS**

Bei der Glasaufdopplung wird vor die bestehende 2-fach-Isolierverglasung eine zusätzliche Scheibe mit Low-E Beschichtung montiert. Diese Massnahme erfordert eine Anpassung des Glasfalzes, da die Gesamtdicke des Verglasungssystems durch die zusätzliche Scheibe und den erforderlichen Scheibenzwischenraum um etwa 12-16 mm zunimmt. Die Vergrößerung des Glasfalzes stellt einen handwerklichen Eingriff dar. Durch den Einsatz von Dünnglas für die zusätzliche Scheibe kann die Gewichtszunahme minimiert werden. Die Low-E Beschichtung auf dem neuen Glas verbessert die Dämmwirkung, sodass in Abhängigkeit der energetischen Eigenschaften der Bestandsverglasung und der Breite des neuen Scheibenzwischenraums  $U_g$ -Werte von etwa 0.6-1.3 W/(m<sup>2</sup>K) erreicht werden können (Abschnitt 4.1.3). Diese Variante ist besonders ressourcenschonend, da die bestehende Verglasung vollständig erhalten bleibt.

##### **Glasersatz mit 2-fach-Wärmeschutzverglasung (2-WS)**

Der Ersatz einer bestehenden 2-fach Isolierverglasung ohne Low-E-Beschichtung ( $U_g$  2.7-3.0 W/(m<sup>2</sup>K)) durch eine moderne 2-fach-Wärmeschutzverglasung ermöglicht eine erhebliche energetische Verbesserung. Die neue Verglasung mit Low-E Beschichtung und Edelgasfüllung erreicht  $U_g$ -Werte von etwa 1.0-1.1 W/(m<sup>2</sup>K). Da 2-fach-Wärmeschutzverglasungen in der gleichen Dicke wie ältere 2-fach-Isolierverglasungen ausgeführt werden können, ist keine Anpassung des Glasfalzes erforderlich. Dies vereinfacht den Austausch und reduziert den handwerklichen Aufwand. Durch den Einsatz von Dünnglas kann das Gesamtgewicht der neuen Verglasung zudem deutlich reduziert werden, wodurch die Belastung für den bestehenden Rahmen minimiert wird.



### Glasersatz mit 3-fach-Wärmeschutzverglasung (3-WS)

Eine 3-fach-Wärmeschutzverglasung bietet mit  $U_g$ -Werten bis zu  $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  eine weitergehende energetische Verbesserung. Beim Ersatz einer bestehenden 2-fach-Isolierverglasung durch eine 3-fach-Wärmeschutzverglasung muss in der Regel der Glasfalz angepasst werden, da die Gesamtdicke der 3-fach-Verglasung etwa 12-14 mm grösser ist als die der bestehenden 2-fach-Verglasung. Diese Anpassung erfordert einen handwerklichen Aufwand und ist nicht bei allen Rahmenkonstruktionen möglich. Durch den Einsatz von Dünnglas kann das zusätzliche Gewicht im Vergleich zu konventionellen 3-fach-Verglasungen um bis zu 30 % reduziert werden. Dies erweitert den Anwendungsbereich dieser Variante, da auch Rahmenkonstruktionen mit geringerer Tragfähigkeit ertüchtigt werden können. Die geringere Gesamtdicke der Dünnglasvariante ermöglicht zudem den Einbau in Rahmen mit kleineren Glasfalztiefen.

### Glasersatz mit Vakuum-Hybridglas

Vakuum-Hybridglas kombiniert eine Vakuumglasscheibe mit einer konventionellen Isolierglaseinheit und erreicht  $U_g$ -Werte von etwa  $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die geringe Gesamtdicke bei gleichzeitig sehr guter Dämmwirkung macht diese Technologie besonders interessant für Bestandsfenster mit begrenzter Glasfalztiefe. Die Gewichtsbelastung ist dabei vergleichbar mit einer konventionellen 2-fach-Verglasung. Da Vakuum-Hybridglas in der gleichen Scheibendicke wie die bestehende 2-fach-Isolierverglasungen ausgeführt werden kann, ist keine Anpassung des Glasfalzes erforderlich. Dies vereinfacht den Austausch und reduziert den handwerklichen Aufwand.

### Entscheidungshilfe für Ertüchtigungsverfahren von Verglasungen

Die in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellten Entscheidungsbäume veranschaulichen einen systematischen Prozess, um die technisch und wirtschaftlich sinnvollste Ertüchtigungsvariante für bestehende Fensterverglasungen zu identifizieren.

Als Ausgangssituation werden dabei zwei unterschiedliche Verglasungstypen betrachtet: zum einen die ältere 2-fach Isolierverglasung ohne Low-E Beschichtung mit Luftfüllung ( $U_g$ -Wert 2.7-3.0  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ), zum anderen die neuere 2-fach Wärmeschutzverglasung mit Low-E Beschichtung und Edelgasfüllung  $> 70\%$  ( $U_g$ -Wert 1.1-1.4  $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ).

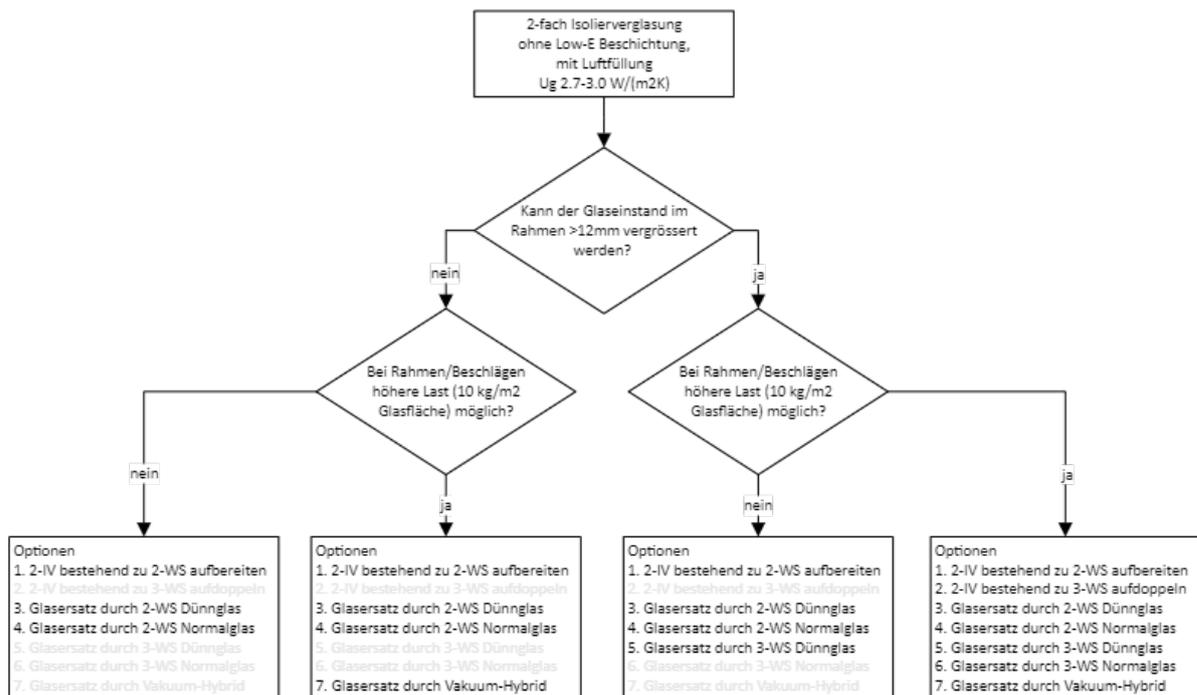




Abbildung 32: Entscheidungsbaum zur energetischen Ertüchtigung von Fenstern mit 2-fach Isolierverglasung ohne Low-E Beschichtung ( $U_g$  2.7-3.0 W/(m<sup>2</sup>K)). Bild: INEB.

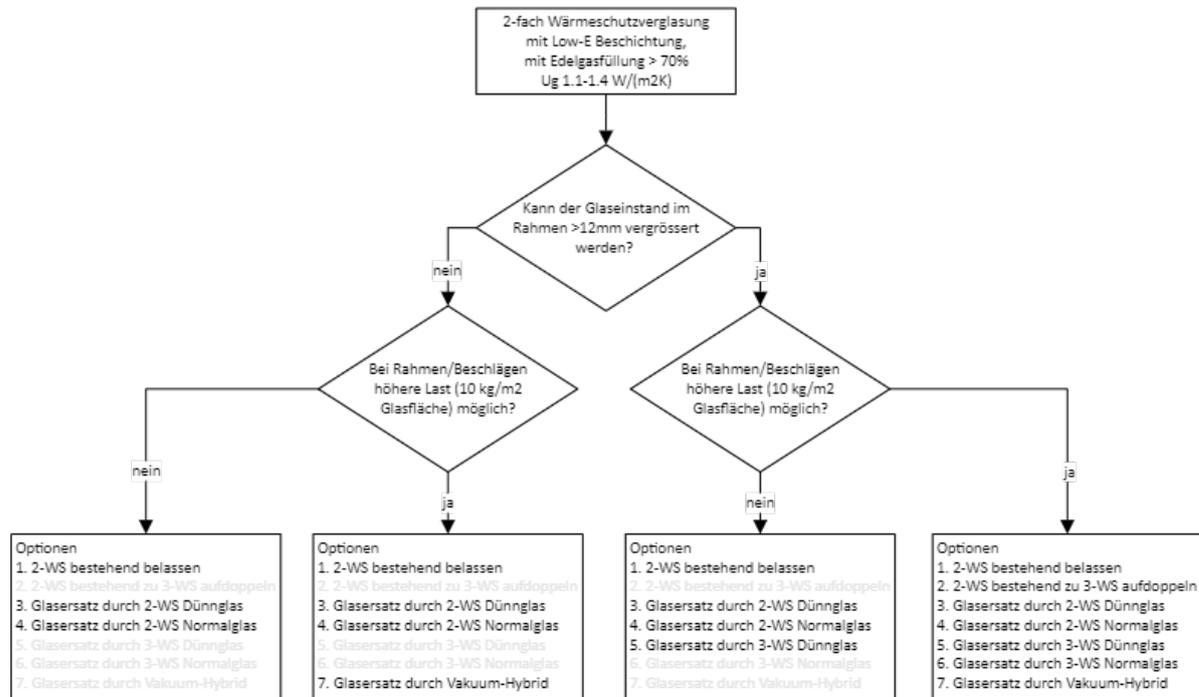


Abbildung 33: Entscheidungsbaum zur energetischen Ertüchtigung von Fenstern mit 2-fach Isolierverglasung mit Low-E Beschichtung ( $U_g$  1.1-1.4 W/(m<sup>2</sup>K)). Bild: INEB.

Der Entscheidungsprozess orientiert sich primär an zwei zentralen technischen Parametern: Zunächst wird geprüft, ob der Glaseinstand im Rahmen um mindestens 12mm vergrößert werden kann. Dies ist entscheidend für die Möglichkeit einer Glasaufdopplung oder eines Glasersatzes. Als zweiter Parameter wird die Belastbarkeit von Rahmen und Beschlägen untersucht, da diese für eine zusätzliche Last von 10 kg/m<sup>2</sup> Glasfläche bei einer Glasaufdopplung ausgelegt sein müssen.

Je nach Bewertung dieser Parameter ergeben sich verschiedene Handlungsoptionen. Diese reichen von der Beibehaltung der bestehenden Verglasung über die Aufdopplung zu einer 3-fach Verglasung bis hin zum kompletten Glasersatz. Dabei stehen verschiedene technische Lösungen zur Verfügung, wie der Einsatz von 2-WS oder 3-WS Dünnglas, Normalglas oder Vakuum-Hybrid-Verglasung.

Die Analyse zeigt, dass auch bei bestehenden älteren Isolierverglasungen durch geeignete Ertüchtigungsmassnahmen eine deutliche energetische Verbesserung erzielt werden kann. Bei neueren Wärmeschutzverglasungen hingegen ist der potenzielle Mehrwert einer Ertüchtigung geringer und muss im Einzelfall sorgfältig gegen den erforderlichen Aufwand abgewogen werden.

#### 4.1.3 Beispiel Glasaufdopplung

Beispielhaft wird im Folgenden die Ertüchtigungsmassnahme Aufdopplung bestehender 2-fach Isolierverglasung zu 3-fach Isolierverglasung dargestellt.

Bestehende 2-fach-Isolierverglasungen können durch die Ergänzung einer dritten Glasscheibe mit Low-E-Beschichtung energetisch verbessert werden (Abbildung 34). Diese Ertüchtigungsmassnahme kann teilautomatisiert in einer Fertigungsanlage für Isoliergläser erfolgen. Dafür wird die bestehende Verglasung aus dem Fensterrahmen ausgebaut, in eine Isolierglasfertigung transportiert, gereinigt und



auf der Fertigungsstrasse vollautomatisch mit der dritten Glasscheibe, dem neuen Glasrandverbund und der Edelgasfüllung ergänzt.

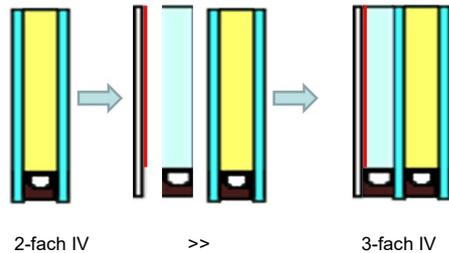


Abbildung 34: Aufdopplung bestehender 2-fach-Isolierverglasungen zu 3-fach IV. Bild: INEB.

In Abbildung 35 ist beispielhaft dargestellt, wie sich der  $U_g$ -Wert einer 2-fach-Verglasung durch die Aufdopplung mit einer dritten Glasscheibe mit Low-E-Beschichtung und einer Argon-Gasfüllung (90 %) in Abhängigkeit der Breite des SZR verbessert. Bei einer bestehenden 2-fach-Verglasung ohne Low-E-Beschichtung mit luftgefülltem SZR reduziert sich der  $U_g$ -Wert für den betrachteten Isolierglasaufbau 4/16/4 gemäss Berechnung von 2.7  $W/(m^2K)$  auf 0.88 bis 1.45  $W/(m^2K)$ . Die bestehende 2-fach-Verglasung mit Low-E-Beschichtung und 70 % Argonfüllung im SZR verbessert sich durch die Aufdopplung gemäss Berechnung von 1.2  $W/(m^2K)$  auf 0.59 bis 0.82  $W/(m^2K)$ .

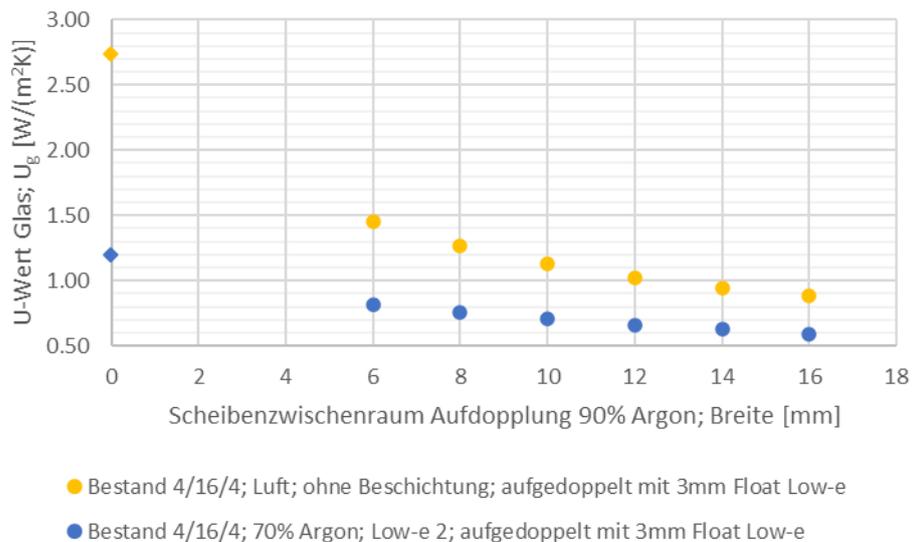


Abbildung 35:  $U_g$ -Werte aufgedoppelter 2-fach-Verglasungen in Abhängigkeit von der Breite der Scheibenzwischenraums. Bild: INEB.

Die indirekten Treibhausgasemissionen der Aufdopplung einer bestehenden 2-fach IV zu einer 3-fach IV wurden anhand der Datengrundlage der KBOB-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» 2009:2022 [8] ermittelt und mit den Werten neuer 2-fach und 3-fach IV gegenübergestellt (Abbildung 36). Für eine neue 2-fach IV 4 mm Floatglas/16 mm SZR 90 % Argon Füllung/4 mm Floatglas betragen die indirekten Treibhausgasemissionen 44  $kg\ CO_2\text{-eq./m}^2$ , für eine neue 3-fach IV mit 3x 4 mm Floatglas und 2x 14 mm SZR mit 90 % Argon Füllung 68  $kg\ CO_2\text{-eq./m}^2$ . Die indirekten Treibhausgasemissionen für die Aufdopplung mit 3 mm Floatglas und einem SZR von 14 bis 16 mm mit 90 % Argon Füllung betragen 25 bis 31  $kg\ CO_2\text{-eq./m}^2$ , was einer Reduktion von 30 bis 43 % gegenüber einer neuen 2-fach IV und 54 bis 63 % gegenüber einer neuen 3-fach IV entspricht.

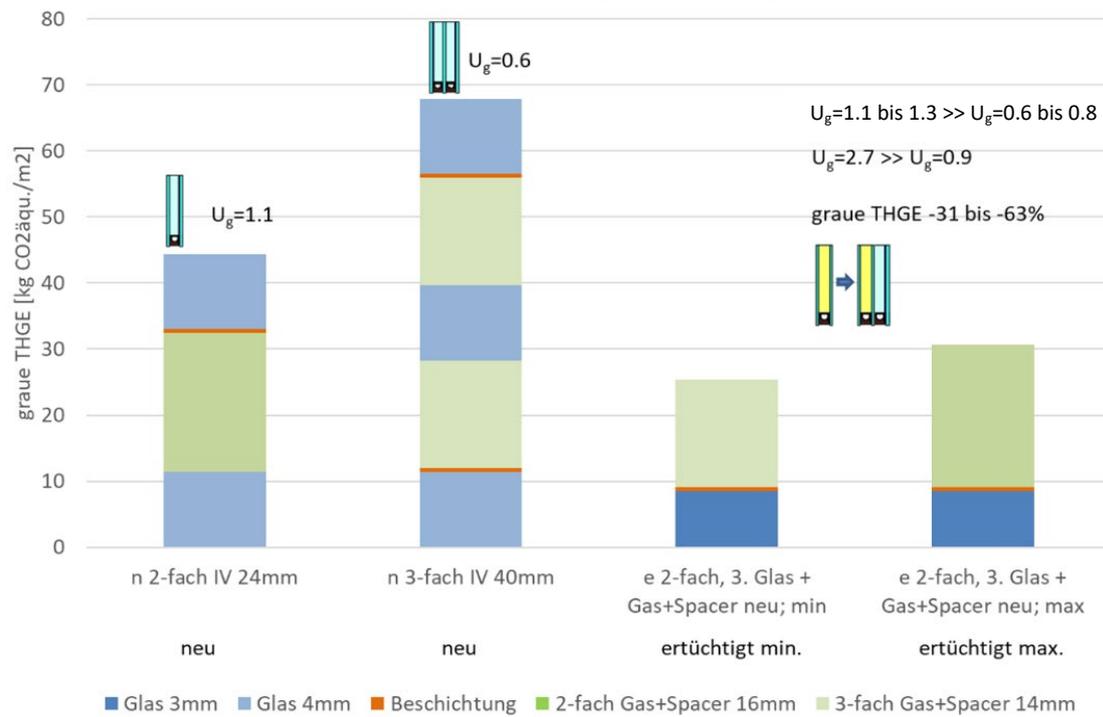


Abbildung 36: Indirekte Treibhausgasemissionen für neue 2-fach IV, 3-fach IV und bestehende ertüchtigte 2-fach IV zu 3-fach IV. Berechnungen gemäss KBOB-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» 2009:2022 [8]. Bild: INEB.

Die gemeinsame Betrachtung der Treibhausgasemissionen aus Erstellung und Betrieb ist in Kapitel 4.2.2 dargestellt.



## 4.2 Betrachtung indirekte und direkte Treibhausgasemissionen

Die energetische Verbesserung von Fenstern spielt eine wichtige Rolle bei der Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden. Neben den direkten Einsparungen im Betrieb müssen dabei auch die indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung berücksichtigt werden, die bei den verschiedenen Sanierungsvarianten für die Ertüchtigung im Bestand oder für die Wiederverwendung (Re-Use) entstehen.

### 4.2.1 Indirekte Treibhausgasemissionen der Erstellung für die Ertüchtigung im Bestand

Die Grundlagen für die Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen von Fenstern sind in Kapitel 3.4 beschrieben. Die folgende Analyse ermittelt die Treibhausgasemissionen der Erstellung unterschiedlicher Ertüchtigungsvarianten. Dabei werden sämtliche relevanten Prozessschritte von der Herstellung neuer Bauteile bis hin zur Entsorgung berücksichtigt. Diese Betrachtung ermöglicht eine Bewertung verschiedener Sanierungs- und Ertüchtigungsstrategien und bildet die Grundlage für eine Gesamtbetrachtung der Treibhausgasemissionen der Erstellung und des Betriebs.

Für die Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung werden die Positionen gemäss Tabelle 13 auf Grundlage der KBOB «Ökobilanzdaten im Baubereich» [8], sowie Anhang 12.2 berücksichtigt. Es wird ein Normfenster gemäss SIA 331 mit zwei Öffnungsflügen dem Lichtmass von 1.55 m Breite und 1.15 m Höhe betrachtet.

	Ist-Zu- stand	Glasauf- dopplung	Glasersatz 3-WS	Glasersatz Vakuum- Hybrid	Renova- tions- fenster	Fenster- ersatz Kunst- stofffens- ter
neue Überschlagsdichtung	X	X	X	X		
Ersatz Glasdichtung		X	X			
neue Glasleisten		X	X			
Anstrich innen	X	X	X	X		
Transport bestehende Vergla- sung Isolierglaswerk		X				
neue Floatglas Scheibe mit Low-E Beschichtung		X				
neuer Abstandhalter		X				
neue Edelgasfüllung (Argon)		X				
neue Mehrfachverglasung			X	X	X	X
neuer Fensterrahmen inkl. Dichtungen und Oberflächenbehandlung					X	X

Tabelle 13: Einzelpositionen für die Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung der betrachteten Varianten.

Eine Aufschlüsselung der indirekten Treibhausgasemissionen bei der Erstellung verschiedener Fensterertüchtigungs- und Fensterersatzvarianten, sowie des Ist-Zustands zeigt Abbildung 37. Die Emissionen werden in Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Quadratmeter Fenster und Jahr (kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a)) dargestellt. Dabei werden acht verschiedene Komponenten der Emissionen betrachtet: Rahmen (inklusive Dichtung und Transport), Beschläge, Dichtung, Oberflächenbehandlung, Glas, Glasleisten, Transport (LKW 3.5-7.5t) und Entsorgung.

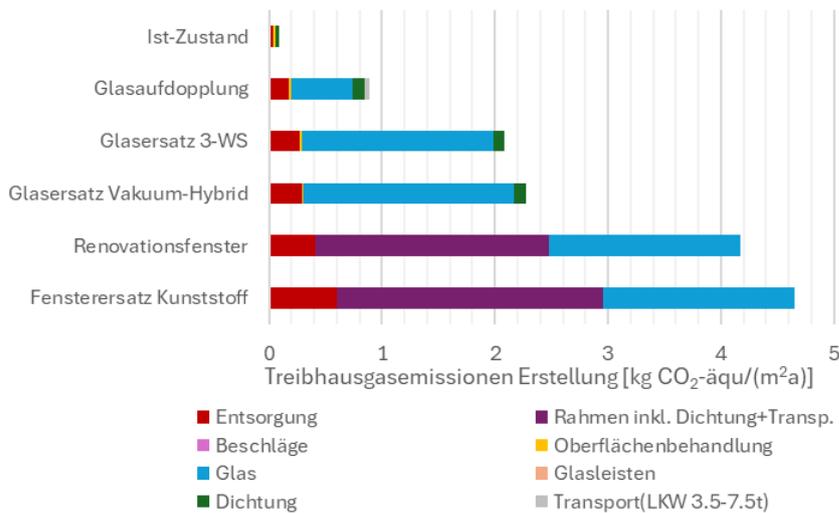


Abbildung 37: Treibhausgasemissionen Erstellung pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten. Betrachtet wird ein Normfenster (zweifuglig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m)

Die Betrachtung der indirekten Treibhausgasemissionen der verschiedenen Varianten führt zu folgenden Ergebnissen:

- Der Ist-Zustand zeigt mit etwa 0.1 kg CO<sub>2</sub>eq/(m<sup>2</sup>a) oder 5.3 kg CO<sub>2</sub>eq für das Normfenster über einen Zeithorizont von 30 Jahren gerechnet die geringsten Emissionen, da kaum neue Materialien oder Bearbeitungsprozesse erforderlich sind.
- Eine Glasaufdopplung verursacht rund 0.9 kg CO<sub>2</sub>eq/(m<sup>2</sup>a) oder 48 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> für das Normfenster über einen Zeithorizont von 30 Jahren gerechnet, wobei etwa 60 % der Emissionen auf das zusätzliche Glas und kleinere Anteile auf die Dichtung und Entsorgung zurückzuführen sind. Diese Variante stellt die emissionsarmste Option unter den Ertuchigungsmassnahmen dar.
- Die Varianten des Glasersatzes verursachen höhere Gesamtemissionen, von 2.1-2.3 kg CO<sub>2</sub>eq/(m<sup>2</sup>a) oder 112 – 123 kg CO<sub>2</sub>eq für das Normfenster über einen Zeithorizont von 30 Jahren gerechnet, wovon 80 % der Emissionen auf das Glas selbst und der Rest auf Dichtungen Anstrich und Entsorgung entfallen [74]. Der Austausch mit Vakuum-Hybridglas erhöhet die Emissionen leicht, was auf die energieintensivere Herstellung dieses Glastyps zurückzuführen ist [8]. Im Vergleich zur Glasaufdopplung verursachen diese Varianten 2.5-mal mehr Emissionen. Fensterersatzvarianten führen insgesamt zu deutlich höheren indirekten Treibhausgasemissionen.
- Das Renovationsfenster verursacht etwa 2.8 kg CO<sub>2</sub>eq/(m<sup>2</sup>a) oder 145 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> für das Normfenster über einen Zeithorizont von 30 Jahren gerechnet, wobei fast 60 % der Emissionen auf den Rahmen entfallen.
- Der Fensterersatz mit Kunststoffrahmen verursacht die höchsten Gesamtemissionen mit rund 4.7 kg CO<sub>2</sub>eq/(m<sup>2</sup>a) oder 251 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> für das Normfenster über einen Zeithorizont von 30 Jahren gerechnet. Davon entfallen 65 % auf den Rahmen, 20 % auf das Glas und ein kleinerer Anteil auf die Entsorgung. Im Vergleich zur Glasaufdopplung verursacht das Kunststofffenster etwa 5-mal mehr Emissionen und im Vergleich zum Renovationsfenster sind die Emissionen um rund 10 % höher.

Fazit: Massnahmen mit geringer Eingriffstiefe, wie die Glasaufdopplung oder der Glasaustausch, verursachen deutlich geringere indirekte Treibhausgasemissionen als ein Fensterersatz. Die Glasauf-



dopplung verursacht beispielsweise 80 % weniger Emissionen als ein Fensteraustausch mit Kunststoffrahmen. Die Wahl der geeigneten Ertüchtigungs- oder Ersatzmassnahme sollte daher nicht nur die energetischen Vorteile, sondern auch die ökologischen Auswirkungen der Erstellung berücksichtigen. Varianten wie die Glasaufdopplung bieten ein günstiges Verhältnis von Aufwand zu Nutzen und stellen eine ökologisch vorteilhafte Alternative zu umfangreicheren Massnahmen dar, insbesondere im Hinblick auf die Reduktion der indirekten Treibhausgasemissionen.

#### 4.2.2 Treibhausgasemissionen für Erstellung und Betrieb für die Ertüchtigung im Bestand

Bei der ökologischen Bewertung der verschiedenen Ertüchtigungsmassnahmen von Fenstern im Bestand ist eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen erforderlich, die sowohl die Herstellung als auch den Betrieb berücksichtigt.

Die nachfolgende Analyse untersucht die Treibhausgasemissionen der Fensterertüchtigungsvarianten unter Berücksichtigung verschiedener Wärmeerzeugersysteme. Dabei werden sowohl die indirekten Treibhausgasemissionen aus der Erstellung als auch die betriebsbedingten Treibhausgasemissionen aus dem Heizenergiebedarf quantifiziert (jeweils bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Fenster). Als Ausgangssituation dient ein typisches Bestandsfenster aus den 1980er Jahren. Die betrachteten Ertüchtigungsvarianten umfassen sowohl Massnahmen an der Verglasung wie Glasaufdopplung und Glasersatz als auch den vollständigen Fensterersatz. Die U-Werte sind in Tabelle 14 dargestellt.

	Ist-Zustand	Glasaufdopplung	Glasersatz 3-WS	Glasersatz Vakuum-Hybrid	Renovationsfenster	Fensterersatz Kunststofffenster
U-Wert Fenster, $U_w$ (W/(m <sup>2</sup> K))	2.7	1.2	0.88	0.89	0.84	0.81
U-Wert Rahmen, $U_r$ (W/(m <sup>2</sup> K))	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.1
U-Wert Verglasung, $U_g$ (W/(m <sup>2</sup> K))	2.7	0.9	0.6	0.47	0.6	0.6
Psi-Wert Abstandhalter, $\Psi_g$ (W/(m K))	0.06	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03

Tabelle 14: U-Werte des Ist-Zustands eines typischen Bestandsfensters aus den 1980er Jahren und der betrachteten Varianten.

Die Ergebnisse werden für drei Wärmeversorgungssysteme dargestellt: konventioneller Erdgas-Heizkessel, Fernwärme sowie Luft-Wasser-Wärmepumpe. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die Bedeutung des Wärmeversorgungssystems im Kontext der Fensterertüchtigung und liefert Erkenntnisse für die strategische Planung von Sanierungsmassnahmen. Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen im Betrieb werden die Transmissionswärmeverluste des Fensters berücksichtigt und Ökobilanzdaten für Nutzwärme gemäss [8] verwendet.



## Ergebnisse Variantenvergleich beim Einsatz von Erdgas

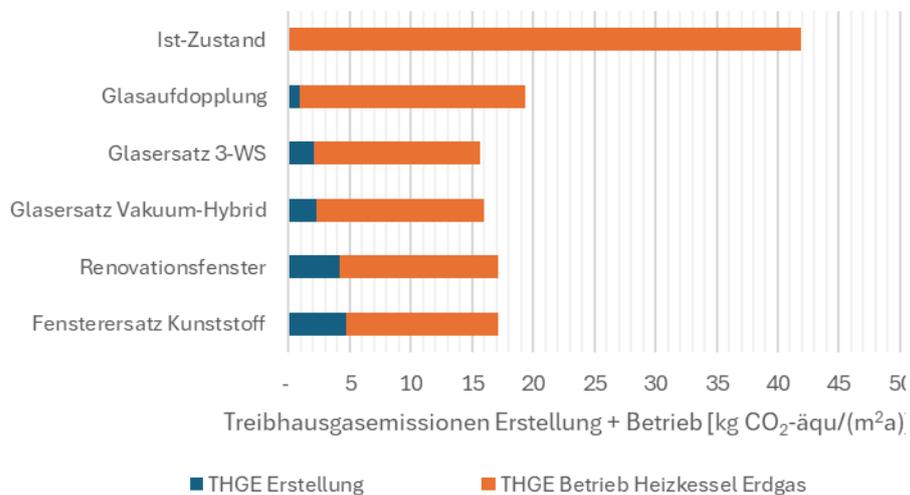


Abbildung 38: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Erdgas.

Bei Verwendung eines Erdgas-Heizkessels zeigen sich die ausgeprägtesten Emissionsunterschiede (Abbildung 38). Der Ist-Zustand generiert mit 42 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die höchsten Gesamtemissionen. Sämtliche Ertüchtigungsvarianten führen zu einer substantziellen Reduktion der Emissionen um circa 50-60 %, auf 16-19 CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Die betriebsbedingten Emissionen dominieren dabei deutlich gegenüber den Erstellungsemissionen. Beim Einsatz von Biogas reduzieren sich gegenüber Erdgas die Betriebsemissionen um ca. 45 %. Von den Ertüchtigungsvarianten weist die Glasaufdopplung die höchsten Treibhausgasemissionen und der Glasersatz die tiefsten Emissionen auf.

## Ergebnisse Variantenvergleich beim Einsatz von Fernwärme

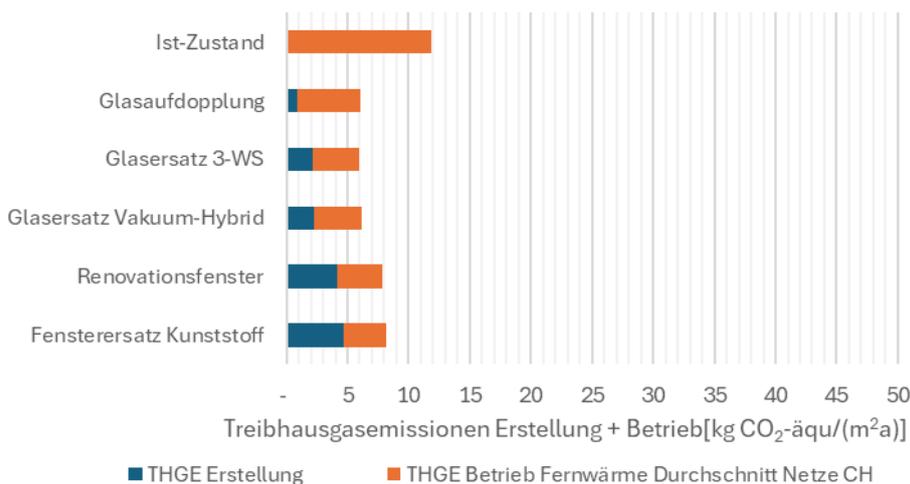


Abbildung 39: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Fernwärme.

Die Wärmeerzeugung durch Fernwärme resultiert in einer signifikanten Reduktion der betriebsbedingten Emissionen (Abbildung 39). Angaben zur Zusammensetzung des durchschnittlichen Fernwärmemixes gemäss KBOB sind in [75] enthalten. Die Gesamtemissionen aller Varianten bewegen sich



zwischen 6-12 kg CO<sub>2</sub>-äq/(m<sup>2</sup>a). Die relativen Unterschiede zwischen den Ertüchtigungsvarianten bleiben bestehen, jedoch mit deutlich geringerer absoluter Ausprägung und einer veränderten Rangfolge. Die Varianten Fensterersatz weisen die höchsten Emissionen der Ertüchtigungen auf.

### Ergebnisse Variantenvergleich beim Einsatz einer Luft-Wasser-Wärmepumpe

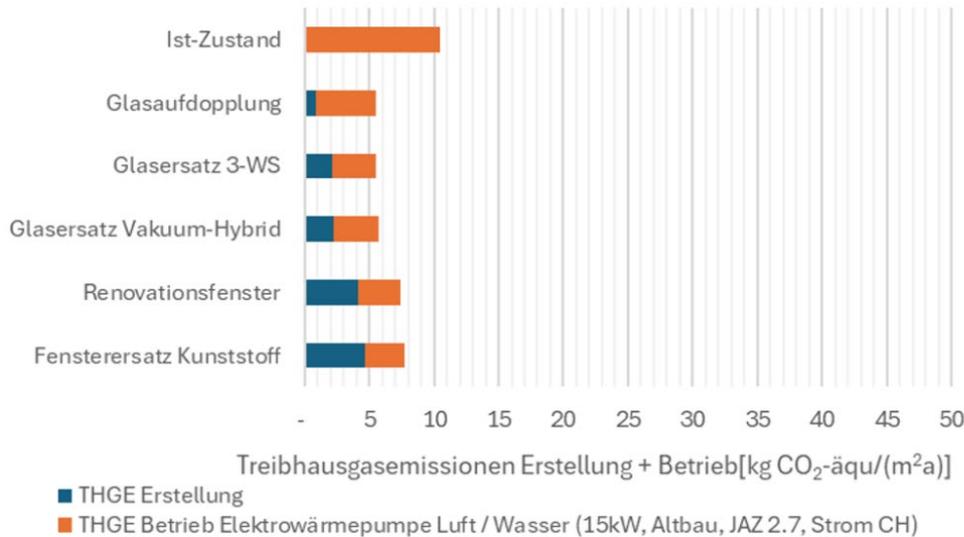


Abbildung 40: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten, Wärmeversorgung mittels Luft-Wasser-Wärmepumpe.

Die Nutzung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (15 kW, JAZ 2.7) mit schweizerischem Strommix zeigt eine noch etwas höhere Effizienz im Systemvergleich (Abbildung 40). Die betriebsbedingten Emissionen erreichen hier die niedrigsten Werte, was die Bedeutung der Dekarbonisierung des Gebäudesektors unterstreicht.

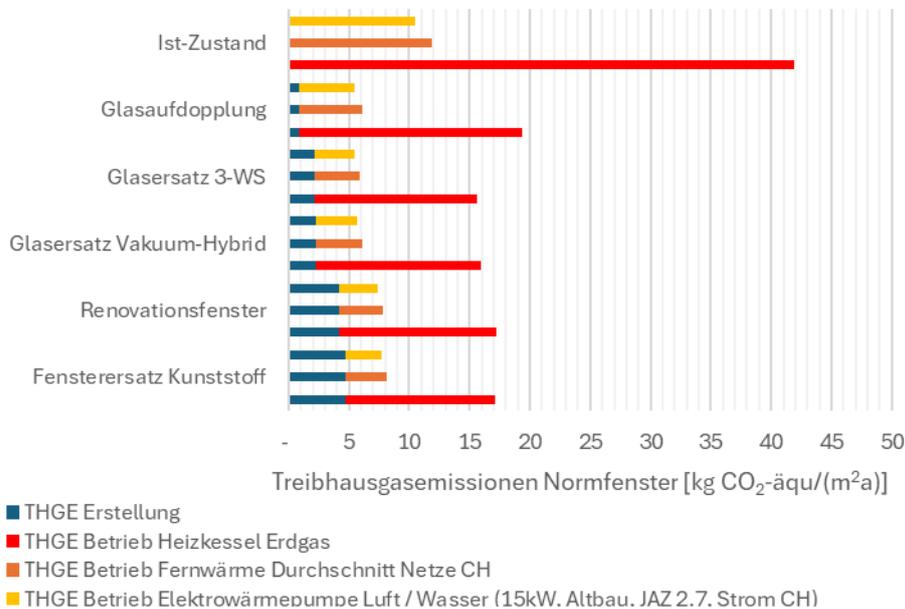




Abbildung 41: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten und Wärmeerzeuger.

Die zusammenfassende Darstellung aller Heizsysteme zeigt Abbildung 41. Dabei wird deutlich, dass:

- Die Wahl des Heizsystems einen grösseren Einfluss auf die Gesamtemissionen hat als die spezifische Ertüchtigungsvariante.
- Die Kombination aus Glasaufdopplung oder Glasersatz und emissionsarmen Heizsystemen das grösste Reduktionspotential bietet.

Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung bei der energetischen Gebäudesanierung. Es zeigt sich, dass die Kombination aus moderater Fensterertüchtigung und effizientem (fossilfreiem) Heizsystem oft zu besseren Gesamtergebnissen führt als eine maximale Fensterertüchtigung bei ineffizienter Wärmeerzeugung. Bei Wärmeerzeugersystemen mit Luft-Wasser-Wärmepumpen beeinflusst zudem der verwendete Strommix das Ergebnis.

### Einfluss des Strommixes

Die folgende Analyse untersucht für den Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe den Einfluss verschiedener Strommixe auf die Gesamtemissionsbilanz der Fensterertüchtigungsvarianten. Betrachtet werden der europäische ENTSO-Verbraucherstrommix, der durchschnittliche schweizerische Verbrauchermix sowie zertifizierter schweizerischer Ökostrom. Diese Betrachtung ermöglicht Rückschlüsse auf die Bedeutung der Strommixes für die ökologische Bewertung der Sanierungsmassnahmen und deren Priorisierung.

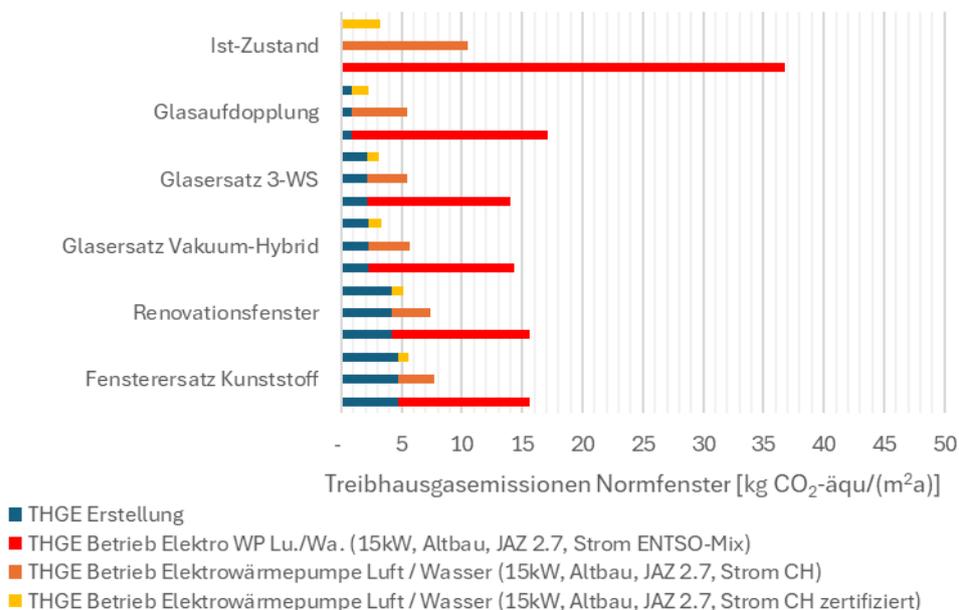


Abbildung 42: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten und unterschiedliche Strommixe für den Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 2.7 W/(m²K).

Bei Verwendung des ENTSO-Strommix weist der Ist-Zustand mit etwa 37 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m²a) die höchsten Gesamtemissionen auf (Abbildung 42). Der Abstand zu den ertüchtigten Varianten beträgt dabei



circa 20-25 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Diese Differenz reduziert sich signifikant bei Nutzung des durchschnittlichen schweizerischen Verbraucherstrommixes. Hier liegen die Emissionen des Ist-Zustands bei etwa 10 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a), während sie für die ertüchtigten Varianten 5-8 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) beträgt. Bei Verwendung von zertifiziertem schweizerischem Ökostrom unterschreiten die Emissionen des Ist-Zustands sogar die Werte der Fensterersatzvarianten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die geringen betriebsbedingten Emissionen die sehr geringen Erstellungsemissionen des Ist-Zustands kompensieren.

Die relative Position der verschiedenen Ertüchtigungsvarianten untereinander verändert sich in Abhängigkeit vom gewählten Strommix. Bei Verwendung des ENTSO-Strommix (rote Balken) zeigt die Glasaufdopplung mit etwa 17 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die höchsten Gesamtemissionen unter den Ertüchtigungsvarianten, gefolgt von den Fensterersatzvarianten mit etwa 16 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Die Glaserersatzvarianten weisen mit etwa 14 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die geringsten Gesamtemissionen auf. Bei Verwendung des schweizerischen Verbraucherstrommix (orange Balken) liegen die Glasaufdopplung und die Glaserersatzvarianten mit etwa 6 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) auf einem ähnlichen Niveau und zeigen geringere Gesamtemissionen als die Fensterersatzvarianten mit etwa 7-8 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Bei zertifiziertem schweizerischem Ökostrom (gelbe Balken) zeigt sich eine klare Rangfolge: Die Glasaufdopplung erreicht mit etwa 2 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die niedrigsten Gesamtemissionen, gefolgt von den Glaserersatzvarianten mit etwa 3-4 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Die Fensterersatzvarianten weisen mit etwa 5-6 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die höchsten Emissionen auf, da hier die höheren Erstellungsemissionen durch die geringen betriebsbedingten Emissionen nicht mehr kompensiert werden können.

Mit sinkendem CO<sub>2</sub>-Gehalt des Strommix gewinnen die Erstellungsemissionen entscheidend an Bedeutung. Während sie beim ENTSO-Strommix nur etwa 5-30 % der Gesamtemissionen ausmachen, steigt ihr Anteil bei zertifiziertem schweizerischem Strom auf über 75 %. Dies führt zu einer Neubewertung des Vorteils verschiedener Ertüchtigungsvarianten. Massnahmen mit geringen oder keinen Erstellungsemissionen gewinnen dabei an Attraktivität.

Ein wichtiger methodischer Hinweis betrifft die zeitliche Auflösung der verwendeten Treibhausgasemissionsfaktoren für den Strommix. Die Analyse basiert auf jährlich gemittelten Treibhausgasemissions-Faktoren, welche saisonale Schwankungen in der Zusammensetzung des Strommixes nicht berücksichtigen. Dies stellt eine relevante Vereinfachung dar, da insbesondere im Winter, wenn der Wärmebedarf und damit der Stromverbrauch der Wärmepumpen am höchsten ist, der Anteil fossiler Energieträger im Strommix typischerweise über dem Jahresdurchschnitt liegt.

Eine präzisere Berechnung der tatsächlichen Emissionen würde die Verwendung monatlich differenzierter Treibhausgasemissions-Faktoren erfordern. Diese würden die saisonalen Schwankungen in der Stromproduktion und deren Zusammenhang mit dem zeitlichen Verlauf des Wärmebedarfs berücksichtigen. Solche detaillierten Faktoren sind in den aktuellen KBOB-Daten jedoch noch nicht verfügbar. Für eine realitätsnähere Bewertung von Sanierungsmassnahmen im Zusammenhang mit elektrischen Wärmepumpen wäre die Erarbeitung und Integration dieser zeitlich aufgelösten Emissionsfaktoren in die Ökobilanzdaten ein wichtiger methodischer Entwicklungsschritt.

Die Analyse des Einflusses des Strommixes verdeutlicht, dass die optimale Sanierungsstrategie massgeblich von den lokalen Rahmenbedingungen der Energieversorgung abhängt. In Regionen mit hohem Anteil fossiler Energieträger im Strommix rechtfertigen die hohen betriebsbedingten Emissionen auch aufwendigere Ertüchtigungsmassnahmen mit höheren Erstellungsemissionen. In Gebieten mit CO<sub>2</sub>-armem Strom hingegen können die Erstellungsemissionen zum ausschlaggebenden Faktor werden, der sogar gegen eine Ertüchtigung spricht.

Fazit: Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer systemischen Betrachtung bei der Sanierungsplanung. Die isolierte Optimierung einzelner Parameter (U-Werte, Erstellungsemissionen) greift zu kurz. Vielmehr müssen Treibhausgasemissionen der Erstellung und des Betriebs in die Bewertung einbezogen werden.



### Einfluss der energetischen Qualität des Ist-Zustandes

Die energetische Qualität des Ausgangszustands ist ein entscheidender Faktor für die Bewertung von Ertüchtigungsmassnahmen. Während die vorherige Analyse ein typisches Bestandsfenster aus den 1980er Jahren mit Zweifach-Isolierverglasung betrachtet, existiert im Gebäudebestand eine grosse Bandbreite unterschiedlicher Fensterqualitäten. Fenster aus den späten 1990er Jahren weisen durch die Verwendung von Zweifach-Wärmeschutzverglasung bereits deutlich bessere energetische Eigenschaften auf. Diese zeigen sich in niedrigeren U-Werten des Glases ( $U_g = 1.1-1.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) und des Gesamtfensters. Tabelle 15: enthält die U-Werte des Ist-Zustands und der Ertüchtigungsvarianten. Die folgende Analyse untersucht, wie sich diese besseren Ausgangswerte auf die Bewertung verschiedener Ertüchtigungsvarianten auswirken.

	Ist-Zustand	Glasauf-dopplung	Glaser-satz 3-WS	Glaser-satz Vakuum-Hybrid	Renova-tions-fenster	Fenster-ersatz Kunststoff-fenster
U-Wert Fenster, $U_w \text{ (W}/(\text{m}^2\text{K}))$	1.6	1.0	0.86	0.87	0.84	0.81
U-Wert Rahmen, $U_f \text{ (W}/(\text{m}^2\text{K}))$	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.1
U-Wert Verglasung, $U_g \text{ (W}/(\text{m}^2\text{K}))$	1.3	0.7	0.6	0.47	0.6	0.6
Psi-Wert Abstandhalter, $\Psi_g \text{ (W}/(\text{m K}))$	0.08	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03

Tabelle 15: U-Werte des Ist-Zustands und der betrachteten Varianten.

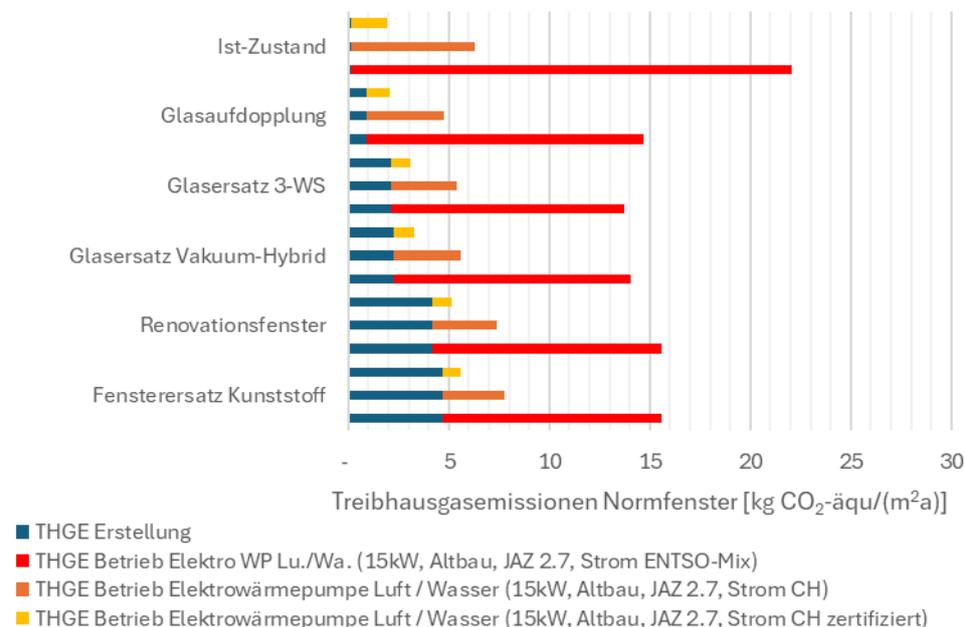


Abbildung 43: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten und unterschiedliche Strommixe für den Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von  $1.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Die geringeren Transmissionswärmeverluste des Ist-Zustands resultieren in deutlich niedrigeren betriebsbedingten Emissionen. Bei einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und Verwendung des ENTSO-Strommix liegen diese bei etwa  $22 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/(\text{m}^2\text{a})$ , was einer Reduktion um mehr als 50% gegenüber dem zuvor betrachteten älteren Fenster entspricht. Dies führt dazu, dass die absoluten Emissionseinsparungen durch Ertüchtigungsmassnahmen geringer ausfallen.



Die relative Position der Ertüchtigungsvarianten verändert sich ebenfalls. Bei Verwendung des ENTSO-Strommix weisen alle Varianten ähnliche Gesamtemissionen von etwa 14-17 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) auf. Die Unterschiede zwischen Glasertüchtigung und Fensterersatz sind dabei weniger ausgeprägt als beim energetisch schlechteren Ist-Zustand. Bei Verwendung des durchschnittlichen schweizerischen Strommix zeigen die Glasertüchtigungsvarianten und der Ist-Zustand Vorteile gegenüber dem Fensterersatz. Mit zertifiziertem schweizerischem Strom weist der Ist-Zustand die geringsten Gesamtemissionen auf, da die bereits moderaten betriebsbedingten Treibhausgasemissionen die nicht vorhandenen Erstellungsemissionen überwiegen.

Fazit: Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Wirtschaftlichkeit und ökologische Sinnhaftigkeit von Ertüchtigungsmassnahmen massgeblich vom energetischen Ausgangszustand abhängen. Bei Fenstern mit bereits guten U-Werten können die Erstellungsemissionen einer Ertüchtigung die erzielbaren betriebsbedingten Einsparungen übersteigen, insbesondere wenn CO<sub>2</sub>-armer Strom für den Betrieb der Wärmepumpe zur Verfügung steht.

Die Amortisationszeit von 30 Jahren in der Ökobilanzierung ist eine vereinfachte Betrachtung der Ertüchtigungsvarianten. Eine differenzierte Berechnung verschiedener Lebensdauern der Ertüchtigungsmassnahmen führt nicht zu einer abweichenden Beurteilung der untersuchten Massnahmen.



## 4.3 Wiederverwendung von Fenstern (Re-Use)

### 4.3.1 Indirekte Treibhausgasemissionen der Erstellung für Re-Use-Fenster

Der folgende Abschnitt analysiert die indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung verschiedener Re-Use-Varianten, bei denen bestehende Fenster aus Rückbauprojekten für den Einsatz in Neubauten aufbereitet und ertüchtigt werden.

Für die Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung auf Grundlage der KBOB «Ökobilanzdaten im Baubereich» [8], sowie Anhang 12.2 wird ein Normfenster gemäss SIA 331 mit zwei Öffnungsflügen mit dem Lichtmass von 1.55 m Breite und 1.15 m Höhe betrachtet.

Gemäss dem Klimapfad des SIA [76] werden bei der Ökobilanzierung von Re-Use-Komponenten die Entsorgungsemissionen des gesamten Bauteils am Ende der Nutzungsdauer berücksichtigt, da das Bauteil am Ende des zweiten Lebenszyklus entsorgt werden muss.

Die Analyse umfasst sechs verschiedene Re-Use-Szenarien, die sich hinsichtlich der wiederverwendeten Komponenten und der Art der energetischen Ertüchtigung unterscheiden. Die berechneten Treibhausgasemissionen beinhalten dabei sämtliche relevanten Prozessschritte.

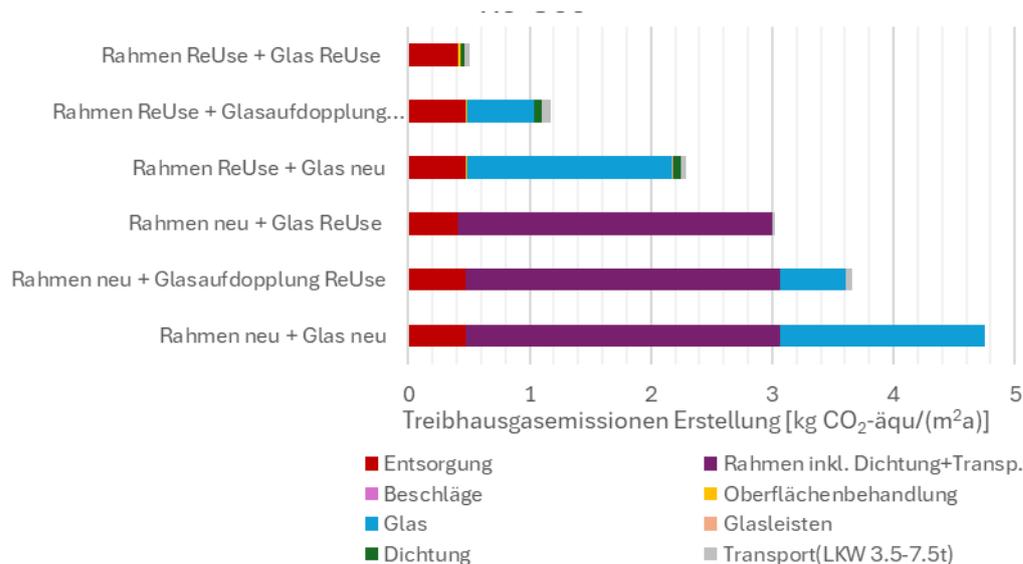


Abbildung 44: Treibhausgasemissionen Erstellung pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten. Betrachtet wird ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m)

Die vollständige Wiederverwendung von Rahmen und Verglasung weist mit etwa 0.5 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die geringsten Emissionen auf. Diese resultieren hauptsächlich aus den Entsorgungsemissionen des kompletten Fensters am Ende der Nutzungsdauer sowie der Erneuerung der Dichtungen.

Die Kombination aus Rahmen-Re-Use und Glasaufdopplung führt zu Emissionen von etwa 1.2 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Neben den Entsorgungsemissionen des Gesamtfensters entstehen hier zusätzliche Emissionen durch das neue Zusatzglas, den neuen Abstandhalter und die neue Gasfüllung.

Bei Verwendung einer neuen Verglasung in einem wiederverwendeten Rahmen steigen die Emissionen auf etwa 2.2 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Dies ist auf die höheren Materialaufwendungen für die Dreifach-Verglasung zurückzuführen.

Ein deutlicher Anstieg der Emissionen zeigt sich bei Varianten mit neuem Rahmen. Die Wiederverwendung der bestehenden Verglasung in einem neuen Rahmen verursacht etwa 3.0 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a),



wobei die Herstellung des Rahmens den dominierenden Faktor darstellt. Die Kombination aus neuem Rahmen mit aufgedoppelter Verglasung führt zu Emissionen von etwa 3.8 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Die höchsten Emissionen entstehen bei der Verwendung eines neuen Fensters mit neuer Verglasung in einem neuen Rahmen mit etwa 4.8 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a).

Diese Ergebnisse verdeutlichen das grosse Einsparpotenzial durch die Wiederverwendung bestehender Fensterkomponenten, auch unter Berücksichtigung der vollständigen Entsorgungsemissionen am Ende der Nutzungsdauer. Insbesondere die Weiternutzung der Rahmen führt zu signifikanten Einsparungen, da diese den grössten Anteil an den Erstellungsemissionen haben. Die Analyse zeigt auch, dass selbst eine teilweise Wiederverwendung von Komponenten deutliche ökologische Vorteile gegenüber der Neuproduktion bietet.

Die aktuelle Berechnungsmethodik nach SIA für die Ökobilanzierung von wiederverwendeten Bauteilen weist eine systematische Inkonsistenz auf, die zu einer potenziellen Benachteiligung von Re-Use-Konzepten führt. Die Methodik sieht vor, dass bei der Wiederverwendung von Bauteilen die Entsorgungsemissionen des gesamten Elements am Ende der zweiten Nutzungsphase vollständig in die Ökobilanz einbezogen werden müssen. Dies geschieht unabhängig davon, welche Komponenten tatsächlich aus dem ursprünglichen Bauteil stammen.

Diese Vorgehensweise resultiert in einer Doppelerfassung der Entsorgungsemissionen, da diese bereits im ersten Lebenszyklus des Bauteils bilanziert wurden. Diese methodische Schwäche wirkt sich nachteilig auf die Bewertung von Materialien mit hohen Entsorgungsemissionen aus und kann dadurch die Entscheidung für Re-Use-Konzepte ungünstig beeinflussen. Eine Anpassung der Methodik, bei der nur die Entsorgung neu hinzugefügter Komponenten berücksichtigt wird, würde zu einer ausgewogeneren Bewertung führen und das tatsächliche ökologische Einsparpotenzial durch Wiederverwendung präziser abbilden. Eine entsprechende Überarbeitung der Berechnungsmethodik sollte daher in zukünftigen Revisionen der Norm in Betracht gezogen werden.

#### 4.3.2 Gesamtbetrachtung Treibhausgasemissionen für Erstellung und Betrieb für Re-Use-Fenster

Im Folgenden werden die Treibhausgasemissionen verschiedener Re-Use-Varianten unter Berücksichtigung der Erstellungs- und Betriebsemissionen analysiert. Die untersuchten Varianten unterscheiden sich sowohl in der Art und dem Umfang der wiederverwendeten Komponenten als auch in den resultierenden energetischen Eigenschaften. Tabelle 16 zeigt die U-Werte und Psi-Werte der verschiedenen Varianten, die als Grundlage für die Berechnung der betriebsbedingten Emissionen dienen. Dabei wird der Einfluss unterschiedlicher Wärmeerzeuger (Erdgas-Heizkessel, Fernwärme und Elektrowärmepumpe) berücksichtigt. Die Untersuchung basiert auf einem zweiflügligen Normfenster (Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 2.7 W/(m<sup>2</sup>K).

	Rahmen Re-Use Glas Re-Use	Rahmen Re-Use Glasaufdopplung	Rahmen Re-Use Glas neu	Rahmen neu Glas Re-Use	Rahmen neu Glasaufdopplung	Rahmen neu Glas neu
U-Wert Fenster, U <sub>w</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.7	1.2	0.88	0.89	0.84	0.81
U-Wert Rahmen, U <sub>r</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	1.5	1.5	1.5	1.5	1.3	1.1
U-Wert Verglasung, U <sub>g</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	2.7	0.9	0.6	0.47	0.6	0.6
Psi-Wert Abstandhalter, Ψ <sub>g</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	0.06	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03



Tabelle 16: U-Werte des Ist-Zustands und der betrachteten Varianten.

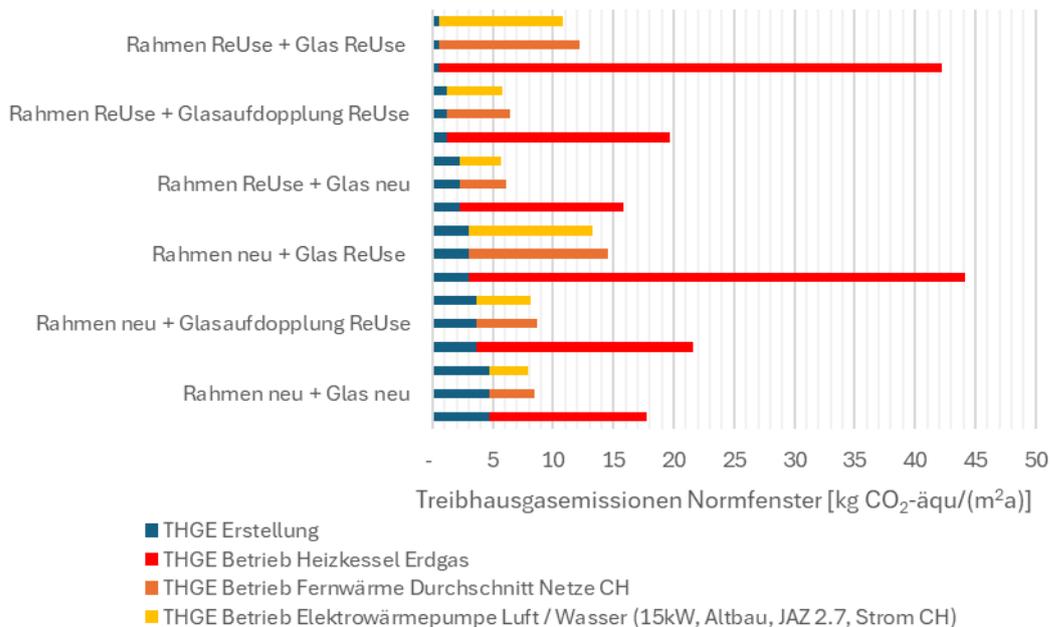


Abbildung 45: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten und unterschiedliche Wärmeerzeuger. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 2.7 W/(m²K).

Bei Verwendung eines Erdgas-Heizkessels dominieren die betriebsbedingten Emissionen die Gesamtbilanz (Abbildung 45). Die vollständige Wiederverwendung von Rahmen und Glas ohne energetische Verbesserung führt zu Gesamtemissionen von etwa 42 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Die energetische Erhöhung durch Glasaufdopplung oder den Einbau eines neuen 3-fach-Wärmeschutzglases bei Weiterverwendung des Rahmens reduziert die Gesamtemissionen auf 16-20 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Varianten mit neuem Rahmen führen trotz verbesserter technischer Eigenschaften zu höheren Gesamtemissionen, was primär auf die erhöhten Erstellungsemissionen des Rahmens zurückzuführen ist.

Bei Nutzung von Fernwärme reduzieren sich die betriebsbedingten Emissionen erheblich. Die Gesamtemissionen der verschiedenen Varianten bewegen sich zwischen 6 und 12 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a), wobei die Rangfolge der Varianten bestehen bleibt. Auch hier zeigen die Lösungen mit wiederverwendetem Rahmen aufgrund der geringeren Erstellungsemissionen Vorteile gegenüber Varianten mit neuem Rahmen.

Der Einsatz einer Elektrowärmepumpe mit durchschnittlichem schweizerischem Verbraucherstrommix führt zu einer weiteren Reduktion der betriebsbedingten Emissionen. Die Unterschiede zwischen den Varianten werden nun primär durch die Erstellungsemissionen bestimmt. Die Wiederverwendung von Rahmen mit energetischer Optimierung des Glases erweist sich durchgängig als vorteilhafteste Option.

Die Rangfolge der Varianten bleibt über alle betrachteten Wärmeerzeuger gleich. Jedoch verringern sich die absoluten Unterschiede zwischen den Varianten mit abnehmendem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Wärmeversorgung. Varianten mit neuem Rahmen weisen durchgängig höhere Gesamtemissionen auf, bieten jedoch auch einen höheren technischen Standard hinsichtlich Dichtigkeit, Sicherheit und Bedienkomfort.

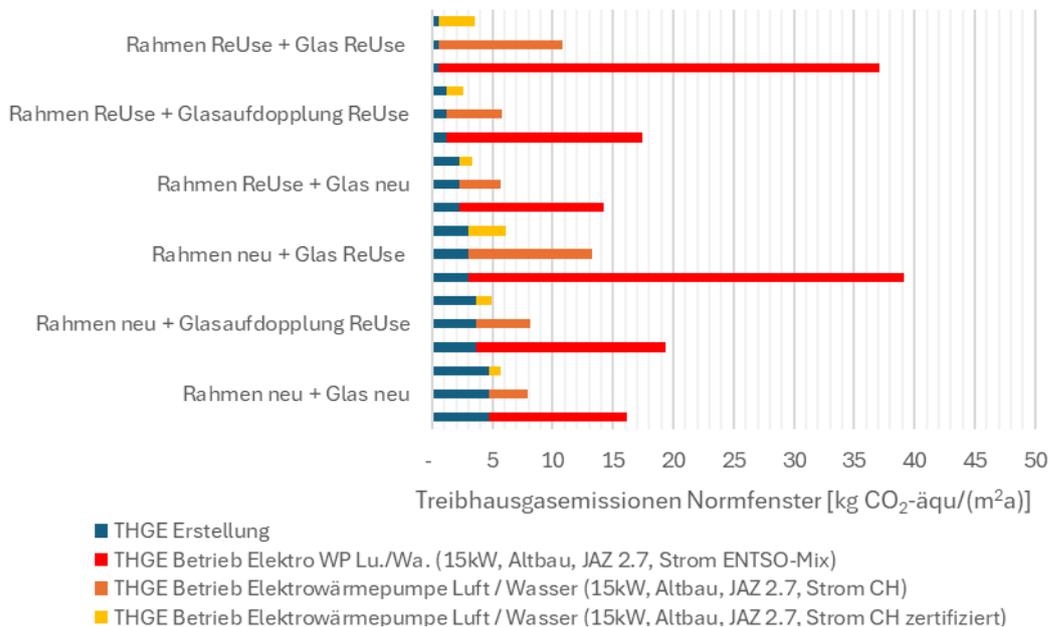


Abbildung 46: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteifläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten und unterschiedliche Strommixe für den Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 2.7 W/(m<sup>2</sup>K).

Die Analyse des Einflusses verschiedener Strommixe auf die Gesamtemissionen der Re-Use-Varianten zeigt deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub>-Intensität der Stromversorgung (Abbildung 46). Der europäische ENTSO-Strommix führt bei allen Varianten zu den höchsten betriebsbedingten Emissionen, was besonders bei den energetisch schlechteren Varianten wie "Rahmen Re-Use + Glas Re-Use" mit etwa 37 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) deutlich wird.

Die Nutzung des durchschnittlichen schweizerischen Strommix resultiert in einer signifikanten Reduktion der betriebsbedingten Emissionen um etwa zwei Drittel. Dies führt dazu, dass die energetisch optimierten Varianten wie "Rahmen Re-Use + Glas neu" nur noch etwa 6 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) Gesamtemissionen aufweisen.

Bei Verwendung von zertifiziertem schweizerischem Ökostrom reduzieren sich die betriebsbedingten Emissionen nochmals deutlich. In diesem Szenario gewinnen die Erstellungsemissionen an relativer Bedeutung, wodurch die Varianten mit wiederverwendetem Rahmen trotz teilweise schlechterer U-Werte die günstigste Gesamtbilanz aufweisen.

### **Einfluss der energetischen Qualität des Ist-Zustandes**

Die Analyse des Einflusses verschiedener Re-Use-Varianten bei einem energetisch besseren Ausgangszustand zeigt deutliche Unterschiede zur vorherigen Betrachtung. Als Basis dient ein typisches Fenster aus den späten 1990er Jahren mit einem Fenster-U-Wert von 1,6 W/(m<sup>2</sup>K) (Tabelle 17). Diese Kennwerte repräsentieren den Stand der Technik dieser Bauperiode mit Zweifach-Wärmeschutzverglasung.



	Ist-Zu- stand Re-Use Fenster	Rahmen Re-Use Glasauf- dopplung	Rahmen Re-Use Glas neu	Rahmen neu Glas Re-Use	Rahmen neu Glasauf- dopplung	Rahmen neu Glas neu
U-Wert Fenster, $U_w$ (W/(m <sup>2</sup> K))	1.6	1.0	0.86	1.6	1.0	0.84
U-Wert Rahmen, $U_f$ (W/(m <sup>2</sup> K))	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3
U-Wert Verglasung, $U_g$ (W/(m <sup>2</sup> K))	1.3	0.7	0.6	1.3	0.7	0.6
Psi-Wert Abstandhalter, $\Psi_g$ (W/(m K))	0.08	0.05	0.03	0.08	0.05	0.03

Tabelle 17: U-Werte des Ist-Zustands und der betrachteten Varianten.

Die geringeren Transmissionswärmeverluste des Ausgangsfensters führen zu deutlich niedrigeren betriebsbedingten Emissionen im Vergleich zum älteren Fenster. Bei Verwendung eines Erdgas-Heizkessels reduzieren sich die Gesamtemissionen des unveränderten Fensters (Rahmen Re-Use + Glas Re-Use) gemäss Abbildung 47 von ursprünglich etwa 42 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) auf etwa 26 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Dies hat direkte Auswirkungen auf die Bewertung der verschiedenen Ertüchtigungsoptionen. Die energetisch optimierten Varianten mit Glasaufdopplung oder neuem Dreifach-Wärmeschutzglas bei Weiterverwendung des Rahmens erreichen niedrigere Werte von etwa 16-17 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Varianten mit neuem Rahmen liegen mit 18-28 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) höher.

Diese Rangfolge verschiebt sich bei der Nutzung von Fernwärme. Die Gesamtemissionen reduzieren sich auf 6-8 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) bei allen Varianten mit wiederverwendetem Rahmen, unabhängig von der Glaswahl. Der vollständige Re-Use liegt mit etwa 8 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) nun im mittleren Bereich. Varianten mit neuem Rahmen weisen weiterhin die höchsten Emissionen von 8-10 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) auf.

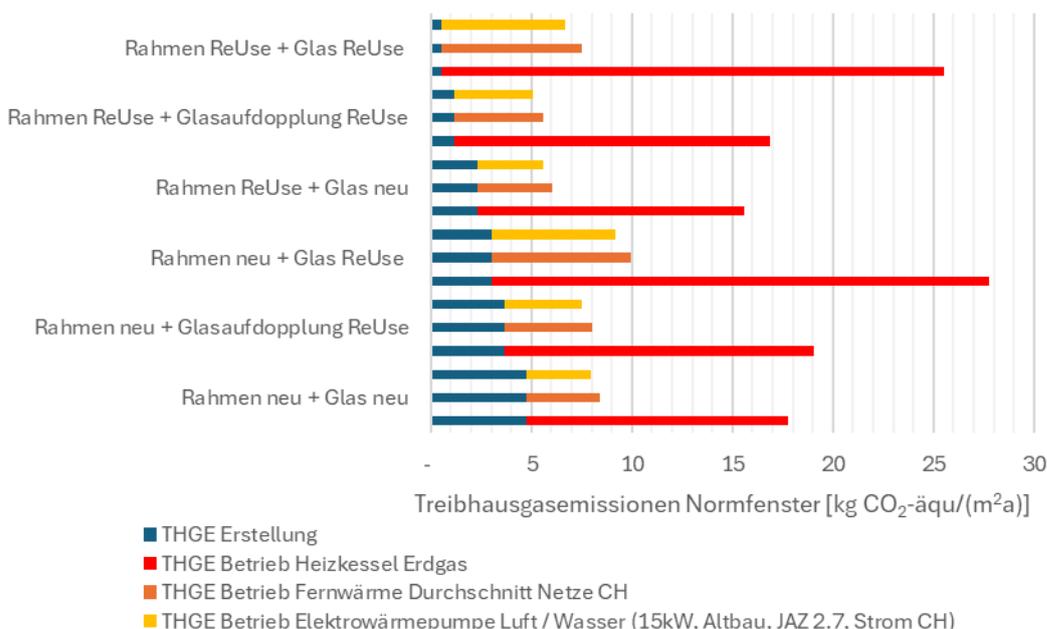


Abbildung 47: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten und unterschiedliche Wärmeerzeuger. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 1.6 W/(m<sup>2</sup>K).

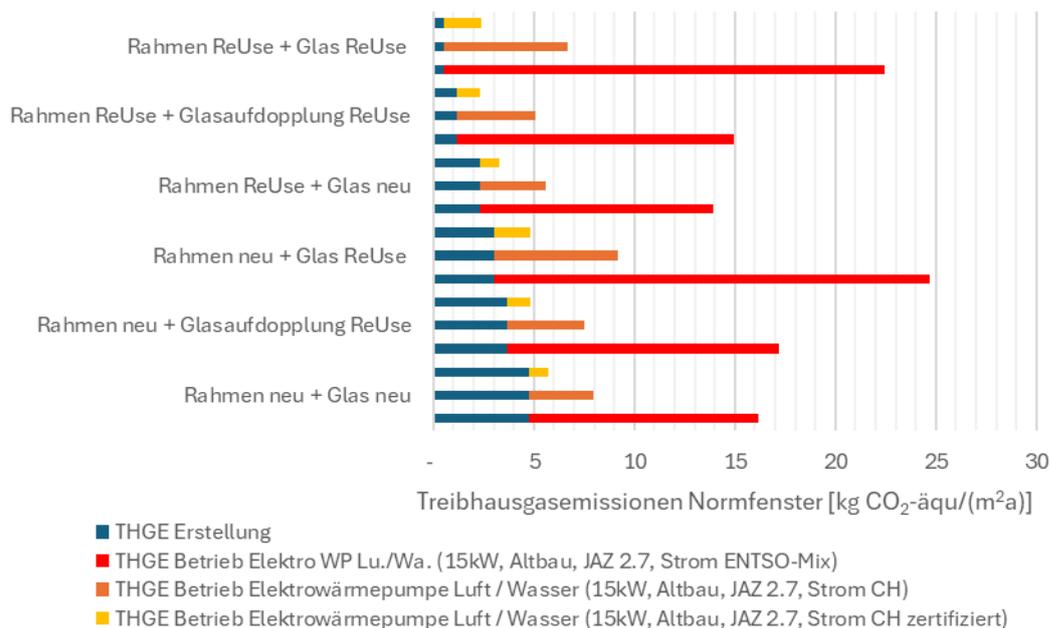


Abbildung 48: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten und unterschiedliche Strommixe für den Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 1.6 W/(m<sup>2</sup>K).

Bei Einsatz einer Elektrowärmepumpe mit zertifiziertem schweizerischem Strom kehrt sich die Rangfolge teilweise um (Abbildung 48). Der vollständige Re-Use von Rahmen und Glas erreicht mit etwa 2.5 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die niedrigsten Gesamtemissionen, gleichauf mit der Glasaufdopplung. Die Variante mit neuem Dreifachglas liegt bei etwa 3.5 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a), während Lösungen mit neuem Rahmen 5-6 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) aufweisen.

### Schlussfolgerung Fenster-Re-Use - Treibhausgasemissionen für Erstellung und Betrieb

Der energetische Ausgangszustand des Fensters für die Wiederverwendung (Re-Use) ist ein zentraler Faktor bei der Entwicklung geeigneter Re-Use-Strategien. Bei älteren Fenstern mit Isolierverglasung ohne Low-E Beschichtung ist eine energetische Ertüchtigung vor dem Re-Use aus zwei Gründen erforderlich: Zum einen führt sie zu deutlichen Emissionseinsparungen im späteren Betrieb, zum anderen ist sie notwendig, um behördliche Anforderungen zu erfüllen. Anders stellt sich die Situation bei Fenstern ab Mitte der 1990er Jahre dar. Falls eine Verglasung mit Low-E-Beschichtung vorhanden ist und die Gasfüllung über 70 % beträgt, weisen diese bereits gute energetische Eigenschaften auf, wodurch die möglichen Einsparungen durch weitere Optimierung geringer ausfallen und die Erstellungsemissionen der Ertüchtigung stärker ins Gewicht fallen.

Die Art der Wärmeversorgung am zukünftigen Einbauort ist ein weiterer entscheidender Faktor für die Gesamtbilanz. Dies stellt eine besondere Herausforderung dar, da zum Zeitpunkt des Ausbaus der Fenster das Zielgebäude und damit die Art der Wärmeversorgung häufig noch nicht bekannt sind. Bei einer Zwischenlagerung z.B. in einer Bauteilbörse muss diese Entscheidung unter Unsicherheit getroffen werden. In Gebäuden mit CO<sub>2</sub>-intensiver Wärmeerzeugung können auch aufwendigere Ertüchtigungsmassnahmen vor dem Re-Use durch die eingesparten betriebsbedingten Emissionen gerechtfertigt sein. Bei CO<sub>2</sub>-armer Wärmeversorgung, insbesondere bei Wärmepumpen mit erneuerbarem Strom, können die zusätzlichen Erstellungsemissionen bei Fenstern ab Mitte der 1990er Jahre durch die geringen betriebsbedingten Einsparungen häufig nicht mehr kompensiert werden.



Die CO<sub>2</sub>-Intensität des Strommixes beeinflusst diese Bewertung zusätzlich. Je nach Verwendung des ENTSO-Strommix, des schweizerischen Verbrauchermix oder von zertifiziertem Ökostrom kann sich die Bewertung verschiedener Varianten verschieben. Bei sehr CO<sub>2</sub>-armem Strom wird insbesondere die vollständige Wiederverwendung von Fenstern ab Mitte der 1990er Jahre ohne energetische Optimierung zunehmend attraktiv.

Diese Zusammenhänge erfordern eine differenzierte Betrachtung jedes Einzelfalls unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen. Mit der fortschreitenden Dekarbonisierung der Energieversorgung wird die direkte Wiederverwendung bestehender Fenster ohne aufwendige energetische Optimierung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Dies gilt besonders für Fenster ab Mitte der 1990er Jahren, die bereits akzeptable energetische Standards aufweisen.



## 4.4 Kostenberechnung Normfenster

Die Kostenberechnungen können sowohl mit dem Ansatz der Erstellungskosten (zu tätigen Investitionen) als auch mit den Lebenszykluskosten berechnet werden (siehe in Kapitel 2.4).

### 4.4.1 Kostenvergleich von verschiedenen neuen Fenstertypen

Bei der Ermittlung der Kosten für Fenster müssen unterschiedliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Da die Ermittlung immer der Systematik Menge\*Kostenkenn- oder -richtwert erfolgt, wird der Referenzwert in CHF/m<sup>2</sup> angegeben.

Kostenkennwerte lassen sich aus realisierten Bauwerken respektive dessen Kostenabrechnungen durch Rückkalkulation ermitteln. Somit handelt es sich bei der Ermittlung der Kostenkennwerte um ein analytisches Verfahren.

Da nicht für alle gewählten Varianten Kostenkennwerte vorliegen, wurden Kostenrichtwerte geschaffen. Im Gegensatz zu den Kostenkennwerten werden Kostenrichtwerte nicht aus realisierten Projekten zurückkalkuliert, sondern aus einzelnen Wertquoten zusammengesetzt. Somit handelt es sich nicht um ein analytisches, sondern um ein synthetisches Verfahren. Bei diesem synthetischen Verfahren sind die Einflüsse, Abhängigkeiten und dgl. für die Anwendenden nur bedingt nachvollziehbar, obschon es sich um dieselben Einflüsse wie bei den Kostenkennwerten handelt.

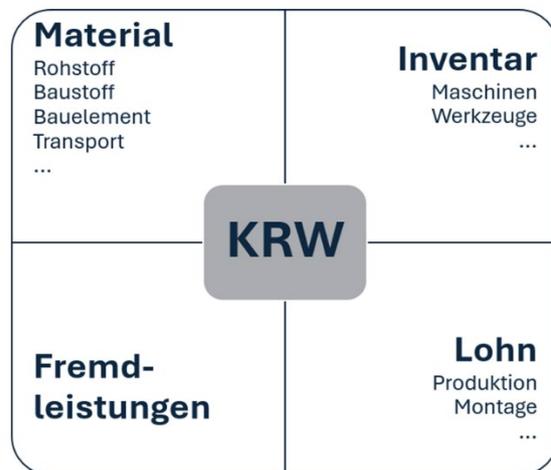


Abbildung 49 Einflüsse auf Kostenrichtwerte

Nachfolgendes Kalkulationsbeispiel zeigt die Kostenabweichungen bei einem neuen Fenster (Investitionen für die Produktion, den Transport zur Baustelle und die Montage) in der Region Nordwestschweiz, bei einer mittleren Bestellmenge (21 bis 50 Stück), einer innenliegenden Montage (Blendrahmen), dem Referenzmass h\*b von 150 cm \*115 cm und einer zweiflügligen Einteilung.



Holzfenster (Fi/Ta)	Holz-Fenster (Eiche)	Holz-Metall-Fenster	Metall-Fenster	Kunststoff-Fenster	Kunststoff-Metall Fenster
435	550	486	592	406	474

Tabelle 18: Investitionskosten (CHF/m<sup>2</sup>)

Die Materialisierung der Fensterrahmen hat nicht nur auf die Kosten, sondern ebenfalls auf die zu erwartende Lebensdauer Einfluss. Die Einflüsse aus der Planungs-, Material- und Ausführungsqualität sowie der Wartung und dem Unterhalt, dem Einbauzeitpunkt, den Beschlägen und der Behandlung sind erfahrungsgemäss deutlich höher zu gewichten. Wird beispielsweise ein Holz-Metall-Fenster betrachtet, so kann eine Lebensdauer von 20 bis 33 Jahren ermittelt werden.

Ideale Bedingungen	Minderwertige Materialqualität	Minderwertige Ausführungsqualität	Keine Wartung/Unterhalt
33	25	25	20

Tabelle 19: Lebensdauer in Jahren

#### 4.4.2 Kostenvergleich von verschiedenen Fenster-Ertüchtigungsvarianten

Der Kostenvergleich basiert auf Erstellungs- und Erneuerungs- respektive Ersatzvornahmekosten sowie der berechneten Lebensdauer (siehe Kapitel 2.4).

Die möglichen Erneuerungs- resp. Ertüchtigungsvarianten mit den Kostenfolgen ergeben die Kostenkennwerte pro Jahr für den vereinbarten Betrachtungszeitraum. Die gewählten Ertüchtigungsmassnahmen bestimmen die Ertüchtigungskosten.

	Ist-Zustand	Glasauf-dopplung	Glaserersatz 3-WS	Glaserersatz Vakuum-Hybrid	Renovations-fenster	Fenster-ersatz Kunststoff-fenster
Holz/Metallfenster Tabelle 18	0	292	316	584	696	581

Tabelle 20: Ertüchtigungskosten (CHF/m<sup>2</sup>)



## 5 Ergebnisse Test-Liegenschaften

### 5.1 Untersuchte Testliegenschaften

Es wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern fünf Test-Liegenschaften für die Konzeption und mögliche Anwendung der Sanierungsverfahren von Fenstern ausgewählt:

- Roche, Bau 29, Labor-, Produktions- Verwaltungsgebäude, Basel
- Kanton Basel-Stadt, Verwaltungsgebäude Erziehungsdepartement, Leimenstrasse 1, Basel
- Kanton Basel-Stadt, Wohnheim, Egliseestrasse 60, Basel
- ABZ, Wohnsiedlung Zurlinden, Mehrfamilienhäuser, Zurlindenstrasse, Zürich
- ABZ, Genossenschaftswohnungen Waidfussweg 1, Mehrfamilienhaus, Zürich



Abbildung 50: Test-Objekte für die Konzeption und mögliche Anwendung der Sanierungsverfahren von Fenstern. Oben links: Roche Bau 29, Quelle: Roche. Oben Mitte: Kanton Basel-Stadt Leimenstrasse 1, Quelle: google.ch. Oben rechts: Kanton Basel-Stadt Wohnheim Egliseestrasse 60, Quelle: Kanton Basel-Stadt. Unten links: ABZ Wohnsiedlung Zurlinden, Quelle: ABZ. Unten rechts: ABZ Genossenschaftswohnungen Waidfussweg 1, Quelle: ABZ.



## 5.2 Untersuchungen und Ergebnisse am Beispiel Egliseestrasse

Die durchgeführten Untersuchungen und resultierenden Ergebnisse werden beispielhaft für das Objekt Egliseestrasse 60 in Basel beschrieben.

### 5.2.1 Objektbeschreibung

Das Gebäude an der Egliseestrasse 60 in Basel wurde durch das Architekturbüro Suter+Suter als Lehrlingswohnheim für die Pensionskasse der Ciba-Geigy geplant und im Jahr 1969 realisiert. Das Tragwerk wurde als Platten-Schottenbauweise in Stahlbeton ausgeführt. Die Aussenwände wurden zweischalig in Beton ausgeführt mit einer minimalen Wärmedämmung von 3 cm (Perfekta-Platte). Die ursprünglichen Fenster waren zwischen den Zimmertrennwänden angeschlagen. 1999 wurden auf die bestehenden Holzrahmen neue Renovationsfenster mit Isolierverglasung aufgesetzt.

#### Fenster



Bei den Fenstern handelt es sich um Renovationsfenster «Aluba classic» mit Holz-Aluminium-Rahmen des Herstellers 4B mit 2-IV-Wärmeschutzgläsern der Interpane Glas AG aus dem Herstellungsjahr 1999. Der Typenaufdruck im Glasrandverbund eines Fensters zeigt das Herstellungsdatum 08.10.1999.

Abbildung 51: Typenaufdruck

#### Zustand der Fenster bei Begehung

An der Begehung am 10.02.2023 wurde ein guter technischer Zustand der Fenster festgestellt (Beschläge, Rahmen innen und aussen). Die Fensterfunktionen (Öffnung, Dreh- und Kippflügel) sind gewährleistet. Mit einer Gesamt-Flügelrahmenstärke von 76mm kann nach heutigen Erkenntnissen ein 3-fach-Wärmeschutzglas mit einer Elementdicke bis ca. 36mm in den bestehenden Flügelrahmen eingebaut werden. Die technischen Möglichkeiten für die Ertüchtigungsvariante V2a (Glaserersatz) sind aber noch im Detail zu prüfen. Der bestehende Fensterrahmen verfügt bereits über zwei, nahe beieinanderliegenden Überschlagsdichtungen, die Luftdichtheit im Fensterfalz scheint gewährleistet. Für die weitere Nutzung der bestehenden Fenster sollen die Fensterdichtungen einzeln optisch geprüft und bei Verformungen ersetzt werden.



## Beispielfenster Typ B (Auswahl)

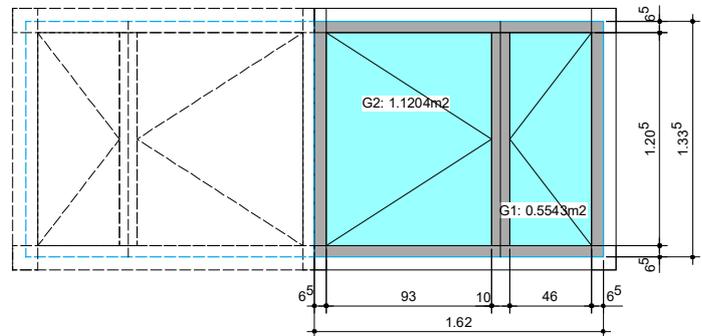


Abbildung 52: Fenster Typ B

### Fenstereinbau:

Das Fenster wurde im Jahr 1999 als Renovationsfenster von Innen auf den bestehenden Holzrahmen aufgesetzt. Bei einem erneuten Fensterersatz ist der luftdichte Anschluss innen und der Witterungsschutz aussen am Fensteranschlag zu prüfen.

### Fenster:

Fenster-U-Wert, berechnet nach SNENISO 10077-2

$$U_w = 1.46 - 1.80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Holz-Metall-Renovationsfenster mit 1 Dreh- und 1 Kippflügel, plus 1 Flügel verschraubt, kippbar  
Abmessungen Mauerlicht:  $b \times h = 1.62 \text{ m} \times 1.34 \text{ m}$   
Baujahr 1999

### Rahmen:

Rahmen-U-Wert:

$$U_f = 1.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Holz-Aluminium-Rahmen, Renovationsfenster 4B aluba classic, 1999  
Gemäss Datenblatt aluba s 1999  
Fensterfalz mit 2 Dichtungsebenen

### Verglasung:

Glas-U-Wert: Bereich ermittelt aufgrund Messwerte und Gasfüllgrad

$$U_g = 1.10 - 1.50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

2-fach Wärmeschutzglas 1999, Abmessungen: 4/18/4 (Elementdicke ED 26mm)

Bemerkungen zur Bestandsanalyse:

- Glas-U-Wert  $U_g$  dieses Fensters gemessen:
- Messwerte Fenster Typ B:  $U_g = 1.25 - 1.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;
- Gasfüllgrad Stichprobe gemessen; 78-93 %
- Berechnung  $U_g$  mit glaCE (glasströsch EN2plus):

Glas: Glas Trösch, EN2plus	
Gasfüllgrad	U-Wert
Anteil V (%)	W/(m <sup>2</sup> ·K)
0-13	1.40
14-47	1.30
48-86	1.20
>87	1.10

Tabelle 21: Glas-U-Werte  $U_g$ : Berechnung in Abhängigkeit des Gasfüllgrades



### Glasrandverbund:

$\Psi$ -Wert Glasrand, berechnet gemäss SNEN ISO 10077-2

$$\Psi_g = 0.08 - 0.09 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

Material: Aluminium

## 5.2.2 Messungen

Im Rahmen der Begehungen werden sowohl der  $U_g$ -Wert als auch der Gasfüllgrad gemessen. Aufgrund der unterschiedlichen Begehungszeiträume und der daraus resultierenden unterschiedlichen Zugänglichkeit konnten die Messungen nicht an genau den gleichen Fenstern durchgeführt werden. Auch sind jeweils verschiedene Fenstertypen in den Messungen vertreten.

### Messungen des $U_g$ -Wertes

Die Messungen wurden vom 10.02.2023 bis zum 14.02.2023 über vier Nächte durchgeführt. Tabelle 22 gibt eine Übersicht über die Messstellen, wobei die Fenster jeweils nummeriert sind. Die Node-Nummern beschreiben die jeweilige ID der Messgeräte zur besseren Nachvollziehbarkeit.

Fenster-Nummer	Node-Nummern	Stockwerk	Messbeginn	Messende
1	10120/10121	EG	10.02.2023 11:30	12.02.2023 01:20 <sup>1</sup>
2	10132/10131	1. OG	10.02.2023 11:30	14.02.2023 09:20
3	10110/10111	2. OG	10.02.2023 11:30	14.02.2023 09:20

Tabelle 22: Messstellen

In Tabelle 23 sind die über die vier Nächte gemessenen und gemittelten  $U_g$ -Werte pro Fenster dargestellt. Fenster 1 konnte aufgrund der mutmasslichen Demontage des Messgerätes durch Unbekannte nur über zwei Nächte gemessen werden. Zusätzlich ist die jeweilige Abweichung zum Mittelwert kursiv dargestellt.

Zur Berechnung der Werte pro Nacht wurde jeweils der Zeitraum von 17:40 bis 7:40 des Folgetages betrachtet.

Fenster-Nummer	Wert	Nacht 1	Nacht 2	Nacht 3	Nacht 4	Mittelwert
1	<b>U[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>1.77</b>	<b>1.73</b>			<b>1.75</b>
	Abweichung	1.24%	-1.27%			
2	<b>U[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>1.27</b>	<b>1.26</b>	<b>1.27</b>	<b>1.25</b>	<b>1.26</b>
	Abweichung	0.78%	-0.25%	0.51%	-1.06%	
3	<b>U[W/m<sup>2</sup>K]</b>	<b>1.39</b>	<b>1.41</b>	<b>1.46</b>	<b>1.42</b>	<b>1.42</b>
	Abweichung	-1.96%	-0.84%	2.85%	-0.19%	

Tabelle 23: Übersicht über die gemittelten  $U_g$ -Werte pro Fenster

### Messungen des Gasfüllgrads

Der Gasfüllgrad wurde für insgesamt 6 Fenster gemessen.

Im Erdgeschoss wurden Gasfüllgrade von 78% und 93% gemessen, im 1. Obergeschoss Gasfüllgrade von 84.7%, 85.5%, 87.9% und 89.4%.

<sup>1</sup> Das Messgerät wurde mutmasslich durch Unbekannte demontiert, womit keine längere Messung möglich war.



### **Erkenntnisse der Begehung**

Der Rahmen-U-Wert  $U_r$  des Renovationsfensters von 1999 beträgt  $1.44 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gemäss Datenblatt. Die 2-fach-Verglasungen IV bestehen aus zwei vier Millimeter starken Floatglas Scheiben (eine mit Low-E-Beschichtung) und 18 mm Scheibenzwischenraum mit Argon-Füllung. Der U-Wert der Verglasung wird mit  $U_g = 1.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  im Neuzustand angenommen. Die Fenster-U-Werte ( $U_w$ ) der 3 untersuchten Fenstertypen liegen im Bereich von 1.44 bis  $1.80 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Bei den Holz-Aluminiumfenster im ersten und zweiten Obergeschoss der Fensters Typ B und C ist es auf Grund der Gasfüllgrad- und der U-Wert-Messungen möglich, diese Fenster zu warten oder zu ertüchtigen.

### **5.2.3 Ertüchtigungsvarianten**

Die Gesamtanierung der 1969 erstellten Liegenschaft ist derzeit in Planung. Die meisten Fenster im Gebäude wurden 1999 erneuert, Typ Renovationsfenster «4B Aluba classic» und befinden sich in gutem bis sehr gutem Zustand. Im Folgenden werden verschiedene Ertüchtigungsmassnahmen der Fenster Typ B und C für das Objekt stichwortartig beschrieben und Ergebnisse der Berechnung der Treibhausgasemissionen in Erstellung und Betrieb dargestellt.

Anzahl und Art der berücksichtigten Fenster:

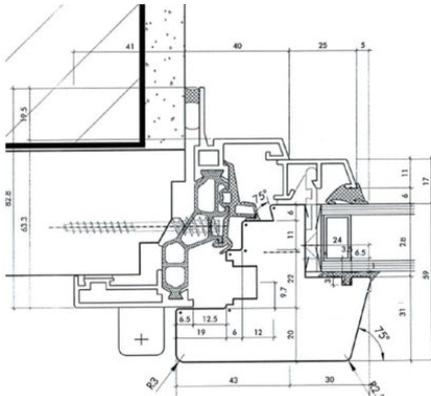
- Typ B: 28x OGs 2-flügelig; B 1620 mm H 1335 mm
- Typ C: 16x OGs 3-flügelig; B 2380 mm H 1335 mm

#### **V0: Ist-Zustand belassen, Fenster warten**

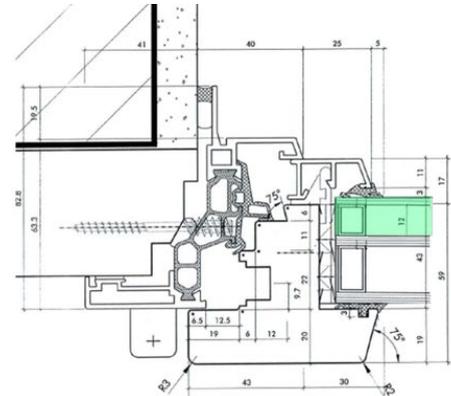
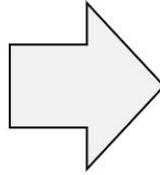
- Überschlagsdichtung einfräsen
- Beschläge einstellen und reparieren
- Rahmen streichen, vor-Ort oder in Werkstatt

#### **V1: Verglasung aufdoppeln 2-fach IV zu 3-fach IV**

- Ertüchtigung Gläser = 2 IV zu 3 IV; IV-Glasgewicht höher:  $3 \text{ mm} = 7.5 \text{ kg}/\text{m}^2$
- Rahmen für Glaseinstand anpassen (12mm fräsen); Überschlagsdichtung einfräsen
- Statische Belastung Rahmen prüfen
- Beschläge einstellen und reparieren
- Logistik Verglasung; Ausbau, Hin- und Rücktransport, Einbau
- Rahmen streichen, vor-Ort oder in Werkstatt
- Gewährleistung nur neues Glas; Gewährleistung Fenster klären



$$U_w = 1.44-1.80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$
$$U_F = 1.44 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$
$$U_g = 1.1-1.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$
$$\Psi_g = 0.08-0.09 \text{ W/(mK)}$$

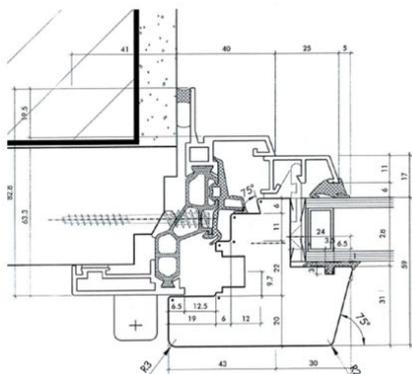


$$U_w = 1.04-1.16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$
$$U_F = 1.44 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$
$$U_g = 0.7-0.8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$
$$\Psi_g = 0.05-0.06 \text{ W/(mK)}$$

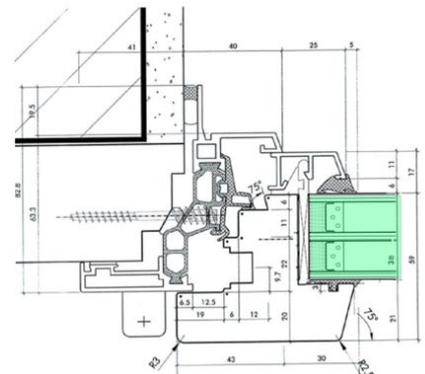
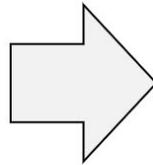
Abbildung 53: Horizontalschnitt Fenster und U-Werte für Testobjekt Egliseestrasse, Ist-Zustand und Ertüchtigung «Verglasung aufdoppeln 2-fach IV zu 3-fach IV». Bild: 4B/INEB.

#### V2a: Glasersatz 3-fach IV

- neue 3 IV; Dünnglas IV 2-3mm; Glasgewicht entspricht bestehender 2-fach IV
- Rahmen für Glaseinstand anpassen (10 mm fräsen); Überschlagsdichtung einfräsen
- Beschläge einstellen und reparieren
- Logistik Verglasung; Ausbau, Transport, Einbau
- Rahmen streichen, vor-Ort oder in Werkstatt
- Gewährleistung nur Glas; Gewährleistung Fenster klären
- Alte Verglasung Re-Use an anderem Ort; Gläser ertüchtigen 2 IV zu 3 IV; Logistik



$$U_w = 1.46-1.80 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$
$$U_F = 1.44 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$
$$U_g = 1.1-1.5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$
$$\Psi_g = 0.08-0.09 \text{ W/(m K)}$$



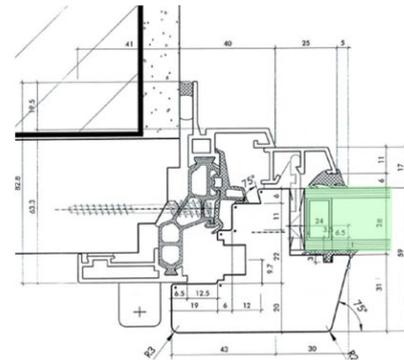
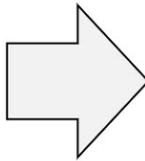
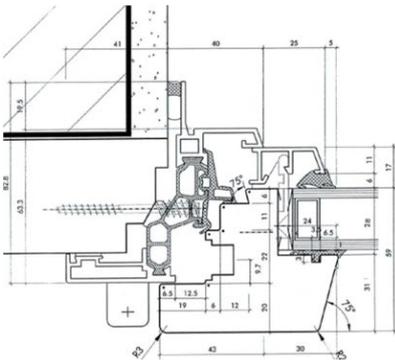
$$U_w = 0.90-1.01 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$
$$U_F = 1.44 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$
$$U_g = 0.6-0.7 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$
$$\Psi_g = 0.03-0.04 \text{ W/(m K)}$$

Abbildung 54: Horizontalschnitt Fenster und U-Werte für Testobjekt Egliseestrasse, Ist-Zustand und Ertüchtigung «Glasersatz 3-fach IV». Bild: 4B/INEB.



### V2b: Glasersatz Vakuum-IV-Hybrid

- Neue Vakuum-Hybrid-IV; Glasgewicht und -dicke entspricht bestehender 2-fach IV
- Rahmen Glaseinstand Anpassung nicht notwendig; Überschlagsdichtung einfräsen
- Beschläge einstellen und reparieren
- Logistik Verglasung; Ausbau, Transport, Einbau
- Rahmen streichen, vor-Ort oder in Werkstatt
- Gewährleistung nur Glas; Gewährleistung Fenster klären
- Alte Verglasung Re-Use an anderem Ort; Gläser ertüchtigen 2 IV zu 3 IV; Logistik



$$U_W = 1.46-1.80 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$U_F = 1.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$U_g = 1.1-1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$\Psi_g = 0.08-0.09 \text{ W}/(\text{m K})$$

$$U_W = 0.86-0.90 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$U_F = 1.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

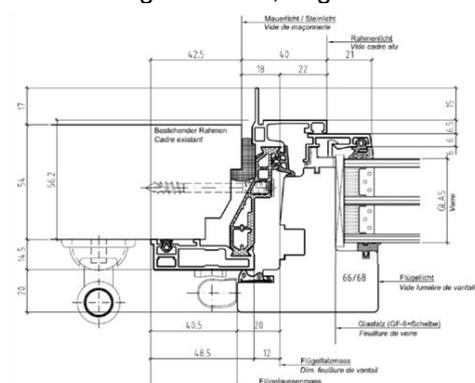
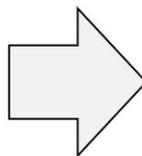
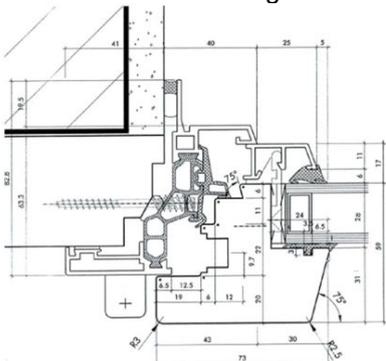
$$U_g = 0.47 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$\Psi_g = 0.05-0.06 \text{ W}/(\text{m K})$$

Abbildung 55: Horizontalschnitt Fenster und U-Werte für Testobjekt Egliseestrasse, Ist-Zustand und Ertüchtigung «Glasersatz Vakuum-IV-Hybrid». Bild: 4B/INEB.

### V3: Fensterersatz - neue Renovationsfenster

- Neue Renovationsfenster; z.B. 4B RF1
- alte Fenster für Re-Use an anderem Ort;  
Gläser ertüchtigen 2 IV zu 3 IV, Rahmen warten, neue Dichtung einfräsen; Logistik beachten



$$U_W = 1.46-1.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$U_F = 1.44 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$U_g = 1.1-1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$\Psi_g = 0.08-0.09 \text{ W}/(\text{m K})$$

$$U_W = 0.86-0.98 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$U_F = 1.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$U_g = 0.6-0.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$$

$$\Psi_g = 0.03-0.04 \text{ W}/(\text{m K})$$

Abbildung 56: Horizontalschnitt Fenster und U-Werte für Testobjekt Egliseestrasse, Ist-Zustand und Ertüchtigung «Fensterersatz - neue Renovationsfenster», Bild: 4B



## 5.2.4 Berechnungen U-Werte und der Transmissionswärmeverluste

Die Berechnung der U-Werte und der Transmissionswärmeverluste der Fenster im Bestand und für vier Ertüchtigungsvarianten liefern folgende Ergebnisse. Die Transmissionswärmeverluste werden berechnet mit den Heizgradtagwerten der nächstgelegenen Klimastation. Für Basel-Binningen werden hier mit 2745 K·d (Langjähriger Mittelwert 2011 – 2020, gemäss Norm SIA 381/3) eingesetzt.

### U-Werte und Transmissionsverluste Beispielfenster Typ B

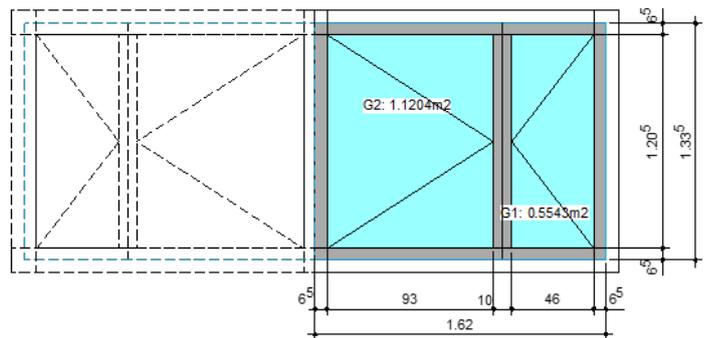


Abbildung 57: Fenster Typ B: Ansicht innen und Massbild aussen (Netto Fenstermasse)

Fenster Bestand			Ertüchtigungsvarianten				
Fenster	Fläche m <sup>2</sup>	U/ψ W/(m <sup>2</sup> K)	Aufdopplung V1 W/(m <sup>2</sup> K)	Glas-Ersatz V2a W/(m <sup>2</sup> K)	Vakuum-Glas V2b W/(m <sup>2</sup> K)	Fensterersatz V3 W/(m <sup>2</sup> K)	
<b>Renovationsfenster</b> 1999	2.16	U <sub>w,max</sub> = <b>1.80</b>	<b>1.16</b>	<b>1.01</b>	<b>0.90</b>	<b>0.98</b>	
4B aluba classic	100%	U <sub>w,min</sub> = <b>1.46</b>	<b>1.04</b>	<b>0.90</b>	<b>0.86</b>	<b>0.86</b>	
<b>Rahmen</b>							
<b>Holz-Metall-Rahmen</b> 1999	0.49	U <sub>t,max</sub> = <b>1.44</b>	<b>1.44</b>	<b>1.44</b>	<b>1.44</b>	<b>1.30</b>	
(Renovationsfenster)	23%	U <sub>t,min</sub> = <b>1.44</b>	<b>1.44</b>	<b>1.44</b>	<b>1.44</b>	<b>1.30</b>	
<b>Verglasung</b>							
<b>Verglasung 2IV 4/18/4</b> 1999	1.67	U <sub>g,max</sub> = <b>1.50</b>	<b>0.80</b>	<b>0.70</b>	<b>0.47</b>	<b>0.70</b>	
	77%	U <sub>g,min</sub> = <b>1.10</b>	<b>0.70</b>	<b>0.60</b>	<b>0.47</b>	<b>0.60</b>	
<b>Glasrand</b>							
<b>Aluminium</b> 1999	7.60	ψ <sub>g,max</sub> = <b>0.09</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	<b>0.06</b>	<b>0.04</b>	
		ψ <sub>g,min</sub> = <b>0.08</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>	<b>0.05</b>	<b>0.03</b>	

Transmissionswärmeverluste		Bestand V0	Aufdopplung V1	Glas-Ersatz V2a	Vakuum-Glas V2b	Fensterersatz V3
Heizgradtage	2745 K·d	kWh/(m <sup>2</sup> a)				
Q <sub>T,max</sub>		<b>118.8</b> 100%	<b>76.1</b> 64%	<b>66.4</b> 56%	<b>59.3</b> 50%	<b>64.3</b> 54%
Q <sub>T,min</sub>		<b>96.1</b> 81%	<b>68.7</b> 58%	<b>59.0</b> 50%	<b>57.0</b> 48%	<b>56.9</b> 48%

Tabelle 24: Fenster Typ B: Resultate U-Wert-Berechnung U<sub>w</sub> und Transmissionswärmeverluste

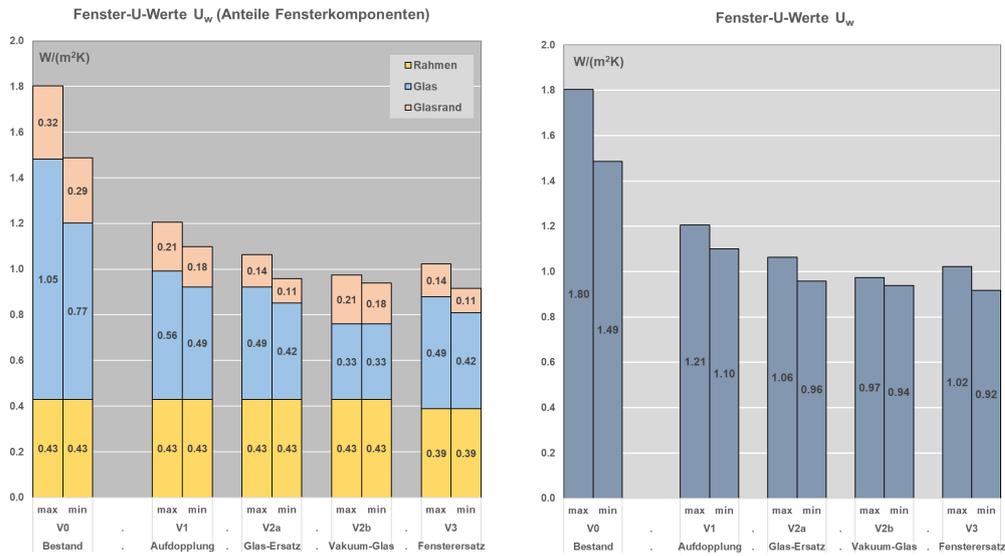


Abbildung 58: Fenster Typ B: U-Werte ( $U_w$ ) im Bestand und für 4 Ertüchtigungsvarianten

### Fenster im Vergleich

Zur Übersicht werden die Resultate in der folgenden Darstellung zusammengefasst. Die Grafik zeigt die gemittelten Fenster-U-Werte der drei untersuchten Fenster im Gebäude Eglisee. Obwohl übereinstimmende U-Werte der Fenster-Komponenten eingesetzt wurden, resultieren in Abhängigkeit der Fenstergeometrie (Grösse, Rahmen- und Glasflächen, Länge Glasrandverbund) leicht differierende Resultate.

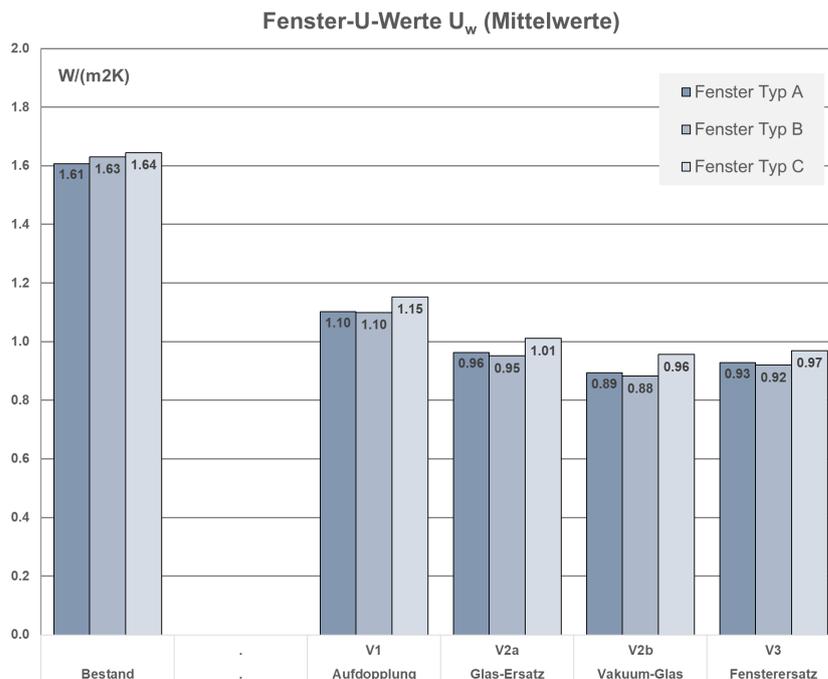


Abbildung 59: Fenster-U-Werte  $U_w$  Bestand und Ertüchtigungsvarianten (Mittelwerte)



### Beurteilung der Resultate

Die Abbildungen der einzelnen Fenstertypen A, B, C zeigen die detaillierten Berechnungsergebnisse der Fenster-U-Werte im Bestand und für 4 Ertüchtigungsvarianten. Die Abbildung 59 zeigt die Mittelwerte  $U_w$  für die Fenster im Quervergleich: Ausgehend von einem mittleren Fenster-U-Wert von 1.61 bis 1.64  $W/(m^2K)$  erreichen die Ertüchtigungsvarianten V2a, V2b und V3 die Einzelbauteilanforderung beim Fensterersatz ( $U_{w,li}=1.0 W/(m^2K)$ ). Mit dem Einsatz eines Vakuum-Hybrid-Glases ( $U_g=0.47 W/(m^2K)$ ) wird die Anforderung deutlich unterboten.

Der U-Wert der Glasaufdopplung (V1) liegt im Bereich zwischen 1.10 und 1.15  $W/(m^2K)$ . Um die Einzelbauteilanforderung zu erfüllen, müsste das bestehende Glas geöffnet, mit einem Edelgas gefüllt und der Glasrand neu abgedichtet werden. So könnten Werte wie beim Glas-Ersatz (3-fach-Wärmeschutzglas) erreicht und die Anforderung gerade erfüllt werden. Es fällt auf, dass der Fensterersatz nur wenig besser abschneidet als der Glasersatz. Das liegt daran, dass der bereits im Ist-Zustand relativ tiefe U-Wert des Rahmens ( $U_f=1.44 W/(m^2K)$ ) beim neuen Renovationsfenster nur auf  $U_f=1.30 W/(m^2K)$  gesenkt wird.

Die Transmissionsverluste können mit allen Ertüchtigungsvarianten deutlich gesenkt werden: Im Mittel resultiert, abhängig vom Fensterformat, eine Reduktion der Wärmeverluste bis 33 % bei der Variante 1, Aufdopplung. Beim Glasersatz (V2a) sind bis 42% und beim vollen Fensterersatz bis 44 % möglich. Maximalwert ( $U$ , bzw.  $Q_T$ ) ist eine Reduktion der Wärmeverluste auf 58% (V1-Glasaufdopplung) bis Am besten schneidet die Variante V2b ab. Mit dem Hybrid Vakuum-Glas kann der Wärmeverlust um bis zu 46% (gesenkt und ein Fenster-U-Wert unter 0.9  $W/(m^2K)$ ) erreicht werden.

### Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb

Für die Fenster Typ B und C werden die Treibhausgasemissionen für Erstellung und Betrieb ermittelt. In der Ökobilanzierung nach SIA 2023:2020 beträgt die Amortisationszeit für Fenster standardmässig 30 Jahre. Für die Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung werden die Positionen gemäss Tabelle 25 auf Grundlage der KBOB «Ökobilanzdaten im Baubereich» [8] berücksichtigt. Dabei fließen Anzahl und Geometrien der verschiedenen Fenstertypen ein.

	Ist-Zustand	Glas-aufdopplung	Glaserersatz 3-WS	Glaserersatz Vakuum-Hybrid	Renovations-fenster	Fensterersatz PVC-Fenster
neue Überschlagsdichtung	X	X	X	X		
Ersatz Glasdichtung		X	X			
neue Glasleisten		X	X			
Anstrich innen	X	X	X	X		
Transport bestehende Verglasung Isolierglaswerk		X				
neue Floatglasscheibe mit Low-e Beschichtung		X				
neuer Abstandhalter		X				
neue Edelgasfüllung (Argon)		X				
neue Mehrfachverglasung			X	X	X	X
neuer Fensterrahmen inkl. Dichtungen und Oberflächenbehandlung					X	X

Tabelle 25: Einzelpositionen für die Berechnung der indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung der betrachteten Varianten

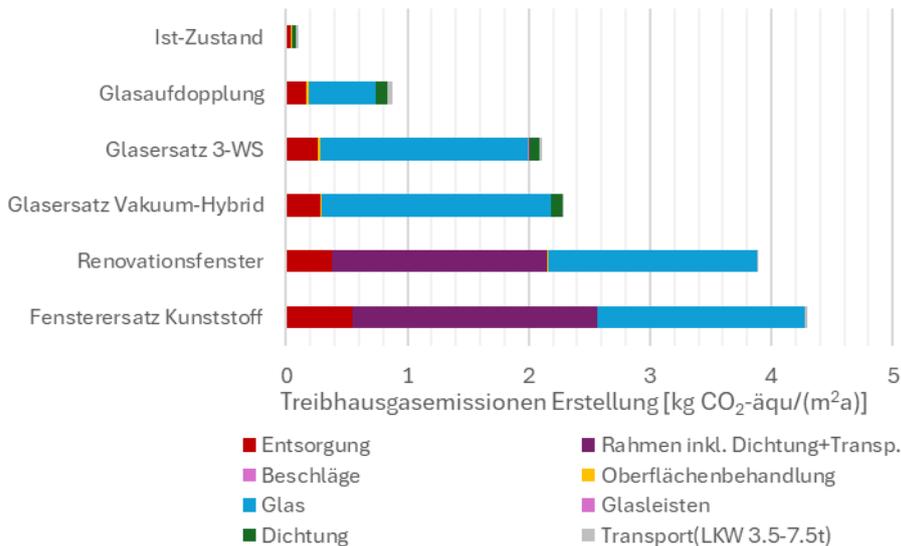


Abbildung 60: Treibhausgasemissionen Erstellung der betrachteten Fenster pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertuchigungsvarianten

Die indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung der verschiedenen Varianten zeigt Abbildung 60. Die Variante «Glasaufdopplung» hat nach dem Ist-Zustand erwartungsgemäss die tiefsten indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung, die höchsten die Variante Fensterersatz, wobei diese Variante gemeinsam mit der Variante «Renovationsfenster» die technisch hochwertigste Ausführung mit voller Gewährleistung bietet. Den grössten Anteil an den indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung haben die Verglasung und der Fensterrahmen. Für Dichtungen, Glasleisten, Anstrich und Transporte für die Glasaufdopplung ist der Anteil an den indirekten Treibhausgasemissionen der Erstellung gering.

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen im Betrieb werden die U-Werte gemäss Tabelle 26 und die Heizgradtage am Standort Basel-Stadt berücksichtigt. Der Fernwarmemix der IWB beinhaltet Stand 2023 die Energieträger Erdgas (22%), Biogas (12%), Holz (21%), Kehricht (41%), Klärschlamm (3%) und Warmerruckgewinnung (1%) [77]. Bis 2037 wird Erdgas im Fernwarmemix durch erneuerbare Energieträger substituiert. Bei der Ermittlung des Treibhausgasemissions-Faktors des Fernwarmemixes wird vereinfacht der Energieträger Erdgas von 2024 bis 2037 linear durch eine Heizzentrale mit Grundwasser-Wärmepumpe ersetzt. Der gemittelte Treibhausgasemissions-Faktor der Fernwärme beträgt für den Zeitraum 2024-2054 0.052 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh.

	Ist-Zustand	Glasaufdopplung	Glasersatz 3-WS	Glasersatz Vakuum-Hybrid	Renovationsfenster	Fensterersatz Kunststofffenster
U-Wert Fenster, $U_w$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	1.68	0.96	0.85	0.84	0.82	0.79
U-Wert Rahmen, $U_f$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	1.44	1.44	1.44	1.44	1.3	1.1
U-Wert Verglasung, $U_g$ [W/(m <sup>2</sup> K)]	1.4	0.7	0.6	0.47	0.6	0.6
Psi-Wert Abstandhalter, $\Psi_g$ (W/(m K))	0.08	0.05	0.03	0.06	0.03	0.03

Tabelle 26: U-Werte der betrachteten Varianten



Abbildung 61: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb der betrachteten Fenster pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Fernwärme (Basel-Stadt)

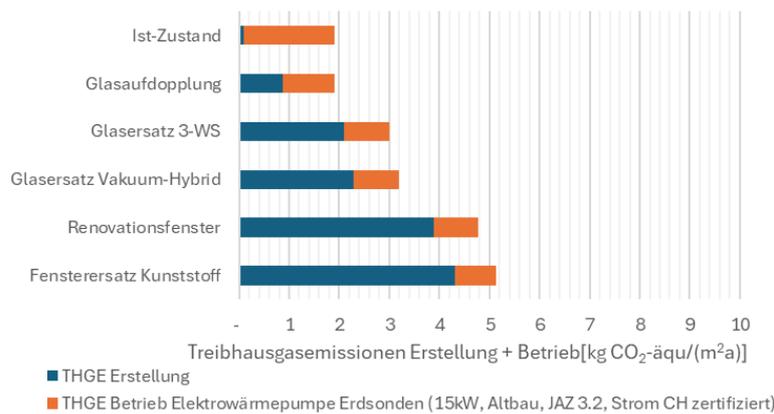


Abbildung 62: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb der betrachteten Fenster pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmepumpe und zertifiziertem Schweizer Ökostrom

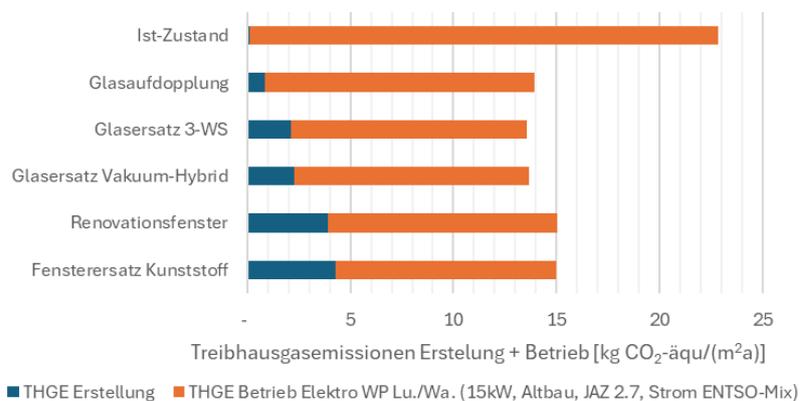


Abbildung 63: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb der betrachteten Fenster pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmepumpe und europäischem ENTSO-Strommix mit einem hohen Anteil fossiler Energien



Die vergleichende Analyse der Gesamtemissionen zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Ertüchtigungsvarianten in Abhängigkeit vom gewählten Wärmeversorgungssystem.

Bei Fernwärmeversorgung zeigt der Ist-Zustand Emissionen von etwa 5.9 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a), die ausschliesslich aus dem Betrieb resultieren (Abbildung 61). Die Glasaufdopplung erreicht mit Gesamtemissionen von etwa 4.2 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) eine Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand, trotz zusätzlicher indirekter Treibhausgasemissionen von 0.7 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Bei den Glasersatzvarianten betragen die Gesamtemissionen 5 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a), bedingt durch ihre höheren indirekten Treibhausgasemissionen. Renovationsfenster und Kunststoff-Fensterersatz schneiden mit etwa 6.8-7 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) ungünstiger ab als die anderen Ertüchtigungsvarianten.

Im Szenario mit Erdsonden-Wärmepumpe (Abbildung 62) und zertifiziertem Schweizer Ökostrom liegt der Ist-Zustand bei etwa 1.9 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Die Glasaufdopplung erreicht ein vergleichbares Emissionsniveau, während alle anderen Varianten aufgrund ihrer höheren indirekten Treibhausgasemissionen darüber liegen. Die Glasersatzvarianten erreichen etwa 3 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a), Renovationsfenster und Kunststoff-Fensterersatz etwa 4.8-5.1 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a).

Bei Verwendung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit ENTSO-Mix-Strom weist der Ist-Zustand mit etwa 23 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die höchsten Gesamtemissionen auf (Abbildung 63). In diesem Szenario führen alle Ertüchtigungsvarianten zu einer deutlichen Verbesserung. Die Glasersatzvarianten erzielen mit etwa 13.5 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die grösste Emissionsreduktion, gefolgt von der Glasaufdopplung mit etwa 14 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a). Renovationsfenster und Kunststoff-Fensterersatz erreichen mit etwa 16 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) ebenfalls eine signifikante Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand.

Diese Analyse verdeutlicht, dass die Bewertung der Ertüchtigungsvarianten massgeblich vom Wärmeversorgungssystem abhängt. Bei emissionsarmer Wärmeversorgung können die indirekten Treibhausgasemissionen der Ertüchtigungsmassnahmen die betrieblichen Einsparungen übersteigen. Bei emissionsintensiver Wärmeversorgung führen hingegen alle Ertüchtigungsvarianten zu einer Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand, wobei die Glasaufdopplung meist die günstigste Option darstellt.

### **Kosten**

Basierend auf den beschriebenen Massnahmen werden die Erstellungs-, Erneuerungs- respektive Ersatzvornahmekosten für die Ertüchtigungs- und Erneuerungsvarianten im Rahmen einer Grobkostenschätzung bei einer Genauigkeit von plus / minus 20%, wobei bei allen Varianten jeweils der Kostenmittelwert angegeben wird.

Aufgrund der Berechnungen konnten Erstellungskosten von CHF/m<sup>2</sup> 327 im Jahr 1999 berechnet werden. Ein identischer Einbau im Jahr 2024 würde nach Berechnung mit dem Berechnungstool Kosten von CHF/m<sup>2</sup> 460 verursachen, was einer mittleren Inflation von etwa 1.4% entspricht. Ein Blick in die Statistik bestätigt die Prognose.

Für die Variante 0, keine Wartungs- und Unterhaltsaufwände, bedeutet dies grundsätzlich keine Kostenentwicklung (orange Linie). Wird die ermittelte Inflation berücksichtigt, zeigt der Kurvenverlauf eine minimale Steigung (dunkelblaue Linie). Bei der Variante 1 (Aufdopplung) konnte ein Investitionsvolumen von CHF/m<sup>2</sup> 276, bei der Variante 2a (Glasersatz, 3fach IV) von CHF/m<sup>2</sup> 300, bei der Variante 2b (Glasersatz, Vakuum) von CHF/m<sup>2</sup> 552 und bei der Variante 3 (Fensterersatz) von CHF/m<sup>2</sup> 1217 ermittelt werden.

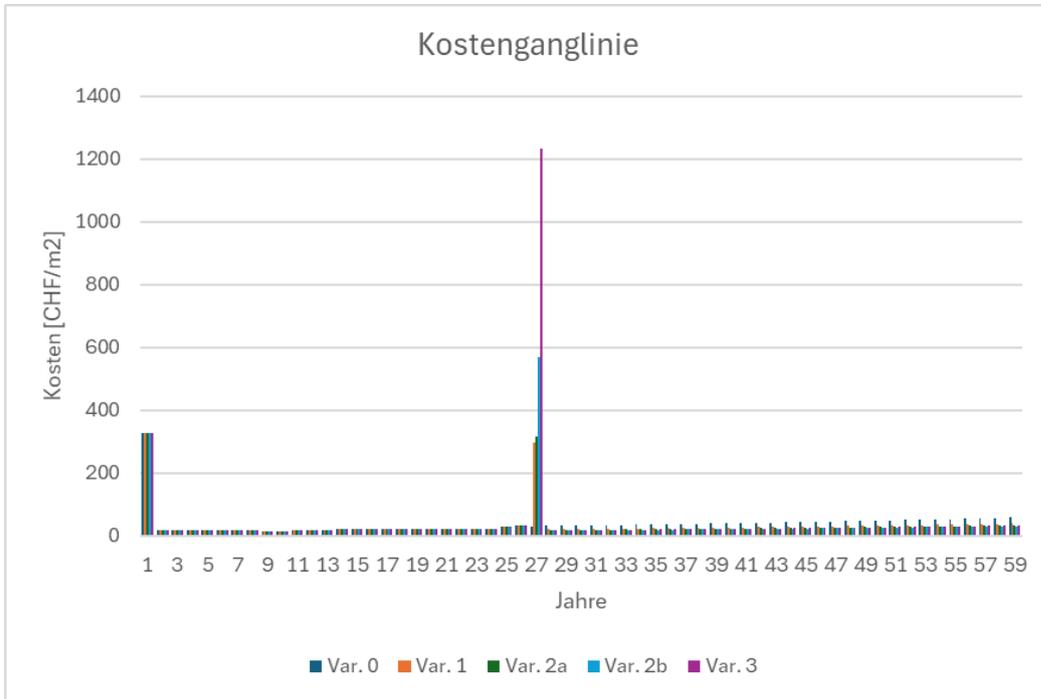


Abbildung 64: Kostenganglinie unterschiedlicher Massnahmenvarianten in Kosten (CHF/m²)

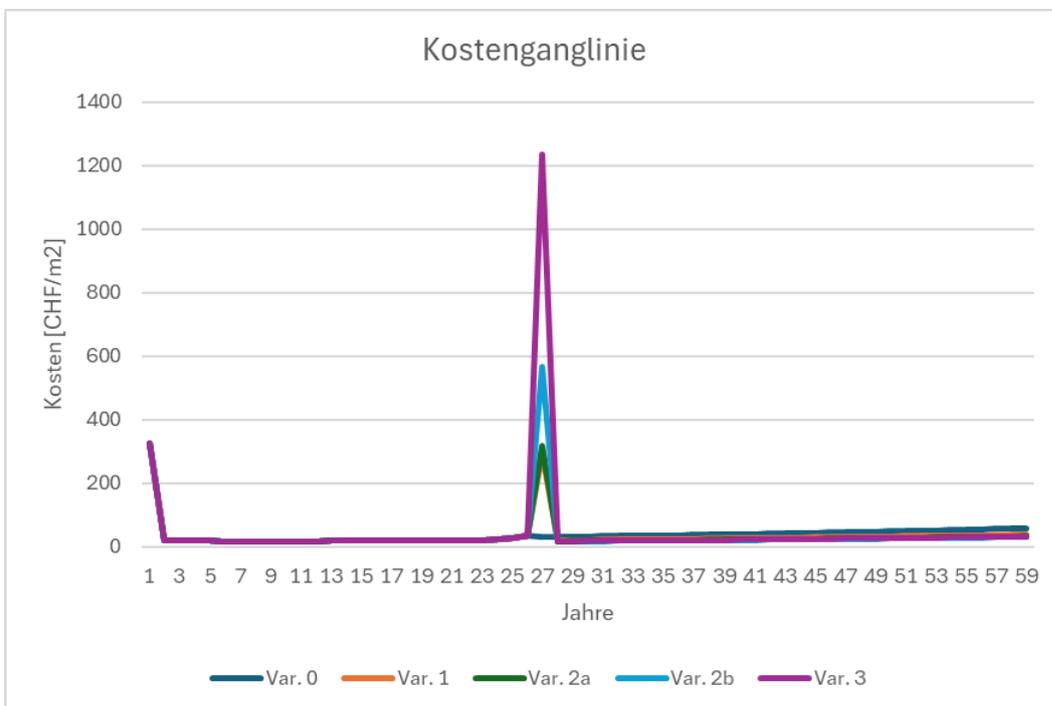


Abbildung 65: Kostenganglinie unterschiedlicher Massnahmenvarianten und resultierendem Heizwärmebedarf in Kosten (CHF/m²)



Für die Variante 0 (Ist-Zustand) werden keine Massnahmen gerechnet, weshalb keine Erhöhung der Lebensdauer resultiert. Für die restlichen Massnahmen kann durch die Investition davon ausgegangen werden, dass sich die berechnete Lebensdauer erneuert. Für alle Varianten werden hierzu die entsprechenden Kennwerte objektspezifisch in das erstellte Berechnungstool eingegeben, welches die Investitionskosten (CHF/m<sup>2</sup>) und die Lebensdauer (Jahre) abschätzt. Für die eingegebenen Parameter des Objekts ergibt das Tool eine Lebensdauer von 33 Jahren. Die Restlebensdauer der 1999 eingebauten Fenster beträgt somit noch etwa acht Jahre.

Für die gesamten Erstellungs-, Erneuerungs- respektive Ersatzvornahmekosten werden die resultierenden Kosten (CHF/m<sup>2</sup>) mit der Gesamt-Fensterfläche von 111.4 m<sup>2</sup> multipliziert. Die Kosten sind pro Ertüchtigungs- und Erneuerungsvariante in Tabelle 27 dargestellt.

<b>Ertüchtigungsvariante</b>	<b>V0 Ist-Zustand</b>	<b>V1 Glasaufdopplung</b>	<b>V2a Glaserersatz 3-fach IV</b>	<b>V2b Glaserersatz Vakuum Hybrid</b>	<b>V3 Fensterersatz – neue Renovationsfenster</b>
Kosten pro m <sup>2</sup> (CHF/m <sup>2</sup> )	0	276	300	552	1'217
Geschätzte Rest-Lebensdauer (Jahre)	8	33	33	33	33
Kosten total (CHF)	0	30'746	33'420	61'493	135'574

Tabelle 27: Übersicht über die Kosten der Ertüchtigungs- und Erneuerungsvarianten.

### 5.2.5 Schlussfolgerung

Die Analyse der Fenster im Gebäude Egliseestrasse 60 in Basel zeigt deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Ertüchtigungsvarianten hinsichtlich Energieeffizienz, Umweltauswirkungen und Kosten.

Die Aufdopplung der Verglasung (V1) erweist sich als vorteilhaft, wenn man die Balance zwischen Kosten, Energieeinsparungen und Treibhausgasemissionen betrachtet.

Diese Bewertung stützt sich auf folgende Erkenntnisse:

Im Bereich Energieeffizienz reduzieren alle Ertüchtigungsvarianten die Transmissionswärmeverluste deutlich von derzeit 111 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf Werte zwischen 54-64 kWh/(m<sup>2</sup>a) (Tabelle 28). Während neue Renovationsfenster (V3) mit 0.82 W/(m<sup>2</sup>K) den besten U-Wert erreichen, erzielt die Glasaufdopplung (V1) mit 0.96 W/(m<sup>2</sup>K) ebenfalls eine sehr gute Verbesserung gegenüber dem Ist-Zustand von 1.7 W/(m<sup>2</sup>K).

Die Gesamtbilanz der Treibhausgasemissionen wird massgeblich vom Energieträger der Wärmeversorgung beeinflusst. Bei der aktuellen Fernwärme mit teilweise fossilem Energiemix dominieren die



Betriebsemissionen. Bei einer fossilfreien Wärmeversorgung, gewinnen hingegen die indirekten Treibhausgasemissionen der Herstellung an Bedeutung. Materialeffiziente Ertüchtigungsvarianten wie die Glasaufdopplung sind dann besonders vorteilhaft, da sie mit minimalen indirekten Treibhausgasemissionen eine substantielle energetische Verbesserung erreichen. Bei einem sehr emissionsarmen Energieträger kann unter Umständen sogar der Ist-Zustand die beste Lösung darstellen, da die zusätzlichen indirekten Treibhausgasemissionen einer Ertüchtigung die geringen Einsparungen im Betrieb übersteigen würden.

Bezüglich der Umweltauswirkungen zeigt die Glasaufdopplung (V1) mit 4.3 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a) die beste Gesamtbilanz bei den Treibhausgasemissionen, wenn man sowohl Betriebs- als auch indirekte Treibhausgasemissionen berücksichtigt. Dies ist deutlich besser als der Ist-Zustand (6.0 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a)) und erheblich niedriger als der Fensterersatz durch ein Renovationsfenster (7.1 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a)). Die günstigen Werte resultieren aus den minimalen indirekten Treibhausgasemissionen (0.9 kg CO<sub>2</sub>-eq/(m<sup>2</sup>a)) bei gleichzeitig substantieller Reduktion der Betriebsemissionen.

Die Kostenkalkulation (Erstellungs-, Erneuerungs- respektive Ersatzvornahmekosten) zeigt, dass die Glasaufdopplung und der Glasersatz durch 3-fach IV mit 276 CHF/m<sup>2</sup> bzw. 300 CHF/m<sup>2</sup> die kostengünstigsten Ertüchtigungsvarianten darstellen - beinahe die Hälfte der Kosten für Vakuum-Hybrid-Glas (552 CHF/m<sup>2</sup>) oder neue Ersatzfenster (1217 CHF/m<sup>2</sup>). Dies entspricht Gesamtinvestitionskosten von 30'746 CHF im Vergleich zu 135'574 CHF für einen kompletten Ersatz.

<b>Ertüchtigungsvariante</b>	<b>V0</b>	<b>V1</b>	<b>V2a</b>	<b>V2b</b>	<b>V3</b>
<b>Kriterium</b>	<b>Ist-Zustand</b>	<b>Verglasung aufdoppeln 2-fach IV zu 3-fach IV</b>	<b>Glaserersatz 3-fach IV</b>	<b>Glaserersatz Vakuum-IV-Hybrid</b>	<b>Fensterersatz - neue Renovationsfenster</b>
U <sub>w</sub> -Wert (W/(m <sup>2</sup> K))	1.68	0.96	0.85	0.84	0.82
Transmissionswärmeverluste [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	111	64	56	55	54
Treibhausgasemissionen Betrieb [kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> a)]	5.9	3.4	3.0	3.0	2.9
Indirekte Treibhausgasemissionen der Erstellung [kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> a)]	0.1	0.9	2.1	2.3	4.2
Summe Treibhausgasemissionen bei Fernwärme Basel [kg CO <sub>2</sub> -eq/(m <sup>2</sup> a)]	6.0	4.3	5.1	5.3	7.1
Investitionskosten pro m <sup>2</sup> (CHF/m <sup>2</sup> )	0	276	300	552	1'217

Tabelle 28: Übersicht über die Ertüchtigungsvarianten.



Auf Basis dieser Analyse wird für die Fenster in den Obergeschossen die Umsetzung der Glasaufdopplungsvariante (V1) empfohlen. Dieser Ansatz bietet die beste Balance zwischen Wirtschaftlichkeit, Energieeinsparung und Umweltauswirkungen bei einer Verlängerung der Nutzungsdauer um weitere 33 Jahre. Der gute technische Zustand der bestehenden Fenster begünstigt diesen Ansatz zusätzlich.

Für die Schiebetüren im Erdgeschoss wird hingegen aufgrund der technischen Einschränkungen trotz höherer Kosten ein Ersatz durch neue Fenster empfohlen. Dieser differenzierte Ansatz ermöglicht eine optimale Kombination aus Leistung und Kosten für das gesamte Gebäude unter Berücksichtigung der spezifischen technischen Anforderungen.

Diese Empfehlung entspricht den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, indem bestehende Komponenten wo möglich erhalten und aufgewertet werden, während gleichzeitig die langfristige Funktionalität und Energieeffizienz verbessert wird. Die erheblichen Kosteneinsparungen im Vergleich zum kompletten Ersatz könnten potenziell in weitere Gebäudeeffizienzmassnahmen reinvestiert werden.



## 5.3 Ergebnisse aller Testliegenschaften

### 5.3.1 Messungen U-Wert Verglasungen und Gasfüllgrad Scheibenzwischenraum

Bei den Test-Objekten wurden vor Ort  $U_g$ -Werte von 21 Verglasungen gemäss ISO 9869-1:2014 gemessen. Der Gasfüllgrad wurde bei 33 Verglasungen gemessen.

Tabelle 29 zeigt die gemessenen  $U_g$ -Werte und Gasfüllgrade. Die Verglasungen stammen aus den Herstellungsjahren 1995-2003. Die Messwerte  $U_g$  liegen zwischen 1.1 und 1.8  $W/(m^2K)$ , der Gasfüllgrad zwischen einem und 93 %. Es konnten nicht bei allen Verglasungen deren U-Wert gemessen wurde, auch der Gasfüllgrad gemessen werden, weil einzelne Räume oder Wohnungen bei der zweiten Begehung nicht zugänglich waren. Für Verglasungen, bei denen beide Messwerte vorliegen, weisen diese eine Korrelation auf. Verglasungen mit tiefem  $U_g$ -Wert weisen einen hohen Gasfüllgrad auf und umgekehrt.

	Leimenstrasse	Egliseestrasse	Zurlinden	Waidfussweg	Roche
Verglasung Herstellungs- jahr	2-fach-IV 1995 / 2001	2-fach-IV 1999	2-fach-IV 1997	2-fach-IV 2003	2-fach-IV 1996 / 1998
Rahmen	Holz-Alu (Wärmebrücken Anschlüsse)	Holz-Alu	Holz, Holz-Alu	Holz	Metall
$U_g$ -Wert ( $W/(m^2K)$ ) gemessen bei	1.1 – 1.5 6 Fenstern	1.3, 1.4, 1.8* 3 Fenstern	1.1, 1.3 / 1.5, 1.6 4 Fenstern	1.1-1.2 4 Fenstern	1.9, 2.1, 2.2/ 1.0, 1,1 3 Fenstern/ 2 Fenstern
Gasfüllgrad gemessen bei	>80% / <10% 11 Fenstern	78-93% 6 Fenstern *Gasfüllgrad nicht gemessen	>80% / <10% 7 Fenstern	>80% 9 Fenstern	Nicht gemessen

Tabelle 29: Stichprobenartig gemessene  $U_g$ -Werte und Gasfüllgrade der Verglasungen der Test-Objekte.



### 5.3.2 Ergebnisse Berechnungen Test-Objekte

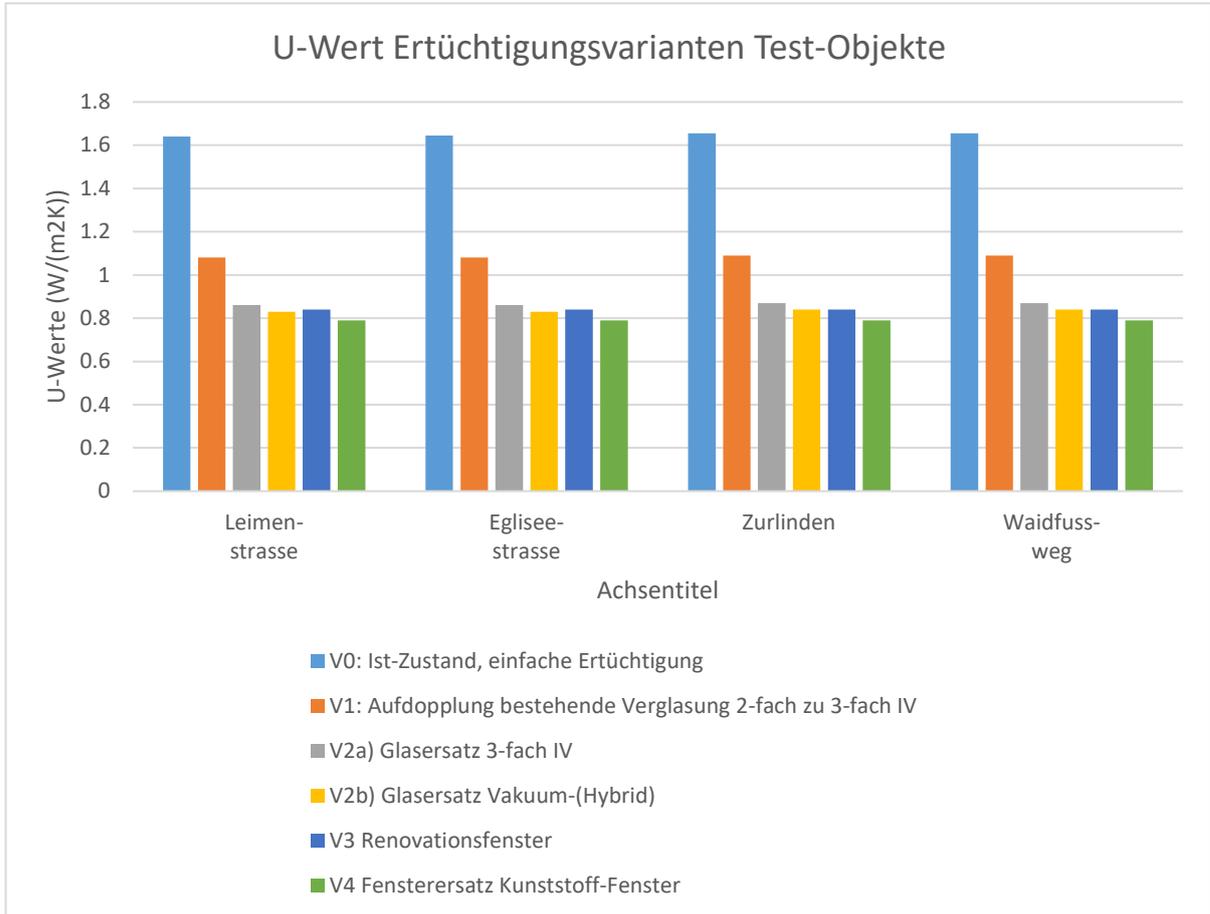


Abbildung 66: Die U-Werte der verschiedenen Test-Objekte mit 2-fach-IV Wärmeschutzverglasung zeigen, dass die Ertüchtigungsvarianten V2 bis V4 eine Verbesserung im U-Wert ergeben.

Abbildung 66 zeigt, dass die U-Werte bei allen Ertüchtigungsvarianten optimiert werden konnten. Bereits eine Glas-Aufdopplung führt bei allen Objekten zu einer markanten Verbesserung des U-Werts, so dass er in etwas bei 1.1 (W/(m<sup>2</sup>K)) zu liegen kommt. Dies ist knapp über der aktuellen Vorgabe der MuKEN 2014.

Damit ergeben sich für diese Objekte auch eine vergleichbare Bewertung der Treibhausgasemissionen der Erstellung (siehe Abbildung 60) sowie Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb mit unterschiedlichen Heizsystemen siehe Abbildung 61 mit Fernwärme (Basel-Stadt), Abbildung 62 mit Erdsonden-Wärmepumpe (CH Mix), Abbildung 63 Wärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmepumpe und europäischem ENTSO-Strommix mit einem hohen Anteil fossiler Energien. Ausserdem sind die Kosten auch analog mit Ausnahme der geografischen Abweichung (siehe Abbildung 64 und Abbildung 65).



### 5.3.3 Ertüchtigungsvarianten

Für die Testobjekte wurden auf Grundlage der Ergebnisse aus Kapiteln 3 und 4, der Unterlagen, Messungen, Berechnungen, Begehungen und Gesprächen mit den Liegenschaftsverantwortlichen verschiedene Ertüchtigungsstrategien erarbeitet.

Die Vorschläge sind in Tabelle 30 zusammengefasst.

<b>Varianten Ertüchtigung</b>	Leimenstrasse	Egliseestrase	Zurifinden	Waidfussweg	Roche 29 1.OG / 4. OG
- nicht zu empfehlen; nicht möglich O bedingt zu empfehlen; bedingt möglich X sinnvoll; möglich + zu empfehlen					
V1 Ist-Zustand Verglasung und Rahmen belassen, Beschläge reparieren/einstellen, Überschlagsdichtung ergänzen	O	+	+	+	X/+
V2 Aufdopplung bestehende Verglasung 2-fach zu 3-fach IV, Rahmen belassen, Glaseinstand vergrössern, Beschläge reparieren/einstellen, Überschlagsdichtung ergänzen	O	X	-	-	-/O
V3a Glasersatz 3-fach IV, Rahmen belassen, Glaseinstand vergrössern, Beschläge reparieren/einstellen, Überschlagsdichtung ergänzen, Ertüchtigung bestehende Verglasung und Re-Use an anderem Ort	O	X	O	O	-/O
V3b Glasersatz Vakuum-Hybrid IV, Rahmen belassen, Glaseinstand vergrössern, Beschläge reparieren/einstellen, Überschlagsdichtung ergänzen; Ertüchtigung bestehende Verglasung und Re-Use an anderem Ort	O	X	O	O	+/O
V4 Fensterersatz Renovationsfenster, Ertüchtigung bestehende Rahmen und Verglasung und Re-Use an anderem Ort	+	O	X/O	O	O/-
V5 Fassade demontieren, reparieren, ertüchtigen, ergänzen, remontieren, siehe Beispiel Bürohaus Dufourstrasse Basel	+	-	-	-	O/-
V6 Kastenfenster	-	-	-	-	X/-

Tabelle 30: Ertüchtigungsmassnahmen für die Test-Liegenschaften.



### 5.3.4 Kosten

Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden hier die Investitionskosten pro m<sup>2</sup> für jede Variante betrachtet. Der Kostenvergleich für die Objekte Egliseestrasse, Waidfussweg, Zurlinden und Leimenstrasse und das 4. Obergeschoss des Roche Bau 29 ist in Abbildung 67 und derjenige für das 1. Obergeschoss des Roche Bau 29 in Abbildung 68 dargestellt.

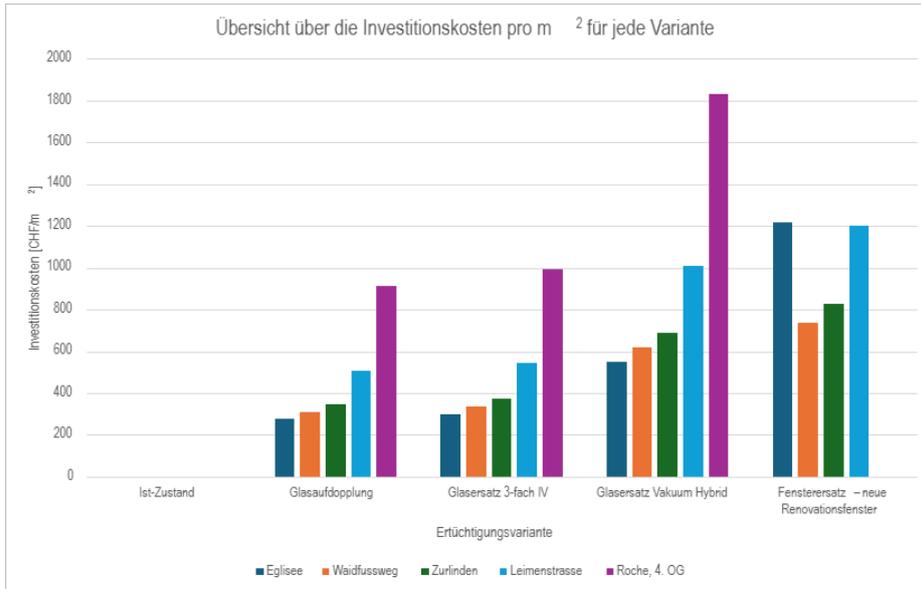


Abbildung 67: Kostenvergleich für die Objekte Egliseestrasse, Waidfussweg, Zurlinden und Leimenstrasse und das 4. Obergeschoss des Roche Bau 29

Beim Vergleich der Kosten (Erstellungs-, Erneuerungs- respektive Ersatzvornahmekosten) fällt auf, dass die Kosten beim Projekt Eglisee jeweils am tiefsten sind. Dies liegt unter anderem daran, dass die Fensterlage beim Objekt Eglisee innen ist, während dem die anderen Objekte eine mittige Fensterlage aufweisen. Die innere Fensterlage ermöglicht eine einfachere Zugänglichkeit für Erneuerungsmaßnahmen, ausser beim Einbau von Renovationsfenstern. Hier ist die Aufbauart des Elementes kostennachteilig.

Beim Roche-Gebäude handelt es sich um raumhohe Metallfenster, die zusätzliche Sicherheitsmassnahmen benötigen. Die Kosten für Ertüchtigungs- wie auch Ersatzvarianten sind deshalb teurer (siehe auch Abbildung 68).

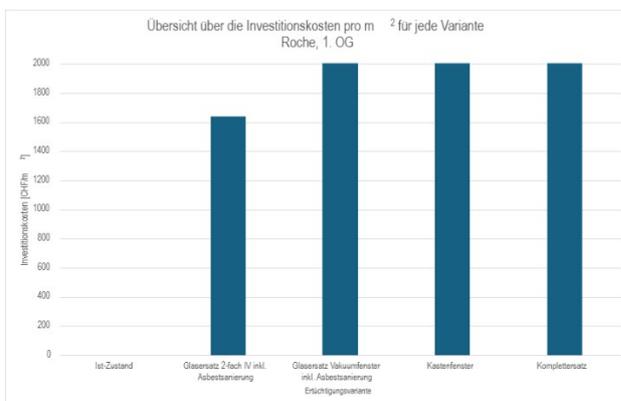


Abbildung 68: Kostenermittlung für Ertüchtigungsvarianten Roche-Gebäude 1. Obergeschoss



## 6 Wegleitung, Materialpass und weitere Hinweise für die Praxis

### 6.1 Wegleitung Sanierung und Ertüchtigung von Fenstern

#### 6.1.1 Einleitung

Diese Wegleitung zeigt das Vorgehen zur Ertüchtigung und Wiederverwendung von Fenstern mit Isolier- oder Wärmeschutzverglasung auf. Vor dem Hintergrund wachsender Anforderungen an Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung nimmt die Bedeutung beider Ansätze zu. Die Wegleitung bietet praxisnahe Informationen und konkrete Handlungsempfehlungen.

Es werden zwei Hauptansätze behandelt:

- Ertüchtigung von Fenstern im Bestand: Optimierung der Fenster direkt im vorhandenen Gebäude. Es werden die Ertüchtigungsvarianten gemäss Kapitel 3.3 in die Betrachtungen einbezogen.
- Wiederverwendung (Re-Use): Demontage von Fenstern aus einem Quellgebäude zur Integration in ein neues Zielgebäude.

#### Idealer Zeitpunkt der Abklärungen

Die Abklärungen von Fenstern als Grundlage für Sanierungsprojekte oder Wiederverwendung sollte möglichst in einer frühen SIA-Phase (Strategische Planung SIA-Phase 1 oder Vorstudie SIA Phase 2) mit einem einfachen Prüfprozess erfolgen können. Diese Abklärungen können gleichzeitig mit Schadstoffabklärungen und Prüfung der Bausubstanz erfolgen. Gut wäre es, nebst einer Fensterertüchtigung auch eine erneuerbare Heizung zu installieren.

#### Bestandesaufnahme in drei Schritten

Die systematische Bestandsaufnahme und Bewertung der vorhandenen Fenster bilden die Grundlage für eine erfolgreiche Ertüchtigung. Sie dient der präzisen Erfassung des Zustands, der Identifikation von Verbesserungspotenzialen und der Ableitung fundierter Entscheidungen für das weitere Vorgehen. Die Bewertung des Fensterzustands erfolgt in mehreren Schritten, die jeweils spezifische Methoden und unterschiedliche Detaillierungsgrade erfordern. Ziel dieses Prozesses ist es, eine solide Basis für Entscheidungen über geeignete Ertüchtigungs- oder Wiederverwendungsmassnahmen zu schaffen.

#### Zuständigkeit

Fachperson aus Architektur, Bauphysik, Energie- und Nachhaltigkeitsberatung, Fenster- und Fassadenplanung.



## 6.1.2 Kurzanalyse und Ersteinschätzung (1. Schritt)

In einem ersten Schritt erfolgt eine Kurzanalyse. Diese besteht aus einer Begehung des Gebäudes zur Begutachtung der Fenster, bei der auch bereits erste Erhebungen, Vermassungen und einfache Tests als Kurzanalyse erfolgen.

Ziel ist es, eine erste Ersteinschätzung des Fensterzustands zu erlangen, grobe Mängel zu identifizieren und die generelle Eignung der Fenster für Ertüchtigungs- oder Wiederverwendungsmassnahmen zu bewerten.

### a) Vorabklärungen

#### Unterlagenbeschaffung

Sammeln aller verfügbaren Dokumente wie Baupläne, Offerten, Rechnungen, Datenblätter Hersteller, Fassadenzeichnungen und frühere Sanierungsberichte.

#### Erfassungsformular (Anhang)

Verwendung des standardisierten Formulars oder der Excel-Vorlage zur systematischen Datenerfassung. Schnittstelle mit dem SwissInv Standard für die Aufnahme von Re-Use Bauteilen bereitstellen.

#### Ausrüstung und Zugänglichkeit

Bereitlegen von Messgeräten (Massband, Laserdistanzmesser, Schieblehre), Kamera oder Tablet für die Fotodokumentation und gegebenenfalls Spezialwerkzeugen. Zugänglichkeit bei der Begehung (inkl. Sicherheit) gewährleisten.

### b) Begehung mit systematischer Prüfung

#### Augenschein vor Ort

Wärmeschutz (Fenster- und Verglasungstyp), Luftdichtigkeit (Fenster und Rahmen inkl. Einbau), Schlagregendichtigkeit, sommerlicher Wärmeschutz, Schallschutz, Sicherheit (inkl. Anforderungen Durchfallschutz etc.), Zustand und Funktionalität

#### Sichtprüfung

Visuelle Untersuchung von Rahmen, Beschlägen und Verglasungen auf erste Anzeichen von Schäden, wie z. B. Verfärbungen, Risse oder Korrosion.

#### Energieeffizienz-Basisbewertung

Erfassung des Fenstertyps und der Verglasungsart als Grundlage für eine erste, grobe Einschätzung der Energieeffizienz.

#### Schadstoffbelastung:

Ein Schadstoffbericht wird beim Rückbau obligatorisch erstellt. So können beispielsweise mit Kitt verglaste Fenster Asbest enthalten oder Anstriche können Blei enthalten. Schadstoffrichtlinien für die Wiederverwendung haben andere Anforderungen als solche für die Entsorgung. Im Schadstoffbericht wird i.d.R. für die Entsorgung geprüft und eher grobe Stichproben genommen. Idealerweise beim Beauftragen des Berichts schon auf die potenzielle Wiederverwendung der Fenster hinweisen.

### c) Einfache Tests und Überprüfung der Funktionalität

- Anzahl Scheiben (von Auge sichtbar)
- Glasdicke mit manuellem Messgerät (bei grösserer Schichtdicke ev. Schallschutzverglasung)
- Beschichtung mit Taschenlampe / Feuerzeug eruieren



- einfacher Test zur Bestimmung der Luftdichtheit: Blatt zwischen Flügel und Blendrahmen ein-klemmen, Fenster schliessen, Blatt herausziehen
  - Kurzer Test der Beschläge, der Beweglichkeit des Fensters und des Schliessverhaltens. Kann das Fenster 5-10 kg mehr Gewicht tragen beispielsweise für eine Glasaufdopplung?
- Die Testergebnisse in das Erfassungsformular eintragen

#### **Notwendige Hilfsmittel**

Doppelmeter, Laser, Schiebelehre (+Magnet), Smartphones (oder Tablets), Kamera, idealerweise Grundrisse für genaue Verortung, manueller Glasdickenmesser [78].

#### **d) Erstellung eines Protokolls**

- Ort des Fensters (Geschoss, Raumbezeichnung, Himmelsrichtung, Baujahr)
- Fenstermasse, Art des Fensters, Klapp- und Schwingflügel inkl. Beschläge, Witterungsschutz
- Rahmentyp, Oberflächenbehandlung, Zustand
- Verglasung, Trocken oder Nassverglasung (wichtig: Asbestfrei)
- Abstandhalter, Materialisierung (Alu, Edelstahl oder Kunststoff) (teilweise mit Typenbezeichnung)
- Montage (Block, Blendrahmen)
- Sicherheit: Schwellen-, Brüstungs- und Sturzhöhe
- Einbruchschutz (Sicherheitsklasse), Verriegelungszylinder
- Anzahl, Lage und Art der Dichtung
- Beschreibung Zustand (Alter Fenster, Beschläge, Schliessmechanismus, Trübung, Anstrich, Dichtungen, Schlagregendichtheit etc.)

#### **e) Ersteinschätzung der Fenster**

- Schlechter Allgemeinzustand mit Dysfunktionalitäten, Beschlägen in schlechtem Zustand etc. Renovationsfenster oder Fenster-Ersatz prüfen.
- Vorhandensein von Schadstoffen: Gefährdungsabschätzung und Entscheid, ob Ertüchtigung infrage kommt oder ob eine fachgerechte Entsorgung sinnvoll ist.
- Bei Einfach- oder Doppelverglasung (ohne Randverbund) ist für beheizte Räume ein Fenster-Ersatz sinnvoll. Wiederverwendung der Fenster mit Einfach- oder Doppelverglasung vor allem im Innenbereich (z.B. als Trennwände) sinnvoll oder für unbeheizte Gebäude.
- Gussgläser sind wertvoll und sollten erhalten bleiben oder zur Weiternutzung ausgebaut werden z. B als Kastenfenster.
- Handelt es sich bei den Fenstern um intakte unbeschichtete oder beschichtete Isoliergläser (Wärmeschutzverglasung), so kommen sie für eine Ertüchtigung in Frage und weitere Abklärungen machen Sinn.

Das Potenzial für Ertüchtigung und Wiederverwendung kann in einigen Fällen stark eingeschränkt sein, dass eine weitere Untersuchung nur in Ausnahmefällen erforderlich ist und ein Renovationsfenster oder Fenster-Ersatz angezeigt ist.

#### **f) Dokumentation**

Die Ergebnisse können im Materialpass Stufe P1 (siehe Kapitel 6.2) dokumentiert werden.

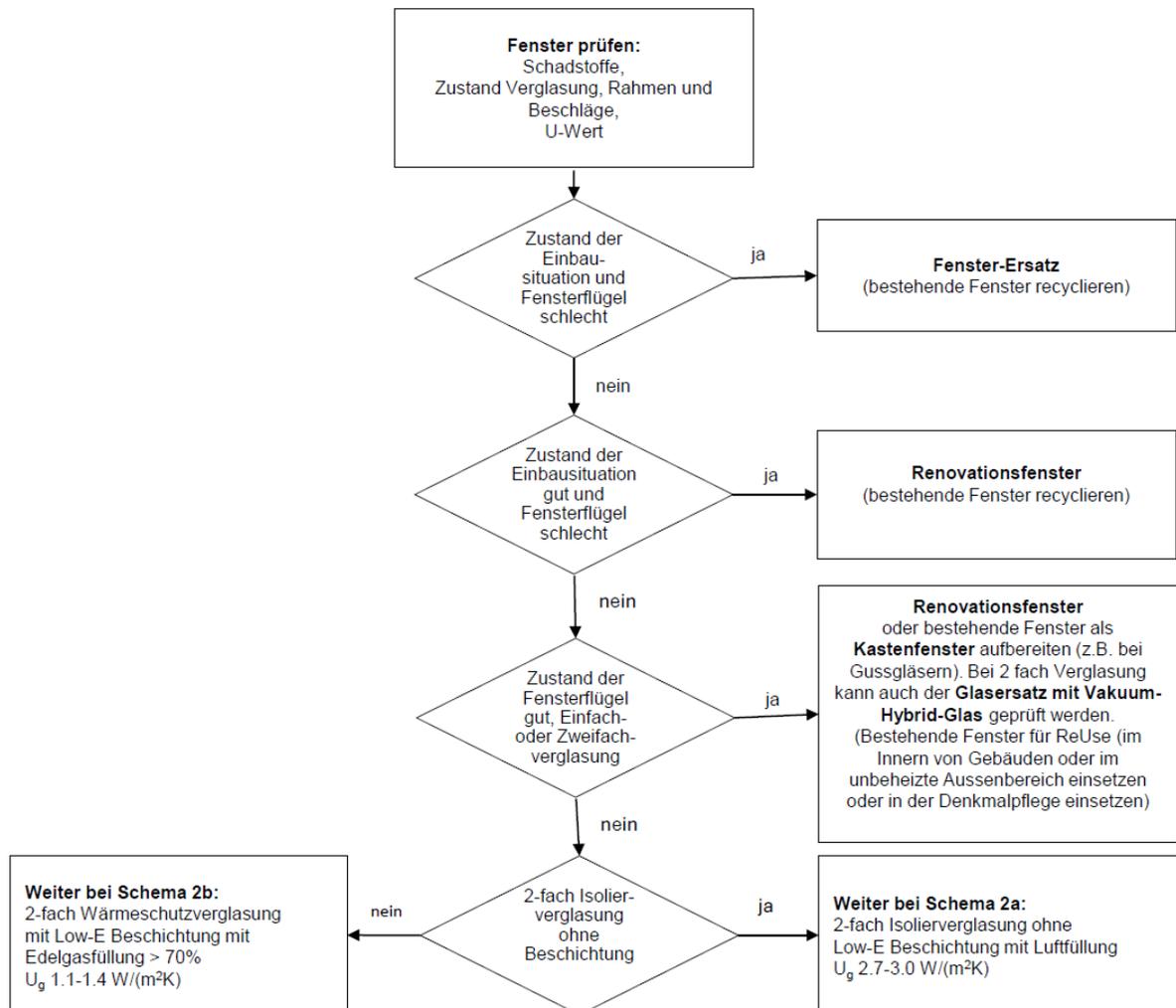


Abbildung 69: Ersteinschätzung von Zustand des Fensters (Rahmen, Beschläge und Verglasung) inkl. Einbausituation (INEB)

Bestehen die Fenster die Ersteinschätzung gemäss Abbildung 69 und handelt es sich um eine 2fach Isolierverglasung oder eine 2-fach Wärmeschutzverglasung, erfolgen anschliessend weitere Abklärungen (siehe 2. und 3. Schritt).

### 6.1.3 Zusatzabklärungen (2. Schritt)

Die Zusatzabklärungen für Fenster mit intakten unbeschichteten Isolierverglasungen ( $U_g$ -Wert 2.7-3.0  $W/(m^2K)$ ) oder mit Low-E beschichteten Wärmeschutzverglasungen ( $U_g$ -Wert 1.1-1.4  $W/(m^2K)$ ) dienen dazu, die Ertüchtigungsvarianten weiter zu präzisieren.

#### a) Zusatzabklärungen zu den Fenstern und zum Gebäude

- Fenstertyp eruieren, Einbaualter, Typ, Schallschutz, Wärmeschutz
- Anforderungen prüfen: Schallschutzanforderung, Wärmeschutzanforderungen (Einzelbauanforderung, Systemnachweis etc.), Sicherheitsanforderungen (gemäss SIGAB)
- Gebäudeheizung Energieträger (Öl, Gas etc.): Wann kommt eine erneuerbare Heizung zum Einsatz?
- Sichtung von weiteren Dokumenten: Frühere Untersuchungen, Rechnungen, Verträge, Offerten, Baudokumentation, -beschrieb



- Hinweisen zu  $U_w$ -Wert und g-Wert nachgehen, Werte schätzen
- Schalldämmwerte eruieren.

Zeigen die Zusatzabklärungen, dass keine speziellen Verglasungen notwendig sind (Lärmschutz, ESG, VSG), dann spielen für die wärmetechnische Ertüchtigung insbesondere die Faktoren des Glaseinstands und des Rahmencustands eine Rolle für die Ertüchtigungsvarianten. Diese sind in für 2-fach Isolierverglasungen und in Abbildung 70 für mit Low-E beschichtete Wärmeschutzverglasungen in Abbildung 71 beschrieben.

### b) Einschätzung weiteres Vorgehen für 2-fach Isolierverglasungen (Schema 2a)

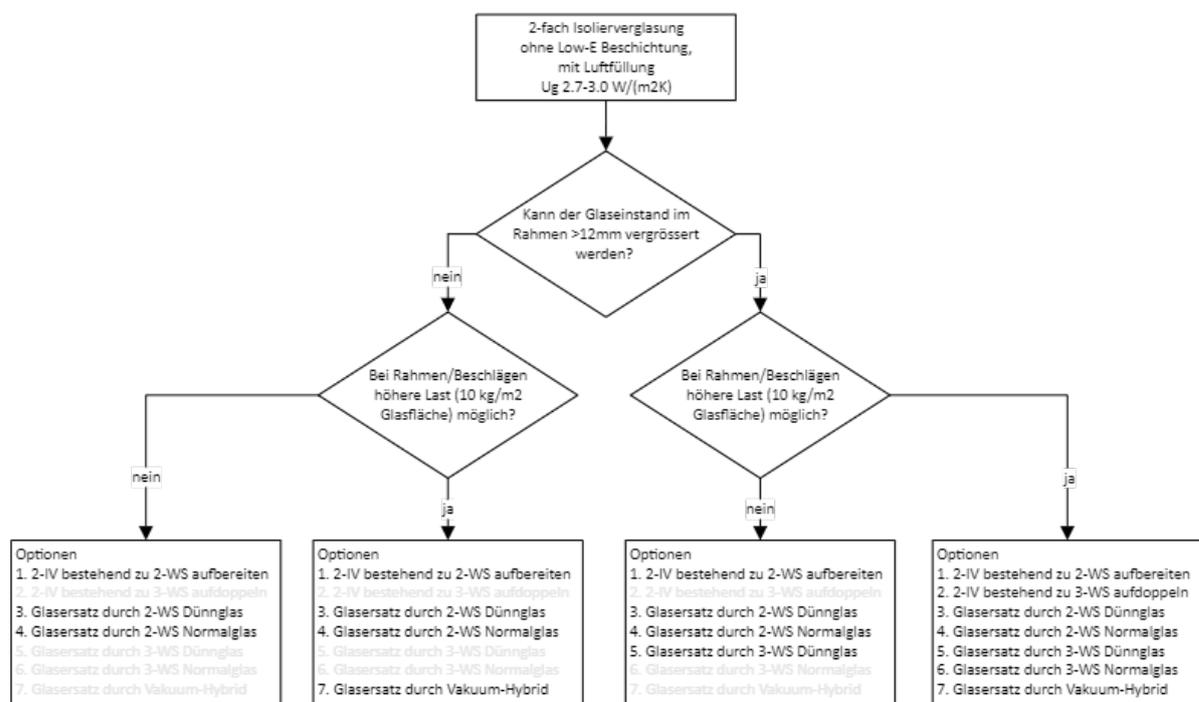


Abbildung 70: Vorgehen bei der Ertüchtigung einer 2-fach Isolierverglasung (INEB)

Auf der Abbildung 70 wird das Vorgehen der möglichen Ertüchtigungen von Verglasungen aufgezeigt.

Dabei stehen folgende Optionen zur Auswahl:

- 2-IV bestehend zu 2-WS aufbereiten ( $U_g$  1.1/  $U_f$  1.5/  $U_w$  1.3)
- 2-IV bestehend zu 3-WS Glas aufdoppeln ( $U_g$  0.9/  $U_f$  1.5/  $U_w$  1.2)
- Glasersatz durch 2-WS Dünnglas ( $U_g$  1.1/  $U_f$  1.5/  $U_w$  1.3)
- Glasersatz durch 2-WS Normalglas ( $U_g$  1.1/  $U_f$  1.5/  $U_w$  1.3)
- Glasersatz durch 3-WS Dünnglas ( $U_g$  0.6/  $U_f$  1.5/  $U_w$  0.88)
- Glasersatz durch 3-WS Normalglas ( $U_g$  0.6/  $U_f$  1.5/  $U_w$  0.88)
- Glasersatz durch Vakuum-Hybrid-Verglasung ( $U_g$  0.47/  $U_f$  1.5/  $U_w$  0.89)

Fazit: Die Analyse zeigt, dass auch bei bestehenden älteren Isolierverglasungen durch geeignete Ertüchtigungsmassnahmen eine deutliche energetische Verbesserung erzielt werden kann. In Abhängigkeit des Heizungersatzes soll die geeignete Sanierungsoption gewählt werden.



### c) Einschätzung weiteres Vorgehen für die mit Low-E beschichteten Wärmeschutzverglasungen mit zusätzlicher Messung des Gasfüllgrads

Bei neueren Wärmeschutzverglasungen ist der potenzielle Mehrwert einer Ertüchtigung geringer und muss im Einzelfall sorgfältig gegen den erforderlichen Aufwand abgewogen werden. Hierfür dient insb. das Messen des Gasfüllgrads, um die Sanierungsvariante festzulegen.

Bei den Fenstern mit einem Gasfüllgrad > 70% kommen folgende Ertüchtigungsvarianten in Frage:

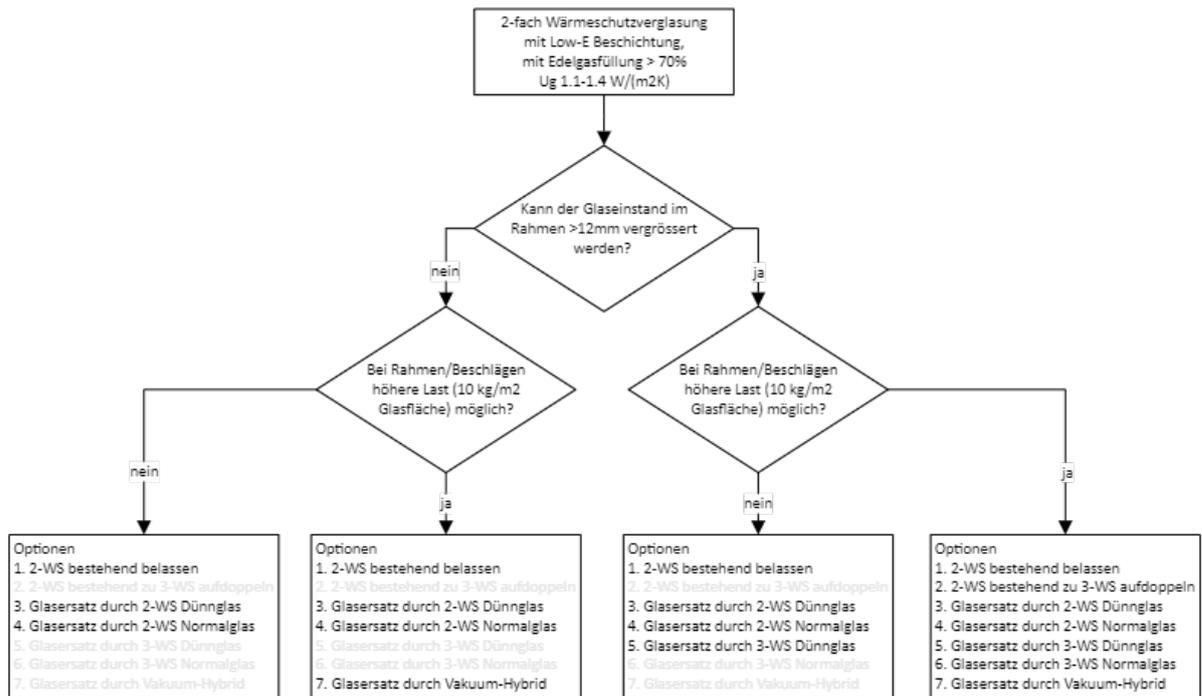


Abbildung 71: Ertüchtigungsvarianten für mit Low-E beschichtete Wärmeschutzverglasungen (INEB)

Es stehen folgende Sanierungsvarianten zur Verfügung:

- 2-WS bestehend lassen ( $U_g$  1.3/  $U_f$  1.4/  $U_w$  1.6)
- 2-WS bestehend zu 3-WS Glas aufdoppeln ( $U_g$  0.7/  $U_f$  1.4/  $U_w$  1.0)
- Glasersatz durch 2-WS Dünnglas ( $U_g$  1.1/  $U_f$  1.4/  $U_w$  1.3)
- Glasersatz durch 2-WS Normalglas ( $U_g$  1.1/  $U_f$  1.4/  $U_w$  1.1)
- Glasersatz durch 3-WS Dünnglas ( $U_g$  0.6/  $U_f$  1.4/  $U_w$  0.86)
- Glasersatz durch 3-WS Normalglas ( $U_g$  0.6/  $U_f$  1.4/  $U_w$  0.86)
- Glasersatz durch Vakuum-Hybrid-Verglasung ( $U_g$  0.47/  $U_f$  1.4/  $U_w$  0.87)

Wenn das Glas weniger als 70% Gasfüllgrad enthält, dann wird eine Glasaufdopplung nicht empfohlen, sondern ein Glasersatz oder die Variante Gläser trennen und neu fassen.

### d) Dokumentation

Die Ergebnisse können im Materialpass Stufe P2 (siehe Kapitel 6.2) dokumentiert werden.



### 6.1.4 Messtechnische Beurteilung und Berechnungen (3. Schritt)

Als Grundlage für die Baubewilligung oder einen Einzelbauteilnachweis können weitere Messungen und Berechnungen hilfreich sein, um folgende Grössen zu eruieren:

- U-Wert des Fensters inkl. Ertüchtigungsvariante
- g-Wert für die solaren Gewinne
- Ev. Schalldämmwert
- Kostenschätzung

#### a) Messungen

Um genauere Werte anzugeben, lohnt es sich folgende Messungen durchzuführen:

- Gasfüllgrad bei Wärmeschutzverglasung messen
- U-Wert Messungen der Verglasung

#### b) Berechnungen

- U-Wert des Fensters berechnen (Angaben der Einzelkomponenten U-Wert Glas und U-Wert Rahmen und  $\Psi_g$  -Wert Abstandhalter inkl. Abmessungen)  
Ertüchtigungsvarianten ebenfalls berechnen
- g-Wert abschätzen oder messen  
Schalldämmwert berechnen
- Kostenabschätzung

#### c) Einschätzung Sanierungsvariante

Einschätzung welche Sanierungsvariante zu favorisieren ist.

#### Hilfstools

- Berechnung von U-Werten und indirekten Treibhausgasemissionen
- Kostenabschätzung

#### d) Dokumentation

Die Ergebnisse können im Materialpass Stufe P3 (siehe Kapitel 6.2) dokumentiert werden.



## 6.2 Materialpass

Im Folgenden wird ein Konzept für einen standardisierten Materialpass vorgestellt, der als Dokumentations- und Bewertungsinstrument für die Ertüchtigung und Wiederverwendung bestehender Fenster dienen soll. Das Konzept basiert auf den Erkenntnissen des Forschungsprojekts und bedarf der weiteren Abstimmung mit relevanten Behörden und Branchenverbänden.

Der Materialpass für Fenster ist ein standardisiertes Dokumentationsinstrument, das die wesentlichen technischen, energetischen und materialbezogenen Eigenschaften eines Fensters erfasst und nachvollziehbar dokumentiert. Er dient als Grundlage für Entscheidungen über Ertüchtigung und Wiederverwendung sowie als Nachweis für Baubewilligungsverfahren.

### 6.2.1 Ziel und Zweck eines Materialpass

Ziel und Zweck des Materialpasses

- Schaffung einer verlässlichen Dokumentation für die technische Bewertung von Fenstern
- Standardisierte Erfassung relevanter Parameter für Baubewilligungsverfahren
- Nachvollziehbarkeit der Fensterhistorie und durchgeführter Ertüchtigungsmassnahmen
- Unterstützung der Qualitätssicherung bei der Fensterwiederverwendung
- Förderung der Kreislaufwirtschaft durch verbesserte Transparenz und Informationsverfügbarkeit

Der Materialpass muss als verlässliches Dokumentationsinstrument bestimmte Anforderungen erfüllen. Zentrale Anforderungen sind:

Formale Anforderungen:

- Erstellung durch zertifizierte Fachpersonen mit entsprechender Qualifikation
- Dokumentation nach standardisierten Verfahren und Prüfmethode
- Nachvollziehbare Kennzeichnung der Informationsquellen (Messungen, Dokumente, visuelle Prüfung)
- Eindeutige Identifikation des dokumentierten Fensters

Inhaltliche Anforderungen:

- Vollständige Erfassung aller baurechtlich relevanten Parameter
- Dokumentation des technischen Zustands und der Leistungsfähigkeit
- Bezugnahme auf aktuelle Normen und Standards
- Beschreibung durchgeführter Ertüchtigungsmassnahmen

Für die praktische Anwendung ist der Materialpass in drei Detaillierungsstufen aufgebaut:

P1: Grundlegende Ersterfassung im Rahmen der Kurzanalyse und Ersteinschätzung

P2: Vertiefte technische Dokumentation nach Zusatzabklärungen

P3: Vollständige Dokumentation mit allen für die Baubewilligung erforderlichen Nachweisen

Die folgenden Abschnitte beschreiben die im Materialpass zu erfassenden Eigenschaften und deren Bedeutung zu den verschiedenen Prozesszeitpunkten.

Die Spalten «Parameter» und «Beschreibung» beschreiben den entsprechenden Parameter, zu welchem in den Spalten «Wert» die entsprechenden Eigenschaften eingetragen werden können, gemäss dem Beispiel. Beim Typ des Wertes wird zwischen folgenden Wertetypen unterschieden:



- Zugewiesener Wert (ID, Verfügbarkeit)
- Typologischer Wert: Wert, welcher von einer charakteristischen Eigenschaft herrührt
- Messwert: Wert, welcher gemessen werden kann oder tabellarisch ermittelt wurde. Das Vorgehen ist (sofern abweichen von der Wegleitung) hinreichend zu dokumentieren.
- Dokumentation: Wert, welcher aus der Originaldokumentation stammt oder am Fensterstempel abgelesen werden kann

Als Grundlage für die Baubewilligung sind vor allem die Abmessungen, der Glasanteil, der  $U_w$ -Wert und der  $g$ -Wert der Verglasung relevant. Allenfalls muss auch der Schalldämmwert  $R_{w,tr}$  berücksichtigt werden. Folgende Hinweise hierzu:

- Der aktuelle  $U_w$ -Wert soll als Näherung aus dem gemessenen  $U_g$ -Wert und den originalen  $U_r$  und  $\Psi_g$ -Werten zusammengesetzt werden.
- Der  $g$ -Wert der Verglasung soll unverändert übernommen werden, ausser im Falle optisch klar sichtbarer Trübungen.
- Für den Schalldämmwert  $R_{w,tr}$  kann angenommen werden, dass dieser unverändert oder schlechter als der ursprüngliche Wert ist. Dies hängt vor allem vom Zustand der Dichtungen ab.

### 6.2.2 Steckbrief

Als schnelle Übersicht soll zu Beginn des Materialpasses die wichtigsten Eigenschaften des Fensters als Steckbrief dargestellt werden. Folgende Eigenschaften fallen hierunter:

- Menge gleicher Fenster und Fenster derselben «Familie»
- Preis
- Fensterart (inklusive Flügelart und -anzahl)
- Besondere Elemente
- Zustand (neuwertig, gebraucht) und kurzer Beschrieb
- Gewicht
- Rahmenaussenmass
- Rahmenmaterial
- Anzahl Scheiben
- Glasart und Beschichtung
- Beschlagstyp

### 6.2.3 Schnelltest Re-Use (direkte Ausschlusskriterien, keine weitere Aufnahme notwendig)

In der folgenden Übersicht sind die direkten Ausschlusskriterien aufgeführt, welche eine weitere Aufnahme eines Fensters oder einer Fenstergruppe obsolet machen.

Ausschlusskriterien

- Zustand: sichtbare starke Schäden wie z.B. Risse, Brüche, blinde Scheiben, verzogene Rahmen, gebrochene Scharniere.
- Schadstoffbelastung, die sich nicht einfach entfernen lässt (basierend auf Schadstoffbericht)
- Mangelnde Isolierung (z. B. Einfachverglasung)?
- Demontierbarkeit nicht gegeben (falls Fenster ausgebaut werden soll)?

Ja	Nein

### 6.2.4 Datenbezug im Materialpass

Im Materialpass soll jeweils klar deklariert werden, auf welchen Zeitraum und auf welche Nutzung sich die Angaben beziehen. Folgende Kriterien werden hierzu unterschieden:

- Bestandsgebäude



- Quellobjekt (Re-Use)
- Zielprojekt (Re-Use)
- Bauteilbörse (Re-Use)

### 6.2.5 Skizze

In der abgebildeten Skizze in Abbildung 72 sind die wichtigsten Konstruktionsmasse aufgeführt. Diese kommen auch in der Übersichtstabelle des Materialpasses vor (siehe Tabelle 31).

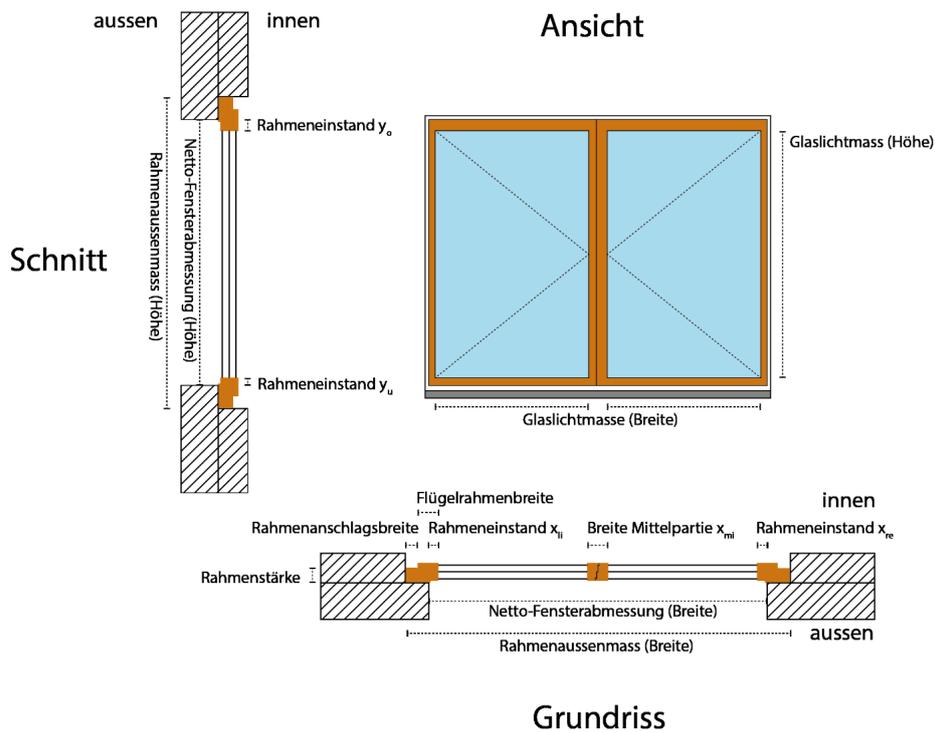


Abbildung 72: Übersicht über die Konstruktionsmasse im Materialpass



## 6.2.6 Tabelle aller Eigenschaften

Tabelle 31 zeigt einen Grossteil der Eigenschaften, die in einem ausgefüllten Materialpass vorkommen können. In den Spalten P1 (Prüfung 1), P2 (Prüfung 2) und P3 (Prüfung 3) ist dabei aufgeführt, wie wichtig eine spezifische Eigenschaft zu einem spezifischen Prozesspunkt ist (vgl. Wegleitung). K steht hierfür für «kann», S für «sollte» und M für «muss».

Parameter	Beschreibung	Wert (Einheit)	Wert (Typ)	P1	P2	P3
<b>Grundinformationen</b>						
<b>GUID (eindeutige ID)</b>	Globally Unique Identifier		Zugewiesener Wert	K	K	K
<b>Menge (gleiche Fenster)</b>	Menge an verfügbaren gleichen Fenstern	Stückzahl	Dokumentation	M	M	M
<b>Menge (Fensterfamilie)</b>	Menge an verfügbaren Fenstern derselben «Fensterfamilie»	Stückzahl	Dokumentation	M	M	M
<b>Preis</b>	pro Stück	CHF	Zugewiesener Wert	K	S	S
<b>Fensterart (inklusive Flügelart und -anzahl)</b>	z. B. einflügeliges Drehkipfenster, zweiflügeliges Kipfenster, dreiflügeliges Drehfenster, Schallschutzfenster etc.	Text	Typologischer Wert	M	M	M
<b>Besondere Elemente</b>	z. B. Sprossen mit allen Massen und Eigenschaften durchgehend oder aufgeklebt, Oberlicht mit allen Massen oder Katzendurchgang mit allen Massen	Text	Typologischer Wert	S	S	S
<b>Allgemeiner Beschreibung</b>	Für Angaben, welche nicht durch andere Datenfelder abgedeckt werden	Text	Typologischer Wert	K	K	K
<b>Herkunft und Ist-Zustand</b>						
<b>Zustand (Kategorie)</b>	Neuwertig, Gebrauchte	Auswahl	Typologischer Wert	M	M	M
<b>Zustand (Beschrieb)</b>	Beschreibung des Zustands einzelner Teile, optische Einschätzung (z. B. Rahmen, Glas und Dichtungen)	Text	Typologischer Wert	M	M	M
<b>Herstellungsdatum</b>	Monat, Jahr ( YYYY / MM)	Auswahl	Dokumentation	S	S	S
<b>Herstellungsfirma</b>		Text	Dokumentation	S	S	S
<b>Modellname oder -nummer</b>		Text	Dokumentation	S	S	S
<b>Verfügbarkeitszeitraum</b>	YYYY / MM bis YYYY / MM	Monat, Jahr bis Monat, Jahr	Zugewiesener Wert	S	S	S
<b>Verortung im Quellobjekt</b>	Herkunft des Fensters (Gebäude)	Text / Plan	Dokumentation	K	K	K
<b>Historie</b>	Welche Instandsetzungen sind daran bereits erfolgt?	Text / Plan	Dokumentation	K	K	K
<b>Demontierbarkeit</b>	Relevant vor Ausbau,	Text	Typologischer Wert	M	-	-



<b>Lagerung</b>	Falls eingelagert	Text	Typologischer Wert	S	-	-
<b>Potenzial für hochwertige Anschlussnutzung</b>	z.B. kein Drahtglas, zu geringer U-Wert, Konformität mit gesetzlichen Vorgaben	Auswahl ja/nein + Text	Typologischer Wert	S	M	M
<b>Weitere Angaben zum Fenster</b>						
<b>Anzahl Dichtungsebenen</b>	2, 3	Zahl	Typologischer Wert	M	M	M
<b>Dichtungsmaterial</b>	z. B. TPE, Silikon, EPDM	Text	Typologischer Wert	K	S	S
<b>Beschlagstyp (Fensterband)</b>	Beschreibung (z. B. Espagnoletten-Beschläge) Sind die Beschläge für Re-Use geeignet (z. B. in Bezug auf den maximalen Belastungswert)?	Text	Typologischer Wert	S	S	S
<b>Fensteranschlag</b>	rechts, links, beidseitig	Text	Typologischer Wert	S	S	S
<b>Fenstergriff</b>	Beschreibung	Text	Typologischer Wert	S	S	S
<b>Wetterschenkel</b>	xx mm und allenfalls Beschrieb	Text + Messwert (mm)	Messwert / typologischer Wert	K	S	S
<b>Gewicht</b>	wenn ausgebaut	kg	Messwert	K	M	M
<b>Flächengewicht</b>	Gewicht pro Fläche (Lichtmass im verbauten Zustand)	kg/m <sup>2</sup>	Messwert	K	K	K
<b>Konstruktionsmasse Rahmen und Glas</b>						
<b>Rahmenaussemasse</b>	Breite, Höhe	mm	Messwert	S	M	M
<b>Netto-Fensterabmessung</b>	Breite, Höhe	mm	Messwert	S	-	-
<b>Glaslichtmass</b>	Glasbreite, Glashöhe	mm	Messwert	M	M	M
<b>Rahmenstärke (ausser bei verbauten Festverglasungen)</b>	siehe Skizze	mm	Messwert	M	M	M
<b>Rahmenanschlagsbreite</b>	siehe Skizze	mm	Messwert	K	M	M
<b>Flügelrahmenbreite</b>	siehe Skizze	mm	Messwert	K	M	M
<b>Rahmeneinstand links und rechts <math>x_{li}</math>, <math>x_{re}</math></b>	siehe Skizze	mm	Messwert	K	M	M
<b>Breite der Mittelpartie <math>x_{mi}</math></b>	siehe Skizze	mm	Messwert	K	M	M
<b>Rahmeneinstand unten <math>y_u</math></b>	siehe Skizze	mm	Messwert	K	M	M
<b>Rahmeneinstand oben <math>y_o</math></b>	siehe Skizze	mm	Messwert	K	M	M
<b>Rahmenverbreiterung</b>	Beschreibung, Lage, Mass	Text + Messwert (mm)	Messwert	K	K	K
<b>Glasfalztiefe</b>	Mass	mm	Messwert	K	S	S
<b>Glasanteil</b>	Berechnung	%-Wert	Berechnet aus Messwert	K	K	K



Weitere Abmessungen	diverse	Text	Messwert	K	S	K
<b>Eigenschaften des Rahmens</b>						
Rahmenmaterial	z. B. Kunststoff, (Eichen-, Fichten-, ...) Holz, Holz-Aluminium, Aluminium, Stahl	Text	Text	M	M	M
Thermische Trennung (bei Aluminium- und Stahlrahmen)	Falls thermische Trennung vorhanden, Breite der Trennung angeben	Text + Messwert (mm)	Text + Messwert (mm)	-	S	S
Grundierung Rahmen	z. B. Produktname	Text	Text	-	K	K
Anstrich Aussen-seite	Zustand und Farbe	Text	Text	M	M	M
Anstrich Innenseite	Zustand und Farbe	Text	Text	M	M	M
<b>Eigenschaften der Verglasung</b>						
Anzahl Scheiben	Einfachverglast, zweifachverglast, dreifachverglast	Auswahl	Typologischer Wert	M	M	M
Gesamtstärke Verglasung*	28 mm Dicke der IV-Einheit	mm	Messwert	M	M	M
Glasaufbau*	z. B. 4/16/4 oder 4/18/4/18/4	Zahl + /	Messwert	M	M	M
Füllung	Luft, Edelgas (Ar, Kr, Xe), SF <sub>6</sub>	Auswahl	Dokumentation	S	S	S
Glasart und Beschichtung**	Wärmeschutz / Sonnenschutz / Schallschutz / Sicherheitsglas / Vakuum-Isolierglas / Isolierverglasung / blendfrei / schmutzabweisend / selbstreinigend / intelligentes Glas	Text	Typologischer Wert	S	M	M
Gasfüllgrad bei Herstellung		%-Wert	Dokumentation	-	K	K
U <sub>g</sub> -Wert bei Herstellung		x.x W/(m <sup>2</sup> K)	Dokumentation	K	S	S
g-Wert bei Herstellung		%-Wert	Dokumentation	-	K	K
Lichttransmission τ <sub>v</sub>		%-Wert	Dokumentation	-	K	K
Abstandhalter	Material, Beschreibung	Text	Typologischer Wert	S	M	M
Asbestfreiheit	Ist der Fensterkitt asbesthaltig (vgl. [79])? Prüfung notwendig? Prüfung noch ausstehend?	Text	Typologischer Wert	M	M	M
Beschreibung	z. B. vulkanisierte Ecken, satiniert, geätzt, getönt, beklebt	Text	Typologischer Wert	S	S	S
<b>Ursprüngliche Thermische Daten</b>						
Wärmedurchgangskoeffizient Glasrand Ψ <sub>g</sub>		x.x W/(m K)	Typologischer Wert	-	S	S
U <sub>r</sub> -Wert gemäss SIA 331 bei Herstellung		x.x W/(m <sup>2</sup> K)	Dokumentation	-	S	S
U <sub>w</sub> -Wert gemäss SIA 331 bei Herstellung	Referenzfenstergrösse	x.x W/(m <sup>2</sup> K)	Dokumentation	-	S	S



<b>Energieäquivalenter U-Wert <math>U_{w,eq}</math> bei Herstellung</b>	Berechnung gemäss [80]	x.x W/(m <sup>2</sup> K)	Dokumentation	-	K	K
<b>Gemessene Thermische Daten (Ist-Zustand)</b>						
<b>Gasfüllgrad gemessen</b>		%-Wert	Messwert	-	-	S
<b><math>U_g</math>-Wert gemessen</b>		x.x W/(m <sup>2</sup> K)	Messwert	-	-	S
<b><math>U_w</math>-Wert berechnet (siehe Anhang 1.5)</b>		x.x W/(m <sup>2</sup> K)	Berechnet aus Messwert	-	-	S
<b>Energieäquivalenter U-Wert <math>U_{w,eq}</math> berechnet</b>		x.x W/(m <sup>2</sup> K)	Berechnet aus Messwert	-	-	S
<b>Prüfnachweise</b>						
<b>Energieeffizienzklasse</b>	gemäss [80]	Klassen A-G	Dokumentation	-	K	K
<b>Luftdurchlässigkeit</b>	gemäss EN 12207	Klassen 1-4	Dokumentation	-	-	K
<b>Schlagregendichtheit</b>	gemäss EN 12208	Klassen 0-9A, 0-7B oder Exxx	Dokumentation	-	-	K
<b>Widerstandsfähigkeit gegen Windlast</b>	gemäss EN 12210	Klassen A1-A5, B1-B5, C1-C5 und AExxxx, BExxxx und CExxxx	Dokumentation	-	-	K
<b>Schalldämmwert <math>R_{w,tr}</math> (C; <math>C_{tr}</math>)</b>		dB	Dokumentation	S	M	M
<b>Resistance Class</b>	gemäss EN 1627	RC1 bis RC6	Dokumentation	-	-	K
<b>CO<sub>2</sub>-Bilanzierung</b>						
<b>Einsparpotenzial</b>	Basierend auf KBOB-Werten	g CO <sub>2</sub> eq	Berechnet aus Messwert	-	-	K
<b>Montage</b>						
<b>Montagebeschrieb</b>	Kurzer Beschrieb, wie Montage erfolgen soll	Text	Typologischer Wert	-	S	S
<b>Detailschnitte &amp; Bilder</b>						
<b>Fotodokumentation</b>	generell	Bilddatei	Aufnahme	M	M	M
<b>Foto Fensterstempel</b>		Bilddatei	Aufnahme	S	S	S
<b>Schnitte / Skizzen</b>		Bilddatei / PDF	Dokumentation	-	S	S
<b>Digitale Daten</b>						
<b>Digitale Repräsentation</b>	Falls verfügbar	.dwg / .ifc oder PDF vom Detailaufbau	Aufnahme oder Dokumentation	-	S	S

Tabelle 31: Übersicht über die im Materialpass vorkommenden Parameter



## 6.3 Erkenntnisse für die Konstruktion von neuen Fenstern

### 6.3.1 Einführung

Die Reparierbarkeit von Fenstern bezieht sich auf die Möglichkeit, beschädigte oder abgenutzte Komponenten eines Fensters zu reparieren oder auszutauschen, ohne das gesamte Fenster ersetzen zu müssen. Gute Reparierbarkeit verlängert die Lebensdauer von Fenstern und trägt zur Reduktion von Abfall und Ressourceneinsatz bei.

Die Kreislauffähigkeit von Fenstern beschreibt die Fähigkeit, am Ende ihrer Nutzungsdauer ganz oder teilweise wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt zu werden. Dies umfasst die einfache Demontage, die Wiederverwendung und das Recycling der Fensterkomponenten.

Grundsätzlich sind Fenster sowohl für die Wiederverwendung als auch für das Zerlegen gut geeignet. Auch für Fenster gelten die allgemeinen Empfehlungen für rückbaubare Konstruktionen wie

- Schraub- oder "Klick"-Verbindungen bevorzugen
- Den Einsatz von Verbundmaterialien minimieren
- Verklebungen vermeiden, an Stellen, an denen sie unvermeidbar sind, trennbar gestalten
- Trennbare Schnittstellen für die Montage vorsehen
- Bereitstellung von Anleitungen zur Demontage und Zerlegung

Für neue Fenster ist es empfehlenswert, über einen RFID-Chip sämtliche relevante Daten sowohl für die Einschätzung des neuen Produktes (z.B. CO<sub>2</sub>-Emissionen des Produkts für die Bilanz bei einer Änderung als auch die Inventarisierung (Verkauf, Anbieten auf eine Bauteil Plattform, etc.) als auch für den künftigen Gebrauch verfügbar zu machen. Der Vorteil des RFID-Chips gegenüber einem aufgedruckten QR-Code ist die zu erwartende Lebensdauer. Ein QR-Code ist gedruckt und oberflächlich, d.h. über die erwartete Lebensdauer des Fensters stark gefährdet. Das Glas sollte idealerweise (ggf. zusätzlich) einen getrennten, eigenen RFID-Chip haben, da es im Laufe der Lebensdauer des Rahmens durchaus ersetzt werden kann, z.B. wegen Bruch.

### 6.3.2 Produkt Fenster

#### Allgemeines

Die Reduktion des Materialeinsatzes ist anzustreben, z.B. die bei der Glasstärke. Beim Glas ist auf einen thermisch guten Abstandhalter zu achten («Warme Kante», kein Metall).

Ersatzteile sind möglichst lange vorzuhalten. Dafür ist anzustreben, mit möglichst wenig unterschiedlichen Teilen in der Produktpalette auszukommen.

#### Reparatur bzw. Wartung

Die Langlebigkeit des Produktes „Fenster“ kann durch eine gute Wartungs- bzw. Reparierbarkeit positiv beeinflusst werden. Insbesondere bei der Ausgestaltung von Dichtungen und Beschlägen ist dies zu berücksichtigen. Ersatzteile sollen mindestens über einen Zeitraum von 20 Jahren verfügbar sein.

#### Rücknahme, Zerlegen und Rezyklieren

Hersteller sollten ein Rücknahmesystem entwickeln, gebrauchte Fenster falls möglich aufbereiten oder die Fenster in Einzelteile zerlegen und recyceln. Einige Herstellerfirmen machen das bereits.

### 6.3.3 Einbau

Bevorzugt mit vorgefertigten Schürzen, Leisten und Kompri-Bändern arbeiten, grundsätzlich auf den Einsatz von Bauschäumen verzichten (siehe auch Eco-Richtlinien).



## 7 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Studie zeigt auf, dass sich der  $U_w$ -Wert von Fenstern in der Schweiz in den letzten Jahrzehnten massiv verbessert hat, insbesondere durch Innovationen in der Glastechnologie wie die 3-fach-Wärmeschutzverglasung. Gerade bei Gebäuden, die älter sind als 40 Jahre, lassen sich beeindruckende Energieersparnisse erzielen durch eine Fensterertüchtigung. Diese können rasch und effizient durchgeführt werden und leisten damit auch einen wichtigen Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor in der Schweiz.

Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von Fenstern von 30 Jahren erzielte die Fensterertüchtigung über eine Glasaufdopplung die geringsten Treibhausgasemissionen für Erstellung und Betrieb. Die Ergebnisse hängen stark ab vom jeweiligen Wärmeerzeuger (siehe Abbildung 41). Es besteht also eine wichtige Abhängigkeit zwischen Fensterertüchtigung und eingesetzter Energie, wobei elektrische Wärmepumpen, die mit Schweizer Ökostrom betrieben werden, die geringsten Treibhausgasemissionen verursachen.

Die Studie zeigt, dass der übliche Fensterersatz nach 30 Jahren bei einer ganzheitlichen Betrachtung generell hinterfragt werden muss. Viele Fenster mit Isolier- oder Wärmeschutzverglasung können ertüchtigt werden. In vielen Fällen kann eine einfache Glasaufdopplung oder ein Glasersatz die Energieeffizienz markant verbessern, gleichzeitig schneiden diese Varianten bezüglich den Treibhausgasemissionen von Erstellung und Betrieb und auch aus ökonomischer Sicht oft besser ab als der Fensterersatz.

Um Fenster zu ertüchtigen, braucht es dafür ein systematisches Vorgehen, das in der Wegleitung beschrieben ist. Dabei ist das Vorgehen für die Ertüchtigung von Isolierverglasungen und Wärmeschutzverglasungen leicht verschieden. Bei Wärmeschutzverglasungen lohnt es sich beispielsweise, mit einem Messgerät den Gasfüllgrad zu bestimmen, um sicher zu sein, dass der Randverbund noch dicht ist. Am Schluss jeder Fensterertüchtigung soll das Fenster auch einen Materialpass erhalten, in dem die wichtigsten Eigenschaften des Fensters als Grundlage für eine Baubewilligung dokumentiert sind.

Rund 85 % der Fenster landen heute in der Deponie. Um den Ressourcenverbrauch zu optimieren und Kreisläufe zu schliessen haben einige Fensterfirmen begonnen, Fenster zurückzunehmen und fachgerecht zu recyceln. Diese Initiative sollte noch weiter zu einem zirkulären Geschäftsmodell ausgebaut werden, indem auch gebrauchte Fenster ertüchtigt und wiederverwendet werden.

Die strengeren Anforderungen der Normen der letzten Jahre haben den Ressourceneinsatz bei Fenstern markant erhöht. So wurde der  $U$ -Wert von bestehenden Fenstern mit der MuKE 2014 die Einzelbauteilgrenzwerte von 1.3 auf 1.0  $W/(m^2K)$  verschärft. Damit erfüllen manche ertüchtigten Fenster die Vorgabe nicht und es braucht einen Systemnachweis als Grundlage für die Baubewilligung. Ausserdem wird heute auf Grund der SIGAB Richtlinie viel öfter Sicherheitsverglasungen verlangt, was ebenfalls den Ressourceneinsatz erhöht und die Ertüchtigung von Fenstern erschwert. Die künftige Normenentwicklung braucht vermehrt eine Zusammenarbeit von verschiedenen Verbänden und eine ganzheitliche Betrachtung, die neue Themen wie Ressourceneffizienz und Treibhausgasemissionen in die Überlegungen miteinbeziehen.

Die vom SIA angenommene durchschnittliche Lebensdauer von 30 Jahren für Fenster (beispielsweise in der SIA 2032) bedarf der dringenden Überarbeitung. Denn die Qualität von Fenstern und Gläsern hat sich in den letzten Jahren weiter verbessert, so dass je nach Materialisierung eine Lebensdauer von bis zu 60 Jahren gegeben ist. Bei der Annahme einer verlängerten Lebensdauer verbessert sich  $CO_2$ -Bilanz massiv bei den beiden Fensterertüchtigungsmassnahmen «Fensterrenovation» und «Fensterersatz».

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde für die Berechnung von  $U$ -Werten und indirekten Treibhausgasemissionen ein Berechnungstool entwickelt, welches den positiven  $CO_2$ -Effekt pro Anzahl Jahre



Lebensdauer berechnet. Dieses Berechnungstool bietet zudem die Möglichkeit, die potenzielle CO<sub>2</sub>-Einsparung Standortabhängig zu ermitteln. Auch ein Kostenberechnungstool wurde entwickelt. Diese Tools sollen nach weiterer Prüfung über eine online-Plattform zugänglich werden.



## 8 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die erfolgreiche Implementierung erfordert das Zusammenwirken aller Akteure. Erste Beispiele zeigen, dass die Wiederverwendung von Fenstern technisch machbar und wirtschaftlich darstellbar ist.

### 8.1 Ertüchtigungsvarianten weiter erforschen

#### Auswertung von Pilotprojekten, Datensammlung erweitern

Durch ein kontinuierliches Monitoring und die Evaluation von Pilotprojekten können wertvolle Erkenntnisse für die Verbesserung von Wiederverwendungsstrategien gewonnen werden. Die Datensammlung läuft auch nach dem Projekt weiter, mit dem Ziel, einen wachsenden, differenzierten Fensterkatalog aufzubauen, der den Überblick über das Thema zeigt und die energetische Beurteilung eines konkreten Fensters in der Baupraxis ermöglicht.

#### Ertüchtigungsvarianten weiter erforschen

Die Ertüchtungsverfahren sollten optimiert werden, um die Wiederverwendung von Fenstern effizienter und nachhaltiger zu gestalten.

Die Beschläge konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht genügend untersucht werden. Sie sind jedoch ein wichtiger Erfolgsfaktor, wenn es darum geht, Fenster zu erhalten. Es würde sich lohnen, das Thema der Beschläge und deren Reparatur genauer zu untersuchen. Wie auch der Druck von Beschlägen aus dem 3D Drucker.

#### Weitere Kennzahlen für die Lebenszykluskosten ermitteln

Um die Lebenszykluskosten zu berechnen, braucht es weitere Untersuchungen beispielsweise zur Lebensdauer der gewählten Ertüchtigungsvarianten, Entwicklung der Energiekosten etc.

#### Berechnungstools weiterentwickeln und als online-Rechner anbieten

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde für die Berechnung von U-Werten und indirekten Treibhausgasemissionen ein Berechnungstool entwickelt. Interessant wären dabei auch die Resultate mit monatlichen Ökobilanzdaten von Strom. Auch ein Kostentool wurde entwickelt. Diese Tools sollen an weiteren Objekten getestet werden und dann mittels einem online-Tool publiziert werden.

#### Fensterprüfstand und standardisierte Beratung

Das INEB baut einen Fensterprüfstand auf und bietet In-situ-Messungen an. Zudem unterstützt das INEB-Fachpersonen für Abklärungen bei Fensterertüchtigungen. Die standardisierten Prüf- und Dokumentationsverfahren ermöglichen die Leistungsbeschreibung im Rahmen von Baubewilligungsverfahren.

### 8.2 Materialpass und Prüfprozess mit Behörden / SIA weiterentwickeln

#### Standardisierte Prüf- und Dokumentationsverfahren entwickeln

Mit dem SIA sollen zusammen mit den relevanten Stakeholdern standardisierte Prüf- und Dokumentationsverfahren entwickelt werden und daraus technische Spezifikationen entwickelt werden.

#### Normative Weiterentwicklung mit SIA

Die erarbeiteten Vorschläge zur Integration von Ressourceneffizienz und Treibhausgasemissionen in bestehende Normen und Zertifizierungssysteme werden in die entsprechenden Gremien eingebracht. Die Resultate sollen der Kommission für Nachhaltigkeits- und Umweltnormen wie auch der Kommission für Gebäudetechnik- und Energienormen KGE vorgelegt werden, um allfällige Anpassungen von Normen zu besprechen.



### **Materialpass mit Behörden weiterentwickeln**

Das Vorgehen und der Materialpass soll in einem weiteren Schritt mit Vertreterinnen und Vertreter der EnFK besprochen werden. Damit der Materialpass als Grundlage für die Baubewilligung benutzt werden kann.

### **Digitale Materialpässe entwickeln**

Die Entwicklung digitaler Tools für Materialpässe und Dokumentation kann die Rückverfolgbarkeit und Wiederverwertung von Bauelementen erleichtern.

## **8.3 Ertüchtigungen von Fenster in der Bauwirtschaft etablieren**

### **Implementierung von Recycling- und Kreislaufstrategien in der Bauwirtschaft**

Um die Zirkularität und insbesondere das Thema Wiederverwendung (Re-Use) von Fenstern zu erhöhen, braucht es Pilotprojekte, die dieser Frage nachgehen. Ziel könnte es sein, ein Netzwerk aufzubauen, das Know-How aufbauen kann. Dafür braucht es folgende Akteure:

- Fensterhersteller für die technische Aufbereitung
- Bau- und Abbruchunternehmen für die Beschaffung
- Architekten und Planer für die Vermittlung und Integration in Bauprojekte
- Baustoffhändler für Lagerung und Vertrieb
- Prüfinstitute für Qualitätssicherung

### **Zusammenarbeit mit Fensterverbänden**

Es wird das Gespräch mit den Fensterverbänden geführt mit der Idee, bei den Mitgliedern eine Geschäftsidee mit «product as a Service» anzuregen. Dies bedeutet, dass eingebaute Fenster alle 10 Jahre gewartet werden und wenn nötig beispielsweise eine Fensterertüchtigung stattfinden kann.

Die Fensterbranche könnte ein Sammelsystem für Fenster etablieren, damit bestehende Fenster möglichst ertüchtigt und wiederverwendet werden oder falls sie am Ende der Lebensdauer sind, professionell in die Einzelteile zerlegt werden, um sie zu recyceln.

Gut wäre es auch, eine Prüfstelle für Re-Use Fenster zu implementieren, die basierend auf technischen Richtlinien Re-Use Fenster prüft und dokumentiert, damit die geprüften Fenster wieder eingesetzt werden können.

### **Automatisierte Glasaufdopplung**

Es sollen automatisierte Verfahren entwickelt werden, mit denen rasch Glas-Aufdopplungen erfolgen können.

## **8.4 Anpassungen von baurechtlichen Vorgaben**

Die Anpassung baurechtlicher Vorgaben soll die Wiederverwendung von Fenstern erleichtern und somit nachhaltiges Bauen fördern.

Re-Use-Kriterien sollten gezielt in Ausschreibungen integriert werden, um die Wiederverwendung von Bauelementen zu unterstützen.

Finanzielle Anreize, wie Förderprogramme, können dazu beitragen, die Nutzung gebrauchter Fenster wirtschaftlich attraktiver zu machen.

## **8.5 Aus- und Weiterbildung**

Aus- und Weiterbildung bei allen beteiligten Akteuren verbessern.



## 9 Publikationen

Das Projekt wurde im Rahmen folgender Tagungen und Anlässe präsentiert und publiziert.

- Klimafestival für die Bauwende, Projektpräsentation und Workshop, Berlin, 3. November 2022
- Nachhaltigkeitswoche FHNW 2023, Projektpräsentation, Workshop und Ausstellung, Muttenz 20.-23. März 2023
- Swiss Green Economy Symposium, Innovationsforum Kreislaufwirtschaft und Bauen, Posterpräsentation, Winterthur, 7. September 2023
- HABG Jahresanlass Alumni, Projektpräsentation, FHNW Muttenz, 23. November 2023
- 5. Runder Tisch Kreislaufwirtschaft, Fachvortrag Projektpräsentation, Roche, Basel, 22. November 2023
- Fachtagung Nachhaltiges Bauen 2024, Fachvortrag Projektpräsentation, Winterthur, 21. März 2024
- LOOP / Pool Architekten, Ausstellung Stories of Re-Use, rethink materials kollektiv, Vernissage, Fachvortrag Zürich 16. Mai 2024
- Brenet Statusseminar 2024, Kurzvortrag Projektpräsentation, Brugg-Windisch, 27. August 2024
- Forum Energie Zürich UpToDate, Fachvortrag Projektpräsentation, Online, 23. September 2024
- Windays 2025, Bern, Fachvortrag Projektpräsentation und Podiumsdiskussion, 3. April 2025



## 10 Literaturverzeichnis

- [1] Metallbau Magazin, "Fenster- und Türenbranche," *metallbau*, Nov. 2015. Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: [https://www.metallbau-magazin.de/artikel/mb\\_Fenster-\\_und\\_Tuerenbranche-2453612.html](https://www.metallbau-magazin.de/artikel/mb_Fenster-_und_Tuerenbranche-2453612.html)
- [2] PVCH - Arbeitsgemeinschaft der Schweizer PVC-Industrie, "Verwertung." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://pvch.ch/Wissen/Recycling>
- [3] J. Souviron, G. van Moeseke, and A. Z. Khan, "Analysing the environmental impact of windows: A review," Aug. 15, 2019, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106268.
- [4] J. P. A. S. B. W. Christoph Geyer, "Energetische Sanierung historisch wertvoller Fenster," 2012.
- [5] F. L. E. M. Hilde Lerner, "Leitfaden Fenstersanierung," 2009. Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: [https://bauxund.at/wp-content/uploads/2018/10/2010bauXundStudie\\_Oeko-KaufWien\\_LeitfadenFenstersanierung\\_\\_behindertengerecht.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://bauxund.at/wp-content/uploads/2018/10/2010bauXundStudie_Oeko-KaufWien_LeitfadenFenstersanierung__behindertengerecht.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [6] *Bundesgesetz über den Umweltschutz*. Bern: Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft, 2025. Accessed: Mar. 25, 2025. [Online]. Available: [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122\\_1122\\_1122/de#tit\\_1/chap\\_5](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/de#tit_1/chap_5)
- [7] SIA, *SIA 2032:2020 - Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden*. 2020. Accessed: Sep. 16, 2024. [Online]. Available: <https://shop.sia.ch/normenwerk/architekt/sia%202032/d/2020/D/Product>
- [8] "KBOB, ecobau Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1: 2022, Version 6.2," 2024.
- [9] Ramseier, Stolz, and Frischknecht, "Ökobilanz von Holztüren und Holzfenstern." [Online]. Available: [www.infoline.energieschweiz.ch](http://www.infoline.energieschweiz.ch)
- [10] GreenTEG AG, "gSKIN Anwendungsbeschreibung U-Wert Messung bei Fensterglas," 2015.
- [11] greenteg, "greenteg U-Wert Messgeräte," <https://www.greenteg.com/de/uval-gt-building>," 2024.
- [12] Sparklike Oy, "Sparklike Laser Portable." Accessed: Dec. 02, 2024. [Online]. Available: [https://sparklike.com/en/product/sparklike-laser-portable/?\\_gl=1\\*2ct7t4\\*\\_up\\*MQ..\\*\\_ga\\*MTY2NzI1OTM1MC4xNzI1NTQ2Mjgy\\*\\_ga\\_5YPEWNJTP2\\*MTcyNTU0NjI4MC4xLjAuMTcyNTU0NjI4MC4wLjAuMTQ1MjA1NDI0MA..](https://sparklike.com/en/product/sparklike-laser-portable/?_gl=1*2ct7t4*_up*MQ..*_ga*MTY2NzI1OTM1MC4xNzI1NTQ2Mjgy*_ga_5YPEWNJTP2*MTcyNTU0NjI4MC4xLjAuMTcyNTU0NjI4MC4wLjAuMTQ1MjA1NDI0MA..)
- [13] J. Hartikainen, K. Niiranen, and S. Oy, "Comparing Gas Measurement Methods for IGUs: Sparklike Laser & Sparklike Handheld vs. Gas Chromatography." [Online]. Available: [www.sparklike.com](http://www.sparklike.com)
- [14] E. J. van Nieuwenhuijzen, J. I. A. Tetteroo, M. van de Vliet, and E. Melet, "In situ detection of product age and argon concentration as measure of the re-use potential of insulating glass units in buildings," *Glass Structures and Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 211–233, Sep. 2023, doi: 10.1007/s40940-023-00225-0.
- [15] Kanton Aargau, "Infoblatt Vorgehen beim Fensterersatz." Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.ag.ch/media/kanton-aargau/bvu/energie/bauen-energie/broschueren/infoblatt-vorgehen-fensterersatz.pdf>
- [16] "Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n) Modello di prescrizioni energetiche dei cantoni (MoPEC) Edizione 2014, versione tedesco (Adeguamento 2018-a seguito di modifica delle norme)," 2018. [Online]. Available: [www.endk.ch](http://www.endk.ch)
- [17] SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, "SIA 180 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden," 2014.
- [18] "SIA 4001 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden – Wegleitung zur Norm SIA 180:2014," 2022.
- [19] Forum Energie Zürich FEZ, "Schalldämmung von Fenstern," 2016.
- [20] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, "SIA 358 'Geländer und Brüstungen.'"



- [21] Schweizerisches Institut für Glas am Bau, "SIGAB-Richtlinie 002: Sicherheit mit Glas - Anforderungen an Glasbauteile."
- [22] Branchenradar, "Fenster in der Schweiz." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.branchenradar.com/de/marktstudien/bauelemente-und-technik/fenster-in-der-schweiz-2024/>
- [23] K. Scholle, "Absatz von Fenstern in der Schweiz nach Rahmenmaterial im Jahr 2023," statista. Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/938690/umfrage/absatz-von-fenstern-in-der-schweiz-nach-rahmenmaterial/>
- [24] Schweizerischer Fachverband Fenster und Fassadenbranche – FFF, "Importstatistik - Daten von der Eidg. Zollverwaltung," Dec. 2023.
- [25] metall verlag, "Flachglas Schweiz Betriebe mit neuer Eigentümerin." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.metallonline.ch/de/news/flachglas-schweiz-betriebe-mit-neuer-eigentuererin>
- [26] K. Haunfelder, "Floatglas: Eigenschaften, Kosten und Hersteller." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.glaserei.org/magazin/floatglas-20224851>
- [27] ReportLinker, "Silica Sand Market Outlook 2022 - 2026." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.reportlinker.com/clp/global/90553#:~:text=Slovenia%20was%20the%20largest%20exporter,were%20the%20next%20largest%20exporters>
- [28] UNEP, "Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources," Geneva, 2019.
- [29] Institut für seltene Erden und Metalle AG, "Silicium." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/silizium/>
- [30] A. Golev, "Silica sand in focus: abundant yet critical?," Queensland Government. Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://geoscience.data.qld.gov.au/blog/silica-sand-focus-abundant-yet-critical#:~:text=Silica%20sand%20and%20lump%20silica,considerable%20distances%2C%20including%20for%20export>
- [31] M. Klingler, D. Savi, and G. Doka, "Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen – Für die Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich," *Büro für Umweltchemie, Zürich*, 2020.
- [32] Baunetzwissen, "Recycling von Glas," 2022, Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/herstellung-eigenschaften/recycling-von-glas-2445257>
- [33] S. Bessenich, "100 % recycelbar, ab auf die Deponie," Espazium. Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/kreislauf-fensterglas>
- [34] Baunetzwissen, "Isolierglas." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/funktionsglaeser/isolierglas-159107>
- [35] Chemie.de, "Krypton." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: [https://www.chemie.de/lexikon/Krypton.html#:~:text=Krypton%20\(von%20altgriech.,000\)%20in%20der%20Luft%20vor](https://www.chemie.de/lexikon/Krypton.html#:~:text=Krypton%20(von%20altgriech.,000)%20in%20der%20Luft%20vor)
- [36] Chemie.de, "Xenon." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Xenon.html>
- [37] R. Erpelding, J. Dach, C. Nied, and I. Kitzmann, "Hochwertiges Recycling von Post-Consumer-Flachglasabfällen aus dem Gebäudesektor In Baden-Württemberg," Sep. 2024.
- [38] FSC, "Die Regeln für den Wald - 10 Grundsätze weltweit." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://fsc-schweiz.ch/ueber-fsc/zehn-prinzipien/>
- [39] PEFC, "PEFC - Hintergrund und Ziele." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.pefc.ch/ueber-pefc/hintergrund-und-ziele/>
- [40] Wald Schweiz, "Zahlen und Fakten." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.waldschweiz.ch/de/wissen/schweizer-wald/zahlen-und-fakten>
- [41] BAFU, "Jahrbuch Wald und Holz," 2023.



- [42] energieheld, "Holzfenster im Überblick - Vorteile, Kosten, Renovieren." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.energieheld.ch/fenster/fensterrahmen/holzfenster>
- [43] Baunetzwissen, "Holzfenster - Anforderungen/Konstruktion." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/sicherheitstechnik/fachwissen/einbruchhemmende-bauteile/holzfenster---anforderungen-konstruktion-164736>
- [44] C. Fühapper and M. Weigl-Kuska, "Welche Schadstoffe stecken im Holzfenster?," *Glaswelt*, vol. 2023, no. 10, Oct. 2023.
- [45] BAFU, "Holzabfälle." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/abfallwegweiser-a-z/holzabfaelle.html>
- [46] Baunetzwissen, "Recycling von Holz." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/fenster-und-tueren/fachwissen/bauschaeden-sanierung/recycling-von-holz-155387>
- [47] BAFU, "Kontrolle der Qualität von Holzabfällen." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/fachinformationen/abfallpolitik-und-massnahmen/vollzugshilfe-ueber-den-verkehr-mit-sonderabfaellen-und-anderen-/umweltvertraegliche-entsorgung-von-sonderabfaellen-und-anderen-k/umweltvertraegliche-entsorgung-von-holzabfaellen/kontrolle-der-qualitaet-von-holzabfaellen.html>
- [48] Aluminium Deutschland, "Bauxit / Bauxitabbau." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.aluminiumdeutschland.de/lexikon/begriff/bauxit-bauxitabbau/>
- [49] L. Rüttinger and R. Treimer, "Fallstudien zu Umwelt- und Sozialauswirkungen der Bauxitgewinnung und weiterverarbeitung in der Boké und Kindia-Region, Guinea," 2016.
- [50] Chemie.de, "Aluminium." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: [https://www.chemie.de/lexikon/Aluminium.html#Gewinnung\\_und\\_Darstellung](https://www.chemie.de/lexikon/Aluminium.html#Gewinnung_und_Darstellung)
- [51] bauelemente bau, "Echte Kreislaufwirtschaft mit End-of-Life Aluminium." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.bauelemente-bau.eu/news/neuigkeiten/5931/echte-kreislaufwirtschaft-mit-end-of-life-aluminium.html>
- [52] D. Savi and M. Klingler, "Recycling am Bau: Quoten sagen nicht alles," *Espazium*. Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/recycling-am-bau-quoten-sagen-nicht-alles>
- [53] Michael Stacey Architects, *Aluminium Recyclability and Recycling - Towards Sustainable Cities*. 2015. [Online]. Available: [www.s4aa.co.uk](http://www.s4aa.co.uk)
- [54] Gesamtverband der deutschen Aluminiumindustrie e.V., "Aluminium im Bauwesen."
- [55] D. Paraskevas, K. Kellens, W. Dewulf, and J. R. Duflou, "Environmental modelling of aluminium recycling: A Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management," *J Clean Prod*, vol. 105, pp. 357–370, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.102.
- [56] PVCH - Arbeitsgemeinschaft der Schweizer PVC-Industrie, "Herstellung von PVC." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://pvch.ch/Wissen/Herstellung>
- [57] Veka AG, "Profilwerkstoff PVC." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: [https://stoeckli-fenster.ch/wp-content/uploads/2022/12/3\\_TDB\\_PVC\\_DE\\_2014-06.pdf](https://stoeckli-fenster.ch/wp-content/uploads/2022/12/3_TDB_PVC_DE_2014-06.pdf)
- [58] Baunetzwissen, "Kunststofffenster mit PVC-Anteil." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/fenster-und-tueren/fachwissen/materialien-werkstoffe/kunststofffenster-mit-pvc-anteil-155295>
- [59] G. Kuo, "When Fossil Fuels Run Out, What Then?" Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/>
- [60] University of Minnesota, "Halite." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://commonminerals.esci.umn.edu/minerals-g-m/halite>
- [61] Baunetzwissen, "Recycling von PVC - Forschung und Verfahrensentwicklung." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/fenster-und-tueren/fachwissen/bauschaeden-sanierung/recycling-von-pvc---forschung-und-verfahrensentwicklung-155365>



- [62] Classen Gruppe, "PVC und Umwelt - CERAMIN." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://ceramin.de/magazin/pvc-und-umwelt/#herstellung>
- [63] Baunetzwissen, "Fensterbeschläge," <https://www.baunetzwissen.de/beschlaege/fachwissen/fensterbeschlaege/allgemeines-zu-fensterbeschlaegen-150158>.
- [64] Institut Feuerverzinken, "Feuerverzinken," <https://www.feuverzinken.com/korrosionsschutz/feuerverzinken#:~:text=W%C3%A4hrend%20die%20Zinkschichtdicke%20von%20bandverzinkten,50%20und%20150%20Mikrometern%20liegen>.
- [65] Collini, "Galvanisch Verzinken."
- [66] PCC-Gruppe, "Elemente in der Erdkruste," <https://www.products.pcc.eu/de/academy/elemente-in-der-erdkruste/>.
- [67] C. und K. Dinkel, "Ökologische Beurteilung der Verwertung von Bauabfällen," 2021.
- [68] "ecobau," 2024, Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: [https://bauxund.at/wp-content/uploads/2018/10/2010bauXundStudie\\_OekoKaufWien\\_LeitfadenFenstersanierung\\_\\_behindertengerecht.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://bauxund.at/wp-content/uploads/2018/10/2010bauXundStudie_OekoKaufWien_LeitfadenFenstersanierung__behindertengerecht.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [69] ecobau, "ecoBKP 112: Abbrüche / Rückbau / Entsorgung," 2024.
- [70] ecobau, "ecoBKP 221: Fenster und Aussentüren," 2024.
- [71] ecobau, "Methodik ecobau." Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecobau.ch/de/themen/methodik-ecobau>
- [72] "Re-Win Fenster für die Ukraine, <https://re-win.ch/>," 2024.
- [73] M. Teich, C. Scherer, M. Schuster, M. Brandenstein, and M. Elstner, "Re-Use and remanufacturing of insulated glass units," *Glass Structures and Engineering*, 2024, doi: 10.1007/s40940-024-00276-x.
- [74] "Netto-Null Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich".
- [75] A. Livia Ramseier and R. Frischknecht, "Umweltkennwerte und Primärenergiefaktoren von Energiesystemen," Uster, 2022. [Online]. Available: [www.treeze.ch](http://www.treeze.ch)
- [76] SIA, "Klimapfad – Treibhausgasbilanz über den Lebenszyklus von Gebäuden," Feb. 2025.
- [77] "iwb Fernwärmemix." Accessed: Nov. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.iwb.ch/angebote/produkte/fernwaerme-klima>
- [78] Glasstec, "Glasdickenmesser, <https://glasstec.ch/product/glas-o-meter-isolierglas-dicke-messgeraet/>," 2024.
- [79] suva, "Asbesthaltiger Fensterkitt: Vorsicht bei Neuverglasungen und Rückbau." Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.suva.ch/de-ch/download/factsheets/asbesthaltiger-fensterkitt--vorsicht-bei-neuverglasungen-und-rueckbau/asbesthaltiger-fensterkitt--vorsicht-bei-neuverglasungen-und-rueckbau--33039.D>
- [80] energie schweiz, "Faktenblatt Energieetikette für Fenster." Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/effizienz/energieetiketten-und-effizienzanforderungen/freiwillige-etiketten/fenster.html>
- [81] Baubüro Insitu, "Projektdokumentation UNIT SPRINT im NEST, EMPA Dübendorf," 2021, Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.insitu.ch/projekte/320-unit-sprint-im-nest-empa>
- [82] M. Stierle, "Oldtimer, aufpoliert," Espazium. Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/fassadensanierung-buerogebaeude-basel>



## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energetische Optimierung von Fenstern im Bestand (INEB) .....	29
Abbildung 2: Auszug EnFK, Merkblatt Fenster 2021 .....	30
Abbildung 3: Berücksichtigung von Transporten bei Fenster-Re-Use in der Ökobilanzierung.....	31
Abbildung 4: Typen von Datenquellen .....	32
Abbildung 5: Nodes und Basisstation [11] .....	34
Abbildung 6: Temperaturfühler für Innen-/Aussentemperatur [11].....	34
Abbildung 7: Wärmestrom- und Oberflächentemperatur-Sensor (links) und AussenOberflächentemperatur-Sensor (rechts) [11] .....	34
Abbildung 8: Aufbau GreenTEG U-Wertmessung der Verglasung Roche Bau 29 1. OG als Beispiel (INEB).....	35
Abbildung 9: Aufzeichnung Ug-Wertmessung einer Nacht Roche Bau 29 Fenster 4 1OG als Beispiel (INEB).....	36
Abbildung 10: Sparklike Laser Portable Sensor ©Sparklike [12].....	37
Abbildung 11: Laser-Strahlengang ©Sparklike [12] .....	37
Abbildung 12: Messeinrichtung Sparklike Laser Portable® [12] .....	37
Abbildung 13: Vergleich der Szenarien.....	41
Abbildung 14: Veranschaulichung der kontinuierlichen Massnahmen in kleinen Intervallen .....	42
Abbildung 15: Darstellung der Begrifflichkeiten .....	43
Abbildung 16: Bildausschnitt zur Visualisierung der Berechnung der Lebensdauer (Indexierung) .....	44
Abbildung 17: Bildausschnitt zur Visualisierung des Berechnungs-Tools .....	45
Abbildung 18: Fachbegriffe zum Fenster [15] .....	46
Abbildung 19: Schalldämm-Masse von verschiedenen Scheibenaufbauten [19].....	48
Abbildung 20: Disposition der Datensammlung. Bild: INEB.....	49
Abbildung 21: in Datensammlung erfasste Fenster-U-Werte (U <sub>w</sub> ): Produktwerte (grau), Anforderungswerte (rot) .....	50
Abbildung 22: Timeline der Fensterrahmen in Holz mit Bereichen der Rahmen-U-Werte U <sub>f</sub> , Bild: INEB .....	51
Abbildung 23: Timeline der Fensterrahmen aus Holz-Metall mit Bereichen der Rahmen-U-Werte U <sub>f</sub> . Bild: INEB .....	53
Abbildung 24: Timeline Fensterrahmen Kunststoff mit Bereichen der Rahmen-U-Werte U <sub>f</sub> , Bild: INEB .....	55
Abbildung 25: Ug-Werte verschiedener Verglasungen, Bild: be Around GmbH.....	56
Abbildung 26: Glas-U-Werte: Datensammlung und U-Wert-Bereiche in Abhängigkeit von Emissivität und (Edel)Gasfüllung. Bild: INEB .....	57
Abbildung 27: Ug-Werte verschiedener 2-fach-Verglasungen in Abhängigkeit vom Gasfüllgrad, Bild: INEB .....	58
Abbildung 28: Treibhausgasemissionen pro m <sup>2</sup> Fensterrahmen [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ] [8] .....	65
Abbildung 29: Treibhausgasemissionen pro m <sup>2</sup> Isolierverglasung [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ] [8] .....	66
Abbildung 30: Ökologische Beurteilung von Fenstern gemäss Methodik ecobau (2024) [71] .....	67
Abbildung 31: Näher untersuchte Ertüchtigungsvarianten von Fenstern (NEB).....	72
Abbildung 32: Entscheidungsbaum zur energetischen Ertüchtigung von Fenstern mit 2-fach Isolierverglasung ohne Low-E Beschichtung (U <sub>g</sub> 2.7-3.0 W/(m <sup>2</sup> K)). Bild: INEB.....	76
Abbildung 33: Entscheidungsbaum zur energetischen Ertüchtigung von Fenstern mit 2-fach Isolierverglasung mit Low-E Beschichtung (U <sub>g</sub> 1.1-1.4 W/(m <sup>2</sup> K)). Bild: INEB. ....	76
Abbildung 34: Aufdopplung bestehender 2-fach-Isolierverglasungen zu 3-fach IV. Bild: INEB. ....	77



Abbildung 35: Ug-Werte aufgedoppelter 2-fach-Verglasungen in Abhängigkeit von der Breite der Scheibenzwischenraums. Bild: INEB. ....	77
Abbildung 36: Indirekte Treibhausgasemissionen für neue 2-fach IV, 3-fach IV und bestehende ertüchtigte 2-fach IV zu 3-fach IV. Berechnungen gemäss KBOB-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» 2009:2022 [8]. Bild: INEB. ....	78
Abbildung 37: Treibhausgasemissionen Erstellung pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten. Betrachtet wird ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) .....	80
Abbildung 38: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Erdgas. ....	82
Abbildung 39: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Fernwärme. ....	82
Abbildung 40: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten, Wärmeversorgung mittels Luft-Wasser-Wärmepumpe. ....	83
Abbildung 41: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten und Wärmeerzeuger. ....	84
Abbildung 42: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten und unterschiedliche Strommische für den Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 2.7 W/(m <sup>2</sup> K). ....	84
Abbildung 43: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten und unterschiedliche Strommische für den Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 1.6 W/(m <sup>2</sup> K). ....	86
Abbildung 44: Treibhausgasemissionen Erstellung pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten. Betrachtet wird ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) .....	88
Abbildung 45: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten und unterschiedliche Wärmeerzeuger. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 2.7 W/(m <sup>2</sup> K). ....	90
Abbildung 46: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten und unterschiedliche Strommische für den Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 2.7 W/(m <sup>2</sup> K). ....	91
Abbildung 47: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten und unterschiedliche Wärmeerzeuger. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 1.6 W/(m <sup>2</sup> K). ....	92
Abbildung 48: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Re-Use-Varianten und unterschiedliche Strommische für den	



Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe. Betrachtung für ein Normfenster (zweiflügelig, Mauerlichtmass 1.55 m x 1.15 m) mit einem U-Wert im Ist-Zustand von 1.6 W/(m <sup>2</sup> K). .....	93
Abbildung 49 Einflüsse auf Kostenrichtwerte .....	95
Abbildung 50: Test-Objekte für die Konzeption und mögliche Anwendung der Sanierungsverfahren von Fenstern. Oben links: Roche Bau 29, Quelle: Roche. Oben Mitte: Kanton Basel-Stadt Leimenstrasse 1, Quelle: google.ch. Oben rechts: Kanton Basel-Stadt Wohnheim Egliseestrasse 60, Quelle: Kanton Basel-Stadt. Unten links: ABZ Wohnsiedlung Zurlinden, Quelle: ABZ. Unten rechts: ABZ Genossenschaftswohnungen Waidfussweg 1, Quelle: ABZ. ....	97
Abbildung 51: Typenaufdruck.....	98
Abbildung 52: Fenster Typ B.....	99
Abbildung 53: Horizontalschnitt Fenster und U-Werte für Testobjekt Egliseestrasse, Ist-Zustand und Ertüchtigung «Verglasung aufdoppeln 2-fach IV zu 3-fach IV». Bild: 4B/INEB. ....	102
Abbildung 54: Horizontalschnitt Fenster und U-Werte für Testobjekt Egliseestrasse, Ist-Zustand und Ertüchtigung «Glasersatz 3-fach IV». Bild: 4B/INEB. ....	102
Abbildung 55: Horizontalschnitt Fenster und U-Werte für Testobjekt Egliseestrasse, Ist-Zustand und Ertüchtigung «Glasersatz Vakuum-IV-Hybrid». Bild: 4B/INEB. ....	103
Abbildung 56: Horizontalschnitt Fenster und U-Werte für Testobjekt Egliseestrasse, Ist-Zustand und Ertüchtigung «Fensterersatz - neue Renovationsfenster», Bild: 4B .....	103
Abbildung 57: Fenster Typ B: Ansicht innen und Massbild aussen (Netto Fenstermasse).....	104
Abbildung 58: Fenster Typ B: U-Werte (U <sub>w</sub> ) im Bestand und für 4 Ertüchtigungsvarianten .....	105
Abbildung 59: Fenster-U-Werte U <sub>w</sub> Bestand und Ertüchtigungsvarianten (Mittelwerte).....	105
Abbildung 60: Treibhausgasemissionen Erstellung der betrachteten Fenster pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten .....	107
Abbildung 61: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb der betrachteten Fenster pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Fernwärme (Basel-Stadt) .....	108
Abbildung 62: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb der betrachteten Fenster pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmepumpe und zertifiziertem Schweizer Ökostrommix .....	108
Abbildung 63: Treibhausgasemissionen Erstellung und Betrieb der betrachteten Fenster pro Quadratmeter Bauteilfläche und Jahr für verschiedene Ertüchtigungsvarianten bei der Wärmeversorgung mit Erdsonden-Wärmepumpe und europäischem ENTSO-Strommix mit einem hohen Anteil fossiler Energien.....	108
Abbildung 64: Kostenganglinie unterschiedlicher Massnahmenvarianten (Investitionen) in Kosten (CHF/m <sup>2</sup> ) .....	110
Abbildung 65: Kostenganglinie unterschiedlicher Massnahmenvarianten (Investitionen) und resultierendem Heizwärmebedarf in Kosten (CHF/m <sup>2</sup> ) .....	110
Abbildung 66: Die U-Werte der verschiedenen Test-Objekte mit 2-fach-IV Wärmeschutzverglasung zeigen, dass die Ertüchtigungsvarianten V2 bis V4 eine Verbesserung im U-Wert ergeben. ....	115
Abbildung 67: Kostenvergleich für die Objekte Egliseestrasse, Waidfussweg, Zurlinden und Leimenstrasse und das 4. Obergeschoss des Roche Bau 29.....	117
Abbildung 68: Kostenermittlung für Ertüchtigungsvarianten Roche-Gebäude 1. Obergeschoss .....	117
Abbildung 69: Ersteinschätzung von Zustand des Fensters (Rahmen, Beschläge und Verglasung) inkl. Einbausituation (INEB).....	121
Abbildung 70: Vorgehen bei der Ertüchtigung einer 2-fach Isolierverglasung (INEB).....	122



Abbildung 71: Ertüchtigungsvarianten für mit Low-E beschichtete Wärmeschutzverglasungen (INEB)	123
Abbildung 72: Übersicht über die Konstruktionsmasse im Materialpass	127
Abbildung 73: Links: Aussenansicht Aufstockung Kopfbau Halle 118, Lagerplatz Winterthur. Rechts: Re-Use-Fenster werden vor der Montage sortiert. Bilder: Martin Zeller	146
Abbildung 74: Ausbildung von Kastengestern in der Halle 118. Bilder: Martin Zeller	146
Abbildung 75: Links: Fassadenansicht UNIT SPRINT im NEST. Rechts: Montage gebrauchter Fenster mit ertüchtigter Verglasung. Bilder: Martin Zeller	147
Abbildung 76: Links: Strassenansicht Bürogebäude Dufourstrasse 38 in Basel nach der Fassadensanierung. Rechts: Demontage der Fassadenelemente für die Ertüchtigung. Bilder: Martin Zeller	148



## 12 Anhang

### 12.1 Dokumentation von einigen Fallbeispielen

In der Vergangenheit wurden insbesondere in denkmalgeschützten Liegenschaften Fenstersanierungen durchgeführt. Mit der Wiederverwendung von Gebäuden und Bauteilen, motiviert durch Ressourcenschonung und Einsparung von indirekten Treibhausgasemissionen wurden in letzter Zeit bei einigen Gebäude Fenster wiederverwendet oder auch saniert. Hier sind einige Beispiele dokumentiert.

#### Kopfbau Halle 118, Lagerplatz, Winterthur

Die Aufstockung der Halle 118 in Winterthur zeichnet sich durch die Verwendung gebrauchter Bauteile aus, wobei die Fenster eine wichtige Rolle spielen. Sie stammen aus verschiedenen Quellen und wurden in die neue Fassade integriert (Abbildung 73). Unterschiedliche Formate der Re-Use-Fenster prägen das Erscheinungsbild des Gebäudes.

Auftraggeberin: Stiftung Abendrot; Architektur: Baubüro in situ AG; Holzbauingenieur: Josef Kolb AG; Holzbau: Zehnder Holz und Bau



Abbildung 73: Links: Aussenansicht Aufstockung Kopfbau Halle 118, Lagerplatz Winterthur. Rechts: Re-Use-Fenster werden vor der Montage sortiert. Bilder: Martin Zeller



Abbildung 74: Ausbildung von Kastengestern in der Halle 118.  
Bilder: Martin Zeller

In der Halle 118 wurden von zwei unterschiedlichen Gebäuden Fenster wiederverwendet: Es wurden Aluminium-Isolierfenster vom Bürobau Orion verwendet. Mit zwei und drei gereihten Flügeln sind sie querformatig und mit aussen liegenden Rafflamellenstoren als Sonnenschutz versehen.

Zudem kamen Fenster vom Sulzer Werk 1 zum Einsatz. Zuvor einfach verglast, wurden sie in der neuen Fassade zu Kastengestern aufgedoppelt [81].



### UNIT SPRINT im NEST, EMPA, Dübendorf

Das Projekt demonstriert das Prinzip der Wiederverwendung von Bauelementen. Materialien stammen grösstenteils aus lokalen Rückbauten oder Vorräten der EMPA. Die Büroeinheiten nutzen wiederverwendete Fenster, die zum Teil energetisch aufgerüstet werden. Dabei werden zum Beispiel zwei gebrauchte Fenster zu einer Kastenfenstereinheit kombiniert, oder bestehende 2-fach Verglasungen mit einer neuen Glasscheibe zu einer 3-fach Verglasung aufgedoppelt (Abbildung 75). Das Projekt verfolgt das "Design for Disassembly"-Prinzip und ermöglicht kreislaufgerecht eine spätere Wiederverwendung der Materialien.

Auftraggeberin: EMPA; Architektur: Baubüro in situ AG; Holzbau: Husner AG.



Abbildung 75: Links: Fassadenansicht UNIT SPRINT im NEST. Rechts: Montage gebrauchter Fenster mit ertüchtigter Verglasung. Bilder: Martin Zeller

Die meisten Fenster, die in der Unit Sprint ein zweites Leben erhalten, sind mindestens 30 Jahre alt. Um die Energieeffizienz zu verbessern, werden einige Fensterscheiben sowie der Fensterrahmen nachgerüstet [81]

Für die Verglasungen kommen verschiedene Nachrüstmethoden zum Einsatz, die mit dem ursprünglichen Zustand (2-fach-Isolierverglasung) verglichen werden:

- Ergänzung einer dritten Scheibe zu einer bestehenden Doppelverglasung.
- Austausch der Abstandhalter und Gasfüllung bei Beibehaltung der bestehenden Glasscheiben.
- Austausch der gesamten Glaskassette gegen eine neue, materialeffiziente Verglasung.



### Fassadensanierung Bürogebäude Dufourstrasse 38, Basel

Die bestehende Aluminiumfassade wurde aus ökologischen und ökonomischen Gründen erhalten und ertüchtigt, statt ersetzt (Abbildung 76). Durch sorgfältige Reinigung, Ergänzung von Dämmmaterial und Austausch der Fensterverglasung konnte die vorgehängte Pfosten-Riegel-Fassade energetisch verbessert werden [82].

Bauherrschaft: Basler Kantonalbank BKB, Basel; Architektur: David Vaner Architektur, Basel; Fassadenplanung: Christoph Etter Fassadenplanungen, Basel; Fassadenbau: Gerber-Vogt, Allschwil; Planungsbüro für das Bauen im Kreislauf: Zirkular, Basel



Abbildung 76: Links: Strassenansicht Bürogebäude Dufourstrasse 38 in Basel nach der Fassadensanierung. Rechts: Demontage der Fassadenelemente für die Ertüchtigung. Bilder: Martin Zeller.



## 12.2 Ökobilanzdaten Fensterertüchtigung

Ökobilanzdaten im Baubereich - FenSanReuse INEB		KBOB / ecobau / IPB 2009/1:2022, Version 6.2													
BAUMATERIALIEN	Anzahl	Dicke [mm]	Bezug Réference	UBP <sup>21</sup>				Primärenergie Energie primaire nicht erneuerbar (Graue Energie) non renouvelable (énergie grise)				Treibhausgas-emissionen Emissions de gaz à effet de serre			
				Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung total	Herstellung energetisch genutzt	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung		
				UBP	UBP	UBP	KWh oil-eq	KWh oil-eq	KWh oil-eq	KWh oil-eq	kg CO <sub>2</sub> -eq	kg CO <sub>2</sub> -eq	kg CO <sub>2</sub> -eq	kg CO <sub>2</sub> -eq	
				Total	Herstellung	Entsorgung	Total	Herstellung total	Herstellung energetisch genutzt	Utilisés sous forme énergétique fabrication	Entsorgung	Total	Herstellung	Entsorgung	
<b>Glasaufdopplung 3mm / Low-e / SZR Argon 8mm</b>															
Flachglas unbeschichtet	1	3	m <sup>2</sup>	31875	29600	2283	76.1	75.4	75.4	75.4	1.1	19.60	17.85	1.75	
Low-e-Beschichtung	1	-	m <sup>2</sup>	2000	2000	0	5.6	5.6	5.6	0.0	0.2	0.60	0.60	0.00	
SZR Isolierverglasung 2-fach, Argon	1	8	m <sup>2</sup>	16490	14700	1787	39.9	40.0	40.0	0.2	10.45	8.85	1.61		
<b>Glasaufdopplung 3mm / Low-e / SZR Argon 10mm</b>															
Flachglas unbeschichtet	1	3	m <sup>2</sup>	35988	33275	2725	86.1	85.4	85.4	1.1	22.21	20.06	2.15		
Low-e-Beschichtung	1	-	m <sup>2</sup>	2000	2000	0	5.6	5.6	5.6	0.0	0.60	0.60	0.00		
SZR Isolierverglasung 2-fach, Argon	1	10	m <sup>2</sup>	20563	18375	2209	49.9	50.0	50.0	0.3	13.06	11.06	2.01		
<b>Glasaufdopplung 3mm / Low-e / SZR Argon 12mm</b>															
Flachglas unbeschichtet	1	3	m <sup>2</sup>	40100	36950	3167	96.1	95.4	95.4	1.2	24.83	22.28	2.56		
Low-e-Beschichtung	1	-	m <sup>2</sup>	2000	2000	0	5.6	5.6	5.6	0.0	0.60	0.60	0.00		
SZR Isolierverglasung 2-fach, Argon	1	12	m <sup>2</sup>	24675	22050	2651	59.9	60.0	60.0	0.4	15.68	13.28	2.41		
<b>Glasaufdopplung 3mm / Low-e / 2x SZR Argon 14mm</b>															
Flachglas unbeschichtet	1	3	m <sup>2</sup>	6725	6130	6132	157.6	156.1	156.1	1.6	41.55	36.30	5.27		
Low-e-Beschichtung	1	-	m <sup>2</sup>	2000	2000	0	5.6	5.6	5.6	0.0	0.60	0.60	0.00		
SZR Isolierverglasung 3-fach, 2x Argon	2	14	m <sup>2</sup>	52300	46400	5616	121.4	120.7	120.7	0.7	32.40	27.30	5.13		
<b>2WS ReMan 1x Abstandhalter+ 1x SZR Argon 16mm</b>															
Flachglas unbeschichtet	1	16	m <sup>2</sup>	32900	29400	3534	79.8	80.0	80.0	0.5	20.90	17.70	3.22		
SZR Isolierverglasung 2-fach, Argon	1	16	m <sup>2</sup>	32900	29400	3534	79.8	80.0	80.0	0.5	20.90	17.70	3.22		
<b>3WS ReMan 2x Abstandhalter+ 2x SZR Argon 14mm</b>															
Flachglas unbeschichtet	2	14	m <sup>2</sup>	52300	46400	5616	121.4	120.7	120.7	0.7	32.40	27.30	5.13		
Low-e-Beschichtung	2	-	m <sup>2</sup>	4000	4000	0	11.2	11.2	11.2	0.0	1.20	1.20	0.00		
SZR Isolierverglasung 3-fach, 2x Argon	2	14	m <sup>2</sup>	52300	46400	5616	121.4	120.7	120.7	0.7	32.40	27.30	5.13		
<b>3IV Dünnglas 3/2/3 SZR 2x 14mm; Dicke 36mm</b>															
Flachglas unbeschichtet	1	8	m <sup>2</sup>	92100	84800	6992	214.2	211.3	211.3	2.9	56.40	50.90	5.51		
Low-e-Beschichtung	2	-	m <sup>2</sup>	4000	4000	0	11.2	11.2	11.2	0.0	1.20	1.20	0.00		
SZR Isolierverglasung 3-fach, 2x Argon	2	14	m <sup>2</sup>	52300	46400	5616	121.4	120.7	120.7	0.7	32.40	27.30	5.13		
<b>3IV Dünnglas 3/2/3 SZR 2x 12mm; Dicke 32mm</b>															
Flachglas unbeschichtet	1	8	m <sup>2</sup>	84629	78171	6190	196.9	194.1	194.1	2.8	51.77	47.00	4.78		
Low-e-Beschichtung	2	-	m <sup>2</sup>	4000	4000	0	11.2	11.2	11.2	0.0	1.20	1.20	0.00		
SZR Isolierverglasung 3-fach, 2x Argon	2	12	m <sup>2</sup>	44829	39771	4814	104.1	103.5	103.5	0.6	27.77	23.40	4.39		



## 12.3 Kostenberechnung

Investitionskosten		Lebensdauer		Instandsetzung	
Grundpreis		Basis-Lebensdaueransatz			
Jahr	Wert	30			
2023	350				
<b>Einbaujahr</b>		<b>Planungsqualität</b>		<b>Massnahme Rahmen/Flügel</b>	
Wert (Zücher Index der Wohnbaukosten)	Index	Wert	Faktor	Wert	Faktor
1950	0.18	A - sehr gut	1.2	A - Dichtung in Flügel einbauen	1.05
1951	0.19	B - durchschnittlich	1	B - Dichtung in Rahmen einbauen	1.1
1952	0.19	B - schlecht	0.9	C - Dichtung an Wand einbauen	1.1
1953	0.2	<b>Materialqualität</b>		D - keine	1
1954	0.2	Wert	Faktor	<b>Massnahme Verglasung</b>	
1955	0.201	A - hochwertig	1.2	Wert	Faktor
1956	0.21	B - mittelmässig	1	A - Gasfüllgrad erhöhen	1.2
1957	0.213	C - minderwertig	0.9	B - Glasaufdoppelung	1.6
1958	0.22	<b>Ausführungsqualität</b>		C - Glasersatz durch 2-fach IV	1.3
1959	0.22	Wert	Faktor	D - Glasersatz durch 3-fach IV	1.5
1960	0.227	A - nach Lehrbuch	1.2	E - Glasersatz durch Vakuumverglasung	2
1961	0.24	B - normal	1	F - keine	1
1962	0.26	C - minderwertig	0.9	<b>Massnahme Fenster</b>	
1963	0.29	<b>Wartung und Unterhalt</b>		Wert	Faktor
1964	0.3	Wert	Faktor	A - Ersatz durch Sanierungsfenster	1.95
1965	0.311	A - geplant	1	B - Ersatz durch Re-Use-Fenster	1.5
1966	0.32	B - nicht geplant	0.6	C - Ersatz durch neues Fenster	2
1967	0.323	<b>Einbauzeitpunkt</b>		D - keine	1
1968	0.325	Wert	Faktor	<b>Massnahme Abfall</b>	
1969	0.331	A - 1928 - 1938	1.2	Wert	Faktor



1970	0.375	B - 1939 - 1948	1.1	A - Re-Use	1.03
1971	0.421	C - 1949 - 1958	1	B - Deponie	1.1
1972	0.466	D - 1959 - 1968	0.9	C - keine	1
1973	0.513	E - 1969 - 1978	0.875	<b>Zusatzmassnahmen</b>	
1974	0.558	F - 1979 - 1988	0.85	Wert	Faktor
1975	0.536	G - 1989 - 1998	0.825	A - Leibungen aussen korrigieren	1.03
1976	0.5	E - nach 1999	0.8	B - Leibungen innen korrigieren	1.03
1977	0.515	<b>Verglasungstyp</b>		C - Leibungen aussen mit Sonnenschutz korrigieren	1.05
1978	0.531	Wert	Faktor	D - Brüstung korrigieren	1.1
1979	0.549	A - einfach	1.2	E - keine	1
1980	0.6	B - doppelt	1.1		
1981	0.654	C - IV	1		
1982	0.698	<b>Verglasungseinbau</b>			
1983	0.67	Wert	Faktor		
1984	0.67	D - Verkittung	1		
1985	0.685	E - Dichtprofile	1.1		
1986	0.705	F - Dichtstoffe	1.1		
1987	0.719	G - Fensterrahmen/Flügeldichtung	1		
1988	0.75	<b>Beschlagstyp</b>			
1989	0.79	Wert	Faktor		
1990	0.859	A - einfach	1		
1991	0.911	B - Drehkipp-, Hebedreh-, Schwingbeschläge usw.	0.9		
1992	0.905	<b>Behandlung</b>			
1993	0.864	Wert	Faktor		
1994	0.853	A - keine	0.9		
1995	0.874	B - Anstriche	0.8		
1996	0.861				
1997	0.874				
1998	0.844				
1999	0.854				
2000	0.887				
2001	0.929				
2002	0.928				



2003	0.899
2004	0.908
2005	0.93
2006	0.945
2007	0.987
2008	1.027
2009	1.031
2010	1.043
2011	1.06
2012	1.067
2013	1.061
2014	1.066
2015	1.053
2016	1.034
2017	1.035
2018	1.037
2019	1.046
2020	1.046
2021	1.058
2022	1.129
2023	1.191
2024	1.2
<b>Einbauregion</b>	
Wert	Faktor
A - Schweiz	1.152
B - Genferseeregion	1.136
C - Espace Mittelland	1.149
D - Nordwestschweiz	1.176
E - Zürich	1.16
F - Ostschweiz	1.157
G - Zentralschweiz	1.149
H - Tessin	1.137
I -	0
J -	0
<b>Bestellmenge</b>	
Wert	Faktor
A - klein (1-5 St.)	1
B - mittel (6-20 St.)	0.97
C - gross (21 - 50 St.)	0.92
D - sehr gross (> 50 St.)	0.87
<b>Fensterlage</b>	



Wert	Faktor	
A - aussen	1.03	
B - mittig	1.5	
C - innen	0.96	
D - vorgesetzt/vorgelagert	0.37	
<b>Fenstergrösse/-format</b>		
Wert	Faktor	
A - klein	0.67	
B - mittel (120x120)	0.81	
C - Referenz (115x150)	1	
D - gross (mind. Raumhöhe)	1.3	
E - sehr gross	1.45	
<b>Einteilung</b>		
Wert	Faktor	
A - fest	1.3	
B - einflügelig	1.4	
C - zweiflügelig	0.97	
D - mehrflügelig	0.63	
<b>Typ des Fensterrahmens</b>		
Wert	Faktor	Basis-Lebensdaueransatz
A1 - Fichte/Tanne	1.03	35
A2 - Lärche/Kiefer	1.06	40
A3 - Eiche	1.3	40
B - Holz-Metall-Fenster	1.15	45
C - Kunststoff-Fenster	0.96	40
D - Kunststoff-Metall-Fenster	1.12	45
E - Metallfenster	1.4	45