



Leitfaden zur energetischen Ertüchtigung von Bestandsfenstern und Gläsern in historischer Bausubstanz als Beitrag zum Klimaschutz





Projekttitlel: Innovative Lösungen für die energetische Ertüchtigung historischer Gläser und Glasfenster - Praxisversuche in der Alten Schöfferei, Kloster Benediktbeuern.

Förderkennzeichen: TLK01U-64547

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Rainer Drewello, Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien, KDWT, Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Projektbeteiligte und Autoren:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) Holzkirchen und Stuttgart:

Prof. Dr.-Ing. Ralf Kilian, Dr.-Ing. Stefan Bichlmair,
Dipl.-Ing. (FH) Christine Milch, Dipl.-Wirt.-Ing. Katrin Lenz,
Dipl.-Ing. Matthias Fischer, Olivia Jorgji M.Sc.

Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT)
Otto-Friedrich-Universität Bamberg:

Prof. Dr. Paul Bellendorf, Alexandra Schmölder M.A., Ruth Tenschert M.A.

Autoren der einzelnen Beiträge:

Seiten 4-5: A. Schmölder, P. Bellendorf, R. Tenschert; Seite 6: P. Bellendorf, R. Tenschert; Seiten 7-12: S. Bichlmair, R. Kilian, C. Milch; Seiten 13-14: K. Lenz, O. Jorgji

Umschlagbild: Beispiele historischer Fenster und Glasscheiben in Bamberg,

© Ruth Tenschert, Paul Bellendorf, KDWT

Layout: Fabien Griessel, M.A., Ruth Tenschert, M.A., Uni Bamberg, KDWT



Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien



Fraunhofer

IBP



finanziert durch
**Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz**



Liebe Leserinnen und Leser,

Klimaschutz und Denkmalschutz – das sind zwei, die zusammenpassen. Einen Beweis dafür haben das Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien der Otto-Friedrich-Universität Bamberg und das Fraunhofer-Institut für Bauphysik im Auftrag des Bayerischen Umweltministeriums erbracht. Am Beispiel der Alten Schäferei des Klosters Benediktbeuren haben sie die Weiterverwendung und energetische Ertüchtigung von historischen Bestandgläsern erforscht. Der vorliegende Leitfaden fasst die Ergebnisse dieses Projekts zusammen, die wegweisend sind für unseren Umgang mit Baudenkmalern.

Denn: Nicht immer ist bei der Sanierung eines denkmalgeschützten Gebäudes der Austausch der Fenster eine sinnvolle Lösung. Alte Verglasungen haben aufgrund ihrer aufwändigen und energieintensiven Herstellung oft einen hohen Materialwert. Mit Blick auf die Vollkostenrechnung kann eine Ertüchtigung daher durchaus der bessere, das heißt klima- und ressourcenschonendere, und ästhetisch stimmigere Weg sein. Wer saniert, ist daher gut beraten, Alternativen für einen bloßen Austausch in Betracht zu ziehen. Die kluge Abwägung zwischen Ersetzen und Wiederherstellen muss beim Sanieren in Zukunft auch für die Fenster gelten – und mit ihr der Blick auf die gesamte Energiebilanz eines Gebäudes.

Der Freistaat als einer der größten Eigentümer von Gebäuden im Denkmalbestand kann hier mit gutem Beispiel vorangehen. Das Projekt, das dieser Leitfaden dokumentiert, ist ein erster Schritt in die richtige Richtung, dem viele weitere folgen mögen. Die Klimaneutralität in Bayern wird ohne intelligentes Sanieren nicht zu schaffen sein. Desto wichtiger sind vielversprechende neue Möglichkeiten, wie die Akteure des Projekts „Innovative Lösungen für die energetische Ertüchtigung historischer Gläser und Glasfenster“ sie aufzeigen. Ich danke den Beteiligten vielmals für ihren Einsatz! Ihnen eine anregende Lektüre und, falls Sie demnächst sanieren sollten, einen neuen Durchblick im Sinne dieses Leitfadens!

Ihr



Thorsten Glauber, MdL



Bayerischer Staatsminister für Umwelt und Verbraucherschutz
Juni 2021



Abb. 1. Verglasung eines Gebäudes in der Franz-Ludwig-Straße in Bamberg, © Ruth Tenschert, KDWT

Denkmalpflegerische Relevanz von Fenstern im Altbau

Deutschland soll bis Mitte des Jahrhunderts klimaneutral werden. Um dies zu erreichen, wird eine konsequente energetische Sanierung von Bestandsgebäuden angestrebt. Daher werden zunehmend auch denkmalgeschützte Gebäude energetisch ertüchtigt, wobei gemäß den denkmalpflegerischen Grundsätzen der Substanzerhalt oberste Priorität haben muss. Dieser Grundsatz steht jedoch im Gegensatz zum staatlich geförderten Fensteraustausch, der sowohl Fensterrahmen als auch Glasscheiben betrifft.

Der Charakter einer historischen Fassade wird maßgeblich durch die Fenster geprägt. Die Fassadengliederung wird dabei nicht nur durch Anzahl und Anordnung der Fenster bestimmt, sondern auch durch Größe, Formenvielfalt und Materialität. Fenster sind darüber hinaus ein wichtiger Indikator für die Datierung und stilistische Einordnung eines Gebäudes. Entscheidend sind dabei nicht nur die Fensterrahmen, sondern auch die Fensterscheiben selbst. Die Struktur eines historischen Glases führt zu unterschiedlichen Lichtbrechungen und -reflektionen, die Fensterscheiben stellen damit einen bestimmenden Charakter für die Fassadenwirkung dar und sind essentieller Teil der Authentizität.

Während in der denkmalpflegerischen Wahrnehmung der Erhalt von Fensterrahmen heute bereits im Zentrum der Betrachtung steht, nehmen die Glasscheiben derzeit noch eine untergeordnete Rolle ein. Vor allem aus energetischen Gründen werden sie bei Sanierungsmaßnahmen oft als Verfügungsmasse betrachtet



Abb. 2. Originale Verglasung der sog. Wilhelmshofpost in Bamberg, © Ruth Tenschert, KDWT

und durch moderne Floatglasscheiben ersetzt. Dabei geht nicht nur wertvolle historische Substanz verloren, sondern auch das Zeugnis wichtiger historischer Herstellungstechniken von Flachglas. Dies betrifft im besonderen Maße das Ziehglas, das in den 1920er Jahren das klassische Zylinder Glas verdrängte und in vielen historischen Gebäuden bis in die 1960er Jahre hinein verbaut wurde. Die verschiedenen Ziehverfahren – von Fourcault über Libbey-Owens bis hin zum Pittsburgh-Verfahren – sind heute Zeugnisse der Technikgeschichte, da seit den 1960er Jahren Floatglas den Markt dominiert. Gezogene Gläser werden nur noch vereinzelt für Restaurierungszwecke hergestellt. Die grundlegenden Recherchen der Uni Bamberg zu den unterschiedlichen historischen Arbeitstechniken flossen in die Berechnungen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) ein.

Das Floatglasverfahren, nach welchem seit 1966 in Deutschland Gläser hergestellt werden, revolutionierte die Glasherstellung. Produktionsbedingte Unregelmäßigkeiten, wie Artefakte vom Ziehprozess, treten hier nicht mehr auf. Es entstehen planparallele und nahezu fehlerfreie Gläser, die vorher nur sehr teures Spiegelglas liefern konnte. Mit diesem Grad an Perfektion geht allerdings auch ein Verlust an Lebendigkeit und Individualität einher, die den Charme und Alterswert historischer Gläser ausmachen. Sowohl handwerklich hergestellte Gläser, als auch die aus frühen industriellen Verfahren zeichnen sich durch charakteristische Relikte der Herstellungsprozesse aus, über die diese auch einem Verfahren zugewiesen werden können. Mond-



Abb. 3. Die Fassade der Alten Schäfllerei in Benediktbeuern wird, wie viele andere Denkmalfassaden, von verschiedenen Fenstertypen geprägt, © Fraunhofer IBP

glas, das vor allem im 18. Jahrhundert bis Mitte des 19. Jahrhunderts zum Einsatz kam, ist z. B. an langen konzentrischen Schlieren erkennbar und zeichnet sich wegen seiner Feuerpolitur durch einen besonderen Glanz aus. Das Zylinderblasverfahren hinterlässt im Glas oft punktuell kleine längliche Bläschen. Ziehglas wiederum weist leichte Wellen auf, die in der Schrägsicht die Lichtreflektion brechen. Das unregelmäßige Erscheinungsbild von historisch hergestellten Gläsern wird denkmalpflegerisch als wichtiges charakteristisches Merkmal betrachtet, das es unbedingt zu erhalten gilt.

Als Folge eines achtlosen Austauschs der historischen Gläser geht nicht nur die Authentizität stilprägender Elemente der Fassade verloren, sondern es werden auch die für die Herstellung verwendeten Rohstoffe einer weiteren Nutzung entzogen. Bei der Produktion von Glas ist die Sortenreinheit von Rohstoffen ein maßgeblicher Faktor. Bereits kleinste Verunreinigungen können die Qualität des Produktes herabsetzen. Historisches Fensterglas wird daher aufgrund seiner unbekannt und divergenten Zusammensetzung nicht dem Recycling zugeführt. Da die Produktion neuer Gläser aber nicht nur einen erheblichen Rohstoff-, sondern auch Energieeinsatz benötigt, stellt der Erhalt von Bestandsglas nicht nur eine denkmalpflegerische, sondern auch eine ressourcenschonende und nachhaltige Maßnahme dar.

Um bei einer energetischen Ertüchtigung nach denkmalpflegerischen Grundsätzen die Fassadengestaltung weitgehend unberührt zu lassen, werden substanzschonende Lösungen im Inneren des Gebäudes bevorzugt. So kann z. B. eine Bestandscheibe durch eine zweite, moderne und energetisch wirksame Innenscheibe ergänzt und so zu einer Isolierscheibe umfunktioniert werden. In anderen Fällen bietet sich der Einbau einer zusätzlichen Fensterebene an, die das Originalfenster nach innen zu einem Kastenfenster erweitert. Bei allen Ertüchtigungen stehen aus denkmalpflegerischer Sicht die Reversibilität des Einbaus und die klare Ablesbarkeit des ursprünglichen Zustands im Vordergrund.

Um die denkmalpflegerischen Belange von energetischen Sanierungen besser bewerten zu können, wurden Lebenszyklusanalysen von verschiedenen Bestandsgläsern im Vergleich zu neu gefertigtem Floatglas durchgeführt und messtechnisch genaue Parameter wie z. B. der Wärmedurchgangskoeffizient U_w ermittelt. Diese Erkenntnisse führen zu einer passgenauen, energetischen aber dennoch auch denkmalpflegerisch vertretbaren Sanierung. Bei der Abschätzung, welche Maßnahme zur Verfügung stehen und sinnvoll eingesetzt werden können, helfen die im Folgenden vorgestellten innovative Lösungen. Mit dem Grundsatz „Sanieren bedeutet Erhalten“ ist Denkmalschutz nachhaltig und leistet aktiven Ressourcenschutz.



Abb. 4. Historische Fensterteilungen eines Gebäudes in der Ottostraße in Bamberg, © Ruth Tenschert, KDWT

Denkmalschutz als aktiver Ressourcen- und Klimaschutz!

Im Jahr 2015 haben die Vereinten Nationen unter dem Schlagwort „Sustainable Development Goals“ (SDGs) neue Richtlinien für eine lebenswerte Umwelt verabschiedet. Die bis 2030 laufende Agenda zielt darauf ab, die nachhaltige Entwicklung in allen Bereichen unseres Lebens zu fördern. Auch das baukulturelle Erbe fällt darunter, stellen doch Denkmale vielfach eine wichtige Quelle von vergangenem Wirken und Handeln sowie der Nutzung und Wertschätzung von Materialressourcen dar. Die historischen Bauten bestehen fast ausschließlich aus natürlichen Ressourcen, die nach dem Ende ihres langen Lebenszyklus zum größten Teil in den Rohstoffkreislauf zurückgeführt oder wiederverwendet werden können. Die nüchterne Energiebilanz eines Denkmals ist zwar im Vergleich zu Plusenergiehäusern per se schlechter, allerdings tragen alle historischen Bauten zum einen auch einen ideellen und kulturhistorischen Wert in sich, zum anderen können sie bei einer ganzheitlichen Betrachtung die schlechtere Energiebilanz über die reine Standzeit und die bereits aufgebrauchten Ressourcen zum Bau zumindest teilweise egalalisieren.

Die lange Lebensdauer und die Verwendung von natürlichen Ressourcen machen historische Gebäude zum Musterbeispiel dafür, wie im Sinne der SDGs Abfall vermieden bzw. verringert werden kann, wie Gebrauchsgüter länger in Nutzung verbleiben können und wie die verwendeten Materialien nach dem Ende der Lebensdauer fast vollständig dem Recycling zugeführt werden könnten.



Abb. 5. Fenster der 1930er Jahre in der Dr.-von-Haas-Straße in Bamberg, © Ruth Tenschert, KDWT

Historische Verglasungen aus der Zeit der industriellen Revolution sind Zeugnisse der Technikgeschichte. Aufgrund der Anforderungen der Energieeffizienz, deren Steigerung auch in den SDGs gefordert wird, sind Verglasungen aus dieser Zeit im Bestand aktuell akut bedroht und werden vielerorts durch moderne Glassysteme ersetzt. Aufgrund der unbekanntenen Glaszusammensetzung werden die ausgebauten Gläser aber nicht einem hochwertigen Recycling zugeführt, sondern, wenn überhaupt, zu minderwertigem Glas weiterverarbeitet.

Die Herstellung von neuen transparenten Gläsern bedarf wieder einer großen Menge an möglichst reinem Sand. Um diesen zu gewinnen sind vielfach Eingriffe in die Lebensräume von seltenen Tier- und Pflanzenarten notwendig. Je nach Standort bedeutet der Abbau von Sand daher einen massiven Eingriff in die Umwelt und beeinflusst die regionale biologische Vielfalt. Jedes Glasfenster, welches länger in Nutzung bleiben kann, verringert somit den Bedarf an der Ressource Sand und schont damit die Umwelt.

Im Sinne der Ziele der nachhaltigen Entwicklung ist somit festzuhalten, dass sowohl das baukulturelle Erbe im Allgemeinen, historische Verglasungen und Gläser aus der Zeit der industriellen Revolution im Besonderen wertvolle Dienste leisten. Die verwendeten Ressourcen basieren auf natürlichen Rohstoffen und sind längst möglich im Einsatz. Zusammengefasst lässt sich somit konstatieren:

Denkmalschutz ist aktiver Ressourcen- und Klimaschutz!



Abb. 6. Winterfenster im bayerischen Oberland,
© Ralf Kilian, Fraunhofer IBP

Erhaltung historischer Fenster – Varianten der Sanierung

Für die Sanierung von Bestandsfenstern gibt es zahlreiche Varianten, die mit wenig Eingriff und vergleichsweise geringen Kosten das ursprüngliche Erscheinungsbild erhalten und zugleich eine erhebliche energetische Verbesserung bewirken. Die Weiterverwendung von Bestandsgläsern und die Reparatur bestehender Rahmen ist sowohl aus baukultureller wie auch aus Sicht des Umweltschutzes eine gute Lösung. Die größtmögliche Energieeinsparung bei gleichzeitigem Erhalt des originalen Fensters bietet ein Ausbau mit einer weiteren Fensterebene innen oder außen.

Als einfachste Lösung kann außen ein **Winterfenster** temporär vor das bestehende Fenster in die Fassadenfläche gesetzt werden, das in der kalten Jahreszeit Wind und Wetter abhält. Nachteilig sind hier jedoch praktische Probleme beim Öffnen der äußeren Fensterflügel. In der heutigen Zeit geht der Trend daher eher zu **feststehenden Doppelfenstern**, die innenseitig vorgesetzt werden und das äußere Erscheinungsbild wahren. Dabei unterscheidet man die Konstruktionen in Kasten-, Vorsatz- und Verbundfenster. **Kastenfenster** weisen durch ihre Mehrschaligkeit sehr gute schallschutz- und wärmetechnische Eigenschaften auf. Das Bestandsfenster wird dabei meist in einem Abstand von ca. 10 bis 12 cm durch ein weiteres Fenster (mit Isolier- oder Einfachglas, mit oder ohne Beschichtung) ergänzt und durch einen gedämmten Futterkasten aus Holz verbunden.



Abb. 7. Historisches Kastenfenster in Wessling,
© Ralf Kilian, Fraunhofer IBP

Vorsatzfenster hingegen werden raumseitig meist ohne Futterkasten niveaugleich in der Mauer- bzw. Dämmebene eingesetzt. Bei einem **Verbundfenster** wird auf den bestehenden Fensterflügel ein zusätzlicher Flügel aufgebracht. Der Scheibenzwischenraum kann zur Reinigung geöffnet werden.

Beim **Aufrüsten einer bestehenden Einscheibenverglasung zu einer Isolierglasscheibe** wird die vorhandene Glasscheibe vorsichtig ausgebaut und durch entsprechende Glashersteller umgebaut. Das Bestandsglas wird als äußere Scheibe wiederverwendet und durch eine neue Floatglas- bzw. eine mundgeblasene Scheibe nach historischem Vorbild ergänzt und so zu einem Isolierglas ausgebildet.

Auch das Glas selbst kann durch **Aufbringen von additiven Materialschichten** (Folien oder Beschichtungen zum Wärme-, Sonnen-, Schall- oder Brandschutz) ertüchtigt werden. Als Beschichtungsmaterial dienen z. B. Metalle und Metalloxide, die durch einen äußerst niedrigen Strahlungsemissionskoeffizienten den Strahlungswärmeverlust erheblich reduzieren können (Wärmeschutzglas). Additive Folien dagegen sorgen für eine erhöhte Materialfestigkeit oder Lichtschutz.

Technisch möglich sind auch Kombinationen aus oben genannten Varianten wie z. B. die Erweiterung zum Kasten- oder Vorsatzfenster mit zusätzlichem Scheibenaustausch bzw. Beschichtung von Scheiben.

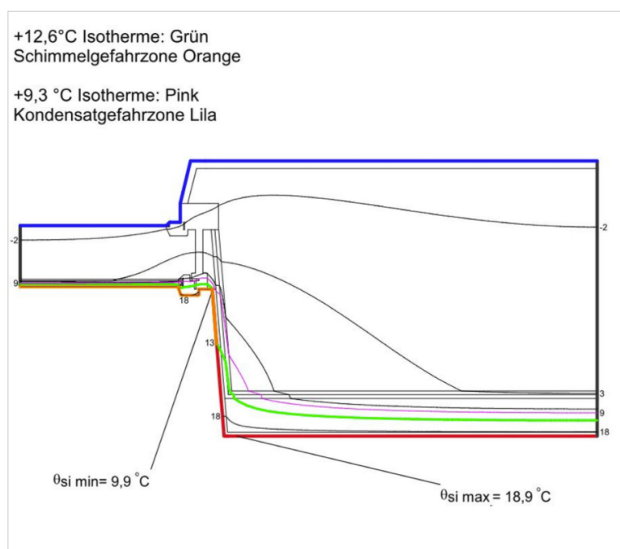


Abb. 8 und 9. Ohne Eingriff in Wand und Fensterbrett nachträglich eingebautes Kastenfenster (rechtes Bild) mit berechnetem thermischen Feld (Wärmebrücken) im horizontalen Schnitt (oberes Bild). Die eingezeichneten Linien sind Kurven mit gleicher Temperatur (Isothermen), ©Fraunhofer IBP

Luftfeuchte im Kastenfenster

Bei einem energetisch zu einem Kastenfenster sanierten Einfachfenster oder bei Kastenfenstern allgemein können in seltenen Fällen feuchtetechnische Probleme im Kastenfensterzwischenraum auftreten. Bekannte Phänomene sind Tauwasser an der äußeren Scheibenebene oder Schäden infolge erhöhter Feuchtigkeit im Zwischenraum des Kastenfensters. Für die Betrachtung des Kastenfensterzwischenraums existieren jedoch keine technischen Regelwerke, sondern lediglich überlieferte Konstruktionsvorgaben hinsichtlich der Luftdichtheit, wie „innere Fensterebene dicht“ und „äußere Fensterebene undicht“.

Am Fraunhofer-Zentrum in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern wurden umfangreiche Messungen zu den Feuchte- und Belüftungsverhältnissen an Kastenfenstern durchgeführt. Dabei konnten über eine neu entwickelte Methode die Belüftungsverhältnisse ermittelt und anhand von Luftwechsellmessungen bestätigt werden. Mit dieser neuen Methode kann das Funktionsprinzip der überlieferten Konstruktionsvorgaben nun wissenschaftlich erklärt und bestätigt werden. Zusätzlich ist damit eine messtechnische Überprüfung bestehender Kastenfenster möglich. Anhand hygrothermischer Simulationen des Kastenfensterzwischenraums kann gezeigt werden, wie sich neben der Luftdichtheit der Fensterebenen auch die U-Werte der Fensterebenen auf die Belüftungsverhältnisse auswirken. Die äußere Fensterebene muss dabei immer „undicht“ ausgeführt werden, d. h. ohne Gummidichtung und mit ausreichender Spaltluft zwischen Rahmen und Stock.



U-Wert des Fensters U_w

Der U-Wert bezeichnet vereinfacht den Wärmeverlust durch das Fenster in Watt pro Quadratmeter und Kelvin (Grad Celsius Temperaturunterschied). Historische Fenster mit Einfachverglasung haben einen U-Wert von rund $5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die energetische Sanierung zielt auf eine Verbesserung des U-Wertes des Fensters ab. Erreicht wird dies häufig durch Einbau einer Glasscheibe mit niedrigem U-Wert der Glasscheibe U_g oder einer zusätzlichen Fensterebene.

Wärmebrücken am Kastenfenster

Die Wärmebrücken der Einbausituation des Fensters wirken sich erheblich auf die Wärmeverluste und Oberflächentemperaturen aus. Im Vergleich zum Einfachfenster schneidet das Kastenfenster bzw. Vorfenster dabei gut ab. Bei Innendämmung hat die Laibungsdämmung (sowie an Sturz und Brüstung) einen hohen Einfluss und sollte entsprechend hochwertig ausgeführt werden. Eine Wärmebrückenberechnung lohnt sich zur Optimierung der Sanierung immer, um Wärmeverluste zu minimieren und günstige Oberflächentemperaturen für die Vermeidung von Schimmelbildung zu schaffen.

Luftwechsel und Lüftung

Wird eine Gummidichtung an der inneren Fensterebene eingebracht, verringern sich die Lüftungswärmeverluste. Dies bringt eine zusätzliche Einsparung an Heizenergie, jedoch kann dadurch eine zusätzliche Belüftung erforderlich werden, um den hygienisch erforderlichen Mindestluftwechsel in Wohnräumen sicherzustellen. Deshalb sollte mit der energetischen Sanierung von Fenstern auch ein Lüftungskonzept erstellt werden.

Scheibenaustausch oder Erweiterung zum Isolierglas

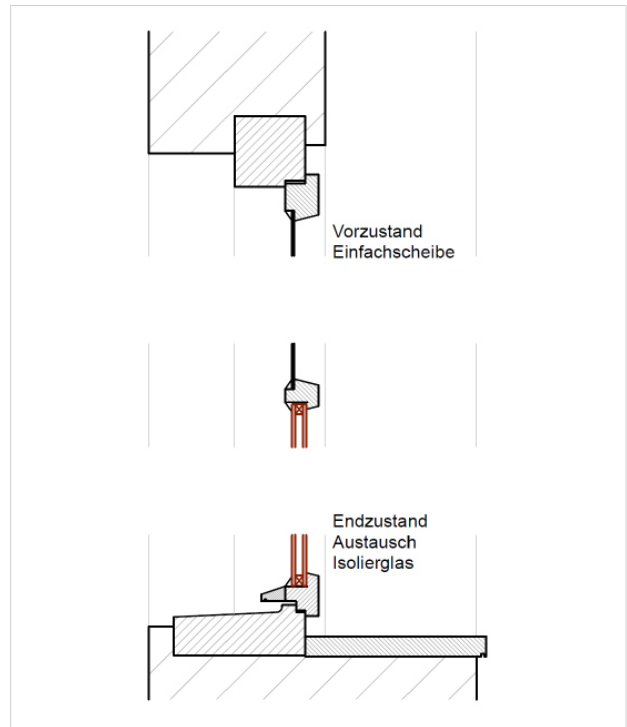


Abb. 10 und 11. Bestandsfenster in Holz mit Austausch der Einfachglasscheibe durch ein Isolierglas (links), Schnittzeichnung (rechts), © Fraunhofer IBP

Systembeschreibung – Scheibenaustausch oder Erweiterung zum Isolierglas

Bei Austausch der Scheibe mit einem Isolierglas wird der bestehende historische Fensterrahmen in seiner Substanz erhalten und so auch die gesamte Anmutung des Fensters bei gleichzeitiger energetischer Verbesserung.

Austausch im Bestandsfenster:

Mit dem **Austausch der originalen Scheibe** lässt sich eine weitreichend substanzschonende Optimierung eines Bestandsfensters realisieren, die originale Bestandsscheibe geht jedoch bei dieser Variante verloren. Hierbei werden die Bestandsscheiben ausgebaut und durch Wärmeschutzglas mit sehr geringem Scheibenzwischenraum ausgetauscht, bspw. Wärmeschutzverglasungen mit U_g -Wert von $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ bis $1,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ sind je nach Ausführung möglich.

Erweiterung zum Isolierglas:

Alternativ besteht die Möglichkeit die **originale Scheibe weiter zu nutzen** und in den Scheibenaufbau der Wärmeschutzverglasung zu integrieren. Dazu wird die originale Scheibe ausgebaut und im Isolierglaswerk mit einer neuen Scheibe zu einem Wärmeschutzglas zusammengebaut.

Die Dicke des neuen Glasaufbaus beträgt hier ca. 15 mm , bei einem U_g -Wert von $0,9 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der historische Fensterrahmen wird durch die veränderte Glasdicke in der Glasfalztiefe angepasst und kann ansonsten erhalten bleiben. Positiv ist an dieser Lösung, dass der Fensterrahmen und die Anmutung des Fensters erhalten bleiben.

Auswirkungen auf die Bausubstanz:

- Geringer Eingriff in die bestehende Bausubstanz
- Anpassung der Glasfalztiefe.
- Evtl. Veränderung des Erscheinungsbildes und der Lichtdurchlässigkeit.

Ressourcenschonung:

- Geringe Ressourcenschonung bei Scheibenaustausch, da eine neue Isolierglasscheibe mit entsprechendem Ressourcenbedarf bei der Herstellung eingebracht wird.
- Hohe Ressourcenschonung, wenn die Bestandsscheibe für die Erweiterung zum Isolierglas weitergenutzt wird.

Energieeinspar-Potenzial / Bauphysik:

Vorteile:

- Moderate Verbesserung des Wärmeschutzes.
- U_w -Werte von ca. $1,8 - 3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ möglich.
- Verringerung des Tauwasseranfalls an der Scheibe gegenüber Einfachverglasung.

Nachteile:

- Hohe Wärmebrückenwirkung im Fensteranschlussbereich.
- Niedrige Oberflächentemperaturen am nicht energetisch sanierten Fensterstock und Flügel.
- Feuchteschäden durch Kondensat möglich.

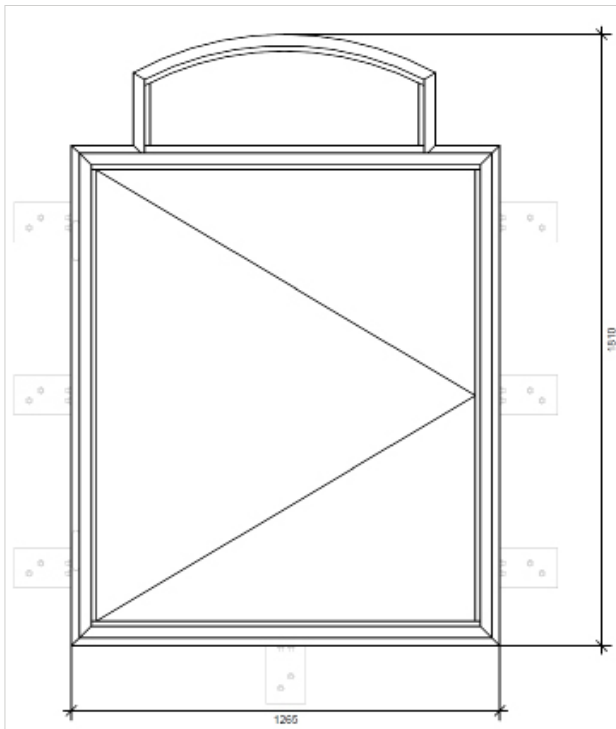


Abb. 11 und 12. Vorsatzfenster mit Metallrahmen, bündig mit der inneren Wandoberfläche montiert, Planung (links) und Umsetzung, © Fraunhofer IBP

Systembeschreibung – Vorsatzfenster Metall

Bei Einbau eines innenseitigen Fensters kann das Bestandsfenster komplett erhalten werden. Das neue, innenliegende Fenster aus Isolierglas erbringt eine hohe Energieeffizienzsteigerung. Das historische Fenster wird gleichsam wie in einer Vitrine präsentiert.

Einbau in eine ungedämmte Bestandswand:

Das **Vorsatzfenster** sitzt niveaugleich raumseitig in der Bestandsmauer (Mischmauerwerk). Ein lotrechtes Ausgleichen der Wandoberfläche kann u. U. notwendig sein. Durch Laschen wird das Fenster direkt auf die Wand befestigt. Das Fenster kann ggf. komplett bis über den Sturzbogen geführt werden.

Einbau in eine innengedämmte Wand:

Das **Vorsatzfenster** wird in die Dämmebene der Innendämmung der Wand eingebaut (siehe Abb. 11). Die Befestigungslaschen sind hierbei allerdings an entsprechend großen Winkeln angeschweißt, um die Stärke der Dämmschicht auszugleichen.

Schlitze an den Befestigungslaschen dienen als Justierungshilfe des Fensterrahmens. Nach der Montage wird mittels Dichtband luftdicht an die Wand angeschlossen und die Innendämmung an das Fenster angearbeitet. Das Fenster lässt sich durch einen Fensterflügel öffnen. Der obere Teil im Sturzbereich wird angepasst an die Bestandsöffnung, bspw. als festverglaster Segmentbogen ausgebildet. Diese Sanierungsvariante erhält das bestehende Fenster komplett in seiner ursprünglichen Form und verbessert den Komfort im Innenraum deutlich.

Auswirkungen auf die Bausubstanz:

- Ggf. lotrechtes Ausgleichen der Wandoberfläche.
- Abstimmen von Putz oder Dämmschicht im Befestigungsbereich und Verschraubung des Rahmens in der bestehenden Wand.

Ressourcenschonung:

- Hoher Grad an Ressourcenschonung am Bestand.
- Zusätzliche Ressourcen werden benötigt, da eine komplette Fensterebene zusätzlich eingezogen wird.
- Variante in Holzrahmen mit höherer Ressourcenschonung im Vergleich zur Variante mit Stahlrahmen.

Energieeinspar-Potenzial / Bauphysik:

Vorteile:

- Hohe Energieeinsparung durch modernes Wärmeschutzglas.
- U_w -Wert Gesamtkonstruktion bis ca. $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Bei Einbau in Innendämmebene geringe Wärmebrückenwirkung.
- Verbesserung der Luftdichtheit (Infiltrationsverluste) durch dicht schließende Gummidichtung.

Nachteile:

- Wärmeverluste durch Wärmebrücken am Stahlrahmen.
- Evtl. etwas ungünstigere Oberflächentemperaturen (thermisch getrennte Profile verbessern die Situation).
- Veränderung der Anmutung der Räume innen.

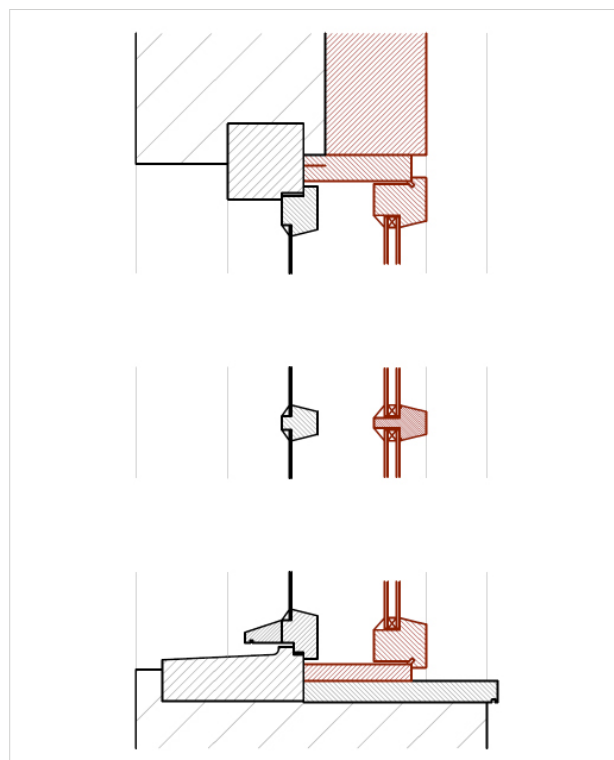


Abb. 13 und 14. Erweiterung eines Bestandsfensters mit Einfachglasscheibe zu einem Kastenfenster in Holz mit Futterkasten, Erweiterungen rot dargestellt, ©Fraunhofer IBP und RSP GmbH

Systembeschreibung – Erweiterung zum Kastenfenster in Holzbauweise

Der Ausbau zum Kastenfenster ist eine substanzschonende Lösung für die energetische Optimierung historischer Fenster.

Einbau in die Fensternische:

Das bestehende Einfachfenster wird zum **zweiflügligen Holz-Kastenfenster** erweitert. Der Fensterstock wird dazu in die vorbereitete Fläche eingesetzt und luftdicht angeschlossen. Die Kastentiefe beträgt meist zwischen 95 bis 110 mm, und der Futterkasten ist mit Nutleisten am Bestandsfenster angebunden. Der Futterstock kann auf das Fensterbrett aufgesetzt und dieses somit erhalten bleiben. Im anderen Fall müsste auch im Bereich der verputzten Brüstung bestehende Substanz abgenommen werden, um das Kastenfenster fachgerecht einbauen zu können und um eine optimale Verbindung von Alt- und Neufenster herzustellen sowie für die Möglichkeit, beide Fenster gut öffnen zu können. Der Einbau des Fensters erfolgt denkmalverträglich mit Stopfmateriale aus nachwachsenden Rohstoffen.

Aus Aspekten der Denkmalpflege und Ressourcenschonung sollte auf industriell hergestellte Schäume verzichtet werden. Die Profilgeometrie wurde hier bewusst schlank ausgeführt, um einer ähnlichen Optik wie die der vorhandenen Fenster zu entsprechen.

Auswirkungen auf die Bausubstanz:

- Vorbereitung des an das Bestandsfenster angrenzenden Laibungs-, Sturz- (und Brüstungs-)bereichs.
- Evtl. Rückbau in diesem Bereich bis zum Bestandsputz.

Ressourcenschonung:

- Hoher Grad an Ressourcenschonung am Bestand.
- Zusätzliche Ressourcen werden benötigt, da eine komplette Fensterebene mit entsprechendem Ressourcenbedarf bei der Herstellung zusätzlich eingebracht wird.

Energieeinspar-Potential / Bauphysik:

- Hohe Energieeinsparung durch modernes Wärmeschutzglas, U_w -Werte der Gesamtkonstruktion von ca. 1,1 – 1,5 W/m²K sind möglich.
- Geringe Wärmebrückenwirkung.
- Innere Fensterebene muss möglichst luftdicht ausgeführt werden (dicht schließende Gummidichtung).
- Verringerung der Infiltrationswärmeverluste durch dicht schließende Gummidichtung.
- Bei Ausführung mit Innendämmung: Laibungsdämmung (mit Sturz und Fensterbrüstung) hochwertig ausführen zur Minimierung der Wärmebrückenwirkung.

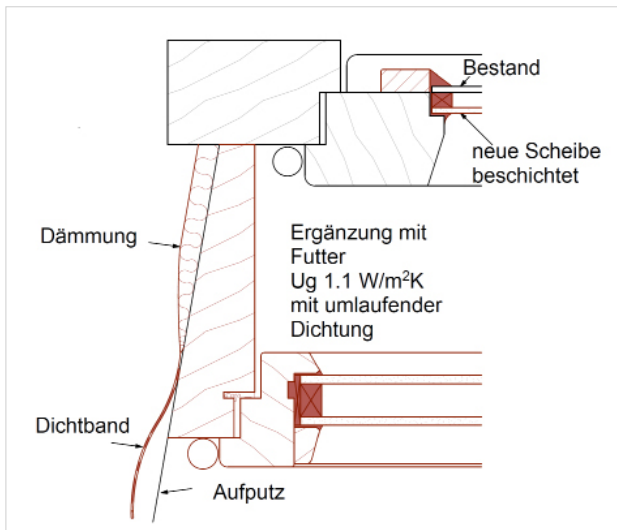


Abb. 15 und 16. Erweiterung eines Bestandsfensters zu einem Holz-Kastenfenster mit Isolierglas, zusätzlich zweite Isolierglasebene durch den Austausch des bestehenden Einfachglases mit einem Isolierglas, ©Holzmanufaktur Rottweil und Fraunhofer IBP



Systembeschreibung – Kastenfenster mit Wärmeschutzglas in beiden Fensterebenen

Zusätzlich zur Erweiterung zum Kastenfenster kann die Scheibe am originalen Fenster energetisch optimiert werden. Durch eine **Scheibenerweiterung** kann die bestehende Scheibe weiter genutzt werden und trägt damit zum Erhalt originaler Substanz und Ressourcenschonung bei.

Scheibenerweiterung mit Bestandsglas zum Isolierglas am Bestandsfenster:

Auch bereits zu Kastenfenster ertüchtigte Fenster erfahren durch eine Erweiterung der bestehenden Einbauscheiben des Bestandsfensters zu einem Isolierglas eine zusätzliche energetische Verbesserung. Im Rahmen einer Untersuchung wurden die Fenster in eine innengedämmte Wand eingebaut, bei denen die Kastenfensterebene (ca. 130 mm Kastentiefe Glas zu Glas) bereits mit einem Wärmeschutzglas (U_w 1,1 W/m²K) ausgeführt ist. Nachträglich wird die Einbauscheibe des außenliegenden Bestandsfensters ausgebaut und durch eine zusätzliche Glasscheibe zu einem Isolierglas ertüchtigt. Die Dicke des neuen Glasaufbaus beträgt hier ca. 15 mm, bei einem U_g -Wert von 0,9 W/m²K. Der historische Fensterrahmen wird durch die veränderte Glasdicke in der Glasfalztiefe angepasst und kann ansonsten erhalten bleiben.

Die Einbausituation ist durch die schmale Rahmendicke hinsichtlich der Wärmebrücken für ein Isolierglas jedoch ungünstig. Es entstehen vor allem am Glasrand Wärmebrückenverluste. Der sehr niedrigen U-Wert des Isolierglases wird dadurch in der Summe wieder erhöht.

Auswirkungen auf die Bausubstanz:

- Kein Eingriff in die bestehende Bausubstanz.
- Anpassung der Glasfalztiefe.

Ressourcenschonung:

- Hoher Grad an Ressourcenschonung am Bestand.
- Für die Herstellung des Kastenfensters werden zusätzliche Ressourcen benötigt, da eine komplette Fensterebene mit entsprechendem Ressourcenbedarf bei der Herstellung zusätzlich eingezogen wird.
- Bei Erweiterung des Bestandsglas zum Isolierglas oder Glasaustausch werden ebenso Ressourcen eingesetzt.

Energieeinspar-Potenzial / Bauphysik:

- Sehr niedriger U_w -Wert bis ca. 0,85 W/m²K (Passivhaus-Niveau) möglich bei Erhaltung des bestehenden Fensters.
- Hohe Oberflächentemperaturen an der Innenoberfläche des Fensters stellen hygienische Verhältnisse sicher.
- Günstigere Feuchteverhältnisse im Kastenzwischenraum.
- Die ungünstige Einbausituation eines Isolierglases am Bestandsfenster mit Kittbett führt zu hohen Wärmebrückenverlusten. Die Wirkung eines niedrigen U-Wertes des Isolierglases wird dadurch deutlich verringert.
- Innere Fensterebene muss möglichst luftdicht ausgeführt werden (dicht schließende Gummidichtung).
- Verringerung der Infiltrationswärmeverluste durch dicht schließende Gummidichtung.
- Bei Ausführung mit Innendämmung: Laibungsdämmung (mit Sturz und Fensterbrüstung) hochwertig ausführen zur Minimierung der Wärmebrückenwirkung.

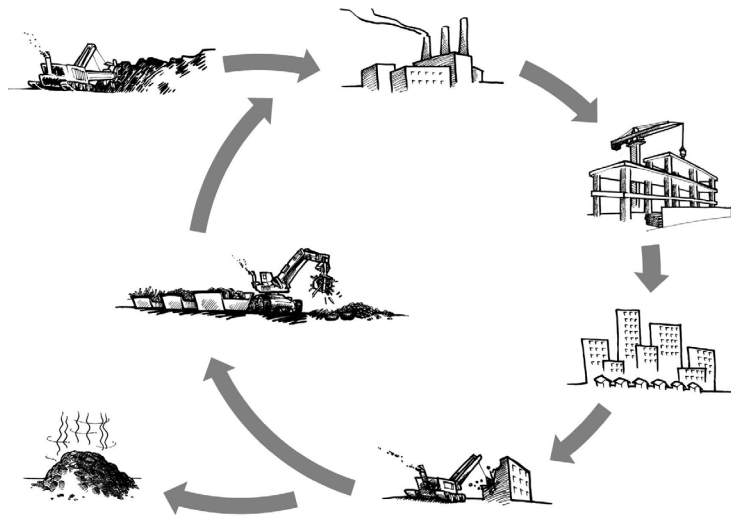


Abb. 17. Lebenszyklus von Bauprodukten, ©Jan Paul Lindner, Fraunhofer IBP

Motivation und Zielstellung

Bei der Auswahl von Möglichkeiten zur Sanierung von historischen Fenstern sind verschiedenste Kriterien abzuwägen. Ein relevantes Kriterium ist hierbei die Energieeffizienz und damit verbunden auch der Beitrag einer Sanierung zum Klimaschutz. Je nach Gebäudekontext sind verschiedene Varianten einer Fenstersanierung realisierbar. Zur quantitativen Beurteilung der ökologischen Effekte und Umweltpotenziale der Varianten ist der gesamte Lebenszyklus mit Herstellung, Gebäudebetrieb und Lebensende zu berücksichtigen. Die Abwägung zwischen Denkmalschutz, Erhalt eines historischen Erscheinungsbildes von Bestandsgebäuden und den Anforderungen an moderne Energiestandards wird hierbei ökologisch im lebenszyklusbezogenen Kontext (Ökobilanz) betrachtet. Hierzu werden Varianten der Fenstersanierung, die es ermöglichen, historische Gläser und Fenster weiter und/oder wieder zu verwenden, ökologisch über den gesamten Lebenszyklus untersucht.

Ziel der Analyse ist es, ökologisch vorteilhafte Varianten der Sanierung über den Lebenszyklus zu identifizieren. Zusätzlich werden Potenziale zur Einsparungen von treibhausgasrelevanten Emissionen über den Beitrag zur globalen Erwärmung (GWP) beziffert sowie Potenziale zur Minimierung des Verbrauchs von primärenergetischen fossilen Energieträgern und Ressourcen (PENRT) aufgezeigt.

Ökobilanz der Varianten zur Sanierung historischer Fenster

Im Rahmen der Forschungsarbeiten im Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege in Benediktbeuern werden an der denkmalgeschützten Alten Schäferei des Klosters unterschiedliche Varianten der Sanierung historischer Be-

standsfenster im Gebäudekontext erprobt. Diese bilden die Basis für die ökologische Analyse und die Identifikation von Umweltpotenzialen.

Nachfolgende Varianten werden aus ökologischer Sicht analysiert:

- Variante 1a: Historische Glasscheibe wird durch eine moderne Isolierglasscheibe ersetzt (Scheibenaustausch).
- Variante 1b: Historische Glasscheibe wird mit modernem Isolierglas gekoppelt und in einen Scheibenaufbau zur Wärmeschutzverglasung integriert.
- Variante 2: Inneres Vorsatzfenster mit Metallrahmen (M) / Holzrahmen (H).
- Variante 3a: Erweiterung des historischen Fensters zum Kastenfenster mit Metallrahmen (M) / Holzrahmen (H).
- Variante 3b: Historische Glasscheiben in einem vorhandenen historischen Kastenfenster werden durch moderne Isolierglasscheiben ersetzt.

Ökobilanz:

Technisch hergestellte und vom Menschen genutzte Produkte haben Wirkungen auf die Umwelt – über ihren gesamten Lebenszyklus von der Entnahme von Ressourcen aus der Natur, über die Herstellung und Nutzung der Produkte bis hin zu ihrem Lebensende.

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044 ist eine genormte Methode, die diese Umweltwirkungen objektiv und vergleichbar quantifizieren lässt. Sie betrachtet dabei ganz unterschiedliche Umweltproblembereiche, wie z. B. die globale Erwärmung (Treibhauspotenzial, GWP) oder aber auch den Verbrauch primärenergetischer fossiler Energieträger und Ressourcen (PENRT).

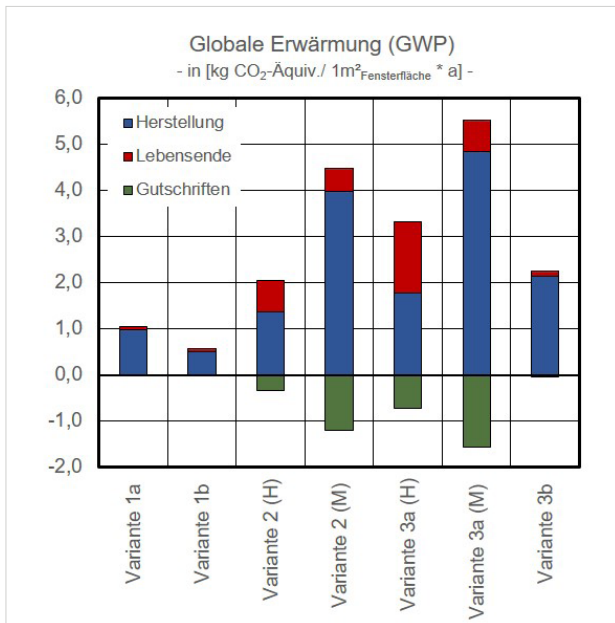


Abb. 18. Konstruktionsbedingte Umweltpotenziale der Varianten der Sanierung für die globale Erwärmung (GWP), © Fraunhofer IBP

Umweltpotenziale über den Lebenszyklus

Der ökologische Beitrag aus der Konstruktion zur globalen Erwärmung durch die Sanierung der Fenster selbst ist in Abbildung 18 dargestellt. Verglichen mit dem Einsparpotenzial von CO₂-äquivalenten Emissionen im Gebäudebetrieb (Abbildung 19) zeigt sich ein sehr geringer Beitrag der Konstruktion im Lebenszyklus.

Die Unterschiede in den konstruktionsbedingten Umweltpotenzialen sind maßgeblich durch die Unterschiede im Konstruktionsvolumen und den eingebrachten Materialmassen (je nach Rahmenprofil) bestimmt. Sie zeigen, dass ein geringer Materialeinsatz auch mit geringen konstruktionsbedingten Umweltwirkungen einhergeht (vergleiche Variante 1b). Umgekehrt führt ein hoher Materialeinsatz zu höheren Umweltwirkungen (vergleiche Variante 2, 3a und 3b).

Die Sanierung des Gebäudes auf das energetische Niveau 1 führt zu einer Verringerung des Beitrages zur globalen Erwärmung (GWP) um ca. 41 % im Vergleich zur Referenz. Bei zusätzlichem Austausch der Wärmeerzeugung kann insgesamt eine Reduktion von ca. 96 % im Betrieb realisiert werden (Niveau 1 im Vergleich zu Niveau 2, Abbildung 19).

Fazit

Die Ergebnisse der ökologischen Analyse für die Varianten der Sanierung historischer Fenster sind unter Lebenszyklusperspektive vergleichbar, alle Sanierungsvarianten sind aus Sicht ihrer Umweltpotenziale empfehlenswert. Der Vorteil ergibt sich durch große Einsparpotenziale im Gebäudebetrieb. Innerhalb der Varianten schneidet Variante 1b (Kombination aus historischer Glasscheibe mit modernem Isolierglas) am besten ab.

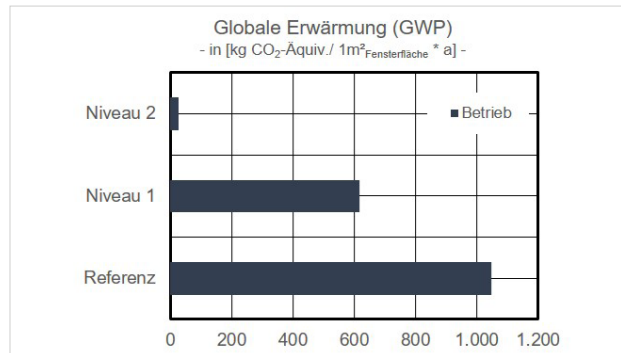


Abb. 19. Umweltpotenziale im Betrieb der Varianten der Sanierung für die globale Erwärmung (GWP), © Fraunhofer IBP

Aufbauend auf einer hochwertigen energetischen Sanierung der Fenster und Gebäudehülle („Efficiency First“) bietet sich als weitere Maßnahme eine Bereitstellung des verbleibenden Energiebedarfs über erneuerbare Energieträger an.

Die vorliegende ökologische Analyse zeigt auch, dass historische Gebäude ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten können und ressourcenschonende Varianten der Sanierung historischer Fenster auf ihrem Weg zur Klimaneutralität bereit stehen. Gleichzeitig können das historische Gebäudebild erhalten und Aspekte des Denkmalschutzes umgesetzt werden.

Randbedingungen der ökologischen Analyse:

- Alle Varianten der Sanierung werden anhand eines Referenzfensters analysiert (Außenrahmen 1,295 m x 0,935 m).
- Die Lebenszyklusphasen Herstellung und Lebensende (inkl. etwaiger Gutschriften für Recycling etc.) stellen die sog. konstruktionsbedingten Umweltpotenziale dar. Der Betrieb wird über betriebsbedingte Umweltpotenziale abgebildet.
- Es wird der Gebäudekontext, d. h. auch Effekte der Sanierung der Fenster durch Einsparungen im Gebäudebetrieb, berücksichtigt. Für den Gebäudebetrieb werden drei energetische Niveaus der Sanierung über 30 Jahre analysiert:
 - > Referenz: Gebäudehülle und Fenster unsaniert, Wärmebereitstellung über dezentrale Öfen, Endenergiebedarf mit 315 kWh/m²·a.
 - > Niveau 1: Teilsanierung Gebäudehülle und Sanierung Fenster, Wärmebereitstellung über dezentrale Öfen, Endenergiebedarf mit 185 kWh/m²·a.
 - > Niveau 2: Teilsanierung wie Niveau 1, Wärmebereitstellung über zentralen Hackschnitzelkessel, Endenergiebedarf mit 192 kWh/m²·a.

Umweltpotenziale werden für den Beitrag zur globalen Erwärmung (Treibhauspotenzial, GWP) und dem Verbrauch primärenergetischer fossiler Energieträger und Ressourcen (PENRT) ermittelt und bezogen auf 1 m² Fensterfläche im Rohbau-Maß und ein Jahr dargestellt.

Beteiligte Institutionen

Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT), Otto-Friedrich-Universität Bamberg:

Die Denkmalwissenschaften der Otto-Friedrich-Universität Bamberg definieren sich als theoretisch fundierte und anwendungs- wie technikbezogene Disziplin an der Schnittstelle von Theorie und Praxis. Alleinstellungsmerkmal des 2016 gegründeten universitären Kompetenzzentrums für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) ist die breite interdisziplinäre Ausrichtung, die geistes-, ingenieur- und materialwissenschaftliches Fachwissen nutzbar macht.

Die am KDWT praktizierte Zusammenführung von empirischen, theoretisch-begrifflichen, und technologischen Wissensbeständen und Methoden begründet sich in dem gemeinsamen Ziel, die facettenreichen Themenfelder des Kulturerbes und der Denkmalpflege interdisziplinär zu erforschen und deren gesellschaftliche Relevanz zu vermitteln. Damit leistet das KDWT einen wesentlichen Beitrag zum gesamtuniversitären Forschungsschwerpunkt „Erschließung und Erhalt von Kulturgut“.

Zu den Kernaufgaben des KDWT gehören die Vertiefung des Wissens- und der Technologietransfers zu außer-universitären Einrichtungen, der Ausbau der technischen Kompetenz und die Ergänzung des Lehrangebots. Der fachwissenschaftlichen Ausdifferenzierung der Denkmalwissenschaften entsprechen vier eigenständige Arbeitsbereiche Denkmalpflege, Bauforschung/Baugeschichte/Bauerhalt, Restaurierungswissenschaften, Präventive Konservierung und Digitale Denkmaltechnologien.

Der Schwerpunkt der Restaurierungswissenschaft liegt in der Kunsttechnologie, den Materialwissenschaften sowie in den Konservierungswissenschaften. Hierbei stehen Techniken zur Substanzerhaltung, zur Präventiven Konservierung, zur Pflege und zum Monitoring im Fokus. Das Denkmal wird dabei als Teil seiner Umwelt verstanden, welches mit dieser in einer Wechselbeziehung steht.

<https://www.uni-bamberg.de/kdwt/>

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP):

Die Anwendung bauphysikalischer Grundsätze ist das Fundament der Forschungs- und Entwicklungsarbeit des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP. Neben klassischen bauphysikalischen Themen wie Akustik, Energieeffizienz, Raumklima, Hygiene und Sensorik, Baustoffrecycling sowie Hygrothermik forscht das Institut an einer großen Bandbreite an Vorhaben mit hoher gesellschaftlicher Relevanz. So geht es beispielsweise darum, Schulen oder Arbeitsräume integral zu gestalten, das Fliegen umweltfreundlicher zu machen oder das energetische Potenzial ganzer Städte auszuloten. Produkte, Prozesse und Dienstleistungen unter ökologischen, ökonomischen, sozialen und technischen Gesichtspunkten zu analysieren und sie der ganzheitlichen Bilanzierung zu unterziehen, bilden weitere Arbeitsschwerpunkte.

Leistungsfähige Labore und Prüfeinrichtungen sowie das größte bekannte Freilandversuchsgelände am Standort Holzkirchen ermöglichen komplexe bauphysikalische Untersuchungen. Moderne Labormesstechnik und Berechnungsmethoden optimieren Bauprodukte für den praktischen Einsatz. Untersuchungen in Modellräumen, im Prüffeld und am ausgeführten Objekt dienen der bauphysikalischen Erprobung von Komponenten und Gesamtsystemen für den Neubau wie für den Sanierungsfall.

Die Analyse von und Konzepte für das Raumklima in historischen Bauten ebenso wie die Entwicklung neuer Lösungen für Museumsdepots und Archive, die nachhaltige Sanierung von Museen sowie Forschung für die Denkmalpflege am Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern gehören zu den vielfältigen Themenbereichen des Geschäftsfelds Kulturerbe-Forschung. Dabei steht die Präventive Konservierung – also die Frage, wie sich Schäden an Kunst und Kulturgut durch die Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen langfristig vermeiden lassen – im Vordergrund. Dieser Ansatz wird auch auf die Denkmalpflege oder die Pflege von archäologischen Stätten übertragen und angewandt.

<https://www.ibp.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder-produkte/kulturerbeforschung.html>

