

PRAXIS FORSCHUNG



Holzmanufaktur



Rottweil



VORBEMERKUNG	5
ABGESCHLOSSENE PROJEKTE	
PROJEKT 1: SCHALLSCHUTZ UND LUFTDICHTHEIT HISTORISCHER FENSTER	8
<i>PROBLEMSTELLUNG</i>	9
<i>PROJEKTZIELE</i>	9
<i>LÜFTUNGSWÄRMEVERLUSTE</i>	10
<i>ERGEBNIS</i>	11
<i>TRANSMISSIONSWÄRMEVERLUSTE</i>	12
<i>ERGEBNIS</i>	12
<i>SCHALLDÄMMWERTE</i>	13
<i>BAUPRAKTISCHE UMSETZUNG</i>	14
PROJEKT 2: ENERGETISCHE OPTIMIERUNG	
INNOVATIVER SANIERUNGSMASSNAHMEN FÜR FENSTER	16
<i>PROBLEMSTELLUNG</i>	17
<i>PROJEKTZIEL</i>	18
<i>STRUKTURIERUNG UND TYPISIERUNG DES FENSTERBESTANDS</i>	19
<i>ENERGIEBILANZ ALS GRUNDLAGE</i>	21
<i>WÄRMEVERLUSTE DURCH FUGEN</i>	22
<i>ERGEBNISSE</i>	23
<i>WÄRMEBRÜCKENBETRACHTUNGEN</i>	25
<i>ERGEBNISSE</i>	26
<i>ZUSAMMENFÜHRUNG</i>	27
PROJEKT 3: SCHADENSFREIE ENERGETISCHE FENSTERSANIERUNG	
IM ALTBAU: KASTENFENSTER	28
<i>PROBLEMSTELLUNG</i>	29
<i>PROJEKTZIELE</i>	31
<i>ERGEBNISSE</i>	32
<i>BAUPRAKTISCHE UMSETZUNG</i>	34

LAUFENDE PROJEKTE**PROJEKT 4: ERTÜCHTIGUNG VON HISTORISCHEN BESTANDSFENSTERN**

UNTER ASPEKTEN DES KLIMASCHUTZES 36

PROBLEMSTELLUNG 37*PROJEKTZIELE* 38**PROJEKT 5: INNOVATIVE METHODEN ZUR REINIGUNG, ABTRAGUNG**

UND AUFBRINGUNG VON OBERFLÄCHEN 40

PROJEKTZIELE 41*CO₂-SCHNEESTRAHLREINIGUNG* 42*LASERBASIERTES REINIGEN MIT LICHT* 42*ATMOSPHÄRENDRUCKPLASMAVERFAHREN* 43

RESÜMEE 44

ZUM UMGANG MIT HISTORISCHEN FENSTERN IM BESTAND UND IM BAUDENKMAL 44

LITERATURVERZEICHNIS 46

IMPRESSUM 47



PRAXISFORSCHUNG DER HOLZMANUFAKTUR ROTTWEIL

VORBEMERKUNG

Hermann Klos

Seit 2015 initiieren die Holzmanufaktur Rottweil GmbH und die Holzmanufaktur SWISS AG in Hunzenschwil in der Schweiz Forschungsprojekte zur Erhaltung und zur funktionalen Verbesserung von Bestandsfenstern. Darüber hinaus unterstützen wir Hochschulen und Institute in den Projekten durch finanzielle Beteiligung und/oder baupraktische und konzeptionelle Zuarbeit. In dieser Veröffentlichung wird die Essenz der Ergebnisse von drei abgeschlossenen und zwei noch laufenden Forschungsprojekten, an denen die Holzmanufakturen mitgewirkt haben bzw. mitwirken, vorgestellt. Wir haben uns dabei bemüht, die komplexen wissenschaftlichen Zusammenhänge für die baupraktische Umsetzung in eine einfachere Darstellung zu überführen.

Die Erhaltung von Fenstern in geschützten Gebäuden ist ein gesetzlich verankerter Kulturauftrag. Der Fensterbestand von hochgerechnet 1,2 bis 1,5 Milliarden Einheiten in Wohn- und Nichtwohngebäuden birgt neben den architektonischen, baukulturellen und bauhistorischen Aspekten auch ein immenses Potenzial hinsichtlich Umweltschutz, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz.

Kaum ein Bau- und Ausstattungsdetail an Gebäuden muss komplexere Anforderungen erfüllen als ein Fenster. Aber selbst neue Fenster werden den Erwartungen von Bauherren und Architekten nicht – oder doch zumindest nicht lange – gerecht, denn in einem teils ruinösen Wettbewerb geht Qualität häufig verloren. Die Anforderungen entwickeln sich zudem derart dynamisch, dass Fenster bereits nach kurzer Zeit nicht mehr den aktuellen Normen entsprechen. Der Wärmedurchgangskoeffizient (früher *k*-Wert, heute *U*-Wert) lag über Jahrhunderte bis 1970 nahezu konstant bei maximal 3,0 W/(m² · K). Innerhalb der letzten fünf Jahrzehnte wurde mit materiell und konstruktiv angepassten Produkten hingegen eine Verbesserung des *U*-Wertes auf aktuell 0,4 W/(m² · K) erreicht.

Die erste Ölkrise in den 1970er-Jahren stellte die bis dahin dem Bauen zugrunde liegenden energetischen

Standards radikal infrage. Ganz stark im Fokus stand damals das Fenster – auch im Baudenkmal. Für Fenster im Bestand und vor allem für besonders wertvolle historische Fenster sind die vom Gesetzgeber, von den Architekten und von den Nutzern formulierten Anforderungen oft so hoch, dass ihre Erhaltung und ihre funktionale Verbesserung eine heikle, teilweise sogar gefährliche Gratwanderung geworden ist.

Die Holzmanufaktur Rottweil wandert seit mehr als 30 Jahren auf diesem Grat, hat Ideen und entwickelt Konzepte und innovative Verfahren und Produkte wie REVETRO® und RETHERMO®, um Bestandsfenster – vor allen Dingen im Baudenkmal – zu erhalten und die Erwartungen zu erfüllen. Dieses Ziel ist für uns Herausforderung, Aufgabe und Erfüllung zugleich. Bei unserer Arbeit beachten wir die „Charta von Venedig“ (1964) und die „Charta von Burra“ (2013) und die in ihnen formulierten restaurierungsethischen Imperative. Ein großes Augenmerk liegt hierbei auf der Akzeptanz des Bauteils Fenster durch Bauherren, Architekten und Nutzer. Eine gute Nutzerakzeptanz ist die wichtigste Voraussetzung für einen langen Erhalt von Bestandsfenstern – und nur zufriedene Bauherren und Nutzer sind Multiplikatoren, um dem Schattendasein der Bestandsfenster in der Bauwirtschaft durch ihre Erhaltung und ihre Verbesserung ein Ende zu bereiten.

NUTZERAKZEPTANZ UND BEGEISTERUNG IST ZU ERREICHEN, WENN DIE ERWARTUNGEN AN DAS FENSTER ERFÜLLT WERDEN.

HIERZU GEHÖREN:

- **Wärme/Kälte:** Fenster sollen im Winter wie im Sommer die gewünschte Raumtemperatur bei gleichzeitig geringem Energieaufwand gewährleisten (Abb. 1).
- **Licht:** Über Jahrhunderte war die Belichtung die einzige Anforderung, die ein Fenster zu erfüllen hatte. Auch heute noch muss ein Fenster ein optimales Zusammenspiel aus gutem Sehen, Lichtgestaltung, Tageslicht, künstlicher Beleuchtung, Sonneneinstrahlung, Lichtverteilung und Blendschutz ermöglichen.
- **Schall:** Ein gutes Fenster muss den Bewohnern und Nutzern eine angenehme Hörwahrnehmung in den Räumen ermöglichen und die immer komplexeren Anforderungen der Lärmabwehr erfüllen.
- **Raumklima/Behaglichkeit:** Thermische Behaglichkeit sorgt für Wohlbefinden und Gesundheit in den Räumen und steigert die Leistungsfähigkeit.
- **Energieeffizientes/klimagerechtes Bauen:** Ein Fenster erfüllt diesen Anspruch, wenn es ein gutes Zusammenwirken von Dämmung, Lüftung, Wärmespeicherung, Sonneneinstrahlung und Regenschutz bietet.
- **Brand:** Der Schutz von Leben, Gesundheit und Sachwerten muss garantiert sein. Hier darf das Fenster kein Schwachpunkt sein.
- **Lufttransmission:** Dichte Fenster sind gut für die Umwelt und das Klima, doch nicht immer für die Menschen und die Bausubstanz. Luftdichte Fenster führen bei zu niedrigen Luftwechselraten zu raumhygienischen und gesundheitlichen Problemen der Bewohner und Nutzer und schädigen auf Dauer die Bausubstanz und die Konstruktion durch Feuchte (Abb. 2).
- **Sicherheit:** Einbrüche in Wohnungen gehören zu den unangenehmsten Dingen, die Bewohnern und Nutzern widerfahren können. Ein Fenster sollte mit all seinen Komponenten dem Schutzbedürfnis gerecht werden.
- **Gestaltung/Design:** Aufgrund geltender Normen und Richtlinien sind heute z. B. in den Bayerischen Alpen und auf der Ostseeinsel Rügen eingebaute Fenster identisch, anonym, austauschbar. Eine regional spezifische gestalterische Integration der Fenster erfolgt nur bei wenigen herausgehobenen Bauprojekten.

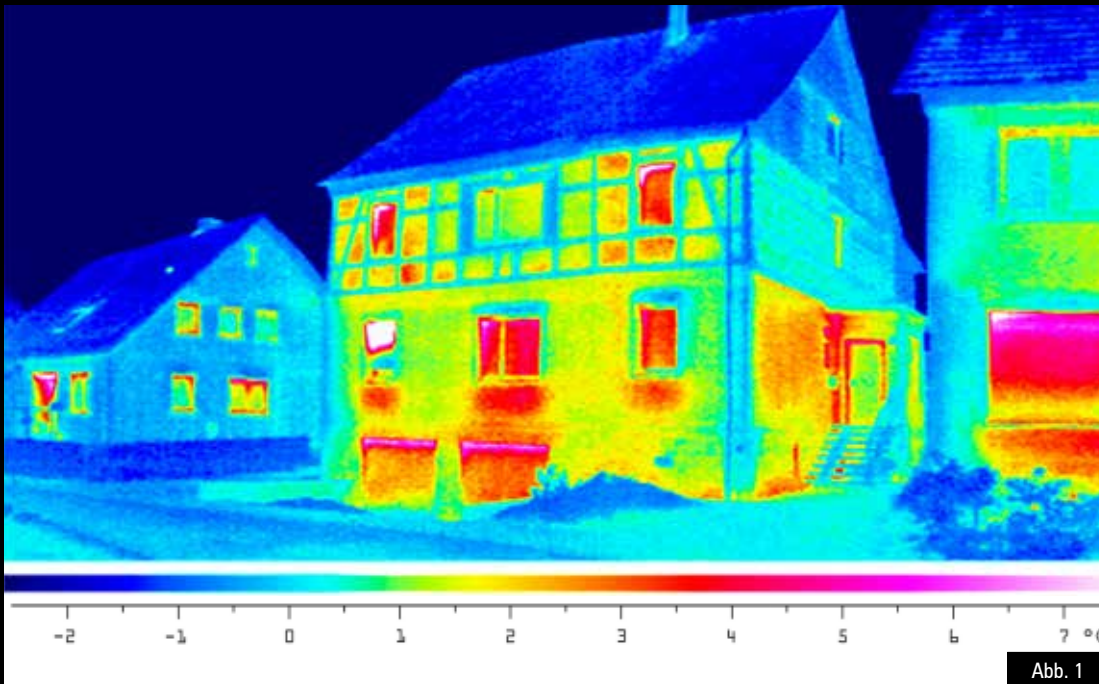


Abb. 1:
Gebäudethermografie als effektives bildgebendes Verfahren zur visuellen Darstellung der Oberflächentemperatur von Objekten durch Messung der Infrarotstrahlung

Quelle:
stock.adobe.com

Abb. 1

Viele Forschungseinrichtungen, Unternehmen, Handwerker und Tüftler arbeiten an der Umsetzung dieser Anforderungen. Schwerpunkt unserer Arbeit ist es, für alle diese Anforderungen gute Lösungen zu finden – gute Lösungen für Bestandsfenster im Allgemeinen und für geschützte Fenster in Baudenkmalen im Besonderen. Wichtig ist uns auch, alle Aspekte der Lebenszyklusbetrachtung und der Ökobilanz zu berücksichtigen. Das vorhandene Fenster muss zukunftstauglich sein, und Lesbarkeit und historische Authentizität dürfen durch die notwendigen Maßnahmen zur funktionalen Verbesserung nicht verfälscht werden oder gar verloren gehen.



Abb. 2:
Der Einbau einer Isolierverglasung im inneren Flügel zur energetischen Verbesserung eines Verbundfensters kann bei bestimmten Wetterlagen zu Kondensatausfall an der kalten äußeren Scheibe führen. Die Folge sind Durchfeuchtung mit Schimmelbildung und optische Beeinträchtigung.

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

Abb. 2

Projekt 1
Abgeschlossenes
Projekt

**SCHALLSCHUTZ UND
LUFTDICHTHEIT
HISTORISCHER FENSTER**

Hermann Klos

Forschungsprojekt: Schallschutz und Luftdichtheit historischer Fenster – Untersuchung des Einflusses der Fugendurchlässigkeit auf den Schallschutz und die Lüftungswärmeverluste historischer Fenster (vgl. Berner Fachhochschule, 2018; Wehle, 2018)

Forschungseinrichtung: Berner Fachhochschule – Departement Architektur, Holz und Bau, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur, Kompetenzbereich Bauphysik und Energie
Projektleitung: Prof. Dr. Christoph Geyer
Verfasserin: Barbara Wehle, M. Sc.

Projektpartner: André SA, Yens-sur-Morges, Schweiz
Haupt AG, Ruswil, Schweiz
holzmanufaktur SWISS AG, Hunzenschwil, Schweiz
Prona AG, Biel, Schweiz
Vogel Fensterbauer AG, Goldach, Schweiz
Fachstelle Denkmalpflege Stadt Biel, Schweiz
Kantonale Denkmalpflege Aargau, Schweiz
Kantonale Denkmalpflege Zürich, Schweiz

Forschungszeitraum: 2017–2018

Auftraggeber: Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege, Zürich, Schweiz,
Auftragsnummer F.007568-10-72FE-01-01

PROBLEMSTELLUNG

Fenster werden heute, selbst wenn sie nur 10 bis 20 Jahre alt sind, sehr schnell infrage gestellt. Dies hängt einerseits mit der globalen Klimadiskussion zusammen. Andererseits suggeriert die Fensterbauindustrie, nur ein neues Fenster sei ein gutes Fenster. In der Tat entsprechen die meisten Fenster bereits nach 10 bis 15 Jahren nicht mehr dem, was technisch möglich ist und vom Gesetzgeber gefordert wird. Die Aspekte Ressourceneffizienz, graue Energie und Bumerangeffekt (oder Rebound-Effekt) werden in dieser Diskussion allerdings ausgeblendet (vgl. Graue Energie, 2020; Rebound Effekt, 2020).

PROJEKTZIELE

Das Forschungsprojekt der Berner Fachhochschule hatte das Funktionsverbesserungspotenzial von Bestandsfenstern – vor allem geschützten Fenstern in Gebäuden, die als Baudenkmal klassifiziert sind – zum Ziel.

Differenziert betrachtet wurde bei diesen historisch wertvollen Fenstern auch die Frage der Erhaltung. Da sie in den Augen der meisten Betrachter ihren Nutzungs- und Lebenszyklus schon mehrmals verbraucht haben, stehen diese Fenster auf der Roten Liste der Substanzverluste im Baudenkmal weit oben. Eigentümer und Nutzer von Gebäuden und Wohnungen mit älteren Fenstern klagen besonders über die Undichtheit, die hohen Energieverluste, das niedrige Schalldämmmaß und die fehlende Sicherheit und häufig auch über den fehlenden sommerlichen Wärmeschutz.

Im Forschungsprojekt standen folgende Aspekte auf der Agenda ganz oben:

- **Lüftungswärmeverluste** von Bestandsfenstern: Verluste durch offene Fugen zwischen Flügel und Rahmen und im Bereich des Baukörperanschlusses
- **Transmissionswärmeverluste** von Bestandsfenstern: Verluste über die Wärmeleitung der verbauten Materialien
- **Schalldämmung** von Bestandsfenstern: niedrige Schalldämmmaße aufgrund der verbauten Materialien und offenen Fugen

Mit wissenschaftlichen Methoden wurden im Projekt an sechs unterschiedlich historisch wertvollen Gebäuden in der Schweiz die Ergebnisse von elf durchgeführten Fenstersanierungen unter Berücksichtigung denkmalpflegerischer Gesichtspunkte ausgewertet.

Der Heizenergiebedarf wurde im Istzustand und die Veränderung der Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste nach der Sanierung der am häufigsten vertretenen Fensterkonstruktionen Einfach-, Verbund- und Kastenfenster mit und ohne Vorfenster ermittelt.

Gemessen wurde hierfür der natürliche Luftstrom durch die Fenster vor und nach der Sanierung. Im Istzustand war eine 3-fache Überschreitung der kantonal definierten Grenzwerte für Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste zu verzeichnen.

Aus den Ergebnissen wurde das Energieeinspar- und das Schalldämmpotenzial durch die Sanierung der Fenster – auch im Vergleich zu anderen energetischen Sanierungsmaßnahmen, wie z.B. Dämmmaßnahmen der Außenwände – berechnet.

LÜFTUNGSWÄRMEVERLUSTE

Durch geeignete Maßnahmen wie eine Grundinstandsetzung der Fenster mit Feinjustierung von Beschlägen, Optimierung des Anpressdrucks und Einbau einer auf die Falzgeometrie abgestimmten Dichtungsebene (Abb. 3) konnte eine Reduzierung der Lüftungswärmeverluste von bis zu 93% gemessen werden (vgl. Tabelle 1). In Einzelfällen wurden nach der Sanierung jedoch auch schlechtere Werte gemessen. Das heißt, ausschlaggebend für die funktionale Verbesserung der Fenster ist die Qualität der ausgeführten Arbeiten.

Abb. 3:
Dichtungseinbau: neue
Dichtung im Rahmen
eingebaut

Quelle:
holzmanufaktur
SWISS AG

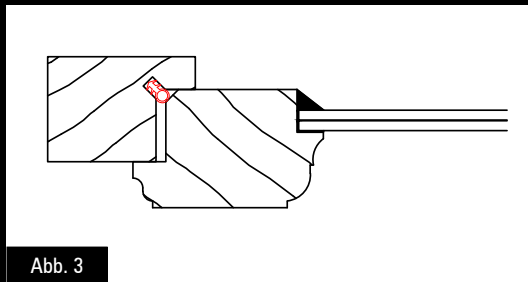


Abb. 3

Der Einbau einer Dichtung bedeutet nicht automatisch, ein dichteres Fenster zu erhalten. Die Dichtung muss abgestimmt sein auf die vorhandene Falzgeometrie und gegebenenfalls müssen Beschläge justiert werden, um ein gutes Ergebnis zu erreichen. Denn die Dichtungen dürfen nicht zusammengequetscht werden, da sie sonst die Elastizität verlieren und ihre Funktion nicht mehr erfüllen können. Der Flügel darf die Dichtung nur leicht touchieren. Um das zu erreichen, kann es nötig sein, die scharfe Flügelkante leicht zu brechen.

Alle diese Maßnahmen waren möglich, ohne das Erscheinungsbild und die historische Lesbarkeit des Bauteils Fenster zu beeinträchtigen. Eine Reduzierung der Lüftungswärmeverluste um 93% bei einem historischen Fenster ist ein hervorragendes Ergebnis und bedeutet eine erhebliche Reduzierung der Heizkosten. Doch wird zugleich der natürliche Luftvolumenstrom der Fenster so stark verringert, dass die hygienisch

notwendigen Mindestluftwechselraten nicht mehr erzielt werden können. Eine zu geringe Luftwechselrate führt aber zu Feuchteschäden und höheren Schadstoffkonzentrationen, z. B. zu einem erhöhten Anteil von CO₂ in der Raumluft. Da bei historischen Fenstern in der Regel keine mechanischen Zwangsbelüftungen eingebaut werden, ist eine Sensibilisierung der Eigentümer und Nutzer für ein regelmäßiges Lüften nötig, um Feuchteschäden zu vermeiden. Eine Alternative kann die Klimatisierung der Räume sein. Eine andere Möglichkeit ist eine etwas weniger dichte Dichtungsebene, in deren Folge der Fugendurchlasskoeffizient a reduziert wird, sodass die Mindestluftwechselraten gewährleistet sind. Gar keine Dichtung einzubauen, ist meist keine Alternative, da dies zulasten der Behaglichkeit und des Wohnwerts geht, klimaschädlich ist und der natürliche Luftstrom bei unsanierten, also nicht abgedichteten Fenstern deutlich über den Standardnutzwerten für die hygienischen Mindestluftwechselraten liegt.

Ein Ventilator an der Zimmertür (Abb. 4) erzeugt einen konstanten Unterdruck, der schrittweise erhöht wird, parallel dazu wird gemessen, wie schnell die Luft durch vorhandene Undichtigkeiten, Leckagen und offene Fugen an Fenstern in das Gebäude nachströmt. Die Messungen des BlowerDoor-Systems dokumentieren eine durchschnittliche Luftwechselrate im Gebäude.



Abb. 4

Abb. 4:
Für die Messung mit dem a-Wert Mess-System (BlowerDoor GmbH) präpariertes Fenster (links) und für die a-Wert-Messung installierter Ventilator (rechts)

Quelle: Wehle, 2018, S. 22

Messobjekte	Unsanierete Fenster				Sanierete Fenster				Differenz	
	$V_{50,a}$	95 %	$V_{50,MLM}$	95 %	$V_{50,a}$	95 %	$V_{50,MLM}$	95 %	$\Delta V_{50,a}$	$\Delta V_{50,MLM}$
	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	%	%
Basel, BS-1	70,96	1,87	93,26	2,5	19,79	1,68	26,43	0,37	-72	-72
Basel, BS-2	32,42	1,24	33,64	0,299	25,22	0,836	27,31	1,98	-22	-19
Bern, BE-1	82,27	0,867	85,05	1,18	26,63	1,87	26,46	0,3	-68	-69
Bern, BE-2	59,25	1,21	58,24	1,47	2,536	0,038	3,961	0,022	-96	-93
Corseaux, GE-1	28,36	0,604	31,95	0,468	4,47	0,16	5,11	0,07	-84	-84
Corseaux, GE-2	33,28	2,09	33,52	0,432	19,95	2,29	24,66	0,19	-40	-26
Ebnat-Kappel, SG-1	— ¹⁾	— ¹⁾	— ¹⁾	— ¹⁾	43,46	3,35	41,61	1,52	— ¹⁾	— ¹⁾
Luzern, LU-1	46,39	2,77	50,36	1,155	11,6	1,15	16,33	0,276	-75	-68
Luzern, LU-2	11,19	0,81	13,631	0,448	34,53	0,598	34,6	0,536	209	154
Neuchâtel, NE-1	— ¹⁾	— ¹⁾	69,66	1,02	— ¹⁾	— ¹⁾	28,35	0,157	— ¹⁾	-59
Neuchâtel, NE-2	— ¹⁾	— ¹⁾	63,27	4,7	— ¹⁾	— ¹⁾	39,32	0,542	— ¹⁾	-38

Tabelle 1:
Volumenströme V :
Berechnung bei 50 Pa Druckdifferenz aus a-Wert-Messungen und aus MLM-Messungen vor und nach der Sanierung inklusive 95 % Vertrauensbereich sowie Differenz der vor und nach der Sanierung ermittelten Messwerte

Quelle: Wehle, 2018, S. 81

¹⁾ Aufgrund hoher Messunsicherheiten ist davon auszugehen, dass während der Luftdichtigkeitsmessungen bestimmter Fenster Fehlströme über die mit Holz verkleideten Fensterlaibungen auftraten. Die Ergebnisse der entsprechenden a-Wert-Messungen und der MLM-Messungen der Fenster sind daher als ungültig anzusehen und Differenzwerte nicht erchenbar.

MLM micro leakage meter (Dichtheitsprüfung mit sehr kleinen Volumenströmen; vgl. Funktionsprüfung von Lüftungs- und Klimaanlage, 2016).

ERGEBNIS

Die Heizenergieersparnis durch Reduzierung der Lüftungswärmeverluste liegt zwischen 19 und 93 %, der Mittelwert beträgt 60 %. Das in Basel oft noch vorhandene Vorfenster – eine Variante des Kastenfensters – verbessert den Fugendurchlasskoeffizienten zudem erheblich.

TRANSMISSIONSWÄRMEVERLUSTE

Transmissionswärmeverluste (vgl. Tabelle 2) sind die Verluste der Wärmeleitung über Bauteile der Gebäudehülle. Holz hat einen niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten, sodass hier keine speziellen Ertüchtigungsmaßnahmen notwendig sind. Bei Bestandsfenstern hingegen weisen

die einfachen Verglasungen überwiegend einen hohen U_g -Wert von $5,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf. In diesen Fällen kann der U_g -Wert durch den Einbau einer effizienten Sonderisolierverglasung auf $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ verbessert werden.

Tabelle 2:
Transmissionswärmeverluste über die verschiedenen Bauteile der Wärme übertragenden Umfassungsfläche im Istzustand, nach einer Sanierung der Fenster sowie nach Durchführung weiterer Sanierungsmaßnahmen

Bauteile ¹⁾	Transmissionswärmeverluste Q_T					
	Ist-Zustand		Fenstersanierung		Weitere Maßnahmen	
	in kWh/m ²	in %	in kWh/m ²	in %	in kWh/m ²	in %
Dach, Decke gegen unbeheizten Bereich	35.5	22.7	35.5	24.1	8.9	15.8
Wände gegen außen u. unbeheizten Bereich	51.5	32.9	51.5	34.9	26.5	46.8
Fenster	24	15.3	14.9	10.1	14.9	26.4
Boden gegen unbeheizten Bereich	45.6	29.1	45.6	30.9	6.2	11
Summe	156.6	100	147.6	100	56.6	100

Quelle: Wehle, 2018, S. 74

¹⁾ Grundlage der Untersuchungen ist ein Durchschnitt historischer Schweizer Gebäudetypen (Abb. 5 und 6).

Abb. 5:
Im Rahmen des Projekts energetisch saniertes Stadthaus in Bern: Der U_g -Wert wurde von 2,8 auf $0,75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ verbessert, das Schalldämmmaß um 13 dB erhöht und die Luftdurchlässigkeit um 93% reduziert.



Abb. 5



Abb. 6

Abb. 6: Im Rahmen des Projekts energetisch saniertes Stadthaus in Basel, Eichenfenster mit Vorfenster: Bei der Sanierung wurde das Vorfenster ausgebaut und das Permanentfenster durch Einsatz einer Sonderisolierverglasung und einer Dichtungsebene energetisch ertüchtigt. Der U -Wert der Verglasung U_g verbesserte sich in Summe der beiden Fenster von 2,8 auf $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Da das Vorfenster nicht wieder eingebaut wurde, verschlechterte sich das Schalldämmmaß leicht von 28,9 auf 27,8 dB.

Quelle: holzmanufaktur SWISS AG

Quelle:
holzmanufaktur
SWISS AG

ERGEBNIS

Die Heizenergieersparnis durch eine Verringerung des Transmissionswärmeverlusts ist abhängig vom Flächenanteil der Fenster an der Gebäudehülle. Bei älteren Baudenkmalen mit überwiegend kleineren Fensterflächen ist daher nur eine geringe Reduzierung der Transmissionswärmeverluste möglich. Bei jüngeren und jungen Baudenkmalen mit viel Fensterfläche kann dagegen eine deutliche Reduzierung der Transmissionswärmeverluste erzielt werden.

SCHALLDÄMMWERTE

Die hohen und ständig steigenden Lärmemissionen gehören heute mit zu den größten Umweltproblemen mit seelischen, körperlichen und psychosomatischen Folgen. Private, gewerbliche und öffentliche Mobilität verursachen Lärmemissionen durch Kraftfahrzeuge, Straßenbahnen, Züge und Flugzeuge (Abb. 7). Eine Reduzierung der Wärmeverluste durch den Einbau einer Schlauchdichtung und den Ersatz der einfachen Verglasung durch eine Standardisolierverglasung kann zugleich zu einer Erhöhung des Schalldämmmaßes um bis zu 13 dB führen (vgl. Tabelle 3). Durch den Einbau von Schallschutzgläsern kann dieser Wert auf bis zu 20 dB steigen. Bei 5 von 6 untersuchten sanierten Fassaden liegt das Schalldämmmaß bei 35 bis 38 dB, teilweise über 40 dB. Das bedeutet, dass die Mindestanforderungswerte der Schweizer Norm SIA 181 (2006) an den Schutz gegen Luftschall von außen problemlos erreicht werden. Das Schalldämmmaß am Fenster selbst lässt sich mit Messtechnik gut ermitteln (Abb. 8). Die Schallnebenwege über Rolladenkästen und Baukörperanschlussfugen sind hingegen schwer zu erfassen.



Abb. 7

Abb. 7: Lärmquelle Straßenbahn in der Altstadt von Basel



Abb. 8

Abb. 8: Messaufbau zur Bestimmung des Schalldämmmaßes eines Fensters: Einstellen eines Abstands von 3 mm zwischen Mikrofon und Verglasung mittels eines Abstandshalters

Quelle: Wehle, 2018, S. 17

Messobjekte	Unsanirtes Fenster		Sanirtes Fenster		Differenz	
	2 Fenster ¹⁾	1 Fenster ²⁾	2 Fenster ¹⁾	1 Fenster ²⁾	2 Fenster ¹⁾	1 Fenster ²⁾
	$R'_{w,9}$ unsanirt in dB		$R'_{w,9}$ sanirt in dB		$\Delta R'_{w,9}$ in dB	
Basel, BS-1	33,2	—	37,3	—	4,1	—
Basel, BS-2 ³⁾	28,9	—	—	27,8	—	-1,1
Bern, BE-1	25,8	—	29	—	3,2	—
Bern, BE-2	22,7	—	35,7	—	13	—
Corseaux, GE-1	—	26,7	—	34,4	—	7,7
Corseaux, GE-2	—	21,4	—	25,3	—	3,9
Ebnat-Kappel, SG-1	29,1	23,5	—	22,3	-6,8	—
Luzern, LU-1	33,3	25,3	37,7	32,3	4,4	7
Luzern, LU-2	33,2	26,7	32,2	29,1	-1	2,4
Neuchâtel, NE-1	30,7	—	39,6	—	8,9	—
Neuchâtel, NE-2	40,1	—	36,2	—	-3,9	—

Tabelle 3: Differenz der gemessenen Schalldämmmaße $R'_{w,9}$ vor und nach der Fenstersanierung

Quelle: Wehle, 2018, S. 77

¹⁾ Permanentfenster mit Vorfenster im Objekt vorhanden

²⁾ Permanentfenster ohne Vorfenster im Objekt vorhanden

³⁾ Beispielfhaft Angaben zum Projekt Basel, BS-2: Bestand: Permanentfenster und Vorfenster, Maßnahmen: energetische und schalldämmende Verbesserung des Permanentfensters, keine Weiterverwendung des Vorfensters (daher eine geringe Verschlechterung des Schalldämmmaßes)

BAUPRAKTISCHE UMSETZUNG

Die Ausführungsqualität ist entscheidend für das Ergebnis. Der U -Wert der Verglasung U_g sollte so gut wie möglich sein. Bei einer Doppelverglasung ist ein U_g -Wert von maximal $0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erzielbar. Vakuumsolierverglasungen (VIG) als Monoscheibe ermöglichen einen U_g -Wert von bis zu $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die Vakuumscheibe, in einer Solierverglasung verbaut, erreicht einen U_g -Wert von $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Um hohe Schalldämmmaße zu erreichen, sollte die Scheibe ein möglichst hohes Flächengewicht aufweisen. Die Fugendichtung muss auf die Falzgeometrie abgestimmt sein. Ein optimierter Anpressdruck durch richtig und sorgfältig eingestellte Beschläge ist Voraussetzung. Offene Anschlussfugen zum Baukörper sind mit entsprechenden Materialien zu dämmen und zu dichten. Schallnebenwege, z. B. über Rollladenkästen, sind auszuschließen.

Die Erhöhung der Schalldämmmaße um bis zu 13 dB und die Reduzierung der Lüftungswärmeverluste um bis zu 93 % zeigen, dass es möglich ist, auch bei historischen Fenstern im Baudenkmal die Funktionswerte deutlich zu verbessern. Bei einem Glasaustausch ist eine Verbesserung des U_g -Wertes von 5,0 auf $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreichbar.

Die durchgeführten Fenstersanierungen erfolgten im Bereich der heute üblichen Standards, ohne dass alle möglichen Varianten und Optionen umgesetzt wurden. Durch den Einbau von speziellen Schallschutzgläsern, das Anlegen einer zweiten Dichtungsebene sowie Verbesserungen an eventuell vorhandenen Vor- oder Innenfenstern ist es speziell bei Kastenfenstern und Verbundfenstern möglich, eine hervorragende Verbesserung der Funktionswerte zu erreichen.

Fenstersanierungen und Fensterinstandsetzungen einschließlich der gewünschten bzw. notwendigen funktionstechnischen Verbesserung sind sehr aufwendig und im Allgemeinen mit nicht unerheblichen Kosten verbunden. In hohem Maß effektiv und effizient ist der Einbau von Fensterfalzdichtungen. Weiterreichende Verbesserungen durch einen Wechsel der Verglasung, eine in der Regel notwendige Holz-, beschlags- und oberflächentechnische Grundinstandsetzung, eine Überarbeitung der Schall- und Transmissionsnebenwege wie des Baukörperanschlusses oder der Fugen und Arbeiten im Bereich von Innen- und Außenanschlüssen wie Fensterfutter oder Fensterzier- und Falzbekleidungen sowie von eventuell vorhandenen Rollläden führen zu insgesamt recht hohen Kosten. Mit diesen Maßnahmen sowie Dämmmaßnahmen im Bereich von Dach, Decken, Böden und Wänden sind zumeist jedoch deutliche Verbesserungen erreichbar. Vor allem bei historischen Häusern ist eine Dämmung der Außenwände häufig nicht möglich, ohne in das Erscheinungsbild des Gebäudes einzugreifen.

Bei einer Entscheidung für eine Fenstersanierung stehen häufig Faktoren wie Behaglichkeit und Umweltschutz im Vordergrund, auch wenn die entsprechenden Maßnahmen mit hohen Kosten verbunden sind und weniger effizient sind als Wärmeschutzmaßnahmen an Decken und Wänden. Undichtigkeiten am Fenster sind unangenehm fühlbar und werden schnell wahrgenommen. So steht das Fenster schnell im Fokus von Maßnahmen.



Projekt 2

Abgeschlossenes
Projekt

ENERGETISCHE OPTIMIERUNG INNOVATIVER SANIERUNGSMASSNAHMEN FÜR FENSTER

Markus Binder

Forschungsprojekt: Entwicklung eines Berechnungstools für die energetische Optimierung innovativer Sanierungsmaßnahmen für Fenster in Baudenkmalern und baukulturell bedeutsamen Gebäuden (ENO.SAFE) (vgl. Hochschule für Technik Stuttgart, 2019)

Forschungseinrichtung: Hochschule für Technik Stuttgart
Projektleitung: Prof. Markus Binder

Projektpartner: Holzmanufaktur Rottweil GmbH, Rottweil
Kurz und Fischer GmbH, Beratende Ingenieure, Winnenden
Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium
Stuttgart, Esslingen

Forschungszeitraum: 2016–2018

Auftraggeber: Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin,
Förderkennzeichen 03FH033PX5

PROBLEMSTELLUNG

Die Fenster eines Gebäudes haben eine wesentliche Bedeutung für seinen Energiehaushalt. Einerseits haben sie einen überproportional hohen Anteil an den Wärmeverlusten, andererseits sind sie die einzigen Bauteile, die in spürbarem Umfang zur Beheizung beitragen können, indem sie Sonnenenergie ins Gebäude lassen.

Bei heutigen Fenstern fällt die Bilanz aus Energiegewinnen und -verlusten wesentlich günstiger aus, als es früher der Fall war. Heutige Wärmeschutzverglasungen lassen nur noch einen Bruchteil der Wärme hindurch, die früher durch Einfachverglasungen oder die ersten Isolierverglasungen entweichen konnte. Dass sie auch

die einfallende Sonneneinstrahlung geringfügig reduzieren, fällt demgegenüber kaum ins Gewicht. Soll ein Gebäude energetisch saniert werden, werden deshalb oft als Erstes die vorhandenen Fenster gegen neue ausgetauscht. Dies erfolgt oft ohne Prüfung einer möglichen Erhaltens- und Verbesserungsfähigkeit des Bestandes.

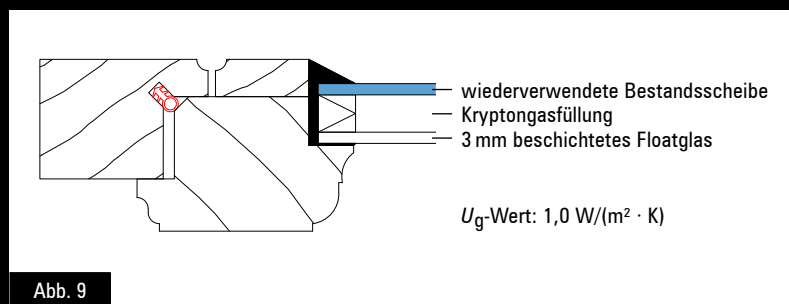
Der energetischen Optimierung steht hierbei ein irreversibler Verlust an historischer und erhaltensfähiger Baustanz gegenüber, der in den meisten Fällen auch den Charakter, das Erscheinungsbild und den Wert der Gebäude beeinträchtigt. Ressourceneffizient ist hingegen generell ein Weiterbauen mit dem Bestand.



Abb. 9:
Das System REVETRO® garantiert die Erhaltung der vorhandenen wertvollen Verglasungen. Durch die eingebaute Dichtung und das eingesetzte Isolierglas mit Wiederverwendung der im Bestand vorhandenen Verglasung wird eine nachhaltige und hoch-effiziente energetische und funktionale Ertüchtigung erreicht.

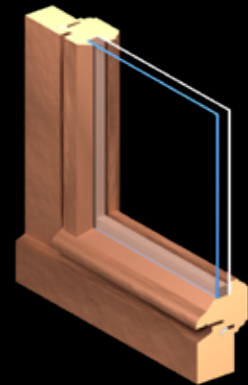
Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

Dabei gibt es in der Praxis zahlreiche Verfahren, mit denen Bestandsfenster materialschonend und unter Wahrung ihres Charakters energetisch verbessert werden können: vom Austausch der Verglasungen über die Abdichtung von Anschluss- und Funktionsfugen bis zur Ergänzung von zusätzlichen Fenstern, die – innen oder außen vorgesetzt – die Funktion des Wärmeschutzes übernehmen und das bestehende Fenster so entlasten. Für den Verglasungsaustausch stehen spezielle, an die schlanken historischen Rahmenprofile angepasste Wärmeschutzverglasungen mit minimiertem Aufbau zur Verfügung. Seit einiger Zeit ist es sogar möglich, bei der Herstellung dieser Verglasungen die im Bestand



vorhandenen welligen Gläser zu verwenden (System REVETRO®, Abb. 9) und die historische Substanz ebenso zu erhalten wie das lebendig spiegelnde Erscheinungsbild der Gläser. Weitere Optionen bieten neue Materialien und Baustoffe wie etwa Vakuumisolierverglasungen.

Dass bisher noch zu wenig von diesen Möglichkeiten Gebrauch gemacht wird, liegt auch daran, dass es Planern, Handwerkern und Akteuren der Denkmalpflege schwerfällt, schnell und zuverlässig festzustellen, welcher energetische Standard sich im konkreten Fall mit den einzelnen Maßnahmen erreichen lässt.



PROJEKTZIEL

Ziel des Forschungsprojekts war es, ein einfach zu bedienendes Planungswerkzeug zu entwickeln, mit dem diese Fragen frühzeitig im Planungs- und Beratungsprozess beantwortet werden können.

Um alle für die Aufgabenstellung relevanten Aspekte zu berücksichtigen, wurde das Projekt konsequent interdisziplinär angelegt. An der Hochschule für Technik Stuttgart beteiligten sich die Fakultät für Architektur und Gestaltung mit dem Zentrum für Integrale Architektur, vertreten durch Prof. Markus Binder, und die Fakultät für Bauingenieurwesen, Bauphysik und Wirtschaft mit dem Zentrum für Akustische und Thermische Bauphysik, vertreten durch Prof. Dr. Andreas Beck.

Die erforderliche Praxisnähe und eine klare Ausrichtung an real auftretenden Fragestellungen wurden durch die Beteiligung der Holzmanufaktur Rottweil GmbH gewährleistet, die das Projekt auch in beträchtlichem Umfang finanziell unterstützte. Das renommierte und auf dem Gebiet der Gebäudesanierung erfahrene Ingenieurbüro für Bauphysik Kurz und Fischer GmbH in Winnenden brachte seine praxisnahe Expertise und Erkenntnisse aus eigenen Untersuchungen beratend in das Projekt ein. Das Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart begleitete das Projekt von fachlicher Seite und stellte sicher, dass bei allen zu betrachtenden Sanierungsmaßnahmen denkmalrechtliche und denkmalfachliche Belange Berücksichtigung fanden.

STRUKTURIERUNG UND TYPISIERUNG DES FENSTERBESTANDS

Um einen Überblick über den Bestand an historischen Fenstern, über typischerweise vorkommende Bauweisen und ihre Häufigkeitsverteilung sowie über die Bandbreite der praxisüblichen Sanierungsmaßnahmen zu gewinnen, wurden umfangreiche Recherchen durchgeführt und auf die Erfahrungen der Projektpartner zurückgegriffen.

Auf dieser Grundlage wurden fünf häufig vorkommende Fenstertypen (Abb. 10 bis 14) als repräsentativ für die weitere Betrachtung ausgewählt:

- einfachverglaste Holzfenster
- Holzverbundfenster als Drehflügelfenster
- Holzverbundfenster als Schwingflügelfenster
- Holzkastenfenster
- thermisch nicht getrennte Metallfenster

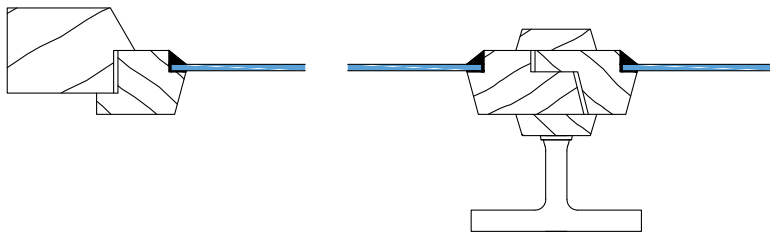


Abb. 10

Abb. 10: Querschnitt einfachverglastes Holzfenster

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

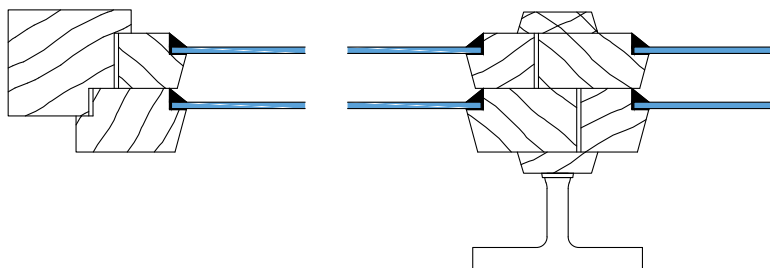


Abb. 11

Abb. 11: Querschnitt Holzverbundfenster als Drehflügelfenster

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

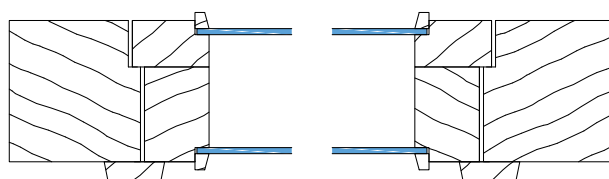


Abb. 12

Abb. 12: Querschnitt Holzverbundfenster als Schwingflügelfenster

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

Abb. 13: Querschnitt
Holzkastenfenster

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

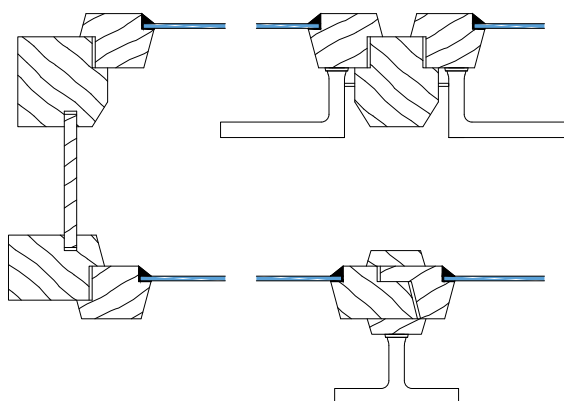


Abb. 13

Abb. 14: Querschnitt
thermisch nicht
getrenntes Metall-
fenster

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

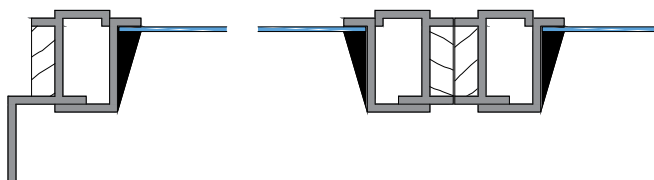


Abb. 14

Abb. 15:
Neues Schloss
Stuttgart

Die Fenster aus der
Wiederaufbauzeit
werden derzeit von der
Holzmanufaktur
Rottweil aufgearbeitet
und funktional ertüchtigt.

Quelle:
harald-reportagen.de



Abb. 15

Durch Vermittlung des Landesamtes für Denkmalpflege und der Holzmanufaktur Rottweil und in Zusammenarbeit mit dem Universitätsbauamt Stuttgart und Hohenheim gelang es, zu jedem der ausgewählten Fenstertypen ein oder mehrere geeignete Beispielgebäude zu finden, für die konkrete Sanierungsabsichten vorlagen sowie Sanierungsvarianten exemplarisch rechnerisch verglichen und Messungen im unsanierten und sanierten Zustand durchgeführt werden konnten. Ein prominentes Beispiel ist das in den späten 1950er-Jahren wiederaufgebaute Neue Schloss Stuttgart (Abb. 15). Für den bauzeitlichen Verbundfensterbestand wurden komplexe funktionale Verbesserungen hinsichtlich Wärme, Schall, Sicherheit und Sonnenschutz entwickelt und umgesetzt (Abb. 16).

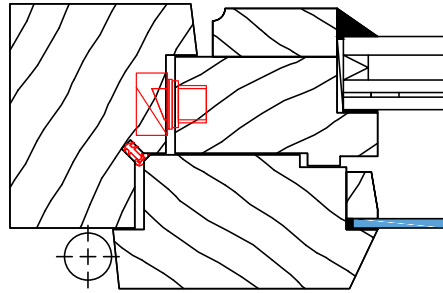


Abb. 16

Abb. 16: Neues Schloss Stuttgart: Querschnitt Details der funktionalen Verbesserung, abgestimmt mit dem Landesdenkmalamt und dem Landeskriminalamt sowie den Nutzern. Eingesetzte Verglasung im Verbundflügel: Sonnenschutzglas CLIMAPLUS® COOL-LITE® XTREME (Gesamtdicke: 23 mm), Sonnenschutzglas COOL-LITE® XTREME 70/33 6 mm (außen), Abstandshalter Swisspacer 8 mm RAL 9016, Verbundsicherheitsglas Stadip P4A (44.4) (innen), U_g -Wert: $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Quelle: Holzmanufaktur Rottweil GmbH

ENERGIEBILANZ ALS GRUNDLAGE

Um unterschiedliche Sanierungs- und Erneuerungsmaßnahmen im Hinblick auf ihre energetische Wirksamkeit zu vergleichen, müssen alle im und am Fenster auftretenden Wärmetransportvorgänge, also die Energieströme, bilanziert werden (Abb. 17).

Zur Berechnung des Wärmedurchgangs von Fenstern und Verglasungen konnte auf eine ganze Reihe von Normen wie z. B. DIN EN ISO 10077-1 (2018) und -2 (2018), DIN EN 673 (2011) und ISO 15099 (2003) zurück-

gegriffen werden. Die in diesen Normen hinterlegten Rechenansätze ermöglichen eine präzise Abbildung der am Fenster auftretenden Wärmetransportvorgänge. Einige der dort zugrunde gelegten Annahmen gehen jedoch von Verhältnissen aus, die für heute übliche Rahmenkonstruktionen und Verglasungen angemessen sind, bei historischen Bauweisen aber zu Fehleinschätzungen führen können. Zwar kann

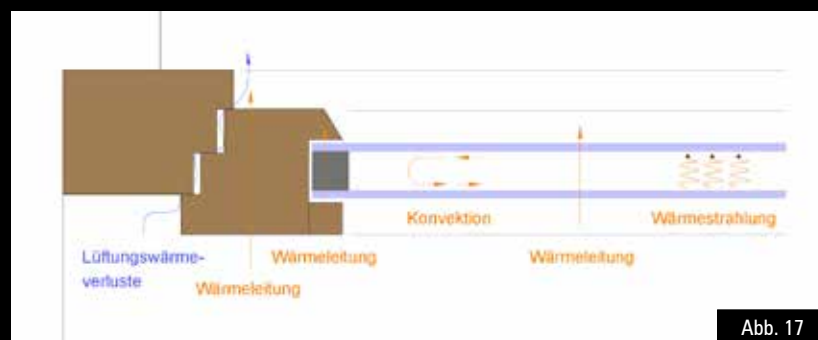


Abb. 17

Abb. 17: Wärmetransportvorgänge am Fenster

Quelle: Hochschule für Technik Stuttgart, 2019, S. 51

z. B. auch der Einfluss von Sprossen im Fenster berücksichtigt werden, doch beziehen sich die in den Normen enthaltenen Angaben vor allem auf Metall- und Kunststoffsprossen, die – als „glasteilende“ Sprossierung – in den Scheibenzwischenraum eingelegt werden – eine Konstruktionsweise, die bei der Denkmalpflege eher selten vorkommt (vgl. Abb. 18 bis 20).

Abb. 18: Querschnitt
realglasteilende
Sprossierung eines
Industriefensters

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

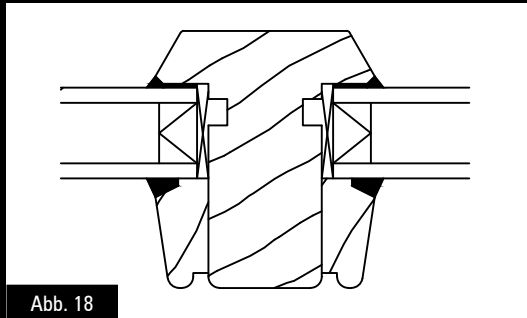


Abb. 18

Abb. 19: Querschnitt
„glasteilende“ Sprossie-
rung (Wiener Sprosse,
Landhaussprosse) eines
Industriefensters

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

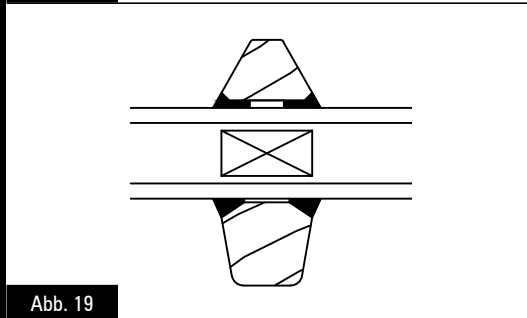


Abb. 19

Abb. 20: Querschnitt
realglasteilende
Sprossierung eines
Fensters der
Holzmanufaktur
Rottweil

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

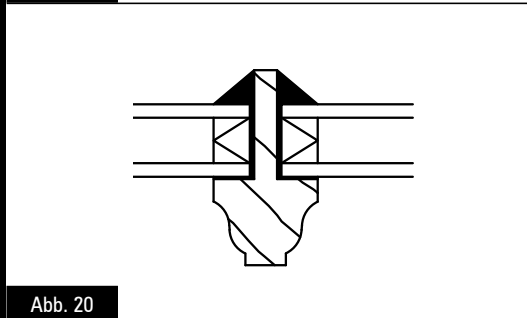


Abb. 20

Der Wärmeverlust infolge von Wärmebrücken, die am Anschluss von Fenster und Wand auftreten, wird bei nach Norm durchgeführten Energiebedarfsberechnungen nicht dem Fenster zugeordnet, sondern fließt in einen übergeordneten, auf die gesamte Gebäudehülle bezogenen Wärmebrückenzuschlag ein. Tatsächlich ergibt sich das Maß dieses Wärmedurchgangs aber sehr direkt aus der gewählten Sanierungsmaßnahme und der Behandlung der angrenzenden Wände. Daher ist es in den ganzheitlichen Vergleich unterschiedlicher Sanierungskonzepte im Sinne dieses Forschungsprojekts mit einbezogen worden.

Ein Aspekt, der von den geltenden Fensternormen gar nicht erfasst wird, ist schließlich der Wärmeverlust, der dadurch entsteht, dass warme Raumluft durch die Anschluss- und Funktionsfugen des Fensters nach außen strömt. Die Wahrnehmung ist meistens, dass es „zieht“, also kalte Luft hereinkommt. Gerade bei historischen, im Laufe der Zeit vielfach verzogenen Fenstern können diese Energieströme relevante Größenordnungen annehmen. Sie dürfen daher ebenfalls nicht vernachlässigt werden.

Wegen der beschriebenen Sachlage bestand ein wesentlicher Teil des Forschungsprojekts darin, die geltenden Normen auf ihre Anwendbarkeit auf historische und bestehende Fenster zu prüfen und sie wo nötig durch eigene Rechenansätze und Eingangsdaten zu ergänzen. Die hierfür erforderlichen Kennwerte wurden durch eine umfangreiche Literaturrecherche sowie durch eigene Messungen und Berechnungen gewonnen.

WÄRMEVERLUSTE DURCH FUGEN

Entscheidend für die Wärmeverluste durch Fensterfugen ist neben dem Temperaturunterschied zwischen innen und außen und dem anliegenden Winddruck vor allem die Dichtheit der Fenster. DIN EN 12207 (2000) definiert vier Dichtheitsklassen, in die Fenster eingeordnet werden können, wobei Klasse 4 die höchste Qualitätsstufe darstellt. Fenster, die neu eingebaut werden, müssen nach DIN 4108-2 (2003) mindestens die Dichtheitsklasse 2 erreichen, bei höheren Gebäuden Dichtheitsklasse 3. Während neue Fenster regelmäßig die höchsten

Anforderungen erfüllen, liegen für Bestandsfenster, insbesondere für historische Fenster, entsprechende Kennwerte nicht vor. Im Rahmen des Projekts wurden deshalb in den Beispielgebäuden Dichtheitsmessungen an den unterschiedlichen Fenstertypen – jeweils vor und, wo es möglich war, nach der Sanierung – sowie an weiteren Referenzfenstern vorgenommen. Teilweise wurden im Bestand bereits vorhandene, bei früheren Sanierungen eingesetzte Dichtungen für Vergleichsmessungen entnommen, um deren Wirksamkeit zu überprüfen.

Da die Messung des Fugendurchlasskoeffizienten a üblicherweise im Prüfstand vorgenommen wird und kein genormtes Verfahren für die Messung im eingebauten Zustand existiert, wurde ein für diesen Zweck empfohlenes In-situ-Messprinzip der Firma BlowerDoor GmbH übernommen und dahin gehend weiterentwickelt, dass es nicht nur Unterdruck-, sondern auch Überdrucksituationen abbilden kann. Dazu wird auf das zu untersuchende



Abb. 21

Fenster eine Folie mit Lochblende aufgebracht und die Folie auf dem Fensterrahmen verklebt (Abb. 21). Um die für die Messung notwendige Druckdifferenz am Fenster sowie an der Lochblende erzeugen zu können, wird ein Gebläse luftdicht in die Raumeingangstür eingebaut. Druckfühler werden raumseitig an der Tür, zwischen Folie und Fenster und außen vor dem Fenster platziert. Anhand der gemessenen Druckdifferenz an der Lochblende und der Größe der Druckdifferenz kann der Volumenstrom durch die Lochblende errechnet und auf die Fugenlänge des Fensters oder auf die Fensterfläche bezogen werden.

Abb. 21:
Fenster mit variablen Abstandshaltern, verklebter Folie und Lochblende

Quelle: Hochschule für Technik Stuttgart, 2019, S. 75

ERGEBNISSE

Die Messungen erbrachten die in Tabelle 4 für die einzelnen Referenzgebäude zusammengestellten Ergebnisse.

Gebäude	Baujahr	Jahr der Fenstersanierung	Fenstertyp, Material	Dichtheitsklasse nach DIN EN 12207 (2000)	
				Vor der Sanierung	Nach der Sanierung
Landesamt für Denkmalpflege, Esslingen	1904	ca. 2002	Einfachfenster, Holz	0	0 ¹⁾
Neues Schloss Stuttgart	Außenwände: 1446, 1807 Fenster: 1955–1961	ca. 1955	Verbundfenster, Holz	2	3 (nach Dichtungsaustausch)
Hochschule für Technik, Stuttgart, Bau 4	1957	2018–2020	Verbundfenster, Holz	2	Messung noch ausstehend
Hochschule für Technik, Stuttgart, Bau 5	1960	2017 (nur 2 Fenster)	Verbundfenster, Holz	0	3
Wohnhaus, Kochenhofsiedlung, Stuttgart	ca. 1933	2017–2018	Kastenfenster, Holz	1	Messung noch ausstehend
Gymnasium am Deutenberg, Villingen-Schwenningen	1962–1965	2017–2018	Metallfenster mit Isolierverglasung	1	Messung noch ausstehend

Tabelle 4:
Dichtheitsklassen vor und nach der Sanierung der Fenster

Quelle: Hochschule für Technik Stuttgart, 2019, S. 75

¹⁾ Bei der Sanierung wurden keine Dichtungen eingesetzt, da die Fenster nicht zu Aufenthaltsräumen gehören.

Auch wenn die Messungen wegen der geringen Zahl der untersuchten Gebäude eher stichprobenartigen Charakter haben und nur bedingt repräsentativ sind, ergeben sie doch interessante Resultate:

- Entscheidend für die Luftdichtheit ist die Maßhaltigkeit der Rahmen- und Flügelhölzer. Metallrahmen weisen hier wegen ihrer hohen Formstabilität Vorteile auf.
- Alle im Projekt nach der Sanierung überprüften Holzfenster mit Dichtungen erreichten mindestens die Dichtheitsklasse 2 und erfüllen damit den für neue Fenster geforderten Standard.
- Das vermessene Kastenfenster erreichte bereits ohne Dichtungen die Dichtheitsklasse 1, was seinem guten Erhaltungszustand zuzuschreiben ist sowie der Tatsache, dass die Luft hier zwei „hintereinandergeschaltete“ Öffnungsfugen durchströmen muss.
- Verzogene Fenster mit Holzrahmen erreichen auch mit zusätzlichen Dichtungen keine hohe Luftdichtheit. In solchen Fällen steht zunächst im Vordergrund, die Rahmen- und Flügelhölzer zu richten und Beschläge neu einzustellen und zu justieren, damit die Fenster wieder sauber schließen. Wichtig ist, dass die verwendeten Dichtungen auf die vorhandene Falzgeometrie abgestimmt sind und nicht gequetscht werden, sondern nur mit leichtem Anpressdruck anliegen.
- Die geringste Dichtheit (schlechter als Dichtheitsklasse 1, hier ausgewiesen mit „0“) wiesen Holzfenster ohne Dichtung auf.

Aus der jeweils erreichten Dichtheitsklasse lassen sich auch die zu erwartenden Wärmeverluste durch den Fugentluftwechsel prognostizieren. Um diese in einer vergleichbaren Form zu den üblicherweise im Vordergrund stehenden Wärmeverlusten durch Transmission darstellen zu können, wurde im Projekt ein „äquivalenter U-Wert“ U_{eq} definiert. Für ein 2,00 m hohes und 1,20 m breites einflügeliges Fenster ergeben sich unter Annahme eines mittleren Winddrucks von 2 Pa die in Tabelle 5 zusammengestellten U_{eq} -Werte.

Für die ganzheitliche Betrachtung des Fensters müssen der U_{eq} -Wert und der „normale“ U-Wert addiert werden. Im Planungstool wird U_{eq} aus den geometrischen Eigenschaften des Fensters und seiner zu erwartenden Dichtheitsklasse exakt ermittelt.

Tabelle 5: Messergebnisse zur Luftdichtheit der Fugen mit und ohne Dichtung

Fenster	Dichtung	Fugendurchlasskoeffizient a aus Messung in $m^3/(h \cdot m \cdot Pa^{2/3})$	Dichtheitsklasse nach DIN EN 12207 (2000)	U_{eq} in $W/(m^2 \cdot K)$
Holzverbund	—	1,3	1	1,9
Holzverbund	vorhanden	0,32	3	0,46
Metall	—	0,15	2	0,21
Metall	vorhanden	0,043	4	0,062

Quelle: Hochschule für Technik Stuttgart, 2019, S. 78

WÄRMEBRÜCKENBETRACHTUNGEN

Während Angaben zu linearen Wärmedurchgangskoeffizienten für Glaseinstände und Sprossen bei heute üblichen Rahmenprofilen in der Literatur und in den einschlägigen Normen leicht zu finden sind, gilt dies für zahlreiche in der Fenstersanierung vorkommende Situationen nicht. Ein Schwerpunkt des Projekts lag daher in der Ermittlung der entsprechenden Kennwerte durch Wärmebrückenberechnungen für bestandstypische Situationen und Sanierungsvarianten mit zeitgemäßen Materialien. Die Daten wurden in einer Datenbank erfasst, die in das Planungstool integriert und Interessierten zur Verfügung gestellt werden kann. Dabei wurden zwei Fenster mit folgenden Eigenschaften untersucht:

- ein historisches Fenster aus dem 17. Jahrhundert, Flügelansichtsbreite 36 mm (vgl. Abb. 22)
- ein modernes Fenster, Flügelansichtsbreite 78 mm (vgl. Abb. 23):
 - Miniwärmeschutzverglasung 8 bis 16 mm Gesamtdicke mit U_g -Werten von 1,9 bis 0,9 $W/(m^2 \cdot K)$
 - Vakuumisolierverglasung von 6,7 mm bis 11,7 mm (abhängig von der Scheibengröße) mit einem U_g -Wert von 0,7 $W/(m^2 \cdot K)$
 - Vakuumscheibe, in einer Isolierverglasung verbaut, 18 mm mit einem U_g -Wert von 0,4 $W/(m^2 \cdot K)$
 - Wandanschlüsse mit unterschiedlichen Sanierungsszenarien (Innen-, Außen-, Laibungsdämmung)

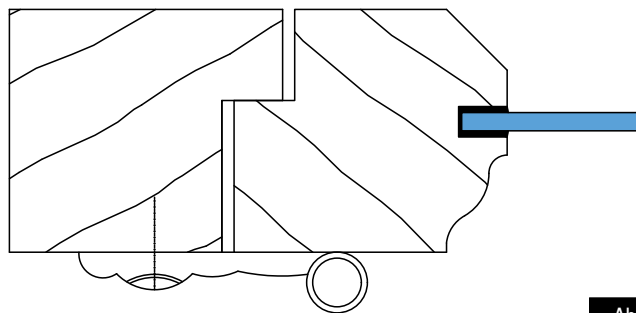


Abb. 22: Querschnitt historisches Fenster aus dem 17. Jahrhundert, Flügelansichtsbreite 36 mm

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

Abb. 22

Abb.-Maßstab: 1 : 1

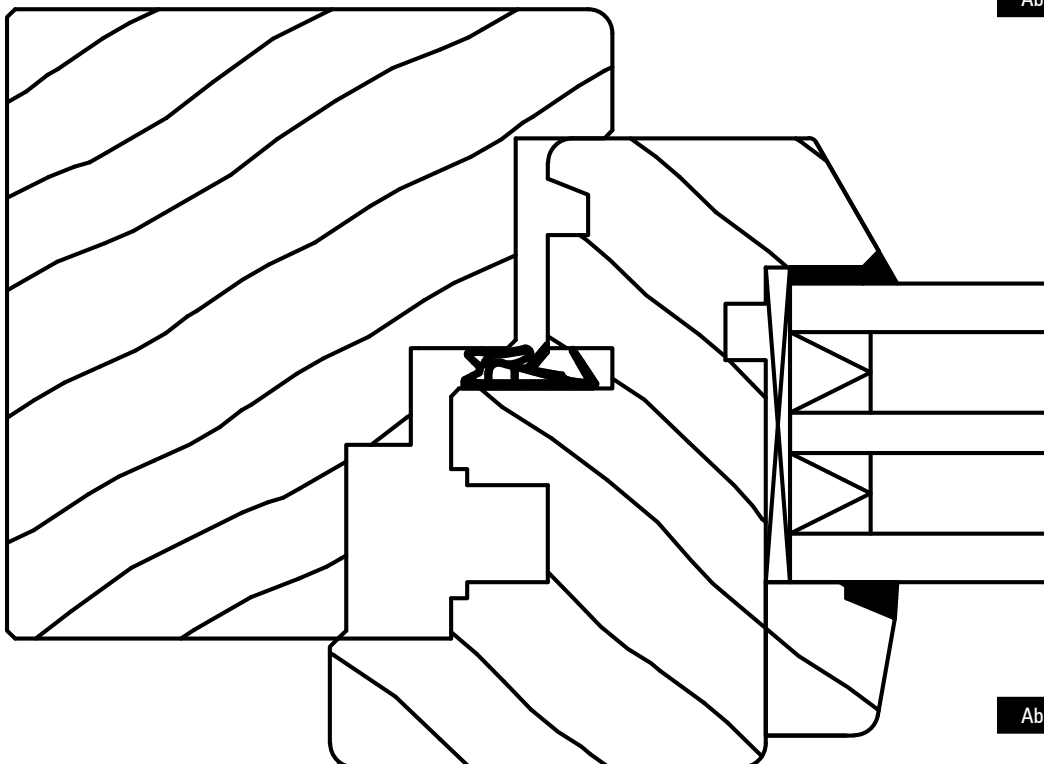


Abb. 23: Querschnitt modernes Fenster, Flügelansichtsbreite 72 mm

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

Abb. 23

Abb.-Maßstab: 1 : 1

Von besonderem Interesse waren hier Konstruktionen unter Verwendung von Vakuumisolierverglasungen. Dies sind Doppelverglasungen, deren nur 0,2 mm messender Scheibenzwischenraum evakuiert wird. Der üblicherweise vorhandene Wärmetransport durch Gaswärmeleitung und Konvektion im Scheibenzwischenraum kann dadurch vollständig unterbunden werden. Damit das Vakuum dauerhaft erhalten bleibt, müssen die Gläser einen verlässlich gasdichten Randverbund aufweisen. Dies wird üblicherweise dadurch erreicht, dass die Scheiben fest miteinander verlötet werden (Abb. 24).

Abb. 24: Vakuumisolierverglasung mit verlötetem Glasrandverbund und Ventil zur Evakuierung (ein europäischer Hersteller liefert Vakuumisolierverglasungen ohne das störende Evakuierungsventil)

Quelle: Hochschule für Technik Stuttgart, 2019, S. 24



Abb. 24

Abb. 25: Geometrisches Modell für die Parameterstudie zu den Wärmeströmen über die Schwachstelle am Glasrandverbund

Quelle: Hochschule für Technik Stuttgart, 2019, S. 63

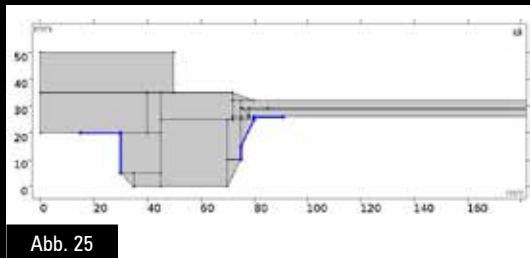


Abb. 25

Für die Fenstersanierung sind Vakuumisolierverglasungen als Verbundsicherheitsglas (VSG) sowie unter Verwendung von Scheiben nach historischer Fertigung möglich. Eine Weiterverwendung der Bestandsscheiben in Form einer Verglasung nach dem System REVETRO® ist aktuell noch nicht möglich. Eine Verarbeitung von Vakuumisolierverglasungen ist vor allem deshalb interessant, weil sie mit ihren geringen Gesamtdicken von ca. 6,7 mm oft in den bereits bestehenden Glasfalz eingesetzt werden können, wobei sie dennoch sehr niedrige U_g -Werte von bis zu $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ aufweisen. Bei Verwendung von Vakuumisolierverglasungen mit dickeren Glasscheiben muss gegebenenfalls der Glasfalz bis zu 5 mm tiefer gefräst werden. Es ist allerdings zu beachten, dass der verlötete Glasrandverbund eine deutliche Wärmebrücke darstellt. Beim Einsatz in neuen Fensterprofilen wird deshalb versucht, dem durch einen tiefen Glaseinstand und eine kräftige Überdämmung zu begegnen. Dies ist bei der Fenstersanierung innerhalb der üblicherweise schlanken Rahmenprofile jedoch nicht möglich. Innerhalb des Projekts sollte daher geklärt werden, welche zusätzlichen Wärmeströme über die zwangsläufig am Rand entstehende Schwachstelle entstehen. Hierfür wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der die Dimensionen des Rahmenprofils und die Materialeigenschaften von Glaslot, Kitt und Holz variiert wurden (Abb. 25).

ERGEBNISSE

Es zeigte sich, dass der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient Ψ_g des Glaseinstands für alle Varianten bei ca. $0,07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ liegt – und damit ungefähr zwei- bis dreimal so hoch ist wie bei den derzeit häufig bei einem Glasaustausch verwendeten 10 bis 15 mm starken Miniwärmeschutzverglasungen mit Edelgasfüllung und thermisch verbessertem und in der Breite reduziertem Glasrandverbund.

In der Konsequenz bedeutet dies, dass bei sehr kleinen Scheibenformaten der Vorteil der Vakuumisolierverglasung

durch ihren potenziell niedrigeren U_g -Wert aufgrund der höheren Verluste über den Scheibenrand wieder aufgezehrt werden kann (vgl. hierzu auch Abb. 26). Der praktische Vorteil der Vakuumisolierverglasung – ihre geringe Dicke und ihr guter U_g -Wert – bleibt aber in jedem Fall erhalten.

Als Nebenergebnis liefert die Betrachtung auch Erkenntnisse über die Oberflächentemperaturen am Fenster und daraus abgeleitet über die Tauwassergefahr. Durch den hohen Wärmestrom über den gut leitenden Glasrandverbund treten trotz des eigentlich guten U_g -Wertes der Verglasung am

Glaseinstand sehr niedrige Temperaturen auf (Abb. 27). Bei einer gemäß DIN 4108-4 (2017) angenommenen Außentemperatur von -5 °C stellen sich dort z.B. nur $+2,3\text{ °C}$ ein, was bei Standardraumklima weit unter der Taupunkttemperatur liegt. Hier wäre entsprechend ein hoher Tauwasseranfall zu erwarten. Erfahrungsgemäß tritt Tauwasser allerdings weniger stark auf als in der Theorie berechnet. Weniger kritisch wäre die Situation, wenn das Einfachfenster zum Kastenfenster ergänzt würde, unabhängig davon, in welcher Ebene die Vakuumisolierverglasung eingesetzt wird.

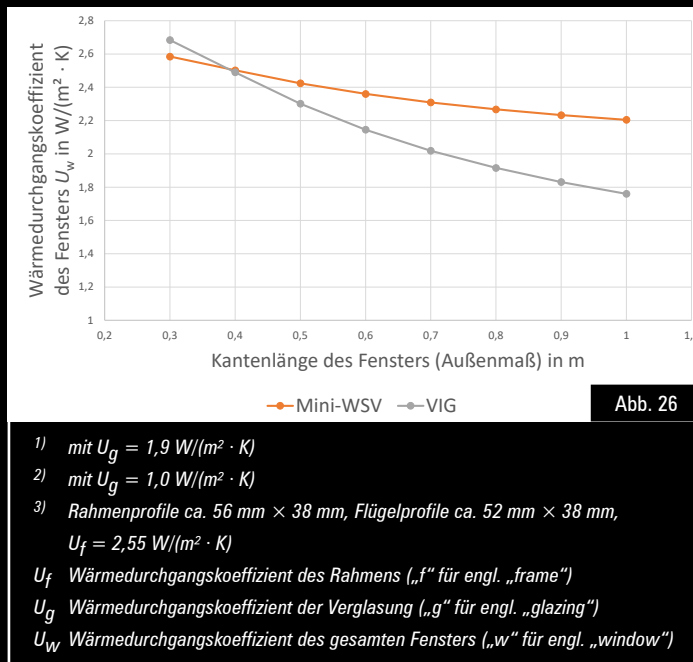


Abb. 26: U_w -Wert quadratischer Beispielfenster unterschiedlicher Größe mit Miniwärmeschutzverglasung (Mini-WSV)¹⁾ sowie Vakuumisolierverglasung (VIG)²⁾ jeweils mit Rahmen aus Hartholz³⁾ unter Berücksichtigung der im Projekt ermittelten Wärmebrückenwirkung des Glasrandverbunds

Quelle:
Markus Binder,
Stuttgart

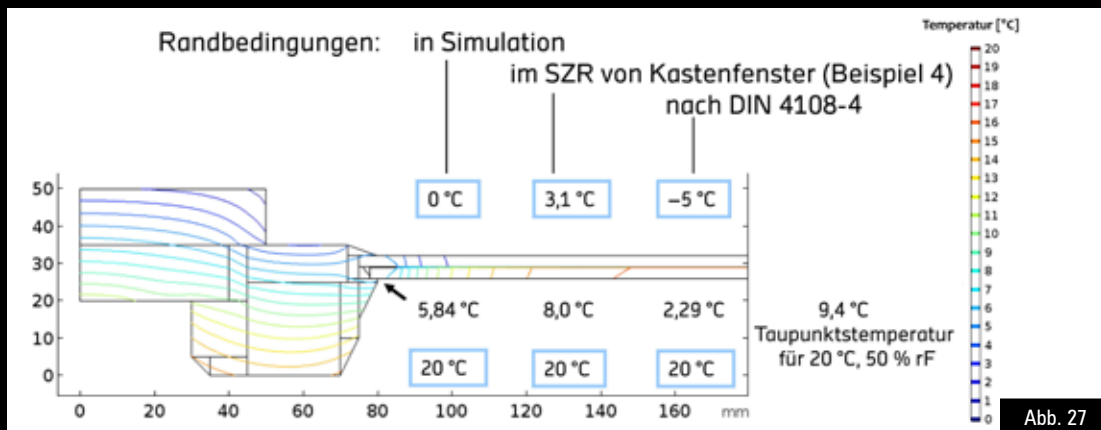


Abb. 27: Isothermen und Oberflächentemperaturen an einem Einfachfenster mit Vakuumisolierverglasung

Quelle: Hochschule für Technik Stuttgart, 2019, S. 65

Entsprechende Untersuchungen wurden für Sprossen in Vakuumisolierverglasungen und Miniwärmeschutzverglasungen sowie für unterschiedliche Bauteilanschlüsse durchgeführt. Ihre Ergebnisse sind im Schlussbericht des Forschungsprojekts (vgl. Hochschule für Technik Stuttgart, 2019) dargestellt.

ZUSAMMENFÜHRUNG

Die im Rahmen des Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse wurden in einem computerbasierten Planungstool zusammengeführt. Bei Eingabe der wesentlichen geometrischen und konstruktiven Eigenschaften eines Bestandsfensters berechnet es dessen Energiebilanz und stellt diese unterschiedlichen Sanierungsszenarien gegenüber. Derzeit wird das Tool im Prototypenstadium

von verschiedenen Planungsbüros einem Praxistest unterzogen. Im Anschluss an diese Testphase sollen die Rückmeldungen der beteiligten Büros genutzt werden, um das Programm in seinem Funktionsumfang und seiner Benutzerfreundlichkeit weiter zu verbessern und Planern, ausführenden Firmen und der Denkmalpflege eine intuitiv bedienbare, aussagekräftige Version bereitstellen zu können.

Projekt 3

Abgeschlossenes
Projekt

SCHADENSFREIE ENERGETISCHE FENSTER- SANIERUNG IM ALTBAU: KASTENFENSTER

Hermann Klos

Forschungsprojekt: Schadensfreie energetische Fenstersanierung im Altbau und denkmalgeschützten Gebäuden (vgl. Bichlmair et al., 2019a, 2019b)

Forschungseinrichtung: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen
Stefan Bichlmair, M. Eng.
Prof. Dr. Martin Krus
Dipl.-Ing. (FH) Christine Milch
Dennis Stiegler, B. Eng.

Projektpartner: Glas Zange GmbH & Co. KG, Weiden
Holzmanufaktur Rottweil GmbH, Rottweil
RSP GmbH, Kirchstockach
Zoller-Prantl, Gesellschaft m. b. H., Haiming, Österreich

Forschungszeitraum: 2017–2019

Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn,
Forschungsinitiative Zukunft Bau,
AktENZEICHEN SWD-10.08.18.7-17.42

PROBLEMSTELLUNG

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP baut in der Alten Schäferei des Klosters Benediktbeuern ein Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege auf (vgl. Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern, 2020). In diesem Zentrum haben Fachplaner, Handwerker, Denkmalpfleger, Entscheidungsträger, Bauherren und Interessierte die Möglichkeit, sich über Energieeffizienz im Bestand und in der Denkmalpflege zu informieren und sich beraten und weiterbilden zu lassen. Der Wissenstransfer zwischen Denkmalpflege, Baupraxis, Forschung und Industrie ist ebenso wie die Darstellung von Funktionsweisen innovativer und erprobter Materialien ein wichtiger Teil der Arbeit des Zentrums. Hierfür wird das Gebäude des Zentrums modellhaft unter energetischen und denkmalpflegerischen Gesichtspunkten instand gesetzt.

Ein aktueller Schwerpunkt der Forschungsarbeit am Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern liegt in der energetischen Verbesserung von Fenstern in Bestandsgebäuden (vgl. Energetische Ertüchtigung von Fenstern im Baudenkmal, 2019). Hierbei spielt Ressourcenschonung eine essenzielle Rolle. Die Erhaltung der gesamten Fensterkonstruktion ist daher ein primäres Ziel

bei der Ertüchtigung von Bestandsfenstern. Auch in diesem Bereich der Altbausanierung müssen Baudenkmalpflege und Energieeffizienz nicht im Widerspruch stehen. Durch neue Methoden zur Erhaltung und zur nachträglichen energetischen Optimierung können Bestandsfenster auf den energetischen Standard heutiger neuer Fenster gebracht und zugleich denkmalgerecht verbessert werden.

Das Kastenfenster ist eine über Jahrhunderte bewährte Konstruktion. Ein Fenster ist gut – zwei Fenster in einer Öffnung sind besser. Das wussten und praktizierten in den ersten Jahrhunderten nach Christus bereits die Römer (Abb. 28). Mit dem Untergang des Römischen Reiches gingen dieses Wissen und dieser Standard für ein ganzes Jahrtausend verloren.

Kastenfenster oder zwei hintereinandergestellte Fenster sind z. B. in Rottweil seit 1596 belegt: Damals wurden Burschen für das Einsetzen der Winterfenster im Rathaus mit einem Essen im Gasthaus belohnt. Ab dem späten 17. Jahrhundert waren Kastenfenster weit verbreitete Konstruktionen, ein Beispiel ist das Obere Schloss in Öpfingen (Abb. 29).

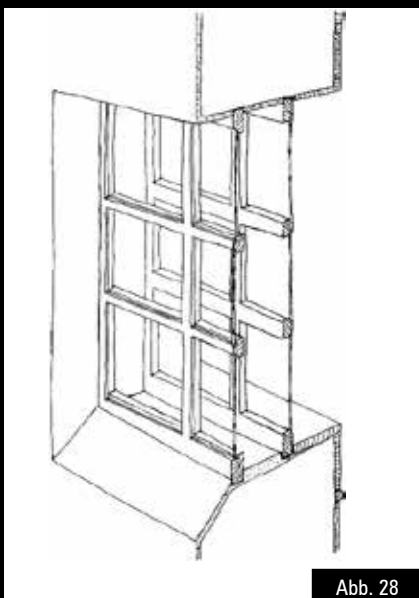


Abb. 28

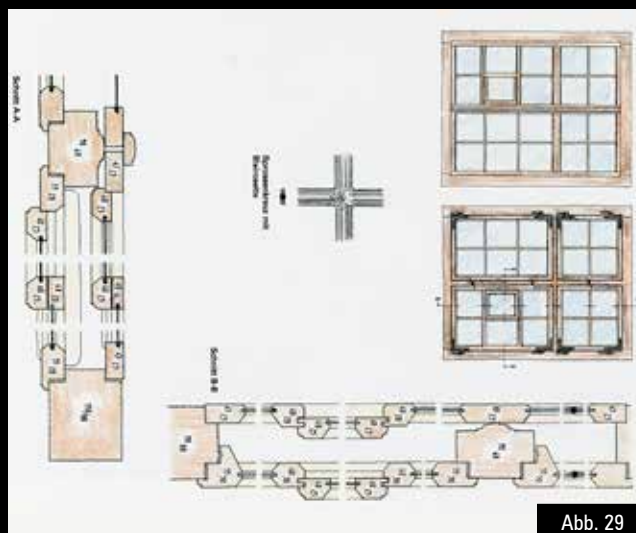


Abb. 29

Abb. 28: Römische Kastenfenster: kleinteilige Verglasung mit wenig durchsichtigen Gussglasscheiben, gesteckt oder gehalten in Leistenrahmen

Quelle: Baatz, 1991

Abb. 29: Öpfingen, Oberes Schloss: Dokumentation des bauzeitlichen Permanentfensters sowie des bauzeitlichen Vorfensters von 1695

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

Abb. 30:
 Giengen an der
 Brenz, Produktions-
 halle der Firma Steiff,
 1903: zweischalige
 Glasfassaden

Quelle:
 Holzmanufaktur
 Rottweil GmbH



Abb. 30

Abb. 31: Stuttgart,
 Hegelstraße 33: Die
 Kastenschichtfassade
 (Glasdoppelfassade)
 soll neben mehr
 Wärme auch eine
 schallschutztechni-
 sche Verbesserung
 bewirken.

Quelle:
 Holzmanufaktur
 Rottweil GmbH



Abb. 31

Abb. 32: Querschnitt
 wärmetechnische
 Verbesserung eines
 historischen Be-
 standsfensters durch
 ein innen liegendes
 Isolierglasfenster in
 moderner flächen-
 bündiger Ausführung

Quelle:
 Holzmanufaktur
 Rottweil GmbH

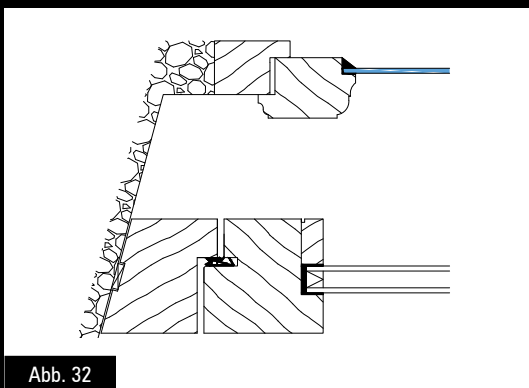


Abb. 32

Fast 400 Jahre lang änderte sich an dem energetischen Standard einer verdoppelten Verglasung nichts. Für die energetische Verbesserung – auch von Bestandsfenstern – war scheinbar erst die Ölkrise der 1970er-Jahre und dann die intensive Klimadiskussion mit Zuspitzung bis in die heutige Zeit nötig. Die Glasdoppelfassaden (GDF) in der zeitgenössischen Architektur sind ein gelungenes Fortschreiben der ursprünglich römischen Fensterkonstruktion (Abb. 30 und 31).

Bis in die 1990er-Jahre wurden einfachverglaste alte und ältere Fenster gerne mit einem ebenso einfachverglasten Innenfenster oder einem Vorfenster zum Kastenfenster erweitert (Abb. 32).

Damit wurde auf eine bewährte Konstruktion zurückgegriffen. Im Zuge veränderter Anforderungen und Ansprüche an die energetischen Funktionswerte eines Fensters wurden ab den frühen 2000er-Jahren die zusätzlichen bzw. die Bestandsinnenfenster mit einer Isolierverglasung versehen.

Eine Folge des daraus resultierenden kühleren und damit weniger Feuchte speichernden Kastenfensterzwischenraums (Kavität) war allerdings ein erhöhter Kondensat ausfall an der äußeren nun deutlich kälteren Scheibe sowie an der angrenzenden Bausubstanz. Auch wenn der Kondensat ausfall vor allem bei Wetterumschwüngen,

oftmals im Herbst und im Frühjahr, auftritt, ist er für die meisten Eigentümer und Nutzer mehr als lästig. Sie erwarten von einem Fenster, ganzjährig hindurchschauen zu können und nicht ständig die Scheiben trocknen bzw. den Kondensatausfall beseitigen zu müssen. Darüber hinaus nimmt der meist wertvolle historische Bestand auf Dauer Schaden. Die erhöhte Durchfeuchtung führt schnell zu unansehnlichen Schäden am Lack, zu Schädlingsbefall und zu einer marodierenden Holz- und Bausubstanz (Abb. 33).



Abb. 33

Abb. 33: Schäden am Lack, Schädlingsbefall und eine marodierende Holz- und Bausubstanz infolge anhaltender Durchfeuchtung

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

PROJEKTZIELE

Diesem feuchtetechnischen Verhalten von Kastenfenstern hat das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Benediktbeuern ein intensives Forschungsprojekt gewidmet, an dem sich ausführende Unternehmen mit ihrer Expertise und auch mit finanzieller Unterstützung beteiligt haben. So liegen nun für die bis dahin empirisch begründeten Feststellungen auch wissenschaftlich begründete Aussagen und Ergebnisse zum Feuchteverhalten von Kastenfenstern vor.

Gegenstand der Untersuchung waren die Bestandsfenster in der alten Schöfflerei im Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern (Abb. 34 und 35).



Abb. 34

Abb. 34: Alte Schöfflerei, Kloster Benediktbeuern, OG, Nordseite, Fenster 1.26: Außen- und Innenansicht des Bestandsfensters im Vorzustand, Stockaußenmaß 1,14 m × 1,40 m (1,60 m²)

Quelle: Bichlmair et al., 2019b, S. 35



Abb. 35

Abb. 35: Alte Schöfflerei, Kloster Benediktbeuern, OG, Nordseite, Fenster 1.27: Innenansicht des Fensters mit Erweiterung zum Kastenfenster, links mit geschlossenem Fenster, rechts mit geöffnetem Fenster

Quelle: Bichlmair et al., 2019b, S. 35

Mit neuen Methoden und messtechnischen Berechnungen wurde das komplexe System Kastenfenster wissenschaftlich untersucht. Im Vordergrund stand die Bestimmung der Luftaustauschverhältnisse. Sie werden anhand des Feuchtegehalts der Luft im Kastenfensterzwischenraum sowie des Feuchtegehalts der Umgebungsluft raum- und außenseitig berechnet. Für das feuchtetechnische Verhalten von Kastenfenstern relevant sind Temperatur, relative Luftfeuchte und Taupunkt.

Für den Kondensatausfall am äußeren, in der Regel historischen Fenster ist das Klima im Kastenfenster-

zwischenraum entscheidend. Hier stellt sich je nach Belüftungsanteil von außen und innen ein bestimmter Luftzustand ein. Der Feuchtegehalt der Luft im Kastenfensterzwischenraum bewegt sich zwischen dem Feuchtegehalt der Raumluft und dem Feuchtegehalt der Außenluft. Im Rahmen des Forschungsprojekts sowie an Musterfenstern wurden die verschiedenen möglichen Parameter betrachtet. Die wesentlichen Zusammenhänge lassen sich auf die Luftwechselraten – beeinflussbar durch die möglichen Dichtungsebenen am inneren bzw. äußeren Fenster (Infiltrationsverhalten) – und auf die funktionstechnischen Werte (U -Werte) der Scheiben reduzieren.

ERGEBNISSE

Die Messungen der Luftfeuchte im Kastenfensterzwischenraum, aufbauend auf der Untersuchung der mit Tracergas ermittelten Luftwechselraten für den Kastenfensterzwischenraum (Tabelle 6), haben bestätigt, dass insbesondere in den saisonalen Übergangszeiten ein erhöhter Feuchtegehalt im Kastenfensterzwischenraum gegeben ist. Eine gute Abdichtung des inneren Fensters wirkt sich vorteilhaft aus, wobei ein zu dichtes Innenfenster und eine nicht ausreichende Luftwechselrate wiederum zu bauphysikalischen und raumhygienischen Problemen führen können. Eine weitere Abdichtung der

Rahmenfuge am äußeren Fenster wirkt sich hingegen kontraproduktiv aus, da die notwendigen erhöhten Luftwechselraten im Scheibenzwischenraum dann nicht mehr erreicht werden können und sich der dadurch erhöhte Feuchtegehalt als Kondensat an der äußeren Scheibe niederschlägt. Bei der Variante V90 (vgl. Tabelle 7) mit innen dicht ausgeführter Fenster-ebene sinkt die absolute Feuchte in der kalten Jahreszeit erwartungsgemäß bis auf das Niveau der absoluten Feuchte der Außenluft ab. Es stellt sich ein günstiger Verlauf der absoluten Feuchte ein.

Tabelle 6: Aus der Messung mit Tracergas (Prüfgas zur Ortung von Leckagen) ermittelte Luftwechselraten für den Kastenfensterzwischenraum (Kavität) der Fenster 1.25, 1.26 und 1.27 in der Alten Schäfllerei, Kloster Benediktbeuern, sowie das aus der Luftwechsellmessung berechnete Mischungsverhältnis

Fenster	Normaler Einbauzustand		Innen optimal abgedichtet		Außen optimal abgedichtet		Mischungsverhältnis m_o/m_i
	m_{LR} in m^3/h	LW in h^{-1}	m_o in m^3/h	LW in h^{-1}	m_i in m^3/h	LW in h^{-1}	
1.25	0,49	2,54	0,39	2,02	0,07	0,39	5,6
1.26	0,66	4,09	0,63	3,89	0,14	0,82	4,5
1.27	0,91	5,63	1,1	6,83	0,05	0,30	22,8

LW Luftwechsel pro Stunde

m_o Volumen der pro Stunde von außen einströmenden feuchten Luft

m_i Volumen der pro Stunde von innen einströmenden feuchten Luft

m_{LR} Volumen der pro Stunde im Kastenfensterzwischenraum vorhandenen feuchten Luft

Quelle:
Bichlmair et al.,
2019b, S. 37

Variante	Parameteränderung	U-Wert des Fensters in $W/(m^2 \cdot K)$		
		Inneres Fenster ($U_{w,i}$)	Äußeres Fenster ($U_{w,e}$)	$U_{w,ges}$
V10	Ausgangsvariante: Scheibe mit $U_g = 1,1 W/(m^2 \cdot K)$	1,48	4,36	1,09
V50	außen dicht (Luftwechselrate: $0 h^{-1}$)	1,48	4,36	1,09
V90	innen dicht (Luftwechselrate: $0 h^{-1}$)	1,48	4,36	1,09
V120	Innenscheibe mit verbessertem U-Wert: Scheibe mit $U_g = 0,6 W/(m^2 \cdot K)$	1,08	4,36	0,86
V130	Außenscheibe mit verbessertem U-Wert: Scheibe mit $U_g = 1,3 W/(m^2 \cdot K)$	1,48	1,78	0,80

Tabelle 7: Simulierte Kastenfenstervariante mit den jeweils veränderten Parametern (fett hervorgehoben), Berechnung der U-Werte nach DIN EN ISO 10077-1 (2006) und -2 (2008)

Quelle:
Bichlmair et al.,
2019b, S. 38

U_g Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung („g“ für engl. „glazing“)

U_w Wärmedurchgangskoeffizient des gesamten Fensters („w“ für engl. „window“)



BAUPRAKTISCHE UMSETZUNG

Die von Bauherren und Architekten gewünschte, gesetzlich geforderte und auch im Sinne des Klimaschutzes notwendige energetische Verbesserung eines Bestandsfensters durch Erweiterung mit einem Innenfenster zu einem Kastenfenster erfordert also ein möglichst dichtes Innenfenster mit einem möglichst hohen U -Wert der Verglasung U_g . Je besser der U_g -Wert der inneren Verglasung ist, desto stärker ist der Kondensatausfall an der äußeren kalten Scheibe. Eine Verringerung des Kondensatausfalls ist mit einem in den Fugen leicht undichteren Außenfenster und einer Verbesserung des U_g -Wertes – auch der äußeren Glasebene – von z. B. 5,1 auf 1,3 $W/(m^2 \cdot K)$ zu erreichen. Dies führt zu einer erheblich erhöhten Luftraumtemperatur im Kastenfensterzwischenraum. Je höher dort die Luftraumtemperatur ist, desto höher ist die Speichermöglichkeit für die absolute Luftfeuchte, was zu einer entsprechenden Reduzierung des Kondensatausfalls an der äußeren Scheibe führt.

Das Forschungsprojekt des Fraunhofer-Instituts bestätigt so in vollem Umfang die allgemein bekannte Konstruktionsregel „Fugen innen dicht und außen offen“ für Kastenfenster. Ein zu einem Kastenfenster erweitertes historisches Fenster ist daher die effektivste Methode einer größeren Energieeinsparung. Mit der gewünschten

Optimierung des U_g -Wertes der inneren Fensterebene erhöht sich die Anforderung an die Dichtheit des inneren Fensters, um kritische Feuchteverhältnisse im Kastenfensterzwischenraum zu vermeiden. Die Akzeptanz einer zusätzlichen Verbesserung des U_g -Wertes der äußeren, meist historisch wertvollen und geschützten Fensterebene durch den Ersatz der originalen Gläser durch eine Isolierverglasung ist heute unter denkmalpflegerischen Gesichtspunkten der Bestandserhaltung in der Mehrzahl der Fälle allerdings nicht zu erreichen.

Mittelfristig gesehen könnte die globale Klimaerwärmung jedoch auch dieses Tabu infrage stellen. Die in der Denkmalpflege arbeitenden und engagierten Betriebe und Institute sind daher gefragt, Lösungen zu entwickeln zum Schutz vor Totalverlusten bei Konstruktionsdetails und Materialien wie der Bestandsverglasung (Abb. 36). Eingriffe werden auch in größerem Umfang notwendig und sinnvoll sein, um Bestandsfenster nachhaltig zu erhalten. Weiterbauen mit dem Bestand ist ein Lösungsansatz. Nur eine nachhaltige und auch für den Bauherrn zufriedenstellende gebrauchstaugliche und energieeffiziente Sanierung sichert die Erhaltung von Bestandsfenstern.

Abb. 36: Querschnitt:
Kastenfenster mit
Wiederverwendung
der Originalver-
glasung (System
REVETRO®)

Quelle:
Holzmanufaktur
Rottweil GmbH

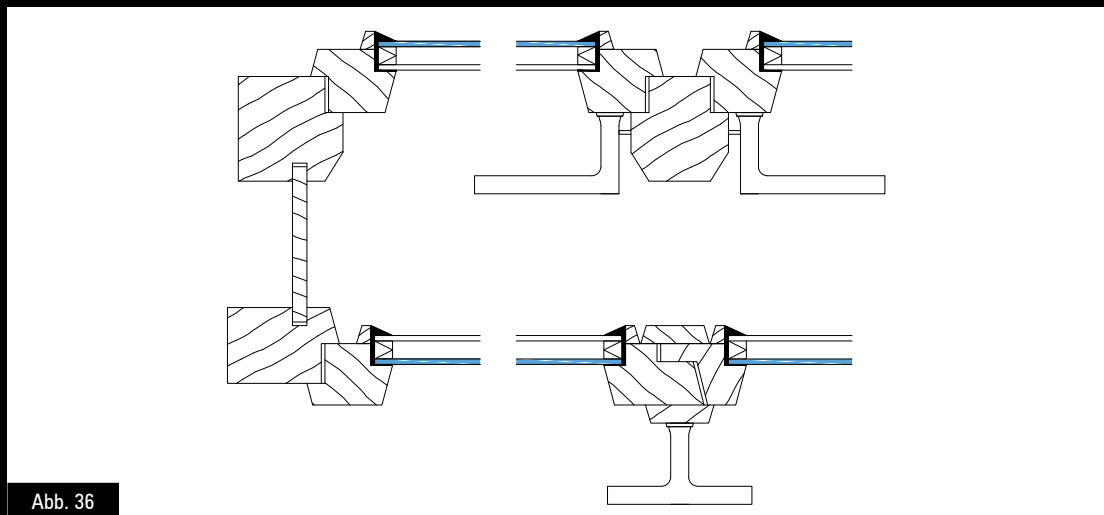


Abb. 36



Projekt 4

Laufendes
Projekt

ERTÜCHTIGUNG VON HISTORISCHEN BESTANDS- FENSTERN UNTER ASPEKTEN DES KLIMASCHUTZES

Hermann Klos

Forschungsprojekt: Innovative Lösungen für die Ertüchtigung von historischen Bestandsfenstern unter Aspekten des Klimaschutzes und von Lebenszyklusbetrachtungen (vgl. Bichlmair, 2020)

Forschungseinrichtungen: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen
Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und
Denkmaltechnologien (KDWT) der
Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Projektpartner: Holzmanufaktur Rottweil GmbH, Rottweil
RSP GmbH, Kirchstockach

Forschungszeitraum: 2020–2021

Auftraggeber: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt
und Verbraucherschutz, München

PROBLEMSTELLUNG

Bauliche Anlagen verursachen mit ihrer Herstellung, Errichtung, Nutzung und Entsorgung ca. 30% der Energie- und Stoffströme und wirken so auf die Umwelt. Dem Baubereich kommt damit eine wesentliche Rolle in der Ressourcenschonung und der Umweltentlastung zu. Die im April 2012 veröffentlichte und zuletzt im März 2020 aktualisierte DIN EN 15804 soll u. a. eine weiterhin einheitliche Basis für Ökobilanzen im Baubereich und für Bauprodukte schaffen.

Die Norm dient als Grundlage für Produktkategorie-Regeln zur Erstellung von Umweltdeklarationen für Baustoffe und Bauprodukte. Durch die Umweltdeklarationen (EPD: environmental product declaration) sollen die Lebenszyklen eines Bauprodukts sowie bauphysikalisch und allgemein relevante Informationen dargestellt werden (Abb. 37). Die EPD von Bauprodukten sollen helfen, nachhaltiges Bauen einfacher zu gestalten.

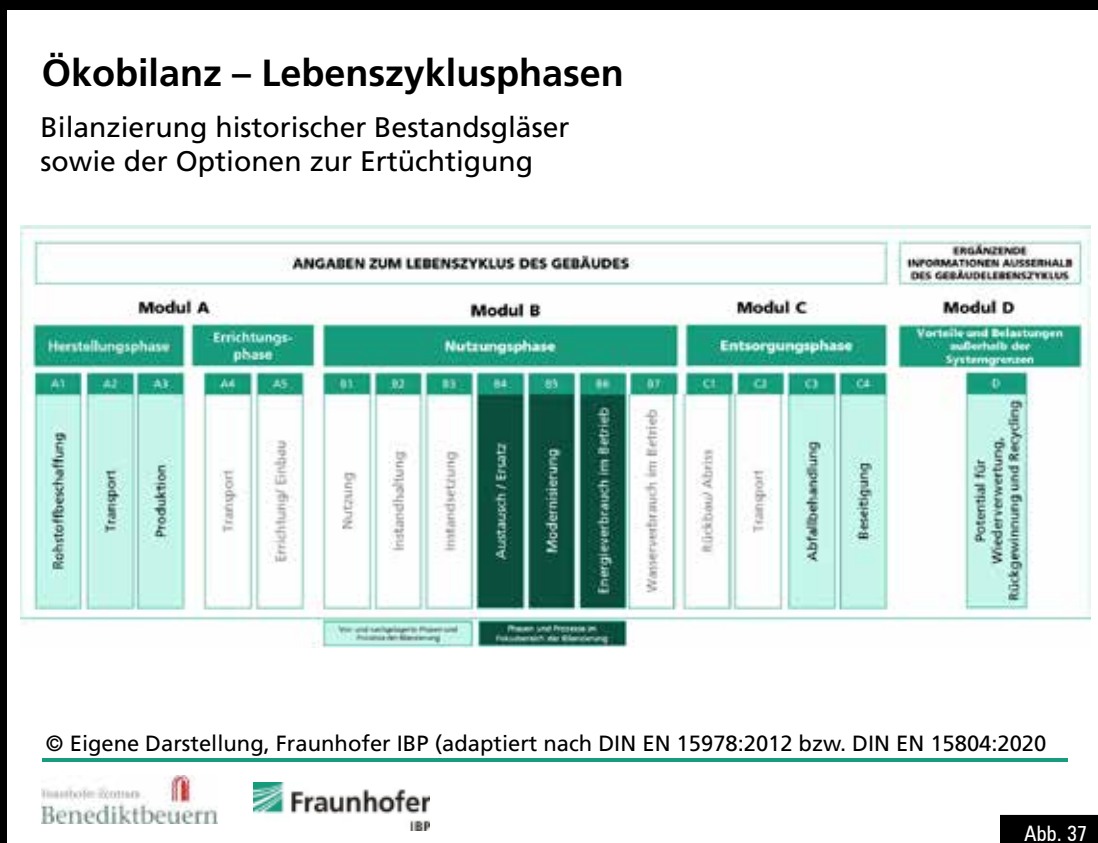


Abb. 37: Ökobilanz – Lebenszyklusanalyse historischer Bestandsgläser

Quelle: Bichlmair, 2020, Folie 5

PROJEKTZIELE

Aufbauend auf dem vorangehend beschriebenen Projekt „Schadensfreie energetische Fenstersanierung im Altbau und denkmalgeschützten Gebäuden“ des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP, Holzkirchen, werden Sanierungskonzepte und Varianten unter denkmalgerechten, energieeffizienten und ressourcenschonenden Gesichtspunkten untersucht. Zentrales Anliegen ist, neben den bekannten Varianten einer Fenstersanierung

und -ertüchtigung durch Ersetzen der vorhandenen Glasscheiben, Einbau zusätzlicher Glasscheiben innen oder außen auf den bestehenden Fenstern und den zusätzlichen Einbau eines Fensters (Erweiterung zum Kastfenster) auch die Variante der Weiterverwendung der historischen Bestandsgläser zu untersuchen – ein wichtiges Anliegen der Denkmalpflege und ein Beitrag zur Ressourcennachhaltigkeit (Abb. 38).

Abb. 38:
Methodischer Ansatz
der Untersuchungen
denkmalgerechter
Sanierungsvarianten

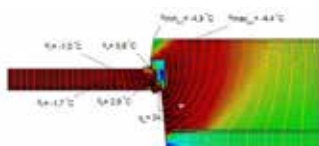
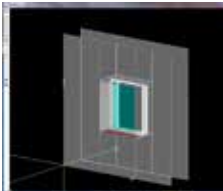

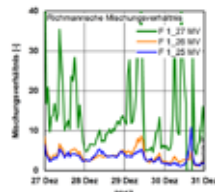
Quelle: Bichlmair,
2020, Folie 4


Methodischer Ansatz


Untersuchungen an denkmalgerechten Sanierungsvarianten

- Energetische Untersuchungen
 - Energieeinsparung
 - Schadensfreiheit

- Ressourcenschonung: Ökobilanz und Lebenszyklusanalyse
 - Unterschiedliche Varianten der Sanierung
 - Historische Bestandsgläser








Abb. 38

Für die Holzmanufaktur Rottweil GmbH bedeutet Denkmalschutz auch Umweltschutz. Ein wesentlicher Antrieb unserer Arbeit ist, Möglichkeiten zu schaffen, mit vorhandenen qualitativ hochwertigen Produkten weiter zu arbeiten und sie weiter zu verbauen. Im Glasbereich haben wir hierfür bereits vor einigen Jahren mit unseren Produkten REVETRO® und RETHERMO® Grundlagen geschaffen (Abb. 39). Sie werden nun im Rahmen des

Projekts an von der Holzmanufaktur Rottweil gefertigten und bereitgestellten Musterfenstern untersucht. Ziel des Forschungsprojekts ist, durch Variantenvergleiche belastbare und vergleichbare Informationen über die lebenszyklusorientierte Optimierung von Gebäuden und Bauprodukten zu erhalten.

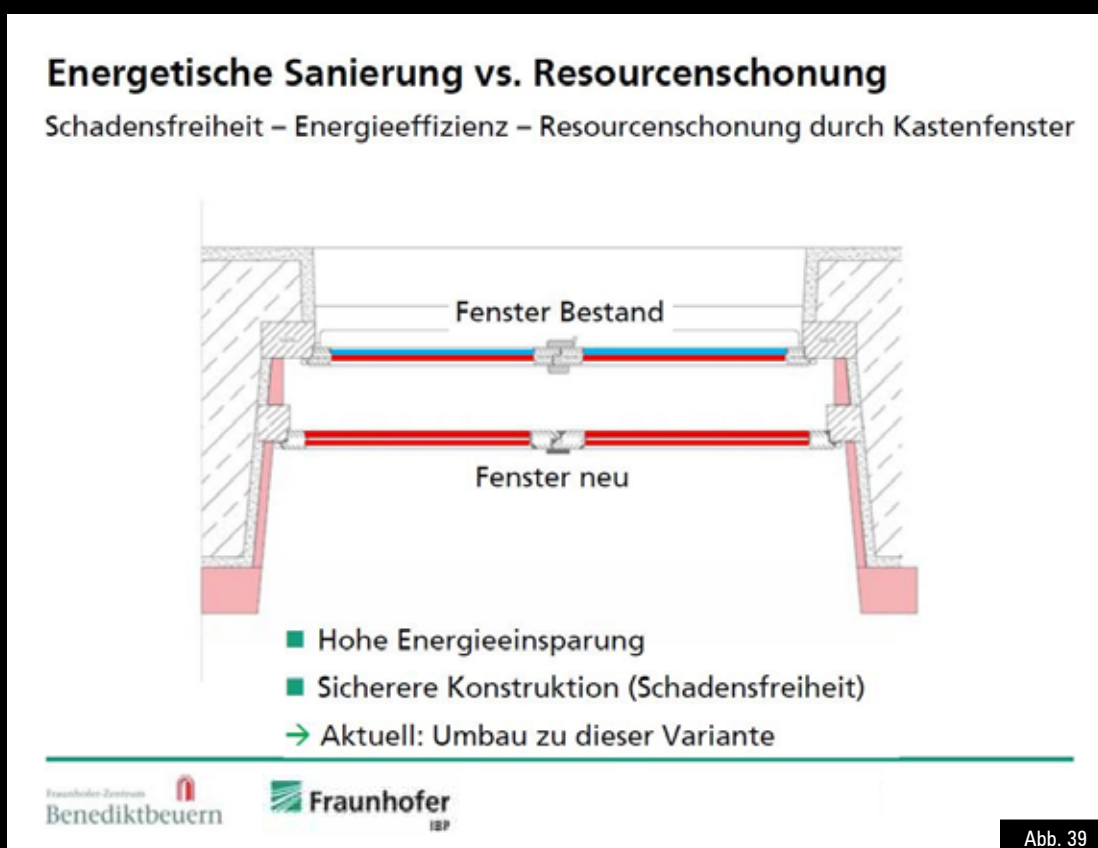


Abb. 39:
Betrachtung der energetischen Sanierung vs. Ressourcenschonung bei Kastenfenstern

Quelle: Bichlmair, 2020, Folie 10

Projekt 5

Laufendes
Projekt

INNOVATIVE METHODEN ZUR REINIGUNG, ABTRAGUNG UND AUFBRINGUNG VON OBERFLÄCHEN

Hermann Klos

Forschungsprojekt: Entwicklung innovativer Methoden zur Reinigung, Abtragung und Aufbringung von Oberflächen auf denkmalgeschützten Holz- und Metallbauteilen (vgl. Bucher, 2019)

Forschungseinrichtung: Steinbeis-Transferzentrum Oberflächen- und Beschichtungstechnik Rottweil
Projektleiter: Prof. Dr. Volker Bucher

Projektpartner: Holzmanufaktur Rottweil GmbH, Rottweil

Forschungszeitraum: 2019–2022

Finanzierung: Innovationsgutschein Baden-Württemberg, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, Stuttgart

PROJEKTZIELE

Die Erhaltung bestehender Holz- oder Metallausstattungen in Bestandsgebäuden und denkmalgeschützten Gebäuden funktioniert nur, wenn es auch überzeugende Lösungen für die handwerkliche und restauratorische Umsetzung gibt. In diesem Forschungsprojekt werden von der Holzmanufaktur Rottweil gemeinsam mit dem Steinbeis-Transferzentrum Oberflächen- und Beschichtungstechnik innovative Methoden zur Laserreinigung (Projekt „Cleanlaser“) und zur CO₂-Schneestrahlnreinigung dahin gehend optimiert, denkmalgeschützte Holz- und Metallbauteile sowie metallische Beschläge selektiv von Lackschichten oder anderen Schichten befreien zu können, ohne die darunterliegende Struktur zu beeinflussen oder gar zu zerstören.

In leistungsfähigen Versuchsanlagen wird mit energiereichem Licht und unterschiedlichen Lichtquellen im UV- und im IR-Wellenlängenbereich gearbeitet, wodurch sich ein breites Anwendungsfeld für unterschiedliche Anforderungen eröffnet. Gesucht werden effektive Alternativen zu den bisher häufig praktizierten Methoden wie dem chemischen Ablaugen oder dem mechanischen Schleifen. Diese Methoden sind nicht nur gesundheitlich bedenklich, sondern gehen oft mit hohen Emissionen und Materialverlusten einher oder ziehen das darunterliegende Material in Mitleidenschaft.

In einem ersten Schritt wurde eine Machbarkeitsstudie erarbeitet. Von dem Projektpartner und Auftraggeber, der Holzmanufaktur Rottweil, wurden die Anforderungen definiert und zusammen mit dem Steinbeis-Transferzentrum Oberflächen- und Beschichtungstechnik in Rottweil auf Machbarkeit analysiert. Es folgten eine Literaturrecherche und die Erstellung einer Liste der einzusetzenden Methoden sowie der zu bearbeitenden Referenzobjekte. Eine Recherche zu den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen klärt das Potenzial und die Marktfähigkeit der untersuchten Methode.

Mit dem CO₂-Schneestrahlfverfahren (Abb. 40) können selbst empfindlichste Oberflächen von Kulturgut gereinigt werden. Der Reinigungsprozess erfolgt in mehreren Arbeitsschritten. Zunächst erfolgt eine Impulsübertragung zum Abtragen leichter oberflächlicher Schmutzpartikeln. Durch den Temperaturunterschied zwischen CO₂-Schnee und der behandelten Oberfläche und die sich daraus ergebende Thermospannung wird die nächste Stufe der Reinigung erreicht. Der Druck des Strahls löst die oberste gespannte Schicht der Oberfläche. Während des Reinigungsvorgangs ändert der CO₂-Schnee seinen Aggregatzustand von fest zu gasförmig.

CO₂-SCHNEESTRAHLREINIGUNG

Abb. 40:
CO₂-Schneestrahls-
reinigung: Düsenkopf
(links) und Verfah-
rensprinzip (rechts)

Quelle:
Bucher, 2019, S. 12



Abb. 40

LASERBASIERTES REINIGEN MIT LICHT

Ein Projektschwerpunkt ist auch das laserbasierte Reinigen mit Licht (Abb. 41). Es stehen heute prozesssichere Laserverfahren für Reinigung, Entlackung und Vorbehandlung von Holz- und Metalloberflächen zur

Verfügung. Darauf aufbauend wurde von Restauratoren, die mit laserbasierten Abtragsverfahren Erfahrung haben, im Auftrag der Holzmanufaktur Rottweil GmbH ein Arbeitsplan erstellt (Abb. 42).

Abb. 41:
Laserbasiertes
Abreinigen von altem
Lack auf einem
Holzfenster

Quelle:
Bucher, 2019, S. 14



Abb. 41

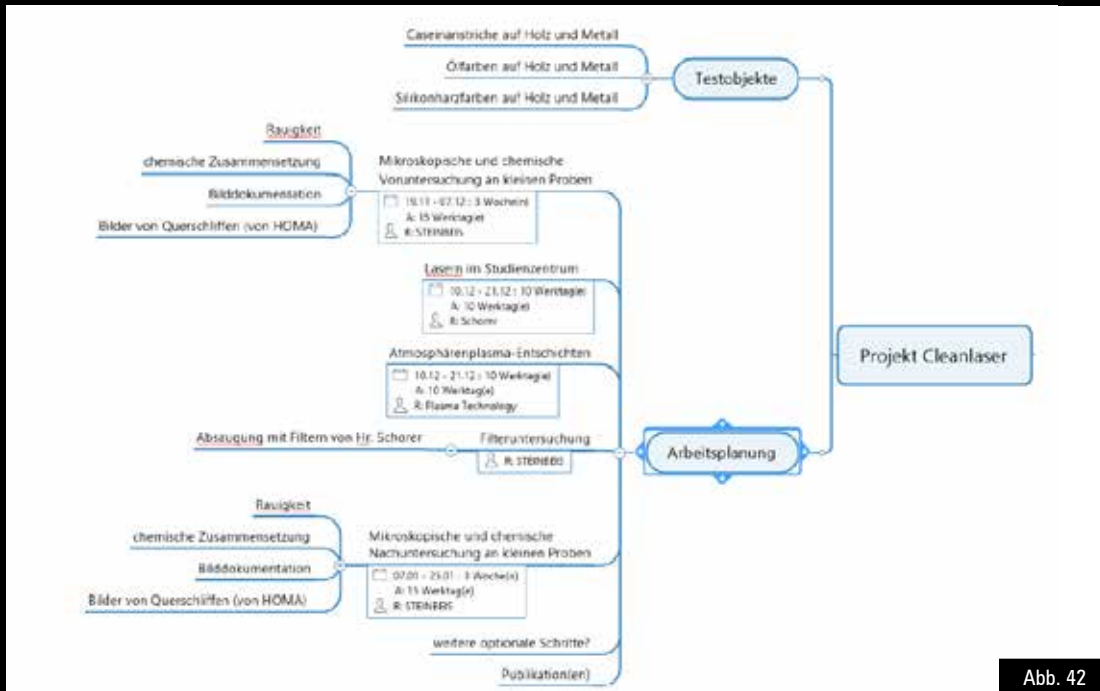


Abb. 42

Abb. 42:
Arbeitsplan zum
Projekt „Cleanlaser“

Quelle:
Bucher, 2019, S. 6

ATMOSPHÄRENDRUCK- PLASMAVERFAHREN

Mit weiteren Test- und Versuchsreihen soll zur Erhöhung der Witterungsbeständigkeit von einheimischen Hölzern beigetragen werden. Viele Funktionsausstattungen im Denkmal wie Fenster, Türen und Holzbauteile aller Art sind vor allem im bewitterten Außenbereich Altersprozessen ausgesetzt, die einen dauerhaften Schutz nicht gewährleisten und Pflege, Instandhaltung und Bearbeitung erschweren. In Versuchsreihen mit dem Atmosphärendruckplasmaverfahren (Druckluftatmosphärenplasma) (Abb. 43) wird die verbesserte Adhäsion des Lacks auf Hölzern verschiedener Provenienz und mit gealterten Oberflächen getestet. Im Ergebnis sollen eine größere Haftfestigkeit, eine höhere Eindringtiefe und eine gleichmäßigere Verteilung auf der Oberfläche erreicht werden.

Gegenwärtig laufen hierzu wie im Arbeitsplan vorgesehene Laborversuche und Feldversuche im Freien unter Bewitterungsbelastung.



Abb. 43

Abb. 43:
Aktivierung von Holz
vor dem Lackieren mit
dem Atmosphären-
druckplasmaverfahren

Quelle:
Bucher, 2019, S. 32

ZUM UMGANG MIT HISTORISCHEN FENSTERN IM BESTAND UND IM BAUDENKMAL

Hermann Klos

Ergebnis der hier vorgestellten (abgeschlossenen) Forschungsprojekte ist die wissenschaftliche Verifizierung dessen, was wir empirisch wussten oder annahmen. Eine Erhaltung und eine Ertüchtigung vorhandener Fenster – ob im gewöhnlichen Altbau oder im Baudenkmal – ist für jede Situation eine bedenkenswerte, ernstzunehmende und meist sinnvolle Alternative, zumal die Erwartungen an eine Fenstererneuerung oft enttäuscht werden, da die verwendeten neuen Materialien und Produkte oft weder qualitativ noch konstruktiv an solide gefertigte Bestandsfenster herankommen. Darüber hinaus werden die hohen Erwartungen an eine energetische Verbesserung durch einen Fensteraustausch vielfach ebenfalls nicht erfüllt, da der Wärmedurchgangskoeffizient der Fenster nur für einen geringen Teil des Energiehaushalts eines Gebäudes verantwortlich ist. Bei einem nur kleinen Flächenanteil der Fenster an der Wärme übertragenden Umfassungsfläche können die Transmissionswärmeverluste durch eine Sanierung mittels Glasersatz meist nur

wenig, teils sogar nur um weniger als 10% bezogen auf die Gesamttransmissionswärmeverluste, verringert werden (vgl. Tabelle 2 auf Seite 12). Energieverluste sind davon abgesehen ganz wesentlich vom Nutzerverhalten und vom richtigen Lüften abhängig. Grundlagen jeglicher Baumaßnahme an Fenstern sind neben der Beachtung behördlicher Vorschriften die Überprüfung der Gebrauchstauglichkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Sicherheit sowie die Berücksichtigung nutzungsspezifischer, architektonischer und denkmalpflegerischer Anforderungen. Daraus sollte ein technologisch einfaches, gestalterisch hochwertiges und ökologisch nachhaltiges Sanierungskonzept erwachsen. Generell gelten die restaurierungsethischen Grundsätze „Erhalten statt erneuern“ und „Beschränkung der Arbeiten auf das Notwendige“. Angesichts der Klimaschutzdiskussion und der Forderungen zur Einhaltung von Energiestandards bei Baudenkmalen muss die erwiesene Langlebigkeit denkmalgeschützter Fenster immer wieder in die Waagschale geworfen werden. Die damit verbundene Nachhaltigkeit darf nicht gegen graduell bessere Dämmwerte ausgespielt werden: Beide Aspekte sind zukunftsfähig, beide dienen dem Schutz unseres Klimas. Ein Ergebnis unserer Arbeit der zurückliegenden 32 Jahre ist, dass wir für alle Bestandsfenster – und auch für die denkmalgeschützten Fenster – Konzepte und Maßnahmen gefunden haben, die begeistern und die die gewünschten Funktionswerte erfüllen.

Bauwerke und ihre Ausstattungen werden im Allgemeinen erhalten, solange sie ihren Zweck erfüllen. Durch neue technische Anforderungen der Gesetz-



geber und die sich verändernde Erwartungshaltung der Nutzer werden jedoch besonders ältere Fenster oft infrage gestellt. Neue Normen und die Nutzer berücksichtigen dabei zumeist nicht, dass die Leistungsfähigkeit historischer Fenster bauzeitgebunden ist. Zur Sicherung ihres Fortbestands sind Funktionsverbesserungen und -anpassungen in vielen Fällen unausweichlich. Notwendige Maßnahmen an Fenstern müssen jedoch materiell, konstruktiv und gestalterisch verträglich ausgeführt werden. Für den erhaltenswerten und erhaltungsfähigen Baubestand – insbesondere im Baudenkmal – gilt es, den Zeugnis-, Erinnerungs- oder Alterswert der bauzeitlichen Fensterelemente zu bewahren, und zwar unabhängig davon, ob sie in einem Gebäude des 15. Jahrhunderts oder der 1980er-Jahre eingebaut sind. Vorhandene Fenster mit ihren materiellen, konstruktiven und gestalterischen Eigenschaften dokumentieren den Geist und die Ideen ihrer Entstehungszeit.

Fenster im Bestand und namentlich im Baudenkmal sind ein wichtiger Bestandteil des Ganzen, werden aber selten als Antiquität oder als Erbstück angesehen. Selbst wenn sie materiell, konstruktiv und gestalterisch noch so hochwertig gefertigt sind, werden sie schnell als verbraucht und verschlissen bewertet. Auch wenn sie über Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte gezeigt haben, dass sie ihre Funktion erfüllen und für den Betrachter eine Freude sein können, wiegen Aussagen der Bauindustrie, dass nur ein neues Fenster ein gutes Fenster sei, mehr.

Technik ist aus dem Mut und der Lust zur Verbesserung hervorgegangen. Sie erreicht ihr Ziel, wenn mehr Menschen länger leben, besser wohnen und glücklicher sind, aber sie wird zum Unglück, wenn sie die Menschen ihrer eigenen Kreativität beraubt, wenn sie ihnen das Bedürfnis oder gar die Fähigkeit nimmt, mit Sachen sorgsam und liebevoll umzugehen. Wer die Vergangenheit nicht kennt, kann die Zukunft nicht gestalten. Das gilt für das Große, das Gesamte, ebenso wie für die Dinge im Detail. Anders als Kunst-



schätze, Antiquitäten oder Oldtimer werden Bauwerke und ihre Funktionsausstattungen im Allgemeinen nur so lange erhalten, wie sie gebrauchsfähig sind und ihren Zweck erfüllen. Bis zur Industrialisierung der Fensterfertigung in den 1970er- und 1980er-Jahren war jedes Fenster ein handwerklich hochwertig, individuell und speziell für ein Gebäude gefertigtes Fenster. Mit dem vielfach auch gedankenlosen schnellen Austausch von Fenstern gehen daher wertvolle Zeugnisse der Handwerks- und Baukunst verloren, ohne dass geprüft worden wäre, mit welchen Anpassungen, Umbauten oder handwerklichen Ergänzungen sie weiterhin ihren Dienst leisten könnten.

Dort, wo die Selbstverständlichkeit aufhört, Überkommenes zu bewahren, muss die Denkmalpflege eingreifen und fordern, dass Erhaltungsmaßnahmen und Funktionsveränderungen so konzipiert und ausgeführt werden, dass sie sich verträglich in das materielle, konstruktive und gestalterische Gefüge des Originals einpassen. Durch ein konsequentes denkmalpflegerisches Handeln lässt sich viel erreichen – oft mehr, als das Auge sieht. Wie bemerkte schon der britische Schriftsteller und Kunsthistoriker John Ruskin vor mehr als 170 Jahren über die Baukunst: „Wir können ohne sie leben, ohne sie beten, aber nicht ohne sie erinnern.“ (Ruskin, 1900, S. 333)

LITERATURVERZEICHNIS

Baatz, 1991:

Baatz, Dietwulf: Fensterglastypen, Glasfenster und Architektur. In: Hoffmann, Adolf; Schwandner, Ernst-Ludwig; Hoepfner, Wolfram; Brands, Gunnar (Hrsg.): *Bautechnik der Antike. Internationales Kolloquium in Berlin, 15.–17. Februar 1990*. Mainz: von Zabern, 1991 (Diskussionen zur archäologischen Bauforschung 5), S. 4–13

Berner Fachhochschule, 2018:

Schallschutz und Luftdurchlässigkeit historischer Fenster. Berner Fachhochschule, Departement Architektur, Holz und Bau, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur, 2018

Bichlmair, 2020:

Bichlmair, Stefan: *Innovative Lösungen für die Ertüchtigung von historischen Bestandsfenstern unter Aspekten des Klimaschutzes – Lebenszyklusbetrachtungen und Demonstration in der Alten Schäferei, Kloster Benediktbeuern*. Holzkirchen: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2020. – Präsentation

Bichlmair et al., 2019a:

Bichlmair, Stefan; Krus, Martin; Milch, Christine; Stiegler, Dennis: *Schadensfreie energetische Fenstersanierung im Altbau und denkmalgeschützten Gebäuden. Abschlussbericht*. Holzkirchen: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2019 (IBP-Bericht HTB-023/2019)

Bichlmair et al., 2019b:

Bichlmair, Stefan; Stiegler, Dennis; Krus, Martin; Milch, Christine: Schadenfreie energetische Fenstersanierung im Altbau und Denkmal – hydrothermische Aspekte. In: *Bausubstanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege* 10 (2019), Nr. 6, S. 34–42

Bucher, 2019:

Bucher, Volker: *Entwicklung innovativer Methoden zur Reinigung, Abtragung und Aufbringung von Oberflächen auf denkmalgeschützten Holz- und Metallbauteilen. Zwischenbericht*. Rottweil: Steinbeis-Transferzentrum Oberflächen- und Beschichtungstechnik, 2019

Charta von Burra, 2013:

The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance, 2013. Burwood: Australia ICOMOS Incorporated, 2013 [online].
Internet: http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/The-Burra-Charter-2013-Adopted-31_10_2013.pdf [Zugriff: 16.11.2020]

Charta von Venedig. Internationale Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (1964). In:

Michael Petzet: *Grundsätze der Denkmalpflege*. München: ICOMOS, Nationalkomitee der Bundesrepublik Deutschland, 1992 (ICOMOS, Hefte des Deutschen Nationalkomitees 10), S. 45–49 [online]. Internet: <https://www.icomos.de/admin/ckeditor/plugins/alphamanager/uploads/pdf/HefteX.pdf> [Zugriff: 02.11.2011]

DIN 4108-2:2003-07 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

DIN 4108-4:2017-03 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte

DIN EN 673:2011-04 Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren

DIN EN 12207:2000-06 Fenster und Türen – Luftdurchlässigkeit – Klassifizierung

DIN EN 15804:2020-03 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte

DIN EN ISO 10077-1:2006-12 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 1: Vereinfachtes Verfahren [zurückgezogen und mehrfach ersetzt; aktuell durch DIN EN ISO 10077-1:2020-10]

DIN EN ISO 10077-1:2018-01 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 1: Allgemeines [zurückgezogen; ersetzt durch DIN EN ISO 10077-1:2020-10]

DIN EN ISO 10077-2:2008-08 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen [zurückgezogen und mehrfach ersetzt; aktuell durch DIN EN ISO 10077-2:2018-01]

DIN EN ISO 10077-2:2018-01 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen

Energetische Ertüchtigung von Fenstern im Baudenkmal [online]. München: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., 2019.
Internet: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/veranstaltungen-messen/bauphysik-in-der-denkmalpflege3.html> [Zugriff: 01.04.2020]

Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern [online]. München: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., 2020.

Internet: <https://www.denkmalpflege.fraunhofer.de/kompetenz.php> [Zugriff: 01.04.2020]

- Funktionsprüfung von Lüftungs- und Klimaanlage*. Springe-Eldagsen: BlowerDoor GmbH, Januar 2016 [online].
Internet: https://www.blowerdoor-unlimited.de/media/pdf/6a/13/a6/MLM-FlowBlaster_de.pdf [Zugriff: 03.11.2020]
- Graue Energie*, 2020 [online]. Internet: <https://www.baunetzwissen.de/glossar/g/graue-energie-664290> [Zugriff: 03.11.2020]
- Hochschule für Technik Stuttgart, 2019:
Entwicklung eines Berechnungstools für die energetische Optimierung innovativer Sanierungsmaßnahmen für Fenster in Baudenkmälern und baukulturell bedeutsamen Gebäuden (ENO.SAFE). Schlussbericht. Stuttgart: Hochschule für Technik Stuttgart, Juni 2019
- ISO 15099:2003-11 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Sonnenschutzvorrichtungen – Detaillierte Berechnungen
- Rebound Effect*, 2020 [online]. Internet: https://www.faktor-x.info/wissenswertes/glossar?tx_dpnglossary_glossary%5B%40widge_0%5D%5Bcharacter%5D=R&Hash=0bf09af57a6b5f951b43aaaa2c8f2da6 [Zugriff: 03.11.2020]
- Ruskin, 1900:
Ruskin, John: *Die sieben Leuchter der Baukunst*. Übers.: Wilhelm Schoelermann. Leipzig: Eugen Diederichs, 1900 (John Ruskin. Ausgewählte Werke in vollständiger Übersetzung 1) [online]. Internet: <https://digi.ub.uni-heidelberg.de/diglit/ruskin1900bd1> [Zugriff: 05.11.2020] [Original: Ruskin, John: *The Seven Lamps of Architecture*. London: Smith, Elder, and Co., 1849]
- SIA 181:2006-01 (SN 520181) Schallschutz im Hochbau
- Wehle, 2018:
Wehle, Barbara: *Schallschutz und Luftdichtheit historischer Fenster. Untersuchung des Einflusses der Fugendurchlässigkeit auf den Schallschutz und die Lüftungswärmeverluste historischer Fenster. Forschungsbericht – Schlussbericht*. Biel: Berner Fachhochschule, Departement Architektur, Holz und Bau, Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur, 31.01.2018 (Bericht-Nr. F.007568-10-72FE-01-SB)

IMPRESSUM PRAXISFORSCHUNG | 2020

Verfasser: Markus Binder
Hermann Klos

Satz und Gestaltung: typograt Telegin und Stahl GbR
Gewerbepark H. A. U. 22
78713 Schramberg

Lektorat: Dieter Schlichting
Büro für Lektorate und Übersetzungen
22529 Hamburg
ds-lektorat.de

Druck: Lienhard PrintMedien GmbH & Co. KG
Linsenboldstraße 1
78647 Trossingen

Herausgeber: Holzmanufaktur Rottweil GmbH
Neckartal 161
78628 Rottweil
+49 741 942006-0
info@homa-rw.de
holzmanufaktur-rottweil.de

UNSER CAMPUS

Jakobskirche | Holzwerkstatt

Historische WC-Anlage | Mitarbeiteraufenthaltsraum

Heneshalle | Verwaltung, Ausstellung

Pumpenhaus | Malerwerkstatt,
Schulungsraum

Spulerei | Glaswerkstatt,
Restaurierung, Lager

Feuerwehrhaus | Holzlager

Holländer | Metallwerkstatt, Bauteillager

Holzmanufaktur



Rottweil