

Vesna Pungercar, Florian Musso, Arnulf Dinkel
Fabien Coydon, Thibault Pflug, Lucas Höfert
Frank Liedloff, Anka Krauße

Fenstermaschine II

Vorgefertigte Sanierfenster mit integrierter Technik – Demoprojekt

F 3118

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0273-3

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Fenstermaschine II

Vorgefertigte Sanierfenster mit integrierter Technik – Demoprojekt

Endbericht zum Förderprojekt SWD – 10.08.18.7- 16.46 Oktober 2018

Autoren:

MSc Vesna Pungercar, TUM (Projektleitung)
Prof. Dipl.-Ing. Florian Musso, TUM
Arnulf Dinkel, Dipl.-Ing. Architekt, Fraunhofer ISE
Fabien Coydon, Dipl.-Ing., Fraunhofer ISE
Dr. Thibault Pflug, Fraunhofer ISE
Lucas Höfert, Staatl. gepr. Hochbautechniker, B+H
Frank Liedloff, M.Sc. Dipl.-Ing. (FH), B+H
Anka Krauß, B+H

Fachlicher Betreuer:

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Fraunhofer IRB i. A. BBSR II 3

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Institut für Entwerfen und Bautechnik
Lehrstuhl für Baukonstruktion und Baustoffkunde
Prof. Dipl.-Ing. Florian Musso
Arcisstraße 21
80333 München
+49. (0)89. 289-22353
vesna.pungercar@tum.de
www.ebb.ar.tum.de

Projektpartner:

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

Beck+Heun GmbH
Stotternheimer Straße 10, 99086 Erfurt



Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Projektlaufzeit: Oktober 2016 bis Oktober 2018

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



1 Inhaltsverzeichnis

1	INHALTSVERZEICHNIS	1
2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	3
3	TABELLENVERZEICHNIS.....	5
4	HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG DIESES VORHABENS.....	6
5	GRUNDLAGEN.....	8
5.1	AUSGANGSPUNKT	8
5.2	MARKTANALYSE	9
5.2.1	Bestandsgebäude	9
5.2.2	Neubau	10
5.2.3	Stand der Technik	12
5.3	WICHTIGE ASPEKTE UND ANFORDERUNGEN	13
5.3.1	Brandschutz	13
5.3.2	Fenstergröße.....	13
5.3.3	Tageslicht.....	14
5.3.4	Solare Gewinne.....	15
5.3.5	Brüstungshöhe.....	15
5.3.6	Sonnenschutz.....	15
5.3.7	Insektenschutz.....	16
5.3.8	Wärmedämmung.....	17
5.3.9	Befestigung.....	18
5.3.10	Bewegungsarten von Fensteröffnungselementen.....	18
5.3.11	Lüftung und Revision	19
5.3.12	Steuerung	20
5.4	EXPERTENRUNDE AUF DER BAUMESSE BAU MÜNCHEN IM JANUAR 2017.....	20
6	VOR DER DEMONSTRATION AM GEBÄUDE	22
6.1	DEMOPROJEKT	22
6.1.1	Beschreibung	22
6.2	THERMOGRAFIE.....	23
6.2.1	IR-Bilder	24
6.3	ENTWICKLUNG DER ENDGÜLTIGEN VARIANTE	27
6.3.1	Variantenentwicklung und Bewertung.....	28
6.3.2	Die endgültige Variante	32
6.3.3	Montage der Fenstermaschine.....	38
6.4	BAUPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNG	39
6.4.1	Anforderung	39
6.4.2	Rahmenbedienungen (DIN 4108)	40
6.4.3	Simulationsverfahren.....	40
6.4.4	Simulationsergebnisse.....	41
6.4.5	Schlussfolgerungen.....	43
6.5	TAGESLICHT UND SONNENENERGIEGEWINNE	44
6.5.1	Simulationswerkzeug.....	44
6.5.2	Bewertungsmetriken	45

6.5.3	Simulationsergebnisse	45
6.5.4	Schlussfolgerungen:	48
6.6	ANALYSE DES LÜFTUNGSGERÄTES	48
6.6.1	Lüfter und Lüftergehäuse	49
6.6.2	Regenerativer Wärmetauscher	50
7	DEMONSTRATION AM GEBÄUDE	51
7.1	MONTAGE UND QUALITÄTSSICHERUNG	51
7.1.1	Vorbereitung vor der Montage	51
7.1.2	Montage des teilvorgefertigten Modulrahmens mit Abdichtung an den Rohbau	52
7.1.3	Einbau des Sonnenschutzes, Fensters und Anarbeiten des WDVS Systems	54
7.1.4	Demontage des Bestandsfensters und Einbau des Lüftungsgerätes	56
7.1.5	Die Innenverkleidung und Putzarbeiten	57
8	NACH DEM EINBAU DER FENSTERMASCHINE AM GEBÄUDE	59
8.1	MONITORING UND AUSWERTUNG	59
8.1.1	Messtechnik	59
8.1.2	Messfehler	59
8.1.3	Darstellung der Messergebnisse	60
8.1.4	Luftaustausch in Wohngebäuden	63
8.1.5	Lüftungsanlage	64
8.1.6	Rebound-Effekt der Nutzer	64
8.1.7	Schlussfolgerungen	65
8.2	THERMOGRAFIE	66
8.2.1	Messung	66
8.2.2	IR-Bilder	66
8.2.3	Schlussfolgerungen	68
8.3	WIRTSCHAFTLICHE BERECHNUNG	68
8.3.1	Prinzipskizze	68
8.3.2	Materialkosten/Detailbeschreibung/Legende	69
8.3.3	Arbeitskosten	71
8.3.4	Anfahrtskosten (20 Kilometer Hin- und Rückfahrt)	72
8.3.5	Gesamt Kostenberechnung	73
8.3.6	Schlussfolgerungen	73
8.4	NUTZERBEFRAGUNG	74
8.4.1	Befragung 2018	74
8.4.2	Schlussfolgerungen	75
9	FAZIT UND AUSBLICK	77
10	LITERATURVERZEICHNIS	79

2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schnittzeichnungen: links Variante 1, Mitte Variante 2, rechts Variante 3 (Quelle: EBB).....	8
Abbildung 2: Mittlere jährliche Modernisierungsraten beim Wärmeschutz ohne und mit Flächengewicht (Institut Wohnung und Umwelt, 2018).....	10
Abbildung 3: Baugenehmigungen und Fertigstellungen (Statistisches Bundesamt, 2018).	11
Abbildung 4: Anzahl der genehmigten Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2016 (Statistisches Bundesamt, 2016).	11
Abbildung 5: Anzahl der Zuwanderer nach Deutschland von 1991 bis 2015. (Statistisches Bundesamt, 2015).....	12
Abbildung 6: Montagesystem von Beck+Heun (Quelle: Beck+Heun).	13
Abbildung 7: Rohbaurichtmaße (RR) Fensteröffnungen DIN 18050 (Kister, 2009).	14
Abbildung 8: Prozentuelle Verteilung der Produktgruppen (Bundesverband Sonnenschutztechnik, 2017).....	16
Abbildung 9: Absatz der wichtigsten Dämmstoffe in Deutschland in Mio. m3 pro Jahr (1989 – 2011) (Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, 2013).	17
Abbildung 10: Befestigungssysteme für Fenster (Cremers, 2015).....	18
Abbildung 11: Bewegungsarten von Öffnungselementen (Cremers, 2015).	19
Abbildung 12: Expertenrunde auf der BAU 2017 in München (Quelle:EBB).	20
Abbildung 13: Ostansicht des Einfamilienhauses in Erfurt (Quelle: Beck+Heun).	22
Abbildung 14: Grundriss Erdgeschoss (Quelle: Spirek, Beck+Heun).	23
Abbildung 15: Vergleich von Foto und IR-Bild der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) vor der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).....	24
Abbildung 16: Foto und IR-Bild der 2-fach-Verglasung an der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).	24
Abbildung 17: Foto und IR-Bild der Dachfläche an der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).	24
Abbildung 18: Foto und IR-Bild der Nordfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).	25
Abbildung 19: Foto und IR-Bild der Wand an der Nordfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).	25
Abbildung 20: Ungleichmäßige Temperaturverteilung an der Nordfassade im Sockelbereich (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau).	25
Abbildung 21: Wärmeverluste durch die Westfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).	26
Abbildung 22: Die Anschlussbereiche der Außenwände und der Türbereich (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).	26
Abbildung 23: Bereich der Kellergeschoßdecke (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).	26
Abbildung 24: Die ausgewählte Variante 3 des vorherigen Forschungsprojektes (Quelle: EBB TUM).....	27
Abbildung 25: Die unterschiedlichen Varianten des Sanierfensters (Quelle: EBB TUM).	28
Abbildung 26: Die unterschiedlichen Varianten des Sanierfensters (Quelle: EBB TUM).	29
Abbildung 27: Ergebniss der Bewertungsanalyse (Quelle: EBB TUM).	32
Abbildung 28: Die Fenstermaschine. (Zeichnung: EBB und Beck&Heun)	33

Abbildung 29: Die 3D-Präsentation der endgültigen Variante der Fenstermaschine (Quelle: EBB TUM).	34
Abbildung 30: Rahmen der Fenstermaschine (Quelle: EBB TUM).	35
Abbildung 31: Sonnenschutz der Fenstermaschine (Quelle: EBB TUM).	36
Abbildung 32: Die dezentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (Quelle: EBB TUM).	37
Abbildung 33: Das neue Fenster und Fensterbank (Quelle: EBB TUM).	38
Abbildung 34: Wärmebrückenanalyse vom Bestand (Sturz vor Sanierung) (Quelle: Beck+Heun).	41
Abbildung 35: Wärmebrückenanalyse vom Bestand (Brüstung vor Sanierung) (Quelle: Beck+Heun).	41
Abbildung 36: Wärmebrückenanalyse der Variante 1 (Sturz nach Sanierung mit der Fenstermaschine mit Slentite) (Quelle: Beck+Heun).	42
Abbildung 37: Wärmebrückenanalyse der Variante 1 (Brüstung nach Sanierung mit der Fenstermaschine mit Slentite) (Quelle: Beck+Heun).	42
Abbildung 38: Wärmebrückenanalyse der Variante 2 (Sturz nach Sanierung mit der Fenstermaschine ohne Slentite) (Quelle: Beck+Heun).	43
Abbildung 39: Wärmebrückenanalyse der Variante 2 (Sturz nach Sanierung mit der Fenstermaschine ohne Slentite) (Quelle: Beck+Heun).	43
Abbildung 40: Tageslichtautonomie und Tageslichtfaktor für Variante 1 (vor Renovierung) (Quelle: ISE).	46
Abbildung 41: Tageslichtautonomie und Tageslichtfaktor für Variante 2 (nach Renovierung) (Quelle: ISE).	46
Abbildung 42: Effektiver g-Wert und transmittierte Sonneneinstrahlung für Varianten 1 (vor Renovierung) und 2 (nach Renovierung). Monatlicher durchschnittlicher Tag in Winter: für jede Stunde des Tages wurde den Durchschnittswert von allen gleichen Stunden im März gerechnet (Quelle: ISE).	47
Abbildung 43: Effektiver g-Wert und transmittierte Sonneneinstrahlung für Varianten 1 (vor Renovierung) und 2 (nach Renovierung). Monatlicher durchschnittlicher Tag in Sommer: für jede Stunde des Tages wurde der Durchschnittswert im Juli errechnet (Quelle: ISE).	47
Abbildung 44: Die Bestandteile vom Lüftungsgerät (1=Aluminium-Wärmespeicher, 2=Motor-Einheit mit Schalldämm-Element, 3=Umlenk-Element, 4=Filter-Element) (Quelle: Beck&Heun).	48
Abbildung 45: Primitiver Teststand zur Einschätzung des Optimierungspotentials (Quelle: ISE).	49
Abbildung 46: Montagebox für die 2 Lüfter (Quelle: ISE).	49
Abbildung 47: Lage der Sensoren (Rot) und Lüftungsgeräte (Blau). Links: Erdgeschoss. Rechts: Obergeschoss. LG= Lüfterpaar (Quelle: ISE).	59
Abbildung 48: Temperaturverlauf in einer typischen Woche (Oben: vor der Sanierung; Unten: nach der Sanierung) (Quelle: ISE).	61
Abbildung 49: Relative Luftfeuchtigkeit in einer typischen Woche (Oben: vor der Sanierung; Unten: nach der Sanierung) (Quelle: ISE).	62
Abbildung 50: CO ₂ -Verlauf in einer typischen Woche (Oben: vor der Sanierung; Unten: nach der Sanierung) (Quelle: ISE).	63
Abbildung 51: Kumulative Verteilung der Temperatur in Winter (Oben: gesamtes Haus; Unten: Schlafzimmer 2) (Quelle: ISE).	64

Abbildung 52: Kumulative Verteilung des CO2 im Winter (Oben: gesamtes Haus; Unten: Schlafzimmer 2).	65
Abbildung 53: Vergleich von Foto und IR-Bild der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) nach der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).	66
Abbildung 54: Vergleich von Foto und IR-Bild der Fenstermaschine (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) nach der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).	67
Abbildung 55: Vergleich von Foto und IR-Bild des Daches an der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) nach der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).	67
Abbildung 56: Vergleich von Foto und IR-Bild der Nordfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) nach der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).	68

3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die Bewertung der Varianten bezüglich Lüftung (Quelle: EBB TUM).....	30
Tabelle 2: Die Bewertung der Varianten bezüglich Nutzerfreundlichkeit (Quelle: EBB TUM).	31
Tabelle 3: Die Bewertung der Varianten bezüglich Montage (Quelle: EBB TUM).	31
Tabelle 4: Die Bewertung der Varianten bezüglich Energie (Quelle: EBB TUM).....	31
Tabelle 5: Materialeigenschaften von Phenol (Quelle: Beck+Heun).	34
Tabelle 6: Materialeigenschaften von Sonnenschutzsystemen (Quelle: EBB TUM).....	36
Tabelle 7: Fenstereigenschaften (Quelle: Beck+Heun).	37
Tabelle 8: Montage der Fenstermaschine (Quelle: EBB TUM).....	39
Tabelle 9: Materialaufbau des Bestandsgebäudes (Quelle: EBB TUM).	40
Tabelle 10: Materialaufbau der Modelvarianten (Quelle: EBB TUM).....	40
Tabelle 11: Simulierte Fenstervarianten (Quelle: ISE).	44
Tabelle 12: Raumtemperaturen vor und nach der Sanierung (Quelle: ISE).	60
Tabelle 13: Signifikanztests der Mittelwerte der vermessenen Variablen (Quelle: ISE).	60
Tabelle 14: Prinzipskizze für Fenstermaschine und Fenstertausch mit dezentraler Lüftungsanlage und Sonnenschutzsystem (Quelle: TUM EBB).	69
Tabelle 15: Materialkosten im Vergleich für Fenstermaschine und Fenstertausch (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun).	71
Tabelle 16: Arbeitskosten im Vergleich (Fenstermaschine und Fenstertausch) (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun).	72
Tabelle 17: Anfahrtkosten im Vergleich (*B+H=Beck & Heun, E=Elektriker, F=Fassadenbauer, FN=Fensterbauer, FB=Fensterbankbauer, LI=Lüftungsinstallateur, SS=Sonnenschutzbauer, T=Trockenbauer) (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun).....	72
Tabelle 18: Gesamt Kostenberechnung in EUR (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun).....	73

4 Hintergrund und Zielsetzung dieses Vorhabens

In den nächsten Jahren sollen laut einer Prognose des BBSR über den Wohnungsmarkt 2030 (BBSR, 2015) rund 230 000 neue Wohnungen pro Jahr für das gesamte Bundesgebiet geschaffen werden. Die Bevölkerungszahl Deutschlands steigt (wegen der Zuwanderung) und die Wohnungsbautätigkeit wächst. Prognosen gehen davon aus, dass sich Wachstum und die steigende Wohnungsnachfrage in den nächsten fünfzehn Jahren stabilisieren werden. Gleichzeitig bietet die Klimaschutzpolitik, die die Reduktion von Energieimporten und Treibhausgasen verfolgt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2014), wirtschaftliche Potenzial für Deutschland. Nachhaltigkeit und Energieeffizienz können vorrangig bei Neubauten realisiert werden. Es bleibt aber viele Bestandsgebäude im gesamten Bundesgebiet, die einen großen Anteil am Energieverbrauch in Deutschland einnehmen und deren Sanierungsquoten bislang gering sind. Um dem Problem entgegenzuwirken, will das BMWi den Endenergieverbrauch für Bestandsgebäude halbieren und den Anteil erneuerbarer Energien auf 60 Prozent erhöhen (BMW, 2014).

Der drängende Bedarf an Wohnungen für alle Generationen und an höherer Energieeffizienz im Gebäudebestand erfordert einen beschleunigten und effizienten Bauablauf. Da Gebäudehüllen verstärkt nicht nur gestalterische und konstruktive, sondern auch energietechnische und nachhaltigkeitsorientierte Funktionen übernehmen, treten oft bauphysikalische, ästhetische und organisatorische Probleme bei der Realisierung auf. Mangelhafte Bearbeitung, Verzögerungen des Bauprozesses und Kostensteigerungen entstehen oft durch die Vielzahl unterschiedlicher Bauelemente. Die höchste Fehlerquote weisen die Anschlüsse zwischen Fenster und Wand (Stiell, 2009) auf. Trendprognosen zeigen den weit verbreiteten Wunsch nach teil- oder vollvorgefertigten Elementen im Bereich des Wohnungsbaus (Detail, 2016).

Diese Umstände motivieren dieses Forschungsvorhaben, das (im Zeitraum von Oktober 2016 bis Oktober 2018) die prototypische Entwicklung eines vorgefertigten Fensterelementes mit integrierter Technik sowohl für den Neubau als auch die energetische Sanierung zum Ziel hat. Folgende Schwerpunkte werden gesetzt:

- Mangelhafte Ausführung, zeitliche Verzögerungen und Kostensteigerungen sollen durch die Minimierung der beteiligten Gewerke reduziert werden
- Wirtschaftlichkeit und Zukunftssicherheit
- Vergleichbarer oder effizienterer Bauablauf als bei konventionellen Verfahren
- Möglichst hoher Grad an Vorfertigung
- Minimierung bauphysikalischer, gestalterischer, konstruktiver, funktionaler und organisatorischer Probleme zwischen Fenster und Wand
- Integration des Blendrahmens in die Fenstermaschine, so dass der Rahmen nicht mehr als solches sichtbar ist
- Optimierung der dezentralen Lüftungseinheit. Die genaue Anordnung des regenerativen Wärmetauschers und des Lüfters muss exakt definiert, simuliert und gebaut werden, um hohe Energieeffizienz und Lüftungseffektivität zu gewährleisten
- Optimierung und Integration der Befestigungen, so dass sie verdeckt angeordnet sind, sich in allen Ebenen dem Bestand anpassen und mit Spannung zum Anpressen von Dichtebenen genutzt werden können

- Integration der Abdichtung der Fenstermaschine ins Element, so dass Wind- und Regenabdichtung gewährleistet werden
- Einsatz der Fenstermaschine im Zuge der energetischen Sanierung der Gebäudehülle

Der Hauptteil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der wissenschaftlichen Dokumentation und Evaluation der Entwicklung und des Einbaus der Fenstermaschine am Fallbeispiel eines Einfamilienhauses in Erfurt. Die Arbeitsschritte behandeln die Aspekte Design, modularer Aufbau und Montageablauf. Darüber hinaus sollen die Themen Integration der Funktionen, Toleranzaufnahme, Anschluss an umgebende Bauteile, Tageslicht, Sonnenschutz, Insektenschutz und Wärmeschutz diskutiert werden.

5 Grundlagen

5.1 Ausgangspunkt

Das Forschungsprojekt baut auf den Ergebnissen des vorangegangenen, im Rahmen von „Zukunft Bau“ geförderten Forschungsvorhabens auf, in dessen Verlauf drei Prototypen (siehe Abbildung 1) für die energetische Sanierung von Gebäuden aus den 1950-er bis 1970er Jahren entwickelt wurden. Das Forschungsprojekt beschränkt sich dabei auf typische Bestandsgebäude aus dieser Zeit, an denen bisher noch keine energetischen Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt wurden.

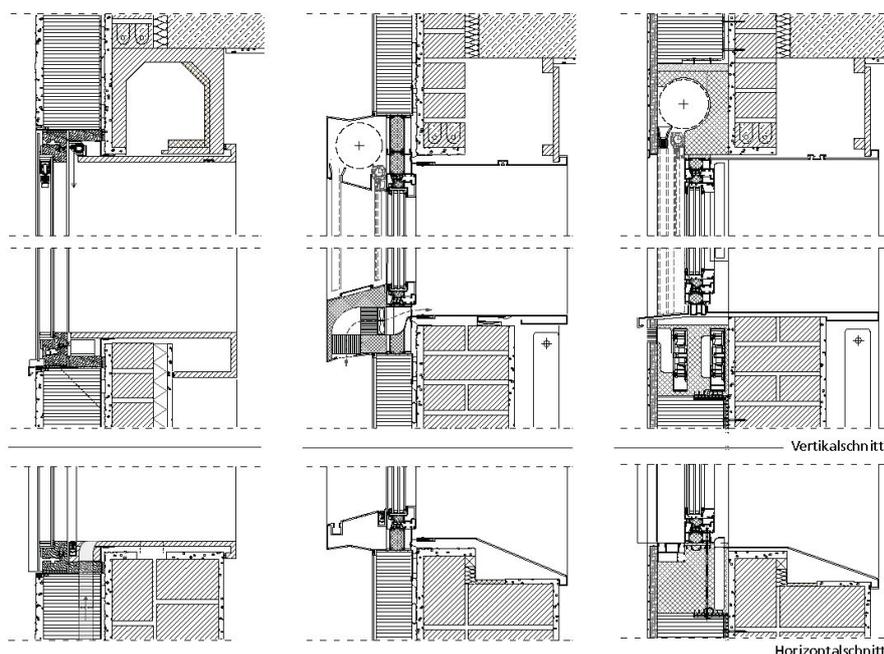


Abbildung 1: Schnittzeichnungen: links Variante 1, Mitte Variante 2, rechts Variante 3 (Quelle: EBB).

Variante 1

Das putzbündige Ganzglasfenster (Senk-Klapp) öffnet nach außen, wodurch der Fensterrahmen größer als die Maueröffnung des Bestandes sein kann. Das Tageslicht fällt annähernd über die gesamte Rohbauöffnung ein, so dass von innen nur Glas zu sehen ist. Bei einem Fenstermaß von $B \times H = 1,25 \times 1,50$ m wird so ein Tageslichtzugewinn von ca. 30 % erzielt. Zu- bzw. Abluftanschlüsse werden für eine Versorgung der Räume über Lüftungskanäle in der Dämmebene vorgesehen. Eine zentrale Lüftungsanlage versorgt mehrere Räume beziehungsweise mehrere Wohnungen. Die vorab montierte Montagezarge erlaubt es, das Fenster als letzten Arbeitsschritt einzusetzen und ohne Konflikt mit den umgebenden Bauteilen zu revidieren.

Variante 2

Eine aufgesetzte Metallfasche erhöht das verfügbare Volumen für integrierte Technik und Montage und Wartung. Die sichtbare Einfassung des Fensters integriert unter anderem ein neu entwickeltes dezentrales Lüftungsgerät auf der Basis bestehender Produkte eines der Industriepartner. Durch Führung der Lüftung im Bereich des Rahmens kann auf die bisher

erforderlichen Eingriffe in die Rohbaubsubstanz verzichtet werden. Wartungsarbeiten erfolgen von außen.

Variante 3

Die Weiterentwicklung des Sanierelements eines der Industriepartner integriert das neue Fenster mit allen technischen Komponenten in der Dämmebene. Die Lüftung erfolgt über ein neu entwickeltes dezentrales Lüftungsgerät, das auf einem regenerativen, aus ca. 90 voneinander getrennten Strömungsebenen bestehenden Enthalpiewärmetauscher mit Wärme- und Feuchterückgewinnung basiert und mehrere Vorteile in sich vereint: Im Winter entsteht ein hoher Komfort dadurch, dass die Luft nicht zu trocken werden kann und dass kein Kondensatablauf nötig ist. Das Element wird als Einbauelement komplett vorgefertigt auf die Baustelle geliefert.

Das neue Forschungsprojekt hat seinen Schwerpunkt nicht nur bei Bestandsgebäuden und behandelt auch Neubauten. Auf Grundlage von Marktanalysen im Wohnungsbau zeigte sich ein Potenzial zur Ausweitung der Anwendung des Sanierfensters auf einen größeren Bereich. Die Ausgangsbasis der Überlegungen bleibt dabei jedoch gleich, da ein funktional erweitertes vorgefertigtes Fensterelement angestrebt wird. Das Sanierfenster als Element zur Integration mehrerer Komponenten stellt den wichtigsten Ansatz zur Vereinfachung der Bauabwicklung dar. Im Gegensatz zum konventionellen Einbau von Sonnenschutz, dezentraler Lüftung und Fenster reduziert das Fensterelement die Schnittstellen der beteiligten Konstruktionselemente.

Die Untersuchung basiert auf dem Stand der Technik beim Industriepartner Beck & Heun, der über 50 Jahre Erfahrung in der Entwicklung von Rollladenkästen verfügt. Das Produkt- und Leistungsspektrum wurde sukzessiv auf Beschattungs- und Dämm Lösungen rund um das Fenster erweitert (Beck+Heun, 2015). Im Bereich der dezentralen Lüftung wurde die Projektentwicklung vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE wissenschaftlich begleitet.

5.2 Marktanalyse

Die Marktanalyse wurde durchgeführt, um das Fensterelement vorherrschenden Bedürfnissen und dem aktuellen Stand der Technik anzupassen. Die derzeitige wirtschaftliche und politische Situation in Deutschland bewirkt einen Anstieg der Bautätigkeit. So werden Bestandsgebäude energetisch saniert, Baulücken in Städten bebaut und neuer Wohnraum geschaffen.

5.2.1 Bestandsgebäude

Die energetischen Erneuerungsmaßnahmen an Bestandsgebäuden stehen in direktem Zusammenhang zur Verwirklichung der Energie- und Klimaschutzziele Deutschlands, auch wenn derzeit der Anteil der Sanierungsmaßnahmen an Gebäudehüllen jährlich bei nur knapp einem Prozent liegt (siehe Abbildung 2). Die Daten des BMWi zeigen, dass Wohngebäude in Deutschland zu 83 Prozent aus Ein- und Zweifamilienhäusern und zu 17 Prozent aus Mehrfamilienhäusern bestehen. Ein Drittel dieses gesamten Wohnbestands wurde zwischen 1948 und 1978 gebaut und weist mangelhafte Energieeffizienz auf. Größere Sanierungen stehen an der Gebäudehülle normalerweise nach 30 bis 40 Jahren an. Dieser Umstand liegt der Prognose des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR, 2016)

zugrunde, die eine zu erwartende Erhöhung der Sanierungstätigkeit im Bausektor in den nächsten Jahren aufführt. An dieser Stelle soll die Bereitschaft der Gebäudenutzer für Modernisierungen nicht vergessen werden. Das statistische Bundesamt kommt zu dem Ergebnis, dass in Deutschland im Jahr 2014 41,0 Millionen Wohnungen existierten, davon 45,5 Prozent von ihren Eigentümern selbst bewohnt (Statistisches Bundesamt, 2016). Laut einer Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft ist die Hälfte der Eigentümer selbstgenutzter Immobilien über 60 Jahre alt (Voigtländer, 2008). Daraus folgt, dass ein Eigentümerwechsel in naher Zukunft zu erwarten ist und mit einer Verjüngung der Altersstruktur der Eigentümer auch die Wahrscheinlichkeit für die Erhöhung der Sanierungsaktivität steigt.

mittlere jährliche Modernisierungsraten beim Wärmeschutz (ohne Flächengewicht)				
	Außenwand	Dach/Obergeschossdecke	Fußboden/Kellerdecke	Fenster
alle Wohngebäude				
2010–2012	1,30 % +/- 0,13 %	1,85 % +/- 0,14 %	0,54 % +/- 0,08 %	3,07 % +/- 0,20 %
2013–2015	1,02 % +/- 0,12 %	1,69 % +/- 0,15 %	0,45 % +/- 0,07 %	3,82 % +/- 0,22 %
2010–2015	1,16 % +/- 0,09 %	1,77 % +/- 0,10 %	0,49 % +/- 0,05 %	3,45 % +/- 0,13 %
2010–2016*	1,05 % +/- 0,07 %	1,69 % +/- 0,09 %	0,46 % +/- 0,05 %	3,33 % +/- 0,12 %
Altbauten bis Baujahr 1978				
2010–2012	1,88 % +/- 0,20 %	2,80 % +/- 0,22 %	0,78 % +/- 0,12 %	4,34 % +/- 0,31 %
2013–2015	1,43 % +/- 0,18 %	2,48 % +/- 0,24 %	0,63 % +/- 0,10 %	4,87 % +/- 0,32 %
2010–2015	1,65 % +/- 0,13 %	2,64 % +/- 0,16 %	0,71 % +/- 0,08 %	4,61 % +/- 0,19 %
2010–2016*	1,51 % +/- 0,11 %	2,52 % +/- 0,14 %	0,67 % +/- 0,07 %	4,39 % +/- 0,17 %

mittlere jährliche Modernisierungsraten beim Wärmeschutz (mit Flächengewicht)				
	Außenwand	Dach/Obergeschossdecke	Fußboden/Kellerdecke	Fenster
alle Wohngebäude				
2010–2012	0,97 % +/- 0,10 %	1,67 % +/- 0,13 %	0,43 % +/- 0,06 %	1,68 % +/- 0,13 %
2013–2015	0,77 % +/- 0,09 %	1,53 % +/- 0,14 %	0,36 % +/- 0,05 %	2,09 % +/- 0,15 %
2010–2015	0,87 % +/- 0,07 %	1,60 % +/- 0,10 %	0,39 % +/- 0,04 %	1,88 % +/- 0,11 %
2010–2016*	0,79 % +/- 0,06 %	1,53 % +/- 0,08 %	0,37 % +/- 0,04 %	1,82 % +/- 0,10 %
Altbauten bis Baujahr 1978				
2010–2012	1,39 % +/- 0,16 %	2,52 % +/- 0,20 %	0,63 % +/- 0,10 %	2,44 % +/- 0,21 %
2013–2015	1,05 % +/- 0,14 %	2,24 % +/- 0,22 %	0,51 % +/- 0,08 %	2,74 % +/- 0,23 %
2010–2015	1,22 % +/- 0,10 %	2,38 % +/- 0,15 %	0,57 % +/- 0,06 %	2,59 % +/- 0,16 %
2010–2016*	1,12 % +/- 0,09 %	2,27 % +/- 0,14 %	0,54 % +/- 0,06 %	2,47 % +/- 0,15 %

Abbildung 2: Mittlere jährliche Modernisierungsraten beim Wärmeschutz ohne und mit Flächengewicht (Institut Wohnung und Umwelt, 2018).

5.2.2 Neubau

Die demografische Entwicklung mit stärkerer Zuwanderung spiegelt sich insbesondere im Wohnungsmarkt und der Bauaktivität wider. Eine Statistik des Statistischen Bundesamts zeigt die Anzahl der Zuwanderer nach Deutschland im Zeitraum der Jahre von 1991 bis 2015. Im Jahr 2015 sind 2.136.954 Menschen nach Deutschland zugezogen (siehe Abbildung 5). Dies ist die höchste Zahl an Zuwanderern seit dem Jahr 1992 (Statistisches Bundesamt, 2015). Dementsprechend hat sich der Wohnungsmarkt in den letzten 5 Jahren entwickelt und parallel hat sich die Zahl der genehmigten Wohnungen (Statistisches Bundesamt, 2016) in Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland erhöht (siehe Abbildung 4). In der Abbildung 4 und Abbildung 5 ist aber auch zu erkennen, dass eine geringere Zahl der Zuwanderer und eine hohe Bautätigkeit im Jahr 1995 zu beobachten ist. Das bedeutet, dass

auch andere Gründe (siehe Abbildung 3) und nicht nur die Erhöhung der Zuwanderung zur steigenden Nachfrage nach Wohnraum und einer Baubeschleunigung nahelegen.

Jahr	Genehmigungen					Fertigstellungen	
	Wohnungen insgesamt ¹	darunter in neuerrichteten Wohngebäuden				Wohnungen insgesamt ¹	darunter: Wohnungen in neuerrichteten Wohngebäuden
		Wohnungen	davon:		Wohnungen in Wohnheimen		
			in Wohngebäuden mit 1 und 2 Wohnungen	3 u. mehr Wohnungen			
Deutschland							
1991	406 091	345 224	143 451	194 509	7 264	331 178	.
1992	485 365	416 761	168 828	238 668	9 265	386 052	.
1993	606 612	525 935	204 539	313 219	8 177	455 451	394 120
1994	712 636	624 839	238 355	381 098	5 386	572 883	501 728
1995	638 630	552 695	200 417	348 342	3 936	602 757	524 606
1996	576 238	496 694	211 573	279 783	5 338	559 488	485 249
1997	528 096	452 727	224 029	226 014	2 684	578 179	501 120
1998	475 711	407 594	239 511	165 757	2 326	500 690	432 237
1999	437 084	379 077	243 198	133 687	2 192	472 638	406 567
2000	348 340	304 248	200 860	102 538	850	423 044	368 531
2001	290 978	256 564	172 494	83 047	1 023	326 187	285 925
2002	274 117	243 222	171 944	70 419	859	289 590	253 700
2003	296 823	263 317	192 693	69 837	787	268 103	236 088
2004	268 679	236 378	167 073	68 504	801	278 008	247 795
2005	240 571	211 706	145 288	65 111	1 307	242 316	213 766
2006	247 793	216 580	145 904	69 780	896	249 436	220 637
2007	182 771	157 198	94 703	61 173	1 322	210 729	185 315
2008	174 691	148 340	88 312	58 537	1 491	175 927	152 237
2009	177 570	153 736	90 080	61 426	2 230	158 987	136 518
2010	187 632	164 611	94 693	66 912	3 006	159 832	140 096
2011	228 311	200 061	111 297	85 304	3 460	183 110	164 178
2012	241 090	212 636	106 697	97 203	8 736	200 466	176 617
2013	272 433	237 274	110 284	118 908	8 082	214 817	188 397
2014	285 079	246 024	107 337	128 088	10 599	245 325	216 120
2015	313 296	267 965	116 020	139 355	12 590	247 722	216 727
2016	375 388	316 550	118 367	172 679	25 504	277 691	240 255
2017	347 882	300 349	112 987	172 404	14 958	284 816	245 304

Abbildung 3: Baugenehmigungen und Fertigstellungen (Statistisches Bundesamt, 2018).

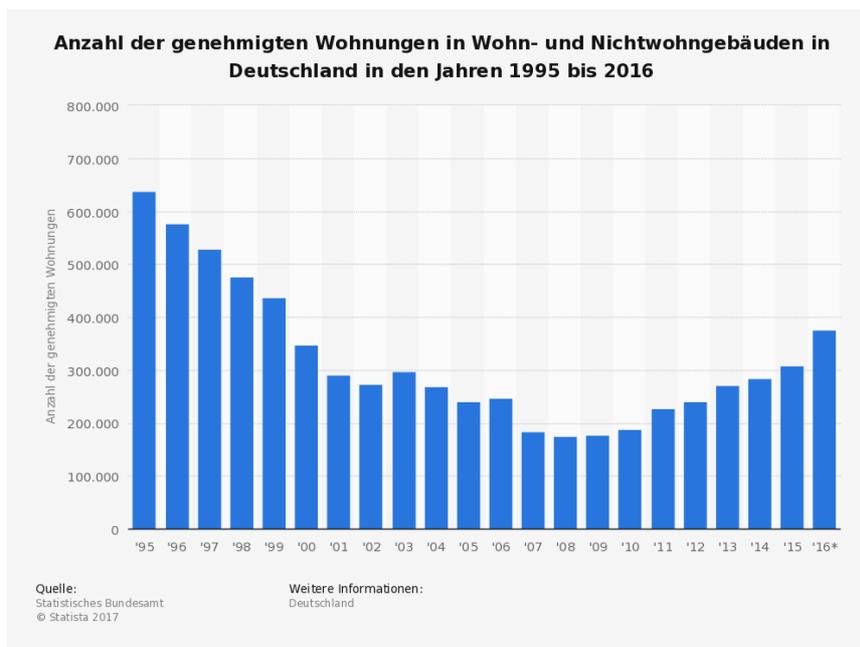


Abbildung 4: Anzahl der genehmigten Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2016 (Statistisches Bundesamt, 2016).

Das Ziel, den Neubau von Wohnungen zu beschleunigen und die Baukosten zu senken hat Bundespolitiker, Kommunen, Vertreter von Gewerkschaften, Bau- und Immobilienwirtschaft, Architekten- und Ingenieurverbände zur Entwicklung eines Zehn-Punkte-Programms veranlasst. Eine der höchsten Prioritäten bei der Baukostensenkung sind typisierte Fenster und Türen, Vorfertigung von Bauteilen und Module für die Aufstockung von Dächern (Bundesregierung, 2017).

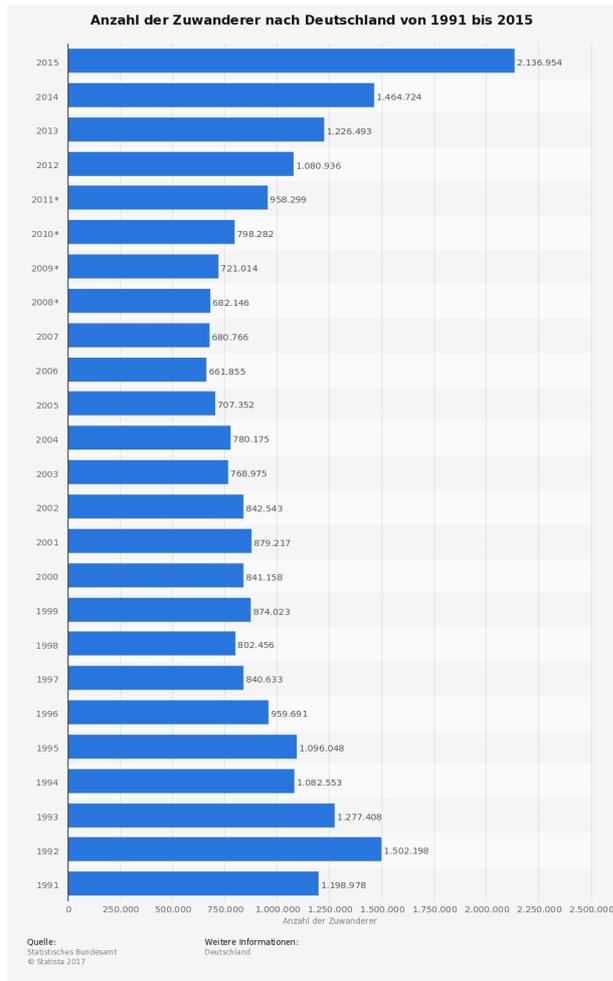


Abbildung 5: Anzahl der Zuwanderer nach Deutschland von 1991 bis 2015. (Statistisches Bundesamt, 2015)

5.2.3 Stand der Technik

Standardisierte aber auch frei gestaltbare Lösungen werden von Architekten nachgefragt und von der Industrie entwickelt. Das Forschungsthema befasst sich mit der Integration von Fassadenelementen, die auf dem Markt nur als Teilsysteme verfügbar sind. Individuelle Lösungen und Systeminnovationen im Bereich Fensterbau haben ihre Schwerpunkte bei der Integration einer dezentralen Lüftungsanlage in das Fenster (Systeme von Schüco International, Velux oder Heim & Haus) oder bei der Optimierung der Fensterzargen für Energie- und Kostenoptimierung. Das System der Montagezarge entwickelte sich in den letzten Jahren weiter und bildet eine Grundlage für Fenstermontagen. Montagezargen reduzieren den Aufwand bei einem späteren Fenstertausch, minimieren notwendige Anschlussabdichtungen und vereinfachen die Gewerkabnahme. Der Markt bietet viele unterschiedliche Varianten an Vorwandmontagesystemen und Montagezargen

(Schreinermeister, 2013), wie verschraubte Montagesysteme (z.B. Tremco-IIIbruck) , durchgängige Winkelkonsolen, Komplettmontageelemente (z.B. Beck+Heun, siehe Abbildung 6) und flexible System-Montagezargen (z.B. Finstral, Thermopane, Autor).



Abbildung 6: Montagesystem von Beck+Heun (Quelle: Beck+Heun).

5.3 Wichtige Aspekte und Anforderungen

Bei der Planung wurden verschiedene Aspekte in Folge der bisherigen Ergebnisse des abgeschlossenen Forschungsprojekts berücksichtigt. Vor allem zu Beginn aber auch in der Entwicklung wurden die relevanten Anforderungen in den Themenbereichen von Brandschutz, Fenstergröße, Tageslicht, solaren Gewinnen, Sonnenschutz, Insektenschutz, Wärmedämmung, Befestigung, Fensteröffnung, Lüftung, Revision und Steuerung untersucht.

5.3.1 Brandschutz

Da die Fenstermaschine ein Fassadenelement ist das in der Dämmebene eingebaut wird, muss sie den speziellen länderspezifischen Normen und Richtlinien für Brandriegel in WDVS (Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V., 2017) entsprechen.

Anforderung:

- Wenn das Fenster der 2. Rettungsweg ist, muss es entsprechend ausgebildet sein.
- Bei Lage des Fensters in der Dämmebene muss die Qualität der Gebäudehülle (Material) entsprechend gewährleistet sein.

5.3.2 Fenstergröße

In Nachkriegsbauten wurden meistens normierte Einfachfenster mit Einscheibenverglasung eingesetzt. Grund für die Normung war die dadurch mögliche industrielle Vorfertigung der Fenster (Giebeler, Fisch, Krause, Musso, Petzinka, & Rudolphi, 2008). Die Maße wurden im Oktametermodul (12,5 cm) angegeben. In der Tabelle unten sind einige dieser Richtmaße für Fensteröffnungen dargestellt.

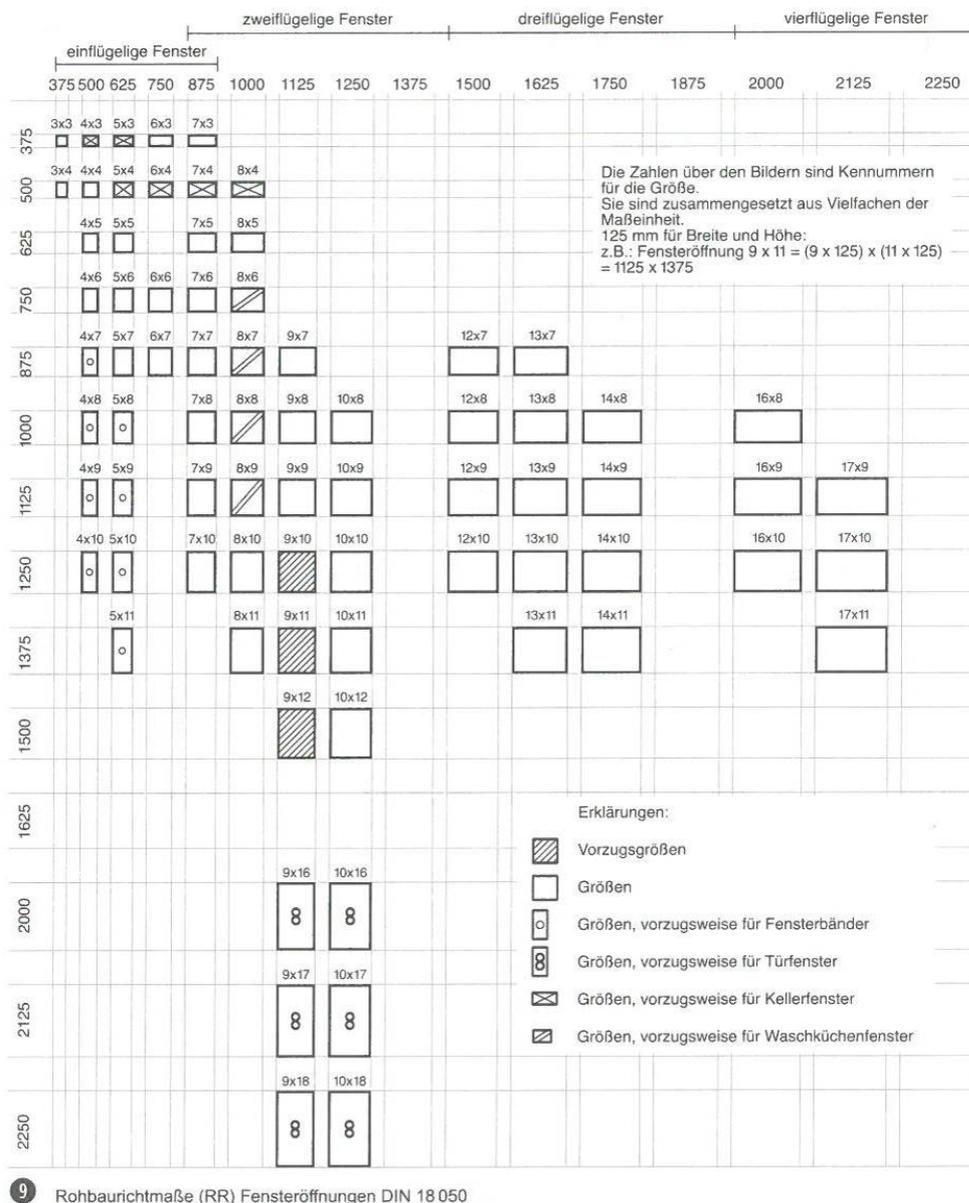


Abbildung 7: Rohbaurichtmaße (RR) Fensteröffnungen DIN 18050 (Kister, 2009).

Anforderung:

- die Größe der Fenstermaschine soll sich im Bereich der Vorzugsgrößen bewegen

5.3.3 Tageslicht

Die Landesbauordnungen fordern mindesten 10% bis 12.5% der Fensterrohbaumaßfläche aus. Die DIN 5034 kann als Empfehlung benutzt werden. Nach Berechnungen von TUM EBB betragen die Fensteröffnungen der Nachkriegsbauten normalerweise 10% der Grundfläche des relevanten Innenraumes. Das bedeutet, dass die Räume schon vor der Sanierung dunkel sind und durch eine energetische Sanierung mit zusätzlicher Dämmung die Lichtqualität herabgesetzt wird.

Anforderung an die Fenstermaschine:

- Mit der Verkleinerung der Fensteröffnung erhöht sich das Risiko für Depressionen und Angststörungen (Department of Psychiatry and Psychotherapy, Center for Medical

Physics and Department of Psychiatry and Psychotherapy, Center for Medical Physics and Biomedical Engineering, Medical University of Vienna, 2012). Die Verkleinerung der Öffnung durch die Fenstermaschine soll möglichst gering sein.

- Die seitliche und obere Vergrößerung von Fenstern ist nicht beliebig möglich. Bei der Vergrößerung muss ein Statiker Dimensionierungsberechnungen durchführen und in den meisten Bundesländern wird eine Baugenehmigung benötigt. Das Verfahren ist zeitlich anspruchsvoll und widerspricht der Idee der Fenstermaschine.
- Nach unten könnte die Fensteröffnung bis zum Boden verlängert werden. Es soll daher bei Anwendung der Fenstermaschine geprüft werden, ob die Vergrößerung nach unten möglich ist.

5.3.4 Solare Gewinne

Eine Verminderung des Tageslichteinfalls beim Einfamilienhaus in Erfurt hätte die Verminderung der solaren Gewinne zur Folge. Für die Ermittlung von belastbaren Werten sind strahlungsphysikalische Berechnungen auf Basis der Spektralverteilungen aller Fenstermaschinen erforderlich.

Anforderung:

- der g-Wert einer Verglasung in Kombination mit einem Sonnenschutz, kann angenähert durch Tabellenwerte (DIN 4108-2, VDI 2078) bestimmt werden.
- Etwas produktspezifischere Ergebnisse liefert das vereinfachte Verfahren nach DIN EN 13363-1, welches jedoch nur für Gewebe – als Außensonnenschutz – anwendbar ist.
- eine Steuerung des Sonnenschutzes ist nicht einfach, aber im Hinblick auf Energieeinsparung (Kühlung & Tageslicht) unverzichtbar.

5.3.5 Brüstungshöhe

Die vorgeschriebene Brüstungshöhe bei Fenstern hängt von der Absturzhöhe ab. In den meisten Bundesländern ist für Wohnbauten eine Brüstungshöhe von 90 cm vorgeschrieben, ab 12 m Absturzhöhe müssen es sogar 110 cm sein. Die Höhe (und wie diese gemessen wird) kann je nach Bundesland variieren.

Anforderung:

- Die Mindesthöhe von Brüstungen wird für den Privatbereich in den Landesbauordnungen geregelt. Die Festlegungen der Mindesthöhen sind unterschiedlich.
- Die dezentrale Lüftungsanlage muss die Festlegung der Mindesthöhen beachten

5.3.6 Sonnenschutz

In den nächsten Jahren sollen laut einer Prognose des BBSR über den Wohnungsmarkt2030 (BBSR, 2015) rund 230 000 neue Wohnungen pro Jahr für das gesamte Bundesgebiet geschaffen werden. Vom lebendigen Marktgeschehen (Neubau) profitieren 2016 nahezu alle Vertriebswege (marketmedia24, 2017). Die Marktanalyse von marketmedia24 führt aus, dass der Sonnenschutz nicht mehr das klassische Nachrüstprodukt ist, sondern viel mehr bei Neubau und Sanierung bereits in der Planungsphase als Teil der Haustechnik eingeplant wird.

Sowohl Architekten wie auch die privaten Bauherren beschäftigen sich immer mehr bewusst mit dem Thema Sonnenschutz. Herr Ing. Johann Gerstmann (Sprecher des Bundesverbandes Sonnenschutztechnik in Österreich) betont, dass gut informierte private Bauherren oftmals beharrlichen Planern gegenüber stehen, die lediglich die hohen Sonnenstände des Sommers auf Südseiten berücksichtigen und daher unverändert Vordächer oder Balkone als wirksame Schutzmaßnahmen betrachten (Bundesverband Sonnenschutztechnik, 2017).

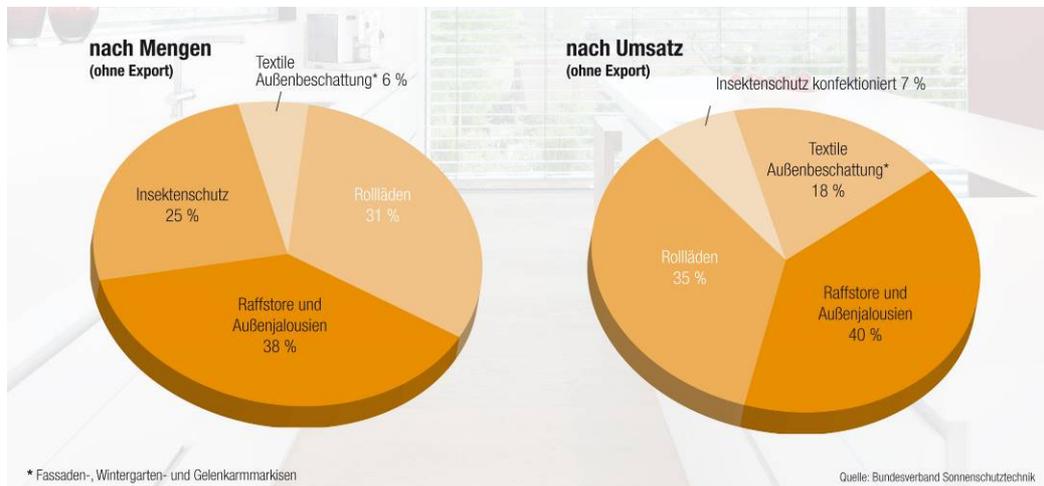


Abbildung 8: Prozentuelle Verteilung der Produktgruppen (Bundesverband Sonnenschutztechnik, 2017).

Laut Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE ist am Markt eine breite Palette von Systemen für die Anwendung im außen- und innenliegenden Bereich der Fassade verfügbar. Dabei gewinnen solche Systeme immer mehr an Bedeutung, die gleichzeitig Sonnenschutz, Blendschutz, Tageslichtversorgung und Aussicht optimieren (Fraunhofer Solar Building Innovation Center SOBIC, 2008). Der Hauptverwendungszweck liegt bei den Systemen, die mehr als nur eine Funktion anbieten. Um Stromersparnis zu gewährleisten und die Leistungsfähigkeit der Nutzer zu steigern, ist die Tageslichtversorgung und -planung von großer Bedeutung (Hausladen, de Saldanha, Liedl, & Sager, 2004). Ein außenliegender Sonnenschutz eliminiert 80 bis 90 Prozent des Strahlungseintrags (der Abminderungsfaktor F_c liegt beim 0,1 bis 0,2) und ein innen liegendes Rollo im Vergleich nur 30 Prozent (Hausladen, de Saldanha, Liedl, & Sager, 2004).

Anforderung:

- Das Sonnenschutzsystem der Fenstermaschine soll wenig Platz (max. 20 cm Tiefe) benötigen.
- Das Sonnenschutzsystem soll den Sonnenschutz und die energieeffiziente Ausleuchtung des Raums mit Tageslicht ermöglichen.
- Der Schutzeffekt bei Anbringung des Sonnenschutzes außen ist größer.

5.3.7 Insektenschutz

Insektenschutz entwickelte sich nach Aussage vieler Fachbetriebe in den vergangenen Jahren positiv und mit wachsenden Umsätzen. Zum Ersten meinen viele Geschäftsführer der Insektenschutzbranche, dass Insektenschutz ein Trendthema ist, da verschiedene Systeme und vor allem verbesserte Gewebe im Bereich Sicht und Luftdurchlässigkeit entwickelt wurden (Metzger, 2017). Zweitens fördern tendenziell weniger kalte Winter und heißere Sommer die Ausbreitung von Insekten. Das Bewusstsein für den Wert und die

Annehmlichkeit einer insektenfreien Wohnung, insbesondere im Sommer und am Abend bei Licht in der Wohnung, nehme zu (Knewitz, 2017).

Anforderung:

- Das Insektengitter der Fenstermaschine soll unauffällig und transparent sein, schnell montiert werden können.

5.3.8 Wärmedämmung

Die Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) schreibt zur Fassadendämmung (meist mit Wärmedämm-Verbundsystemen) einen maximalen U-Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ für die Außenwand vor. Dieser wird je nach Wärmeleitgruppe des verwendeten Dämmstoffs schon mit 100 – 120 mm Dämmstärke erreicht, wirtschaftlich sinnvoll können Dämmstärken bis 250 mm sein. Die Anteile (siehe Abbildung 9) zwischen den Materialgruppen haben sich über die Jahre prozentual nicht wesentlich verschoben. Mineralwolle (ca. 55 %) ist mengenmäßig das wichtigste Material für Dämmstoffe, gefolgt von EPS-Hartschaum (ca. 32 %).

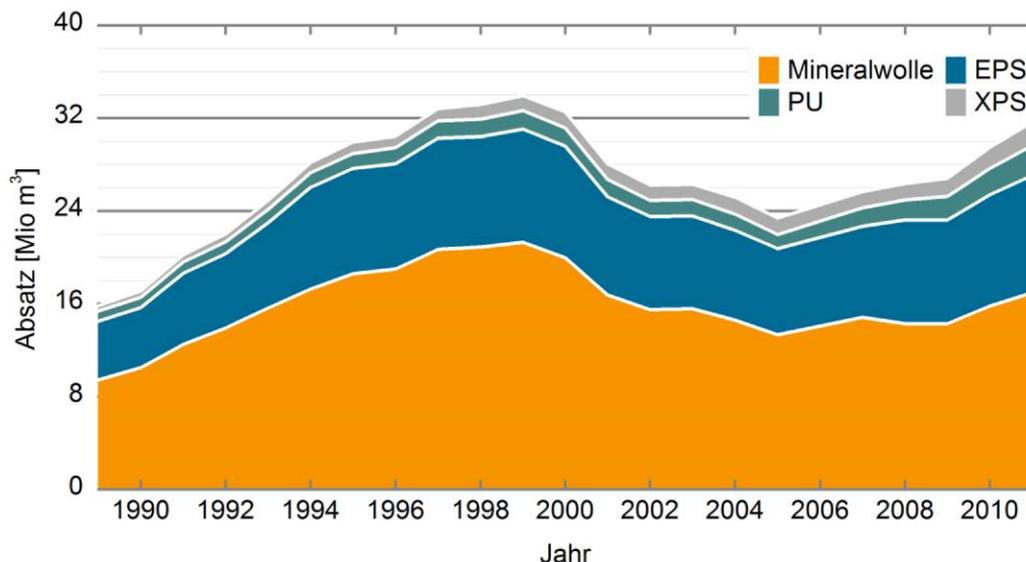


Abbildung 9: Absatz der wichtigsten Dämmstoffe in Deutschland in Mio. m³ pro Jahr (1989 – 2011) (Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, 2013).

Ein Wärmedämm-Verbundsystem ist nach Definition des Forschungsprojektes „Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme“ (CIS Solartechnik GmbH & Co. KG, Sto AG, TU Dresden - Institut für Baukonstruktion, Zentralverband Deutsches Baugewerbe, 2012) ein Bausatz, wo der Dämmstoff, die Befestigungsart und die Abschlussbeschichtung aufeinander abgestimmt sind. Durch die Normen (DIN 4108, 2013), Richtlinien wie zum Beispiel Metallanschlüsse an Putz und Außenwärmedämmung (Fachverband der Stuckateure für Ausbau und Fassade, 2018), Empfehlungen für den Einbau/Ersatz von Metallfensterbänken (Der Maler und Lackiermeister, 2006) werden die Zusammensetzungen der unterschiedlichen Komponenten des WDVS beeinflusst.

Anforderung:

- In der Fenstermaschine verwendete Dämmstoffe sollen möglichst dünn und leicht sein

- nach DIN 4108 Beiblatt 2 sollen Fensterrahmen auf einer Breite/Tiefe von 3 cm mit Dämmstoff überdeckt werden.
- nach Merkblatt Empfehlungen für den Einbau/Ersatz von Metallfensterbänken soll Kompriband zwischen Dämmplatte und Fensterbank eingesetzt werden.
- Die Verwendung von sich ausdehnenden Fugenbändern oder der Einsatz von Anschlussleisten ist besser als die Verwendung von Fugenmasse.
- nach den Richtlinien „Ausbildung von Tropfkanten an Fassaden“ und „Metallanschlüsse an Putz und Wärmedämm-Verbundsysteme“ soll das Tropfkantenprofil horizontal ausgerichtet werden.

5.3.9 Befestigung

Von Cremers 2015 durgeführte Analysen haben bestätigt, dass Fenster zur Vermeidung von Wärmebrücken in der Dämmebene der Gebäudehülle liegen sollten. Bei der Befestigung von thermisch getrennten Profilen in der Dämmebene ist die Wirkung der thermischen Profiltrennung wichtig (siehe Abbildung 10). Zargen sind Hilfsrahmen rund um das Fenster, die ein Systemelement mit guten Dämmwerten, zeitliche Ersparnis auf der Baustelle und hohen Schallschutz ermöglichen (Cremers, 2015).

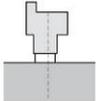
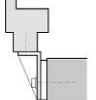
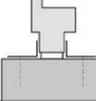
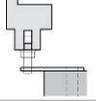
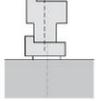
in die tragende Wandkonstruktion eingestellt	vor der tragenden Wandkonstruktion
 <p>Rahmendübel, Direktbefestigungsschrauben Universelle Anwendung bei Alt- und Neubau. Sie werden durch den Rahmen im Untergrund verankert und auf Schub-, Scher- und Biegespannungen belastet. Bohrungen in wasserführenden Bereichen der Fensterprofile sind nach Möglichkeit zu vermeiden und ggf. abzudichten. Eine Besonderheit sind dübellose Rahmenschrauben. Sie können durch die Distanzverschraubung Distanzklotze und zum Teil auch seitliche Tragklotze ersetzen.</p>	 <p>lastabtragende Laschen aus Metallprofilen Diese Bauteile sind in der Regel biegesteif und können somit größere Lasten rechtwinklig zur Fensterebene in das Bauwerk einleiten (Anwendung häufig bei großen Elementen, Fenstertüranlagen, Montage in der Dämmzone etc.). Sie werden zum Baukörper verschraubt oder an in das Bauwerk eingebundene Metallteile angeschweißt.</p>
 <p>Laschen, Krallen, Schlaudern aus Blech Laschen sind relativ biegeweich. Dadurch können sie thermische Längenänderungen der Rahmenwerkstoffe gut aufnehmen. Laschen können nur Lasten senkrecht zur Fensterebene aufnehmen (Trag- und Distanzklotze in jedem Fall erforderlich). Zur Anbindung an Wand und Blendrahmen sind geeignete Befestigungsmittel zu verwenden.</p>	 <p>Konsolen, Winkel Sitzt bei mehrschaligen Wandsystemen das Fenster in der Dämmzone, sind Stützkonstruktionen, z. B. Konsolen u. ä. notwendig. Die Befestigung selbst ist so zu bemessen, dass das Eigengewicht auch bei geöffnetem Flügel rechtwinklig zur Fensterebene abgetragen werden kann. Es ist auf eine ausreichende Dimensionierung der Konsole zu achten.</p>
 <p>Führungen Sinnvoll bei hohen Anforderungen an den Bewegungsausgleich, z. B. bei zu erwartenden Deckendurchbiegungen aufgrund großer Stützweiten. Gleitfähige Zwischenlagen erforderlich.</p>	 <p>justierbare Befestigungssysteme Anwendung grundsätzlich wie die beiden vorgenannten Systeme jedoch mit der zusätzlichen Möglichkeit der Justage beim und nach dem Einbau. Zu beachten ist die ausreichende Dämmstoffüberdeckung der Konsole.</p>
 <p>Zarge Zargen sind Hilfsrahmen, die während der Bauphase gesetzt werden und zu einem späteren Zeitpunkt das Fenster aufnehmen. Die Befestigung und Lastabtragung der Zarge muss sowohl zur Wand als auch zum Fenster den vorgenannten Anforderungen entsprechen. Zargen tragen zur zeitlichen Entzerrung des Bauablaufs bei.</p>	 <p>Zarge Zargen sind Hilfsrahmen, die vorab gesetzt werden, um das Fenster im Bereich der Dämmzone definiert mit üblichen Befestigungsmitteln befestigen zu können. Sie sind insbesondere von Vorteil bei Mauerwerk mit geringer Festigkeit und bei Anforderungen an den Schallschutz, da die Schallnebenwege gedämmt werden.</p>
 <p>Fensteranschluss an eine Pfosten-Riegel-Konstruktion Fenster können als sogenannte Einsetzelemente in Pfosten-Riegel-Fassaden eingesetzt werden. Dazu werden sie analog zu Verglasungen im Randbereich der Blendrahmen durch entsprechend angepasste Klemmungen im Fassadensystem fixiert.</p>	<p>Hinweis: Bei einer Einbaulage vor der tragenden Wandkonstruktion (exzentrische Druckbeanspruchung) ist zu beachten, dass bei Mauerwerk gemäß DIN 1053 über die Befestigung im Brüstungsbereich keine Zugkräfte in die Lagerfugen eingeleitet werden dürfen (Ausschluss von Zugspannungen rechtwinklig zu den Lagerfugen).</p>

Abbildung 10: Befestigungssysteme für Fenster (Cremers, 2015).

Anforderung:

- die Verwendung von Zargensystemen bei der Fenstermaschine erleichtert Befestigung, Abdichtung und zum schnelleren Bauablauf.

5.3.10 Bewegungsarten von Fensteröffnungselementen

Auf dem Markt gibt es unterschiedliche Öffnungsarten von Fensterelementen (siehe Abbildung 11). Es gilt aber, dass in Klimaregionen mit mehr Schnee und Regen (Großbritannien, Skandinavien) nach außen öffnende Fenster bevorzugt wurden, um besseren Regenschutz zu gewährleisten. Dem gegenüber werden in wärmeren Klimaregionen (Südeuropa) nach innen öffnende Fenster bevorzugt, um einen

Insektenschutz Außen montieren zu können und gleichzeitig das Fenster in der Nacht offen zu lassen.

Vergleich der Bewegungsarten von Öffnungselementen zur Ermittlung des Leistungsprofils	Drehen	Wenden	Kippen	Klappen	Klappen mehrteilig	Schwingen	Verschieben horizontal	Verschieben vertikal	Ausstellen
Beeinträchtigung der Nutzfläche bezogen auf die Raumtiefe	Öffnungs- breite	1/2 Öffnungs- breite	minimal	keine (wenn nach außen auf- gehend)	keine (wenn nach außen auf- gehend)	1/2 Öffnungs- breite	keine	keine	keine (wenn nach außen auf- gehend)
Möglichkeit der Anordnung an Verkehrsflächen	ja (wenn nach außen aufgehend)	nein	ja	ja (wenn nach außen aufgehend)	ja	nur mit Öffnungs- begrenzung	ja	ja	ja (wenn nach außen auf- gehend)
Durchblick: maximale freie Öffnungsfläche und Unterteilung	100%	100% mit vertikaler Teilung	keine freie Öffnung	keine freie Öffnung	größtenteils freie Öffnung	100% mit horizon- taler Teilung	50% mit vertikaler Teilung	50% mit horizon- taler Teilung	keine freie Öffnung
geometrische Beschreibung der erzeugbaren minimalen/ kleinen Öffnungsflächen	1x seitlich spaltförmig, oben und unten winkelförmig	2x seitlich spaltförmig, oben und unten winkelförmig	2x seitlich winkelförmig, oben spaltförmig	2x seitlich winkelförmig, unten spaltförmig	mehrmals spaltförmig	4x seitlich winkelförmig, oben und unten spaltförmig	2x seitlich spaltförmig	oben und unten spaltförmig	umlaufend spaltförmig
geometrische Beschreibung der erzeugbaren maximalen/ großen Öffnungsflächen	komplette Öffnungs- fläche	komplette Öffnungs- fläche, senkrechte Unterteilung	2x seitlich winkelförmig, oben spaltförmig	2x seitlich winkelförmig, unten spaltförmig	weitgehend gesamte Öffnungs- fläche	komplette Öffnungs- fläche, waagrechte Unterteilung	50% der Öffnungs- größe als senkrechte Unterteilung	50% der Öffnungs- größe als waagrechte Unterteilung	umlaufend spaltförmig
Eignung für Spaltlüftung	bedingt	bedingt	bedingt	bedingt	bedingt	bedingt	gut	gut	gut
Eignung für Stoßlüftung	gut	gut	nein	nein	gut	gut	gut	gut	nein
Einstellbarkeit der Öffnungen	nur mit Zusatz- beschlag	nur mit Zusatz- beschlag	nur für maximale Kippstellung	mittels des zum Öffnen erforderlichen Beschlags	gut	nein	gut	gut	gut (mechanischer Antrieb)
Witterungsschutz (Schutz gegen Niederschläge) bei Spaltlüftung	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein	oben: ja unten: bedingt	bedingt (mit Zusatz an oberer Öffnung)
Bewegungsart bietet Schutz gegen Zuschlagen durch Wind	nein	nein	nein	mit Zusatz- beschlag	ja, mit entspre- chendem Beschlag	nein	ja	ja	ja
Möglichkeit der Kombination mit beweglichen Elementen									
innenliegend	nein	nein	bedingt	ja	ja	nein	ja	ja	ja
außenliegend	ja	nein	ja	nein	nein	nein	ja	ja	bedingt

Abbildung 11: Bewegungsarten von Öffnungselementen (Cremers, 2015).

Anforderung:

- um die Verglasung von innen zu reinigen, soll das Fenster der Fenstermaschine nach Innen geöffnet werden.

5.3.11 Lüftung und Revision

Früher fand ausreichender Luftwechsel durch Fugenundichtheiten zwischen Bauelementen statt. Die gestiegenen Energiepreise führten zum Einsatz zusätzlicher Wärmedämmung und einer dichteren Bauweise. Die dichte Gebäudehülle verringert die Außenluftzufuhr und erhöht das Schimmelbildungsrisiko (Mürmann, 2006). Dies wiederum führt zur Notwendigkeit, die Wohnungen (frei oder mechanisch) zu lüften. Am Anfang war Zwangslüftung bei Nutzern nicht beliebt. Heutzutage sei aber (nach einer Studie der Technische Universität Dresden) zu beobachten, dass bei Sanierungsmaßnahmen und punktuellen Nachrüstungen zunehmend über den Einsatz von dezentralen Lüftungsgeräten nachgedacht wird (Ender, Gritzki, Hartmann, & Richter, 2004). Dezentrale Lüftungsgeräte haben den Vorteil, dass Reinigung und Anpassung an die Teilnutzung von Gebäuden

einfacher als bei den langen Luftkanälen der Zentralanlagen geregelt werden können. Schallschutz und Wärmerückgewinnung sind besser als bei der freien Lüftung zu erreichen (Hausladen, de Saldanha, Liedl, & Sager, 2004). Andererseits erfordern dezentrale Anlagen im Vergleich mit freier Lüftung höhere Investition und höhere Antriebsenergie.

Anforderung:

- die Integration des Lüftungssystems in die Fenstermaschine sollte unter Berücksichtigung der Bereiche Bauablauf und Bauphysik gelöst werden .
- Wartung und Reinigung sollten von Innen erfolgen.
- Austauschbarkeit und Wiederverwendung sollten möglich sein.

5.3.12 Steuerung

Laut der Marktstudie von (statista, 2017) beträgt der Umsatz im Segment Vernetzung und Steuerung im Haushalt weltweit 2018 etwa 8280 Mio. €. Laut Prognose wird im Jahr 2022 ein Marktvolumen von 18302 Mio.€ erreicht; dies entspricht einem jährlichen Umsatzwachstum von 21,9% (CAGR 2018-2022). Es lässt sich daher behaupten, dass auch in der Zukunft der Markt stark wachsen wird.

Anforderung:

- die Systeme der Fenstermaschine sollen vernetzt und gesteuert werden können.

5.4 Expertenrunde auf der Baumesse BAU München im Januar 2017

Um die Einschätzungen zum Bedarf, den Marktchancen und zu technischen, psychologischen und sonstigen Hemmnissen der Fenstermaschine zu diskutieren, wurden zur Fachmesse BAU in München am 18. Januar 2017 10 ausgewählte Fachleute aus den Kategorien Bauträger, Wohnungsunternehmen, ausführende Firmen und Architekten auf die Messe eingeladen (siehe Abbildung 12), um sie mit den recherchierten Daten und der Idee Fenstermaschine, sowie den integrierten Bestandteilen (z.B. Lüftung) vertraut zu machen.



Abbildung 12: Expertenrunde auf der BAU 2017 in München (Quelle:EBB).

Die Ergebnisse aus der Expertenrunde:

- Die Fenstermaschine soll als ein vorgefertigtes Element entwickelt werden.
- Die Anforderungen an die Fenstermaschine sollen definiert und analysiert werden.

- Analysen zu Nutzerakzeptanz und Wirtschaftlichkeit der Fenstermaschine sollen durchgeführt werden. Zeitersparnis und Gesamtkosten der Fenstermaschine sind wichtig.

6 Vor der Demonstration am Gebäude

6.1 Demoprojekt

Den Kern des Forschungsprojektes bildet die Anwendung der Fenstermaschine im Demoprojekt mit der Analyse des Zustandes vor und nach der energetischen Sanierung. Anhand eines Reiheneinfamilienhauses in Erfurt wird die Praxistauglichkeit der Fenstermaschine überprüft.

6.1.1 Beschreibung

Das Gebäude steht im ruhigen Umfeld am Rande der Stadt Erfurt und ist ein typischer Nachkriegsbau (siehe Abbildung 14) mit 1,5 Geschossen und Satteldach. Häuser der Nachkriegszeit weisen typischerweise schmucklose Außenwände aus Ziegel mit schlechten Wärmeschutzeigenschaften sowie betonierte Geschossdecken und Einfachverglasung auf. Am Altbau (siehe Abbildung 13) wurden bisher keine Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Gegenstand der Forschungsarbeit ist der Austausch der bestehenden Fenster mit der Fenstermaschine im Rahmen der Montage des WDVPs.



Abbildung 13: Ostansicht des Einfamilienhauses in Erfurt (Quelle: Beck+Heun).

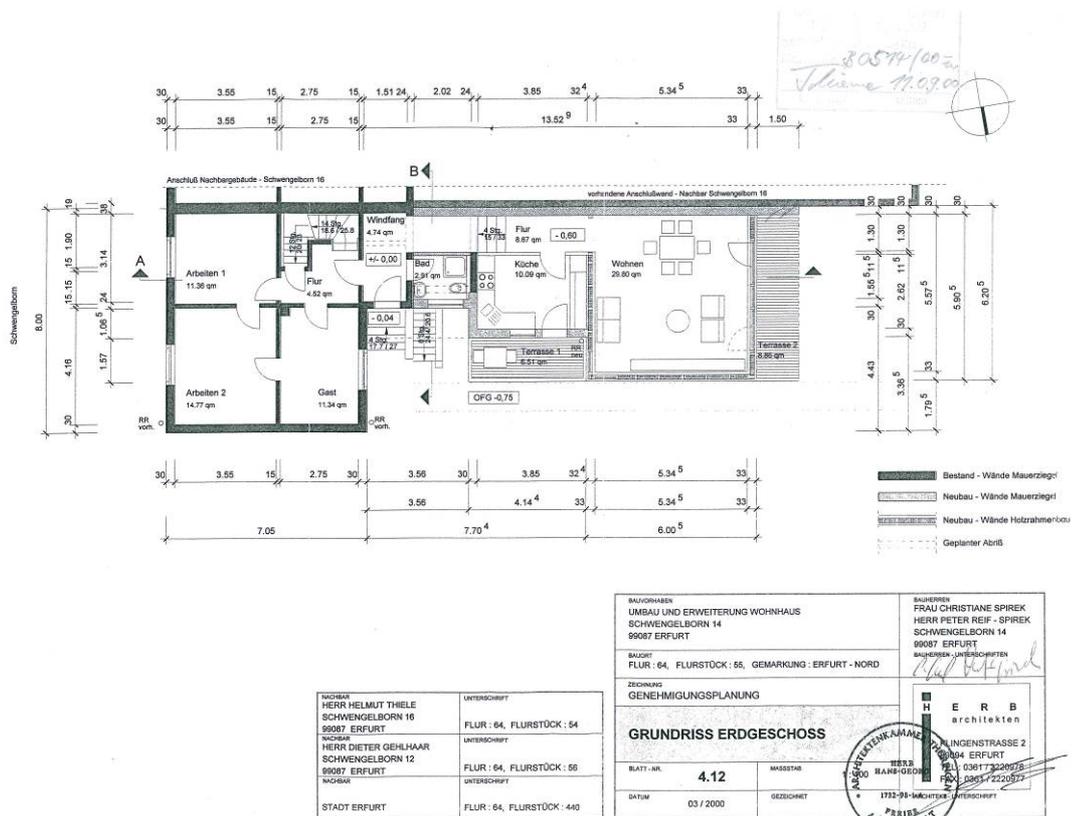


Abbildung 14: Grundriss Erdgeschoss (Quelle: Spirek, Beck+Heun).

Im Fokus der Analyse des Zustandes vor der Sanierung stand die Messung der hydrothermischen Behaglichkeit, der Innenluftqualität und der Wärmeverluste. Die Innentemperatur-, relative Feuchtigkeit-, CO₂-Gehalt- und Wärmebrückenmessungen wurden in der Winterzeit von November 2016 bis März 2017 durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Kapitel 7 dargestellt.

6.2 Thermografie

Der Zweck der thermografischen Analyse ist die Erkennung von Konstruktionsschwachstellen und der Dichtigkeitserfassung der Gebäudehülle des Demoprojekts. Mit Hilfe einer speziellen Kamera wurden am 14.2.2017 um 6.00 Uhr die Wärmebrücken und Unregelmäßigkeiten der Fassade, Undichtigkeiten der Fenster- und Türöffnungen, sowie die Feuchtigkeitsprobleme gemessen. Die Fotos stellen die kritischen Bereiche der Fassade dar. Je höher die Temperatur, desto intensiver die abgegebene Infrarotstrahlung, die von der Kamera aufgezeichnet wird. Jede thermografische Darstellung wird an der rechten Seite von einer Temperaturskala begleitet (siehe Abbildung 15 bis Abbildung 23).

Projekt	Schwengelborn Straße 14
Ort	Erfurt
Objekt / Standort	Doppelhaushälfte
Prüfingenieur	Hr. Höfert, Hr. Liedloff, Beck +Heun
Auftragsnummer	001-2017.02.14
Anwesende	Hr. Höfert, Hr. Liedloff
Gerätetyp	IR-E9 mobil
Emissionsgrad	0.98 [-](Annahme)

Umgebungstemperatur	-6,3 [°C]
Relative Luftfeuchte	90,2 [%]
Windgeschwindigkeit	--- [m/s] (gefühl, nahezu windstill)
Distanz	verschieden [m]

6.2.1 IR-Bilder

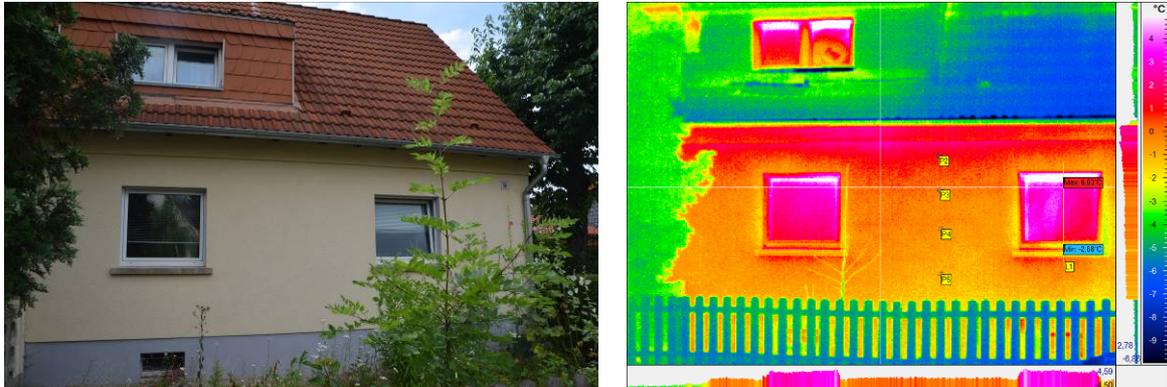


Abbildung 15: Vergleich von Foto und IR-Bild der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) vor der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).

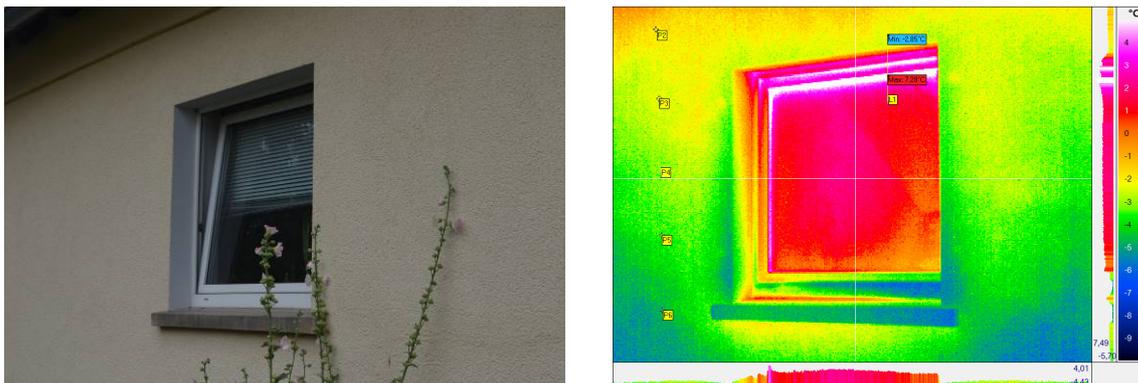


Abbildung 16: Foto und IR-Bild der 2-fach-Verglasung an der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).

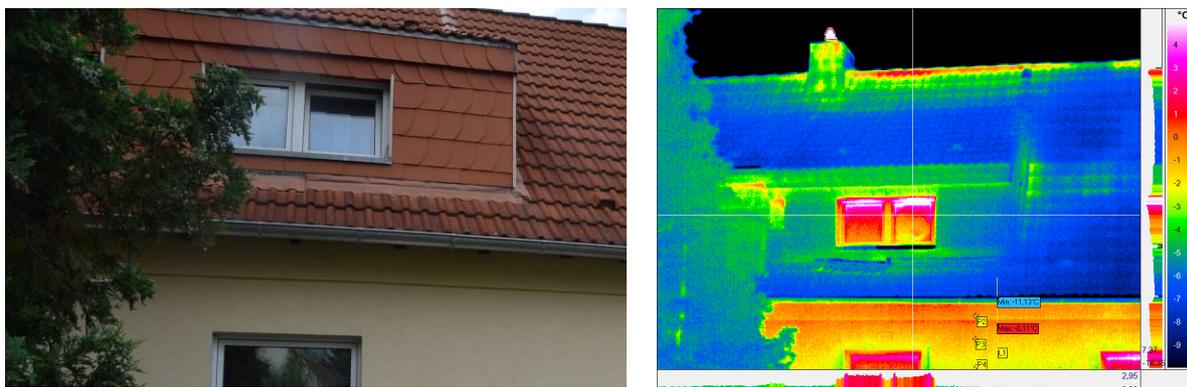


Abbildung 17: Foto und IR-Bild der Dachfläche an der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).

An der Ostfassade sind Bereiche zu erkennen, die einen erhöhten Wärmeabfluss (Wärmebrücke) aufweisen (lila Farbe auf dem IR-Foto). Das gesamte Mauerwerk, die Fenster, die Erdgeschoßdecke und das Dach zeigten ein schlechtes Temperaturbild (siehe Abbildung 15, Abbildung 16, Abbildung 17). Die größten energetischen Schwachstellen sind

im Fensterbereich zu sehen. Auf dem Abbildung 16 ist gut zu erkennen, dass das Fenster in der Winterzeit gekippt ist. Die erhöhten Oberflächentemperaturen im oberen Bereich des Daches sind auf der Abbildung 17 deutlich erkennbar. Die rote Flecken in der Dachfläche deuten entweder auf Lücken in der Wärmedämmung oder Luftdichtigkeit hin. Die Wärme geht durch die Dachgaube und die Fenster verloren.

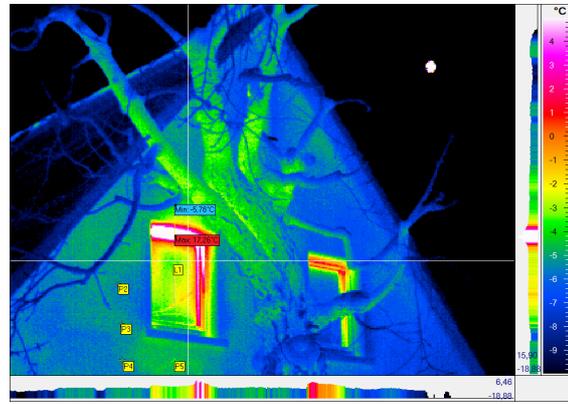


Abbildung 18: Foto und IR-Bild der Nordfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).

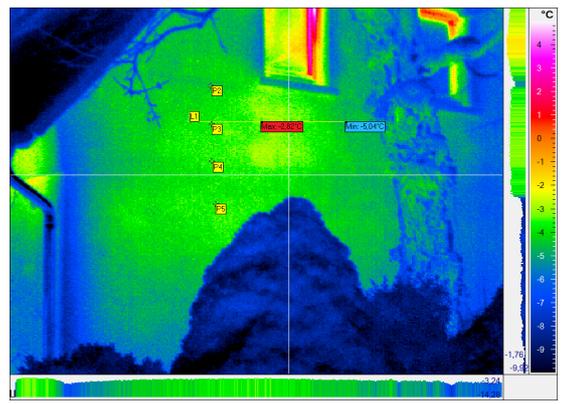


Abbildung 19: Foto und IR-Bild der Wand an der Nordfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).

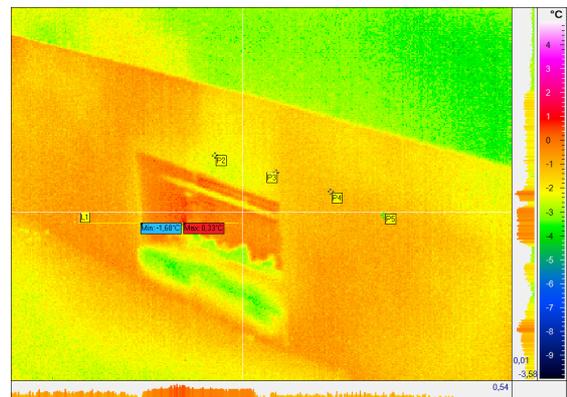


Abbildung 20: Ungleichmäßige Temperaturverteilung an der Nordfassade im Sockelbereich (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau).

Aus Abbildung 18 und Abbildung 19 geht hervor, dass die Fenster an der Nordfassade hohe Wärmeverluste aufweisen. Die ungleichmäßige Temperaturverteilung an der Nordfassade zeigt, dass einen Großteil der Wärme durch das linke gekippte Fenster und durch den

Heizkörper unter dem rechten Fenster verloren geht. Der Sokelbereich des Einfamilienhauses ist nicht gedämmt (siehe Abbildung 20). Die Wärme geht über die Kellerdecke in die Außenwände des Kellers verloren.

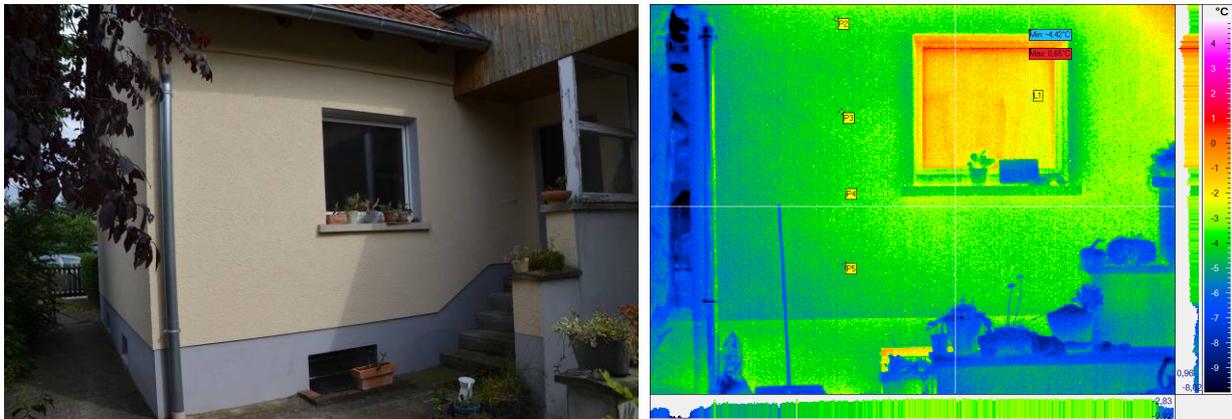


Abbildung 21: Wärmeverluste durch die Westfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).

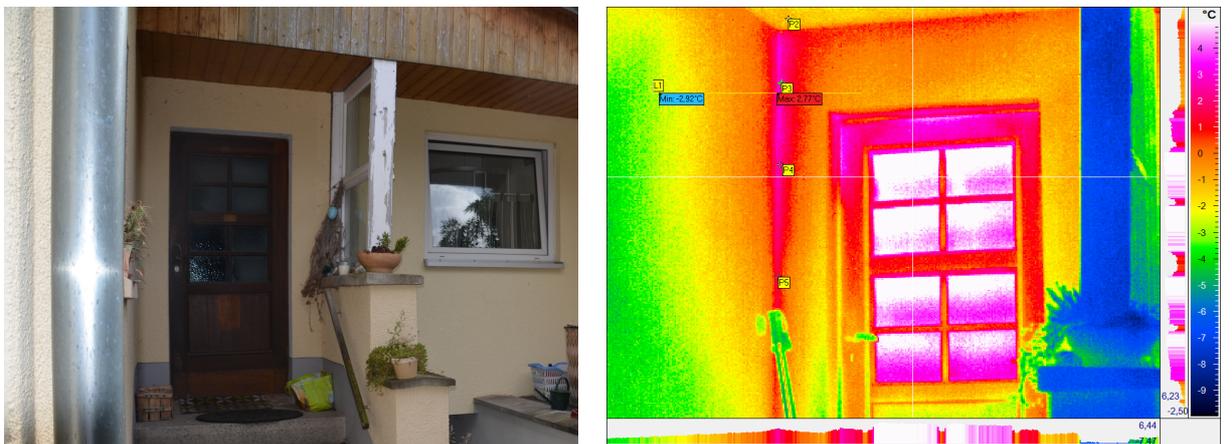


Abbildung 22: Die Anschlussbereiche der Außenwände und der Türbereich (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).

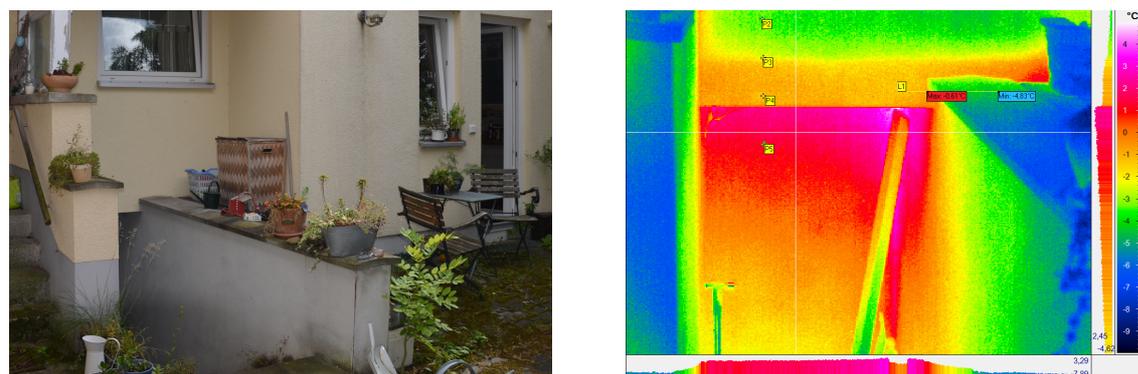


Abbildung 23: Bereich der Kellergeschoßdecke (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) (Quelle: Beck+Heun).

Zu beobachten ist eine Temperaturerhöhung im oberem Bereich des Fensters und die Wärmeverluste durch die Westfassade (siehe Abbildung 21). Die Anschlussbereiche der Außenwände und der Türbereich zeigen erhöhte Oberflächentemperaturen (siehe Abbildung 22). Die Anschlüsse wurden beim Einbau der Haustür nicht fachgerecht durchgeführt,

weswegen es zu Wärmeverlusten kommt. Der Kelleraufgang unter dem Bad in der Abbildung 22 weist eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im Bereich der Kellergeschoßdecke auf.

Schlussfolgerungen:

- Aufgrund der thermografischen Analyse wurden auffallend große Wärmebrücken und Undichtigkeiten durch die vorhandenen Fenster, Wände und Anschlüsse des Einfamilienhauses aufgedeckt.
- Nicht nur die veraltete Abdichtung, schlechte Einbaurahmen und Verschleiß führen zu den Schwachstellen am vorliegenden Gebäude sondern auch nicht gedämmte Ziegelwände und Geschoßdecken.

6.3 Entwicklung der endgültigen Variante

Im Rahmen des von der Forschungsinitiative ZukunftBau geförderten und abgeschlossenen Forschungsvorhabens „Vorgefertigte Sanierfenster mit integrierter Technik Fenstermaschine“ im Jahr 2016 wurde drei unterschiedlichen Varianten entwickelt. Die Variante, die das neue Fenster mit allen technischen Komponenten in der Dämmebene integriert (siehe Abbildung 24), wurde für dieses Forschungsvorhaben ausgewählt, weiterentwickelt und am konkreten Demonstrationsprojekt erprobt.

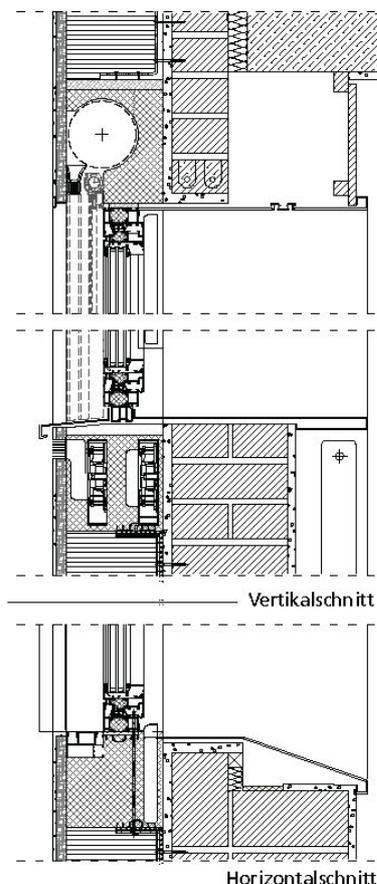


Abbildung 24: Die ausgewählte Variante 3 des vorherigen Forschungsprojektes (Quelle: EBB TUM).

6.3.1 Variantenentwicklung und Bewertung

Die Fenstermaschine wird mit einer Fensterzarge aufgebaut - einem umlaufenden Bauteil in welches Fenster und weitere Gebäudetechnik eingesetzt werden. Im Verlauf des Forschungsprojekts wurde im ersten Arbeitsschritt die Fenstermaschine auf vier Grundkomponenten (Rahmen, Sonnenschutzsystem, dezentrale Lüftungsanlage und Fenster) reduziert. Durch unterschiedliches Aufbringen der Grundkomponenten werden sieben Varianten (siehe Abbildung 25) gezeichnet. Ziel war, mit unterschiedlichen Positionen von Grundkomponenten Erkenntnisse zu gewinnen, wie sich das Zusammenspiel von allen Grundkomponenten in Bezug auf Lüftung, Nutzerzufriedenheit, Energie und Montage auswirkt. Wie die Abbildung 25 zeigt, hat die Variante 1 die dezentrale Lüftungsanlage im Brüstungsbereich, die Variante 7 in der Leibung.

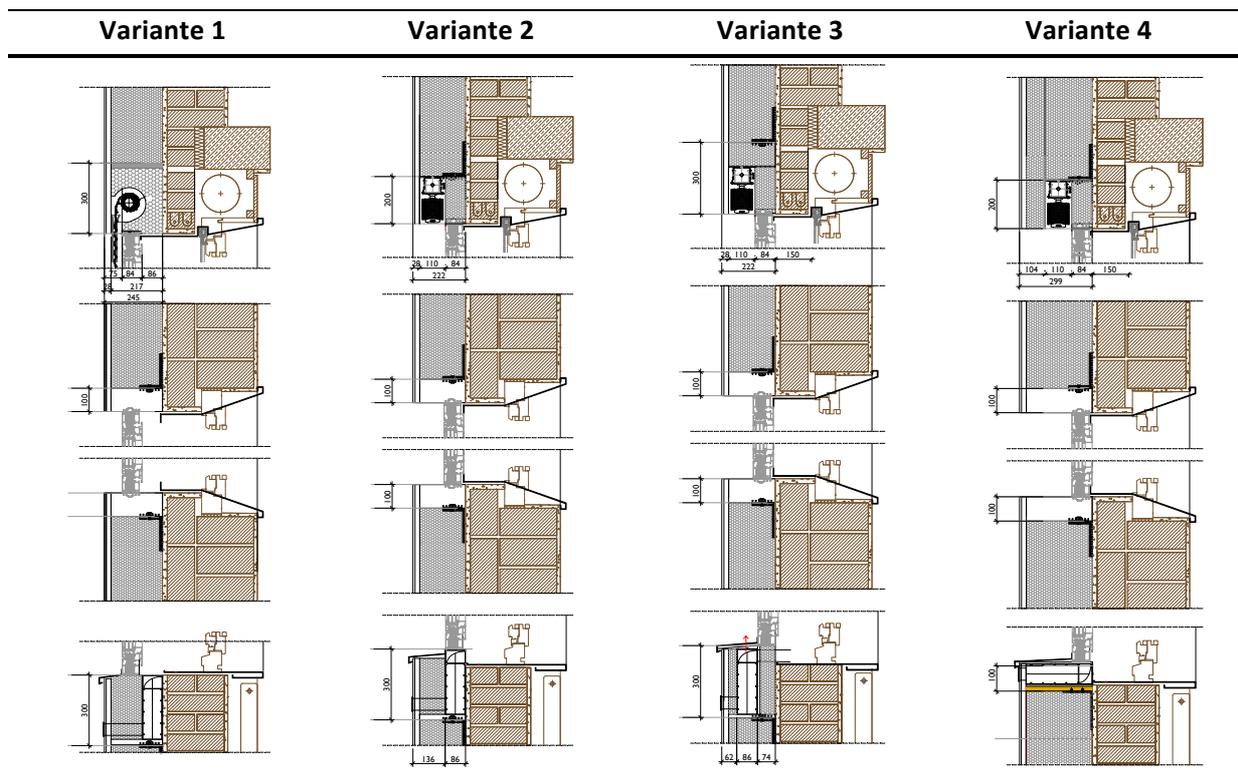


Abbildung 25: Die unterschiedlichen Varianten des Sanierfensters (Quelle: EBB TUM).

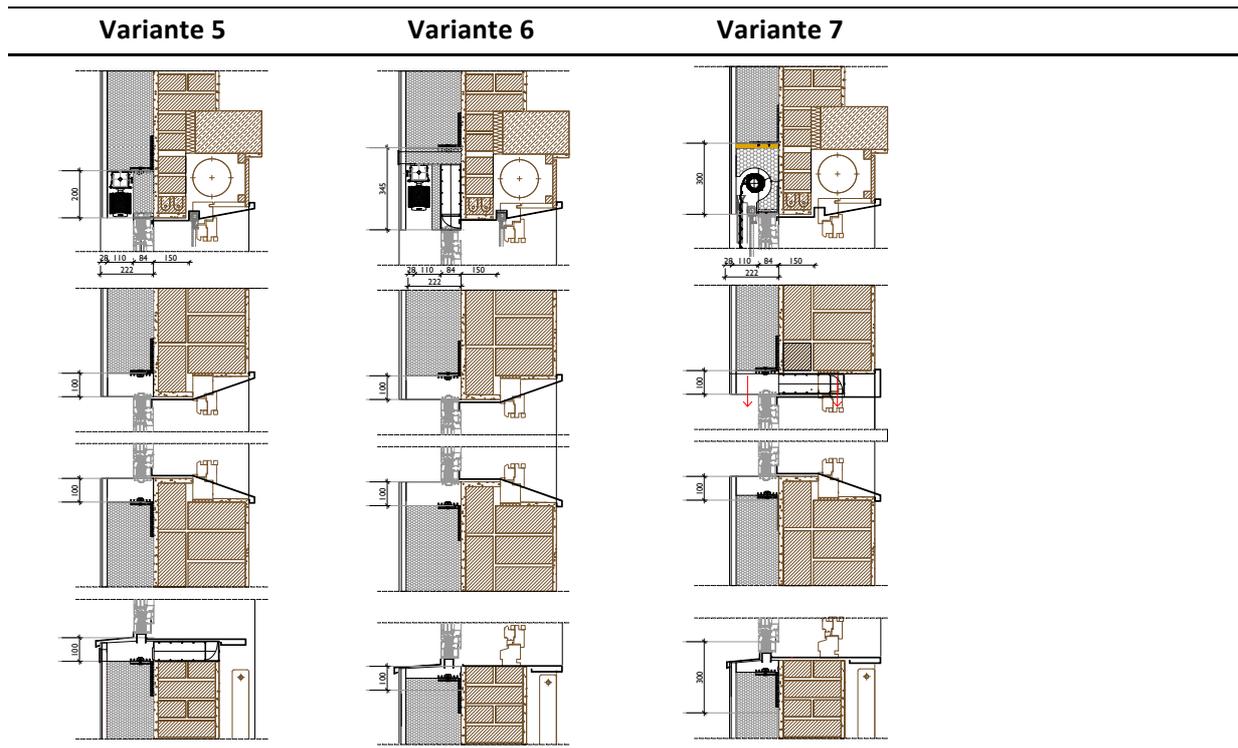


Abbildung 26: Die unterschiedlichen Varianten des Sanierfensters (Quelle: EBB TUM).

Im zweiten Arbeitsschritt bei der Entwicklung der endgültigen Variante wurden die sieben Varianten mit den vier Themenfeldern bewertet. Bei jedem Themenfeld soll herausgefunden werden, ob und wie sehr sich die Varianten unterscheiden und welche Variante für die Erprobung am Einfamilienhaus in Erfurt am besten geeignet ist. Die Daten beruhen auf der Auswertung eines Fragebogens der Forschungsgruppe. Jeder Projektpartner hat jede Variante nach dem festgelegten Notenschlüssel bewertet. Am Ende wurden die Noten summiert und für jede Variante wurde ein spezifischer Nutzwert vergeben. Das Ergebnis ist in Buchstaben und Farben dargestellt. Es gibt 3 Buchstaben: A steht für gut, B für neutral und C für schlecht (siehe von Tabelle 1 bis Tabelle 4).

Beim Themenfeld Lüftung wurde untersucht, welche Aussagen über Wärmebrücken, Wartung, Akustik, Einbauposition, Lüftungseffektivität, Kondensatsablauf, Ästhetik bei der jeweiligen Variante zutreffen. So wurde herausgefunden, welche Variante am geeignetsten ist.

Lüftung / Varianten	1	2	3	4	5	6	7
Wärmebrücke: Die kalte Seite des Lüftungsgerätes soll auf der kalten Seite der Dämmung bleiben, die warme Seite des Lüftungsgerätes soll auf der warmen Seite der Dämmung.	C	C	B	C	C	C	C
Wartung: Der Zugang zu den Komponenten (Wärmetauscher, Lüfter und Filter) muss gewährleistet sein.	A	C	B	A	A	C	A

Akustik: Das Gehäuse des Lüftungsgerätes soll möglichst in der Wand eingebettet sein, um die Schallübertragung zu reduzieren.	A	B	A	C	C	B	C
Akustik: Je komplizierter der Luftpfad ist, desto weniger wird Schall von außen nach innen übertragen.	A	A	A	C	C	A	B
Einbau von zwei Geräten am gleichen Fenster möglich.	A	A	A	A	A	A	A
Lüftungseffektivität / Kurzschluss: Wenn zwei Geräte am gleichen Fenster montiert werden, muss vermieden werden, dass die Zuluft direkt in die Abluft des zweiten Geräts geblasen wird.	C	B	B	B	A	B	C
Kondensatablauf: Bei Gerätestillstand bildet sich Kondensat, welches auf der Außenseite abgeführt werden muss.	B	B	B	A	C	C	C
Ästhetik: Sichtbarkeit des Luftauslasses auf der Fassade.	C	C	C	B	B	A	A

Tabelle 1: Die Bewertung der Varianten bezüglich Lüftung (Quelle: EBB TUM).

Die Nutzerfreundlichkeit der Fenstermaschine soll bestimmen, welche Variante im Hinblick auf Sonnenschutz, Insektenschutz, dezentrale Lüftungsanlage, Fenster, Sanierung, Neubau, Ästhetik für die Bewohnerempfindung optimal ist.

Nutzerfreundlichkeit / Varianten	1	2	3	4	5	6	7
Nutzerfreundlichkeit - Sonnenschutz: Der Tageslichteinfall, der Austausch und das Putzen sollen vom Nutzer reguliert werden.	C	A	A	A	A	A	A
Nutzerfreundlichkeit - Insektenschutz: Das Fenster soll geöffnet werden können. Der Insektenschutz soll ausgetauscht werden können.	C	C	C	B	A	C	A
Nutzerzufriedenheit - Lüftungsgerät: Das Lüftungsgerät und seine Komponenten sollen vom Nutzer beeinflusst /ausgetauscht werden können.	A	C	B	C	A	C	A
Nutzerzufriedenheit - Fenster: Das Fenster soll nach Innen geöffnet und geputzt werden können.	A	A	A	A	A	A	A

Nutzerzufriedenheit- bei der Sanierung: Die Fensteröffnung soll möglichst gleich groß bleiben.	A	B	B	C	B	B	C
Nutzerzufriedenheit - beim Neubau: Großen Öffnungsflächen sollen möglich sein.	B	A	B	C	A	A	B
Nutzerzufriedenheit - Ästhetik: Minimaler Einfluss auf die Ästhetik (Komponenten versteckt)	A	B	A	C	C	B	C

Tabelle 2: Die Bewertung der Varianten bezüglich Nutzerfreundlichkeit (Quelle: EBB TUM).

Das Themenfeld Montage soll herausstellen, welche Variante möglichst klein, schmal, leicht und fertig ist.

Montage / Varianten	1	2	3	4	5	6	7
Montage - Größe: Das Element soll möglichst klein und schmal sein (Ziel max. 18cm).	C	B	C	C	B	B	A
Montage - Befestigung: Das Gewicht soll gleichmäßig verteilt sein.	B	B	B	B	B	C	B
Montage - Schnittstellen: Es soll ein einziges Fensterelement sein, möglichst wenige Schnittstellen.	B	B	B	B	C	B	C

Tabelle 3: Die Bewertung der Varianten bezüglich Montage (Quelle: EBB TUM).

Aus den Aussagen über die Energieflüsse wurden die Ergebnisse abgeleitet, die die Vermeidung von Wärmebrücken und Feuchtigkeitsproblemen behandeln.

Energie / Varianten	1	2	3	4	5	6	7
Energie - Wärmebrücke: Wärmebrücken sollen möglichst vermieden werden.	A	B	B	C	A	A	A
Energie - Wärmedämmung: Die Wärmedämmung soll genügend sein.	A	A	B	A	A	B	A
Energie - Taupunkt: Das Erreichen des Taupunkts soll vermieden werden.	C	B	B	C	A	B	A

Tabelle 4: Die Bewertung der Varianten bezüglich Energie (Quelle: EBB TUM).

Die Variante mit der höchsten „gut-bewerteten“ Summe (siehe Abbildung 27) ist nach der Bewertungsanalyse Variante 7. Die Variante 7 hat insgesamt 11 Aussagen mit guter (A) Bewertung, 3 Aussagen mit neutraler (B) Bewertung und 7 Aussagen mit schlechter (C) Bewertung. Das Ergebnis wurde mit den Projektpartnern diskutiert, die Variante als die endgültige Variante akzeptiert und weiter in Detail bearbeitet.

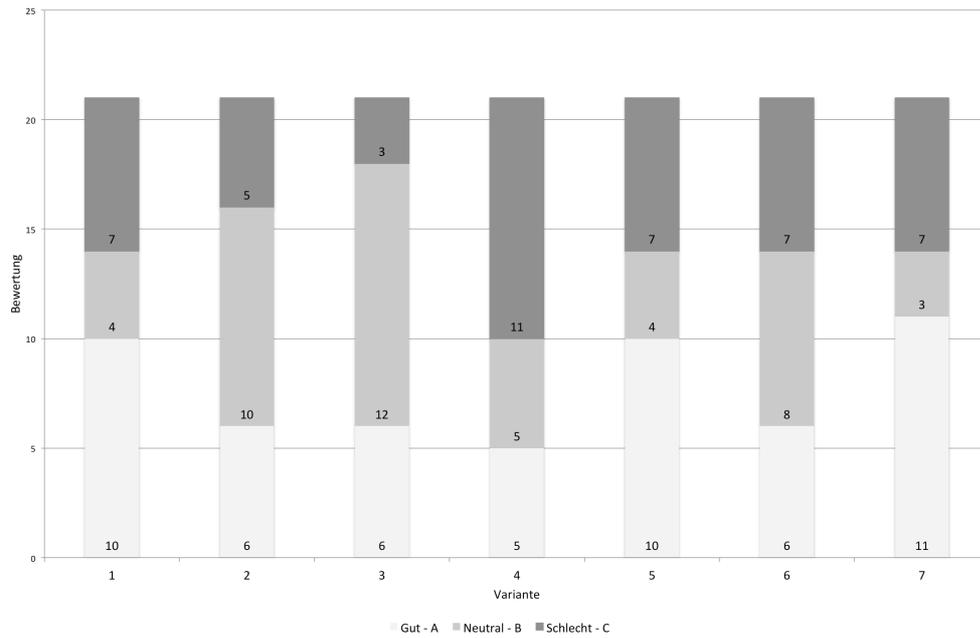


Abbildung 27: Ergebnis der Bewertungsanalyse (Quelle: EBB TUM).

6.3.2 Die endgültige Variante

Die endgültige Version der Fenstermaschine wurde vor der Produktion als vorgefertigtes Element mit zwei integrierten dezentralen Lüftungsgeräten, einem Sonnenschutzpanzer und 3-fach Verglasung gezeichnet (siehe Abbildung 28). In der Abbildung 28 ist der Bestand sepiafarben und neue Bauteile in schwarz dargestellt.

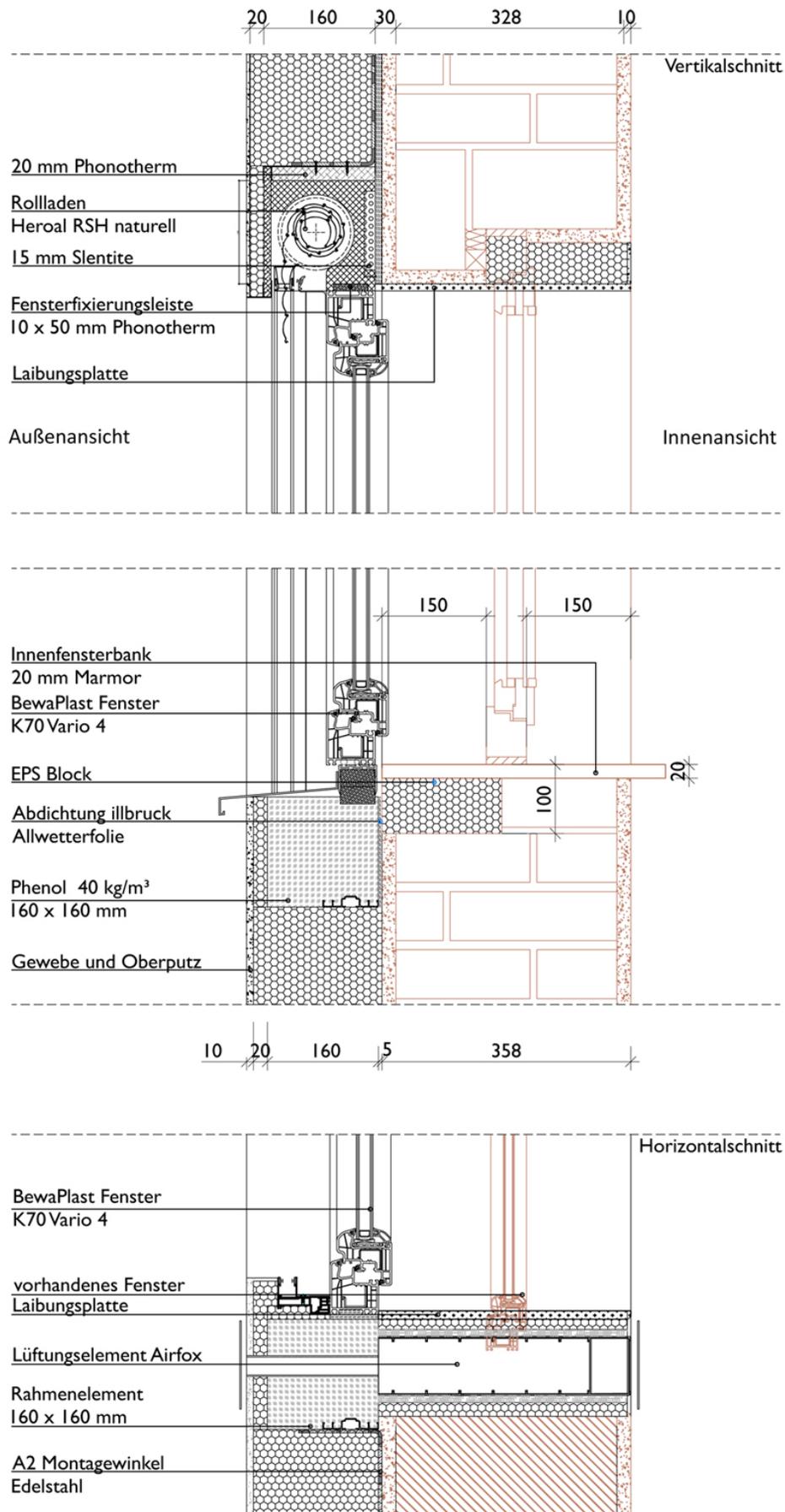


Abbildung 28: Die Fenstermaschine. (Zeichnung: EBB und Beck&Heun)

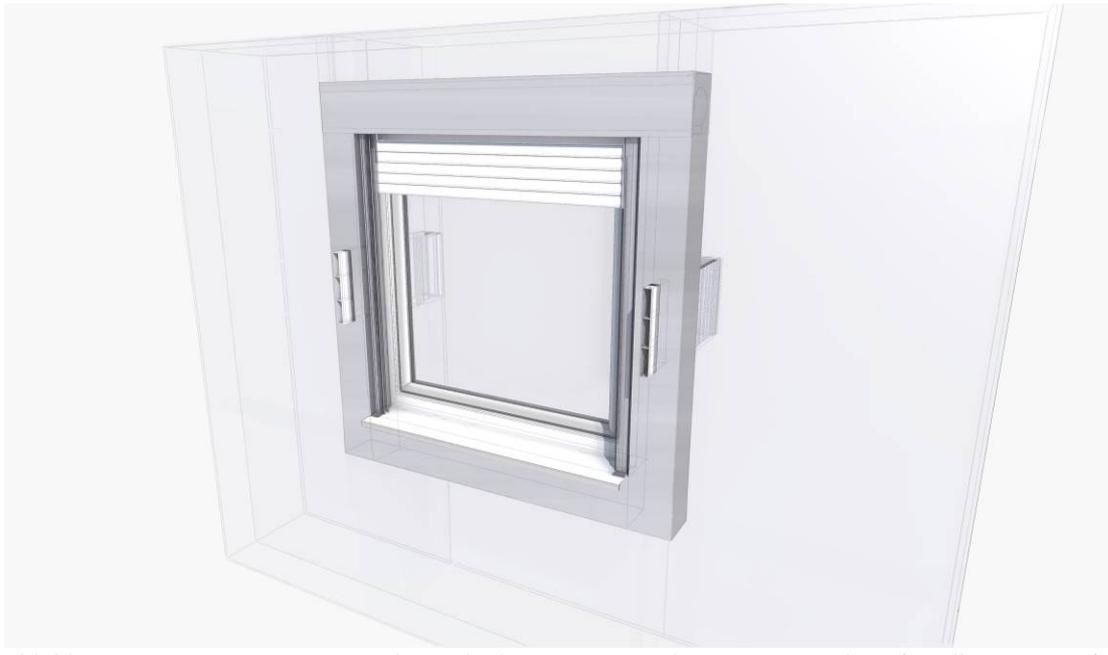


Abbildung 29: Die 3D-Präsentation der endgültigen Variante der Fenstermaschine (Quelle: EBB TUM).

Die Fenstermaschine ist ein vorgefertigtes Bauelement, das sich aus 4 unterschiedlichen Komponenten zusammensetzt; Rahmen-, Sonnenschutz-, Lüftungssystem und Verglasung. Die vier Grundkomponenten bilden einen festen Verbund miteinander und müssen aufeinander abgestimmt werden. Jede Komponente wird im Weiteren graphisch dargestellt und beschrieben.

Der Modulrahmen (siehe Abbildung 30) ist aufgrund der großen Bestandswanddicke und dem vom Industriepartner vorgegebenen Sonnenschutzsystem in seiner minimalen Tiefe von 160 Millimeter konzipiert. Unterschiedliche Funktionen des Rahmenelements führen zu zwei Bauteilen. Das Bauteil für den Sonnenschutz oben (hell grau auf der Abbildung 30 und Abbildung 28) stellt im Vergleich zum hochwärmedämmten tragenden Rahmen unten aus Phenolharzschaum eine thermische Schwachstelle dar. Phenolharzschaum hat konstruktive, thermische und mechanische Vorteile. Das Material ist ein harter, fester Schaumstoff mit geringer Wärmeleitfähigkeit (0.020 bis 0.024 W/(m*K)). Aufgrund der Festigkeit wurden zuerst die Teile des Modulrahmens durch Sägen in der Werkstatt zugeschnitten, auf der Baustelle miteinander verklebt und mit den Metallwinkeln an die Bestandswand des Einfamilienhauses angeschraubt. Um einen direkten Kontakt von Metall und Phenolharzschaum mit Feuchtigkeit zu vermeiden, wird mit EPS-Dämmung nachgedämmt. Das hoch witterungsbeständige, schwer entflammbare, wasserdampf- und CO₂-durchlässige Material kann bei zerstörungsfreiem Ausbau wiederverwendet werden.

Material	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m*K]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	Brandverhalten
Fenster	von 35 bis 40	0.024	60	B2 (DIN 4102-1) Klasse C - s2, d0 (DIN EN 13501-1)

Tabelle 5: Materialeigenschaften von Phenol (Quelle: Beck+Heun).

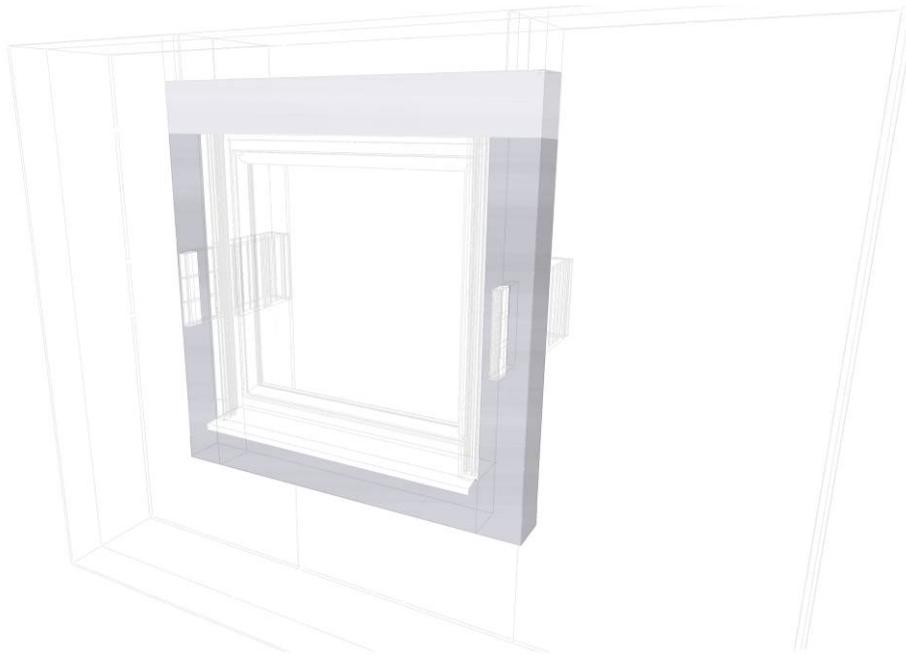


Abbildung 30: Rahmen der Fenstermaschine (Quelle: EBB TUM).

Bei Rahmengröße und Wärmedämmdicke wurde speziell das Beschattungselement (siehe Abbildung 31) berücksichtigt. Das Sonnenschutzsystem ist komplett in das Wärmedämmverbundsystem integriert und von außen unsichtbar. Die Kastengröße von 160mm passt sich an die Rahmengröße 160x160mm an. Das Beschattungselement besteht aus mehreren Komponenten, die sich aus dem Wärmetransport ergeben. In der Umsetzung kommen unterschiedliche Wärmedämmmaterialien zum Einsatz: Phonotherm, Styropor (EPS) und Slentite (siehe Abbildung 28). Phonotherm ist ein wirtschaftlicher, feuchtigkeitsunempfindlicher und zu 100% recycelbarer Funktionswerkstoff mit guten Wärmedämmeigenschaften. Die Anwendung von Phonotherm findet im oben, außen liegenden Bereich des Beschattungselementes (siehe Abbildung 28) statt. Für die anderen Teile des Rahmenelementes wird graues expandiertes Polystyrol (EPS) verwendet. Das graue EPS (BASF, 2015), gehört unter den synthetischen organischen Dämmstoffen, das mit 3-5% Graphit versetzt ist und bessere Wärmedämmeigenschaften als ein normales EPS aufweist. Slentite ist eine effiziente, schlanke und robuste Hochleistungs-Dämmplatte mit einem Lambda-Wert von 0,017W/mK (BASF, 2015), die im hinteren Teil des Beschattungselements integriert ist, um den Wärmetransport zu verringern. Die Kombination von den Materialien ermöglicht einen guten Wärmeschutz.

Der Rollladenpanzer dämmt den von außen in den Raum eindringenden Schall um bis zu 10 dB, bietet optional eine Materialkombination aus Aluminium-Profilen und textilem Blendschutz. Die Führungsschienen (75mm) sind thermisch getrennt und schlagregendicht.

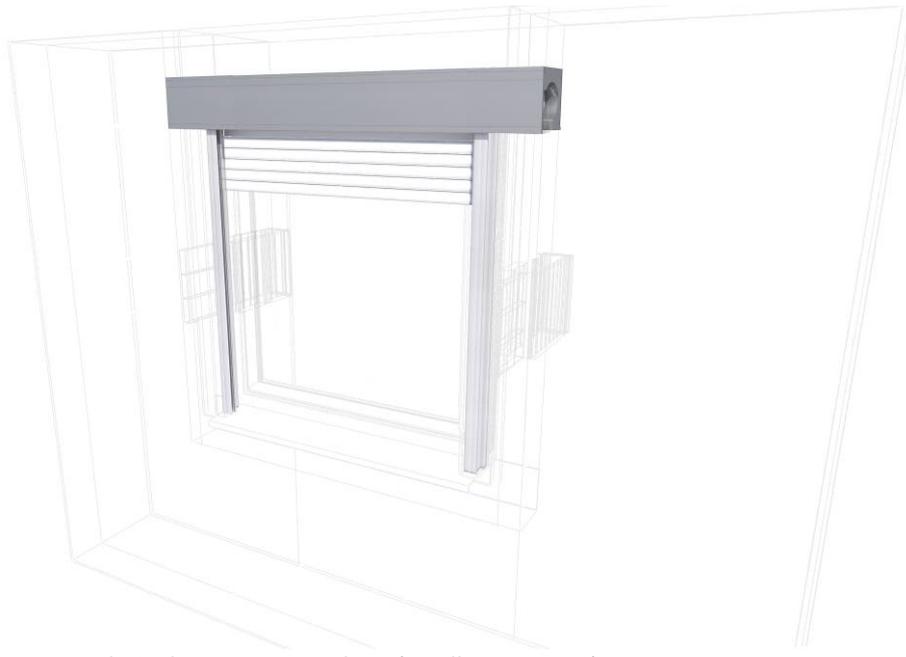


Abbildung 31: Sonnenschutz der Fenstermaschine (Quelle: EBB TUM).

Material	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m*K]	Wasserdampfdiffusions- widerstandszahl μ	Brandverhalten
Phonotherm	500 bis 750	0.076 bis 0.10	12 bis 25	B2 (DIN 4102-1) Klasse E (DIN EN 13501-1)
EPS (BASF, 2015)	15 bis 30	15 bis 30	20 bis 100	B1 (DIN 4102-1) Klasse E (DIN EN 13501-1)
Slentite (BASF Polyurethanes GmbH , 2017)	110-135	0,018	8	B2 (DIN 4102-1) Klasse E (DIN EN 13501-1)

Tabelle 6: Materialeigenschaften von Sonnenschutzsystemen (Quelle: EBB TUM).

Zwei vom Industriepartner vorgegebene dezentrale Lüftungsanlagen mit Wärmegewinnung werden in die Leibungen des Fensterelementes integriert. Die zwei Lüftungseinheiten wurden seitlich eingebaut, indem zwei Ausschnitte in die existierenden Wandleibungen gestemmt hat und die Lüftungsgeräte dann seitlich am Fensterdämmelement angefügt wurden. Die Lüftungsgeräte oben einzubauen wäre wegen des Fenstersturzes nicht möglich gewesen. Unten war es auch nicht möglich, weil auf der Innenseite oft Heizkörper angebracht sind. Die seitliche Ausführung mit Wandausschnitt erlaubt es, die Glasfläche nicht zu reduzieren und die Distanz zwischen den zwei Pendellüftern nochmals zu vergrößern und somit Kurzschlüsse besser zu vermeiden. Beim Lüftungsgerät wurde die Periodenzeit optimiert und damit der Wärmerückgewinnungsgrad leicht erhöht. Es wurde auch erkannt, dass die Periodenzeit in Zukunft für Komfortzwecke angepasst werden könnte: im Winterfall zum Beispiel, sobald die Zulufttemperatur unter eine bestimmte Komforttemperaturensgrenze fällt (z.B. 17°C), könnte automatisch umgeschaltet werden. Dafür sind zusätzliche Sensoren nötig. Im Demoprojekt wurden zwei Pendellüfter pro

Fenster eingesetzt. Die zwei Pendellüfter arbeiten alternierend: während der eine im Zuluftmodus ist, ist der andere im Abluftmodus und umgekehrt. Die Volumenströme liegen zwischen 7 und 35 m³/h. Die einzigen sichtbaren Elemente des Gerätes sind die Abdeckhaube außen und die Innenblende.

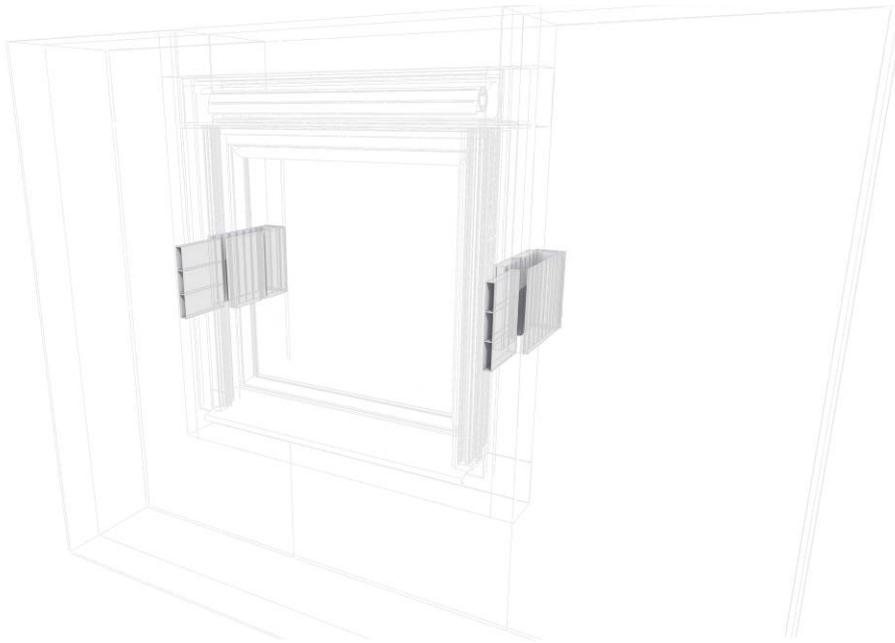


Abbildung 32: Die dezentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (Quelle: EBB TUM).

Die Bestandfenster beim Einfamilienhaus in Erfurt entsprechen nicht mehr heutigen gesetzlichen Anforderungen an Luftdichte und Wärmequalität. Demzufolge wurden auch die Fenster mit 2-fach-Verglasung ($U_w=2,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) durch ein Fenster mit 3-fach-Verglasung ($U_w=0,99$) ausgetauscht. Zur Sicherstellung der Lichtqualität wird die Größe des Glasanteils beibehalten und die Einbaulage durch die Montage in der Dämmebene festgelegt. Die bauphysikalischen Schwachstellen um das Fenster werden mit der Integration in der Dämmebene und dem Einsatz zusätzlicher Wärmedämmung verbessert. Beim Forschungsprojekt wurde wegen der langen Haltbarkeit im Außenbereich und des geringen Gewichtes eine Alu-Fensterbank ausgewählt. Zum Schutz beim Transport und beim Einbau auf der Baustelle wurde eine selbstklebende Schutzfolie eingesetzt. Im Inneren wurde die alte Marmorfensterbank durch eine neue Fensterbank ersetzt.

Technische Details des Fensters: aluplast IDEAL 4000

70mm Bautiefe

$U_f=1,3 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$

$U_w=0,99 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ mit Standard-Dreifach-Verglasung mit $U_g=0,6$ und $\Psi_i=0,040\text{W}/\text{mK}$

Bis zu RC2 Einbruchschutz

Bis 45dB Schallschutz (Schallschutzklasse 4)

Bis zu 41mm Verglasung

5-Kammer-Profil

optional: bonding Inside (Klebetchnologie)

Tabelle 7: Fenstereigenschaften (Quelle: Beck+Heun).

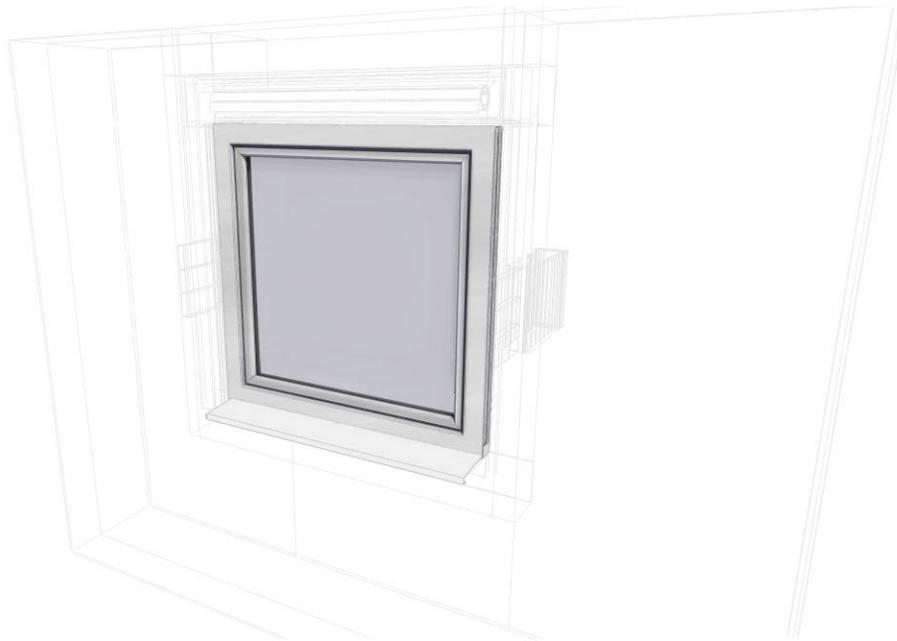


Abbildung 33: Das neue Fenster und Fensterbank (Quelle: EBB TUM).

6.3.3 Montage der Fenstermaschine

Um die Montage erfolgreich vorzubereiten wurden schon in der Entwicklungsphase die Montagschritte (siehe Tabelle 8) vorgeplant und untersucht.

Der erste Montageschritt ist die Bestandsaufnahme, wo die Druckfestigkeit der Wandbaustoffe festgestellt und ein Aufmaß erstellt werden. Basierend auf dem Aufmaß, den Untersuchungen und den Vorgaben des Auftraggebers werden die maximalen Bauteilgrößen und die erforderlichen Eingriffe in die Bausubstanz festgelegt.

Im zweiten Montageschritt wird die vorhandene Fensterbank entfernt, um Raum für Technik zu gewinnen und Wärmebrücken zu vermeiden. Dazu wird die Bohrung für die der Stromzufuhr für die Lüftungsgeräte in der Leibung vorbereitet. Für den vertikalen Transport des Rahmens mit Zubehör (integrierte Führungsschienen, der neue Fensterblendrahmen, Sonnenschutzpanzer) wird auf den Lastenaufzug zwischen Gerüst und Fassade verzichtet. Demzufolge wird den Rahmen mit 2 Monteuren über das Gerüst bis zur Leibungsöffnung transportiert und befestigt. Um die sichere Abdichtung zwischen den Rahmen und Wand zu gewährleisten werden Dichtungsbänder benutzt.

Im dem dritten Montageschritt wird der Modulrahmen mit allem Zubehör (Fenster, Fensterbank, Sonnenschutz) von außen fertiggestellt. Anschließend erfolgt die Überdämmung des Modulrahmens und DIN-gerechte Einbindung ins WDVS-System. Parallel wird im Inneren die Demontage des alten Fensters durch Zerschneiden des alten Blendrahmens durchgeführt.

Im vierten Montageschritt werden die Innenarbeiten (zusätzliche Wärmedämmung, innere Fensterbank, Leibungselemente) und Außenarbeiten durchgeführt.

Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4
Bestand.	Montage des Fensterrahmens mit Andichtung an den Rohbau.	Einbau des Sonnenschutzes und des neuen Fensters Anarbeiten des WDVS-System Das Bestandsfenster wird nach Montage des neuen Fensters von innen demontiert.	Einbau des Lüftungsgerätes Die Innenverkleidung wird eingepasst und überdeckt die Spuren des alten Fensters.

Tabelle 8: Montage der Fenstermaschine (Quelle: EBB TUM).

6.4 Bauphysikalische Untersuchung

6.4.1 Anforderung

Zweidimensionale Wärmebrückenanalysen sind die allgemein akzeptierte Methode, um Feuchteschäden zu minimieren und das Risiko von Schimmelpilzbildung zu untersuchen. Die Untersuchungen zu Keimung und Wachstum von Schimmelpilzen auf verschiedenen Nährböden liefern grundlegende Informationen zu den Normanforderungen. Gemäß der Randbedingungen, die in der DIN 4108-2 beschrieben sind (rel. Luftfeuchtigkeit 50 %, Innenraumtemperatur 20 Grad Celsius, minimale relative Luftfeuchtigkeit 80 % auf der Bauteiloberfläche), dürfen die Bauteile eine minimale Innenoberflächentemperatur von 12,6 Grad Celsius nicht unterschreiten. Diese Temperaturgrenze beschreibt die untere Grenze des Pilzwachstums bei einem vom Schimmelpilz gut verwertbaren Nährstoffangebot. Mithilfe einer zweidimensionalen Wärmebrückenanalyse werden die Oberflächentemperaturen an den kritischen Stellen und die Wärmeströme über den Bauteilanschluss ermittelt. Die Punkte, an denen die niedrigsten Oberflächentemperaturen entstehen und die unterschiedliche Temperaturverläufe aufweisen, sind als kritische Stellen benannt (kritische Stelle A und kritische Stelle B).

6.4.2 Rahmenbedienungen (DIN 4108)

- Lufttemperatur Innen: 20 °C
- Lufttemperatur Außen: -5 °C
- Wärmeübergangswiderstand Innen: 0,13 m²K/W
- Wärmeübergangskoeffizient Innen: (F-Wert Berechnung) 0,25 m²K/W
- Wärmeübergangswiderstand Außen: 0,04 m²K/W

Bestandsgebäude

Materialaufbau	Dicke [mm]	λ [W/(mK)]
Innenputz	20	1,0
Mauerwerk	320	0,96
Außenputz	20	1,0

Tabelle 9: Materialaufbau des Bestandsgebäudes (Quelle: EBB TUM).

Simulationsvariante 1 und Simulationsvariante 2 (Fenstermaschine mit/ohne Slentite)

Materialaufbau	Dicke [mm]	λ [W/(mK)]
Innenputz	20	1,0
Mauerwerk	320	0,96
Außenputz	20	1,0
Dämmung	180	0,035
Außenputz	5	0,87
Stahlbeton Decke	180	2,3
Trittschalldämmung	30	0,04
Estrich	45	1,4
Fenster	70	0,1168

Tabelle 10: Materialaufbau der Modelvarianten (Quelle: EBB TUM).

6.4.3 Simulationsverfahren

Die Bestandssituation, Simulationsvariante 1 (Fenstermaschine mit der Slentite) und Simulationsvariante 2 (Fenstermaschine ohne Slentite) wurde nach folgenden Untersuchungskriterien überprüft bzw. bewertet:

- Innenoberflächentemperaturen an den kritischen Stellen
- Wärmeströme über das Bauteil
- Wärmebrückenkoeffizienten (ψ -Werte)
- Schimmelpilzgefahr
- Taupunktgrenze

6.4.4 Simulationsergebnisse

Bestandssituation

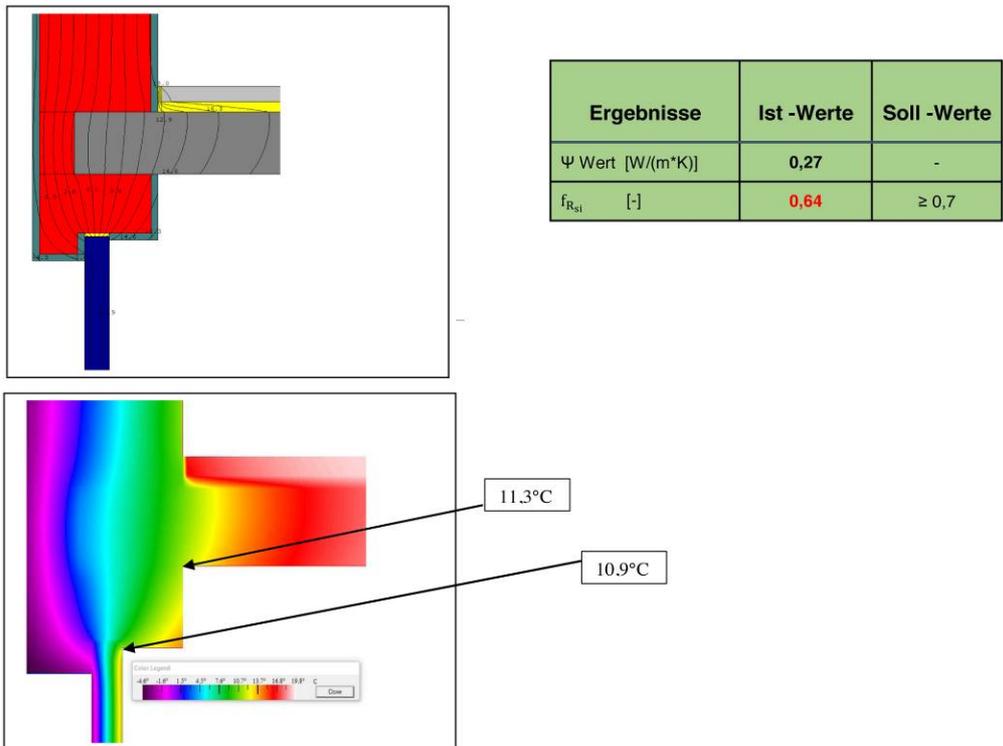


Abbildung 34: Wärmebrückenanalyse vom Bestand (Sturz vor Sanierung) (Quelle: Beck+Heun).

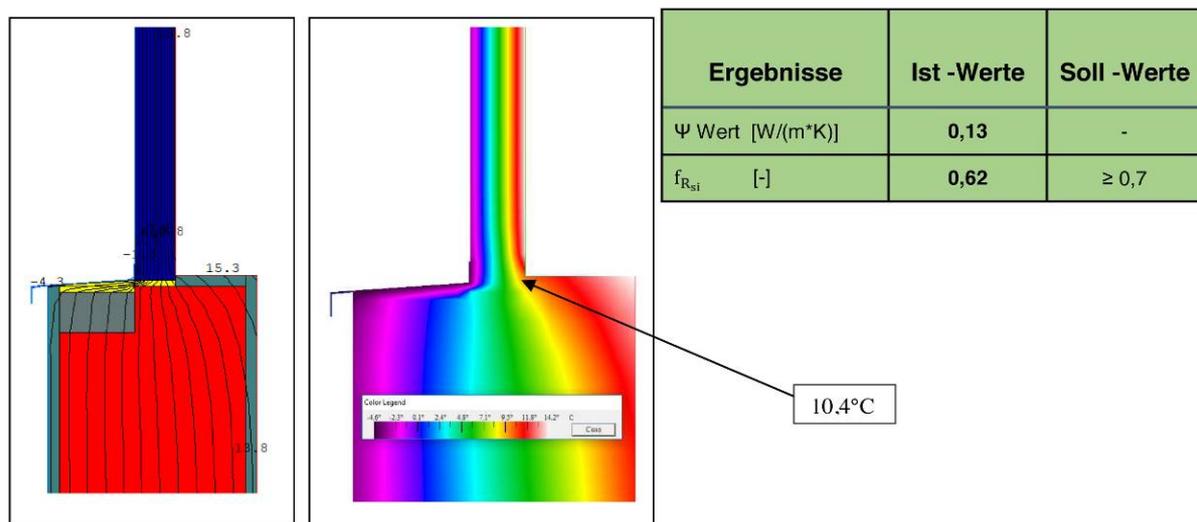


Abbildung 35: Wärmebrückenanalyse vom Bestand (Brüstung vor Sanierung) (Quelle: Beck+Heun).

Simulationsvariante 1 (Fenstermaschine mit Slentite)

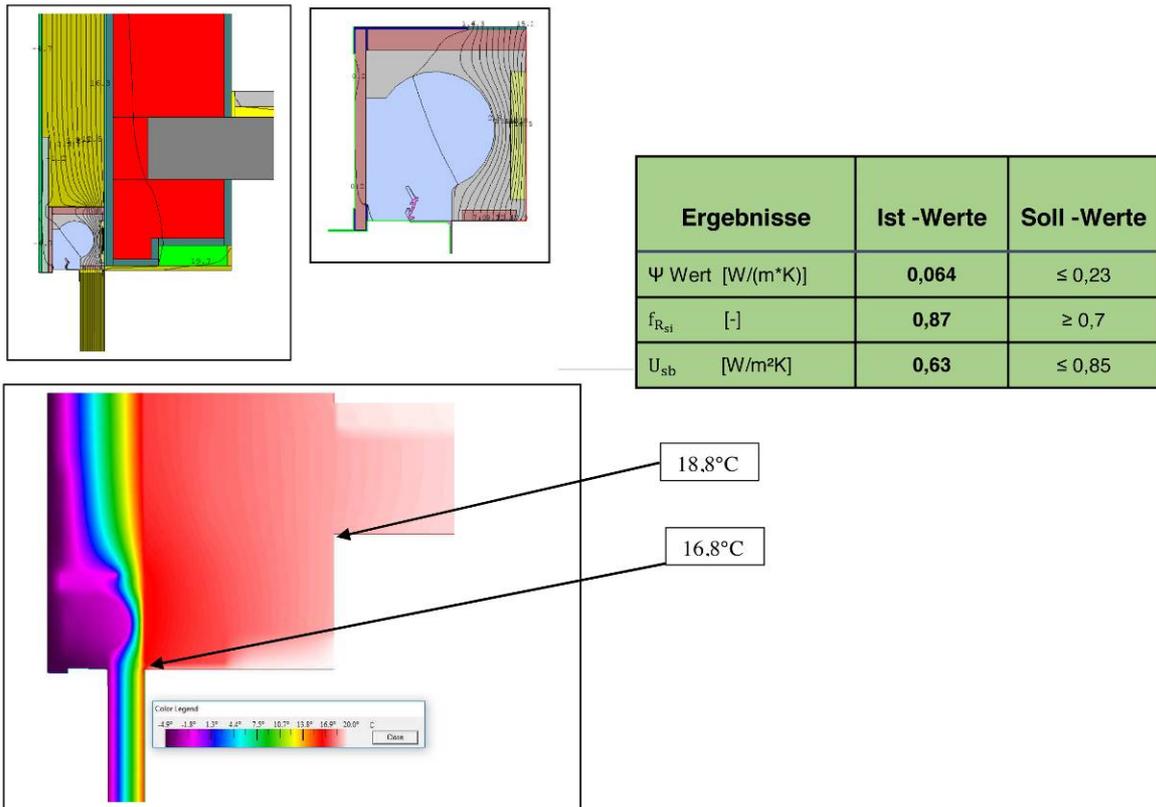


Abbildung 36: Wärmebrückenanalyse der Variante 1 (Sturz nach Sanierung mit der Fenstermaschine mit Slentite) (Quelle: Beck+Heun).

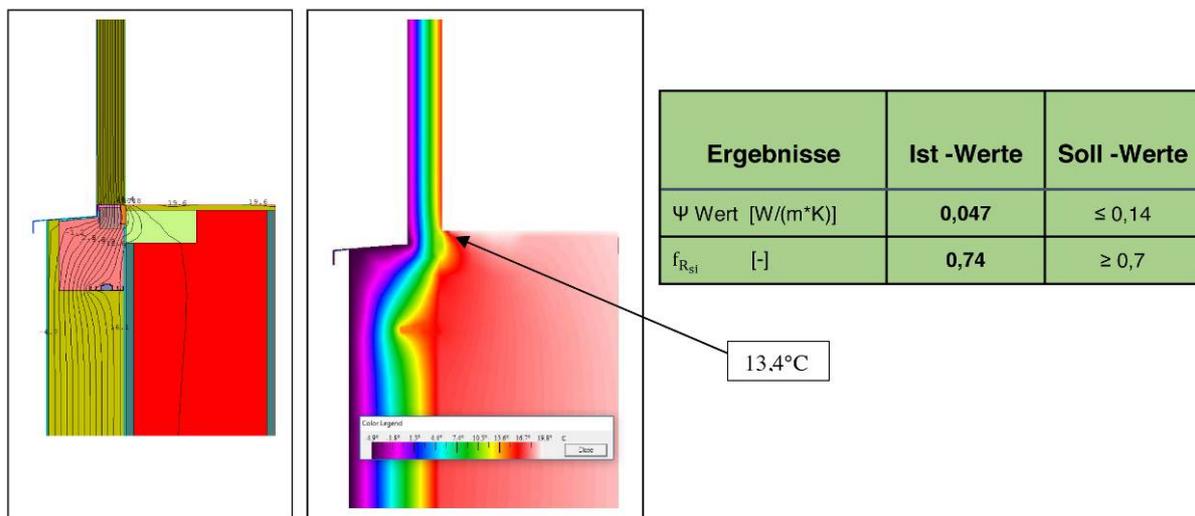


Abbildung 37: Wärmebrückenanalyse der Variante 1 (Brüstung nach Sanierung mit der Fenstermaschine mit Slentite) (Quelle: Beck+Heun).

Simulationsvariante 2 (Fenstermaschine ohne Slentite)

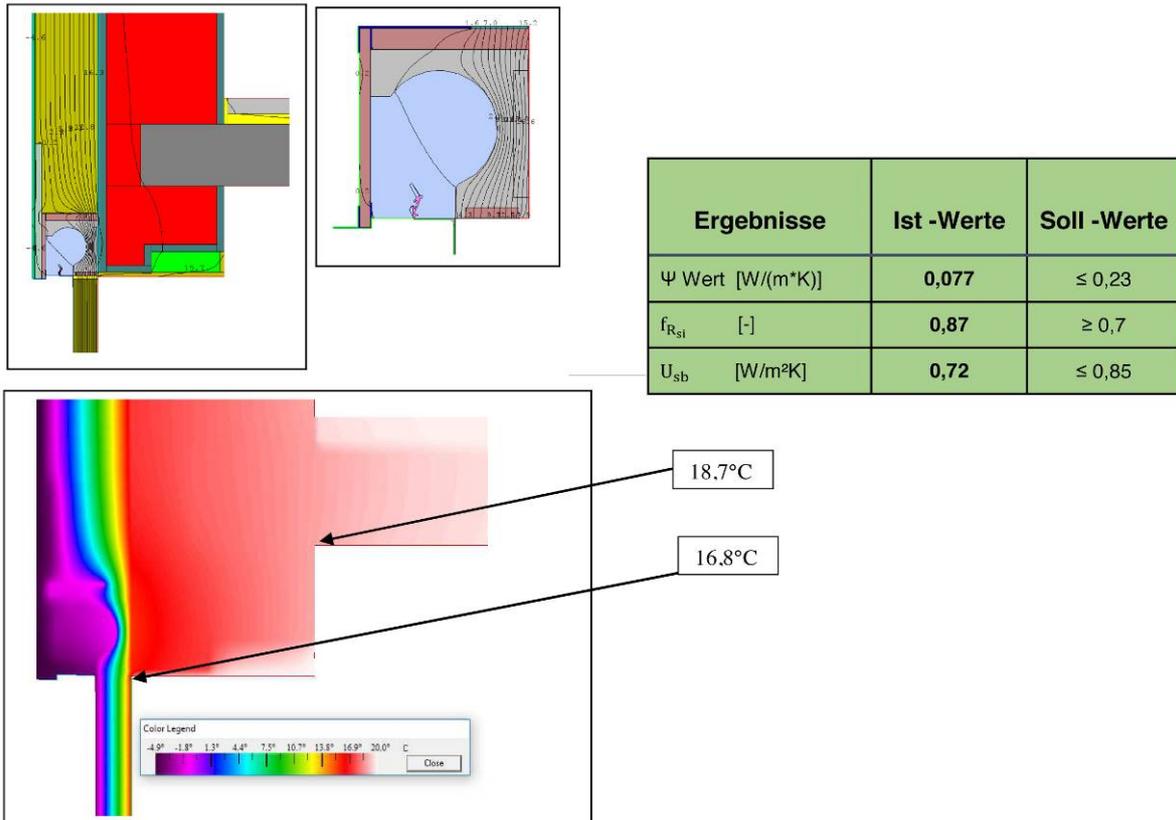


Abbildung 38: Wärmebrückenanalyse der Variante 2 (Sturz nach Sanierung mit der Fenstermaschine ohne Slentite) (Quelle: Beck+Heun).

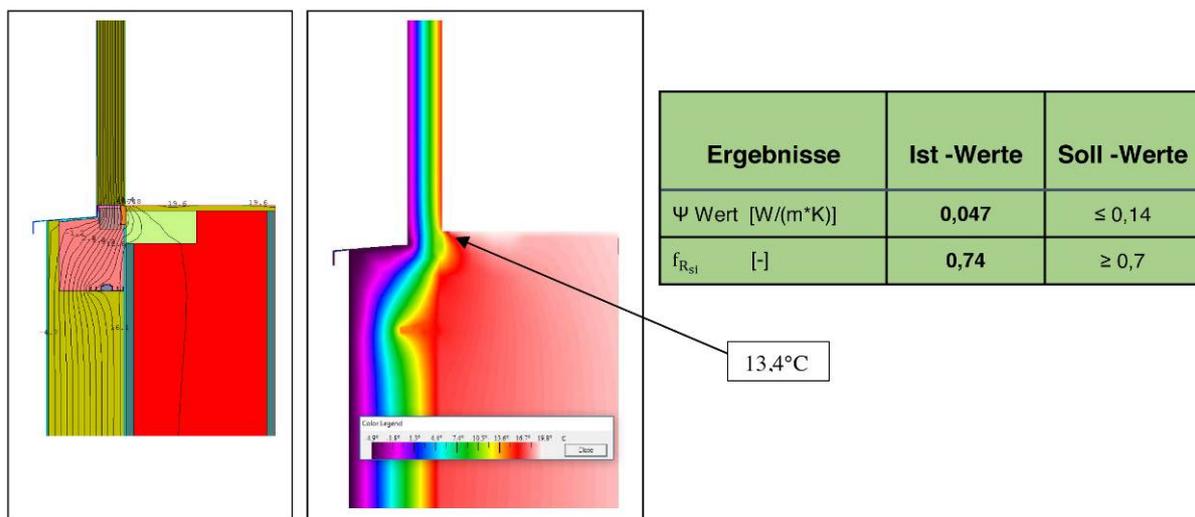


Abbildung 39: Wärmebrückenanalyse der Variante 2 (Sturz nach Sanierung mit der Fenstermaschine ohne Slentite) (Quelle: Beck+Heun).

6.4.5 Schlussfolgerungen

- Der Bestand hat hohe Wärmeverluste und es besteht die Gefahr, dass auf der Innenoberfläche der Taupunkt unterschritten wird (Gefahr der Schimmelbildung).

- Mit der Simulationsvariante 1 und der Simulationsvariante 2 werden die Wärmeverluste reduziert. Die Oberflächentemperaturen steigen von 10,9 auf 16,8 Grad Celsius.
- Wärmebrücken und Schimmelbildung werden mit der Simulationsvariante 1 und der Simulationsvariante 2 verhindert und eine behaglichere Luftqualität im Innenraum wird erreicht. Die Variante 1 mit Slentite ergibt eine minimal zusätzlich verbesserte Wärmedämmung der Rollläden.

6.5 Tageslicht und Sonnenenergiegewinne

In diesem Abschnitt werden die dynamischen Simulationen mit dem Fener-Tool dargestellt, das die Tageslicht- und Solarwärmegewinne der beiden Fensterkonfigurationen vergleicht. Die in den Simulationen verwendeten Wetterdaten stammen von Meteororm für Erfurt. Die Raumgeometrie ist eine "Shoe-Box" von 4,16 m x 3,55 m x 2,55 m mit einem Fenster an der Ostfassade (10 ° Südosten). Im ersten Szenario (vor Renovierung) beträgt die Wandstärke 30 cm und die Außenseite der Fensterleibung 15 cm. Im zweiten Szenario beträgt die Wandstärke 45 cm und die Außenseite der Fensterleibung 15 cm. Die Fensteröffnung ist im zweiten Szenario etwas kleiner als im ersten Szenario (Tabelle 1).

	Variante 1 (vor Renovierung)	Variante 2 (nach Renovierung)
Glasaufbau	4/12/4	4/16Ar/4
U-Wert	3.0 W m ⁻² K ⁻¹	1.1 W m ⁻² K ⁻¹
Glasfläche(ohne Rahmen)	1.41 m x 0.94 m	1.41 m x 0.86 m
Wandstärke	30 cm	45 cm
Außenseite der Fensterleibung	15 cm	15 cm

Tabelle 11: Simulierte Fenstervarianten (Quelle: ISE).

6.5.1 Simulationswerkzeug

Das gewählte Simulationstool ist Fener (Bueno, Wienold, Katsifaraki, & Kuhn, Fener: a Radiance-based modelling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces, 2015), (Bueno, Wienold, Katsifaraki, & Kuhn, 2017), ein Gebäudesimulationsprogramm, das speziell für die Bewertung von Fassadensystemen und deren Steuerung entwickelt wurde. Neben Wetterdaten und Informationen zur Gebäudenutzung nimmt Fener die U-Werte, „Bi-directional Scattering Distribution Functions“ (BSDF) und „Directional Solar Heat Gain Coefficients (DSHGC)“ als Eingabeparameter für das Fenstersystem. Die BSDF (bidirectional scattering distribution function) beschreibt die Lichtverteilung des transmittierten und reflektierten Lichts in Abhängigkeit von der Richtung der einfallenden Strahlung. Die Richtungen der einfallenden und der reflektierten/transmittierten Strahlung werden meistens in Polarkoordinaten angegeben. Man erkennt, dass die BSDF eine skalare Kenngröße in einem 4-dimensionalen Parameterraum ist, wobei je zwei Dimensionen für die Einfall- und die Ausfallrichtung verwendet werden. DSHGCs sind winkelabhängige g-Werte, die das einfallende Sonnenlicht Außen mit der totalen in den Raum transmittierten Solarenergie verbinden. Dies umfasst sowohl die transmittierte Solarstrahlung als auch den nach Innen fließenden Anteil der in

der Fassaden absorbierten Solarenergie. Das Fener-Tool beurteilt gleichzeitig die Tageslicht-, Blendungs- und Energiesituation eines Raumes.

6.5.2 Bewertungsmetriken

Die gewählte Metrik zur Bewertung der Tageslichtleistung für beide Szenarien ist die Tageslichtautonomie. Die Tageslichtautonomie-Metrik ist für Bürogebäude (hier auch für Wohngebäude übernommen) durch den Anteil der Arbeitsstunden definiert, an denen Tageslicht ein bestimmtes Niveau erreicht (Gl. 1). Es wird angenommen, dass unter diesem Niveau elektrisches Licht angemacht benötigt wird.

$$DA_{300lx}[\%] = \frac{\text{working hours with daylight illuminance} \geq 300lx}{\text{total working hours}} * 100 \quad (1)$$

Darüber hinaus ist die „Spatial Daylight Autonomy“ definiert als ein Prozentsatz eines Analysebereichs (der Bereich, in dem Berechnungen durchgeführt werden - typischerweise über einen gesamten Raum hinweg), der für einen bestimmten Anteil der Betriebsnutzungsstunden pro Jahr eine Mindestbeleuchtungsstärke für Tageslicht erfüllt (Gl. 2).

$$sDA_{300lx/50\%}[\%] = \frac{\text{area of target plane with } DA \geq 50\%}{\text{total target area}} * 100 \quad (2)$$

Der Bericht „IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)“ (Illuminating Engineering Society of North America., IES LM-83-12.) empfiehlt $sDA_{300,50\%} \geq 75\%$ als bevorzugte Tageslichtsuffizienz und $sDA_{300,50\%} \geq 55\%$ als nominell akzeptierte Tageslichtsuffizienz.

Neben der Tageslichtautonomie wird auch die räumliche Verteilung des Tageslichtfaktors für beide Szenarien dargestellt. Der Grund dafür ist, dass der Tageslichtfaktor häufig in den Tageslichtnormen aufgenommen wird, obwohl es eine statische Metrik ist und die direkte Sonnenstrahlung und Fensterausrichtung vernachlässigt. Der Tageslichtfaktor (%) ist als das Verhältnis des internen Lichtniveaus zum externen Lichtniveau definiert. In dieser speziellen Fallstudie können dieselben Schlussfolgerungen aus der Betrachtung des Tageslichtfaktors oder der Tageslichtautonomie abgeleitet werden.

Die Bewertung der solaren Wärmegewinne wird in Bezug auf den effektiven g-Wert und die transmittierte Sonneneinstrahlung ausgewertet. Der "effektive g-Wert" ist definiert als das Verhältnis zwischen den stündlichen solaren Wärmegewinnen und der stündlichen gesamten einfallenden Sonneneinstrahlung. Die transmittierte Sonneneinstrahlung ist der Anteil der solaren Wärmegewinne aufgrund der direkten optischen Transmission durch das Fenstersystem.

6.5.3 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 40 - Abbildung 43 dargestellt. Wie berichtet, hat die Verglasung eine geringere Transmission nach der Sanierung. In diesem

Szenario ist die Glasfläche des Fensters auch etwas reduziert und die Wandstärke erhöht. Auf der anderen Seite sind der U-Wert und der g-Wert nach der Renovierung wesentlich reduziert. Es wird daher im zweiten Szenario eine schlechtere Tageslichtleistung des Fensters als im ersten Szenario erwartet. In Bezug auf die Energieeffizienz bedeutet die Abnahme des g-Wertes im zweiten Szenario eine Abnahme des Kühlenergiebedarfs im Sommer und einen Anstieg des Heizenergiebedarfs im Winter. Die Verringerung der des U-Werts-Abfall hat eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs im Winter zu Folge.

Der Beitrag der Simulationen ist in diesem Fall die Quantifizierung der erwarteten Unterschiede zwischen den Szenarien 1 und 2. Die mittlere Tageslichtautonomie im Raum wird von 54% auf 43% reduziert (20% weniger Tageslichtautonomie). In absoluten Zahlen erreicht keines der Szenarien den Tageslicht-Suffizienz-Sollwert (55%) aufgrund des betrachteten kleinen Fensters. Das erste Szenario (vor Renovierung) kommt viel(54%) als das zweite Szenario (33%).

In Bezug auf solare Wärmegewinne hat das zweite Szenario im Durchschnitt einen effektiven g-Wert (der im Durchschnitt um 0.13 niedriger ist als das erste Szenario). In Bezug auf die transmittierte Sonneneinstrahlung bekommt das zweite Szenario 211 kWh weniger als Szenario 1 (36% niedriger).

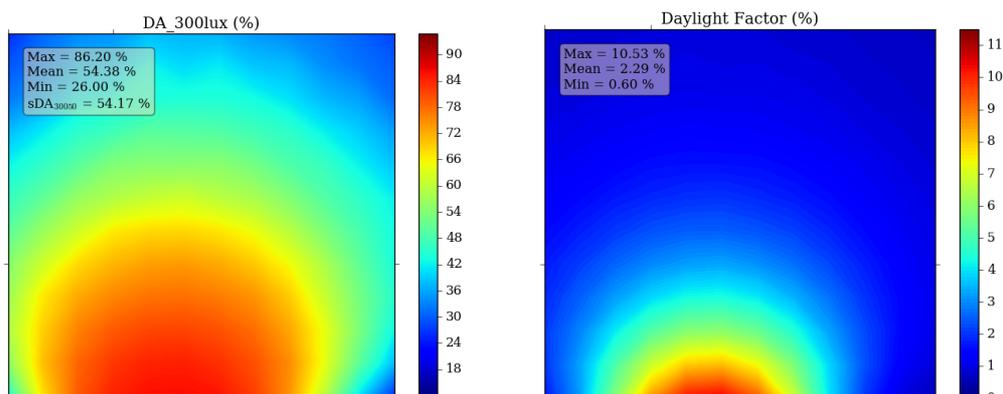


Abbildung 40: Tageslichtautonomie und Tageslichtfaktor für Variante 1 (vor Renovierung) (Quelle: ISE).

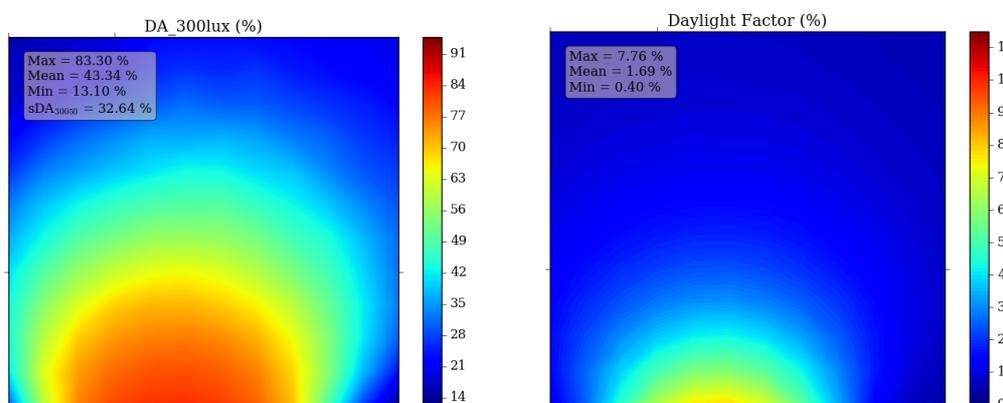


Abbildung 41: Tageslichtautonomie und Tageslichtfaktor für Variante 2 (nach Renovierung) (Quelle: ISE).

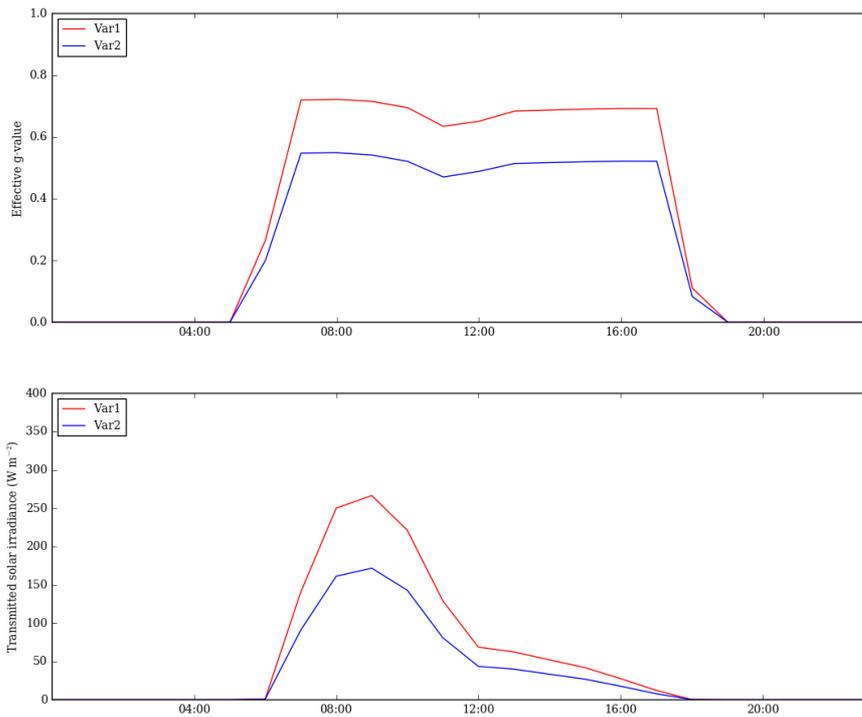


Abbildung 42: Effektiver g-Wert und transmittierte Sonneneinstrahlung für Varianten 1 (vor Renovierung) und 2 (nach Renovierung). Monatlicher durchschnittlicher Tag in Winter: für jede Stunde des Tages wurde der Durchschnittswert von allen gleichen Stunden im März errechnet (Quelle: ISE).

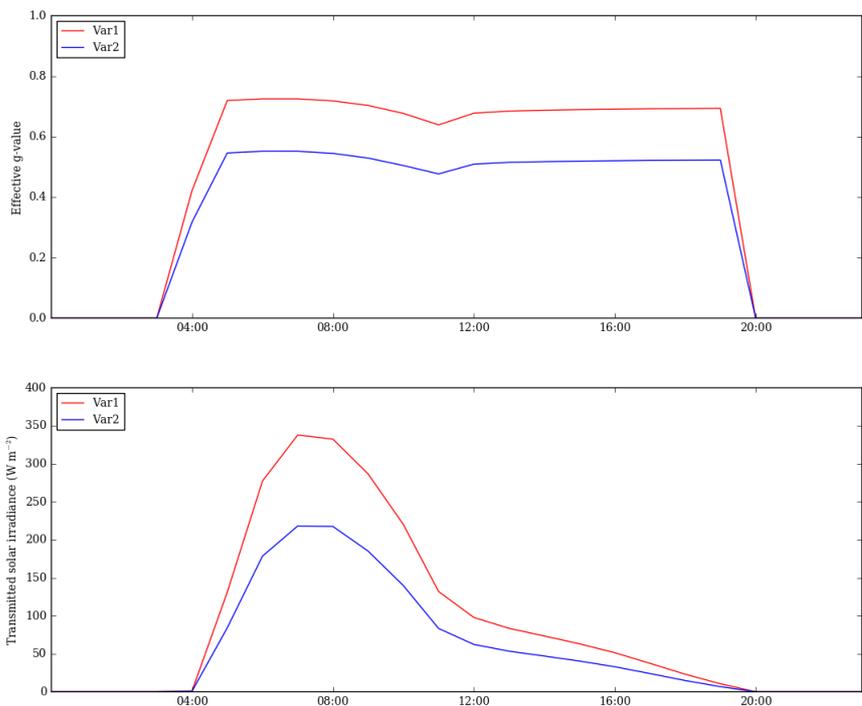


Abbildung 43: Effektiver g-Wert und transmittierte Sonneneinstrahlung für Varianten 1 (vor Renovierung) und 2 (nach Renovierung). Monatlicher durchschnittlicher Tag in Sommer: für jede Stunde des Tages wurde der Durchschnittswert im Juli errechnet (Quelle: ISE).

6.5.4 Schlussfolgerungen:

- Aufgrund der Verkleinerung der Glasfläche und der dickeren Dämmung sowie den breiteren Leibungen verkleinert sich die Tageslichtautonomie, es ist ein erhöhter Stromverbrauch für Beleuchtung zu erwarten. Es gibt auch weniger solare Gewinne, was sich aber im Sommer in kühleren Räumen positiv ausdrückt.
- Bei einer solchen Gebäudesituation könnte zukünftig das Fenster in der Dämmebene liegen und dadurch auch geometrisch grösser gestaltet werden, um Nachteile zu kompensieren und Vorteile zu erhalten.

6.6 Analyse des Lüftungsgerätes

Das Lüftungsgerät, das in der Fenstermaschine eingebaut ist, ist der Pendellüfter „Airfox“ von Beck und Heun. Er besteht aus einem Filter, einem Lüfter, der die Luftbeförderungsrichtung bei jeder Periodenzeit wechseln kann und aus einem Wärmetauscher. Das Gerät ist abwechselnd im Zuluft- und Abluftmodus. Im Abluftmodus bläst der Lüfter von Innen nach Außen, und der Wärmetauscher wird z.B. im Winter aufgewärmt. Im Zuluftmodus bläst dann der Lüfter in der anderen Richtung und die kalte Außenluft wird durch den Wärmetauscher aufgewärmt. Deshalb redet man von Pendellüfter.

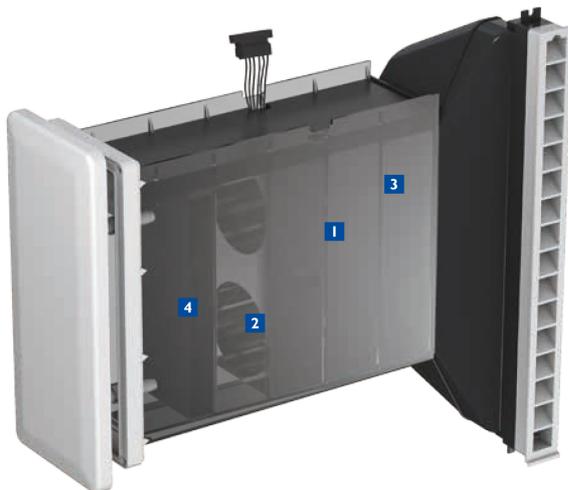


Abbildung 44: Die Bestandteile vom Lüftungsgerät (1=Aluminium-Wärmespeicher, 2=Motor-Einheit mit Schalldämm-Element, 3=Umlenk-Element, 4=Filter-Element) (Quelle: Beck&Heun).

Das dynamische Verhalten des regenerativen Wärmetauschers wurde durch das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE simuliert. Ziel war es, das Optimierungspotential des „Airfox“ zu betonen und die Untersuchungen, die für weitere Optimierungsschritte noch nötig sind, aufzulisten. Der Teststand konnte nur eine grobe Einschätzung der Energieperformance (Wärmerückgewinnung, Volumenstrom und Stromaufwand) liefern.



Abbildung 45: Primitiver Teststand zur Einschätzung des Optimierungspotentials (Quelle: ISE).

6.6.1 Lüfter und Lüftergehäuse

Die Auswahl der Periodenzeit bei dezentralen Lüftungsgeräten mit regenerativem Wärmetauscher basiert auf ein Kompromiss zwischen höherem Wärmerückgewinnungsgrad (für eine kürzere Periodenzeit) und höherem Luftwechsel (für eine längere Periodenzeit). Beim Lüftungsgerät ist eine Periodenzeit von 60 Sekunden eingestellt was zu einer Reduzierung des Luftwechsels um 2% bis 3% und zu einer Erhöhung des Wärmerückgewinnungsgrades um 0.1% im Vergleich mit einer Periodenzeit von 70 Sekunden führt.

Der Lüftungsgerät ist mit 2 kleinen Lüftern (EBM-Papst 8412 NGHAR) ausgestattet (siehe Abbildung 46). Die Verwendung eines größeren Lüfters anstatt zwei kleinen würde zu einer Erhöhung des Luftwechsels um 13% und einer Reduzierung des Stromaufwands um 46% führen.

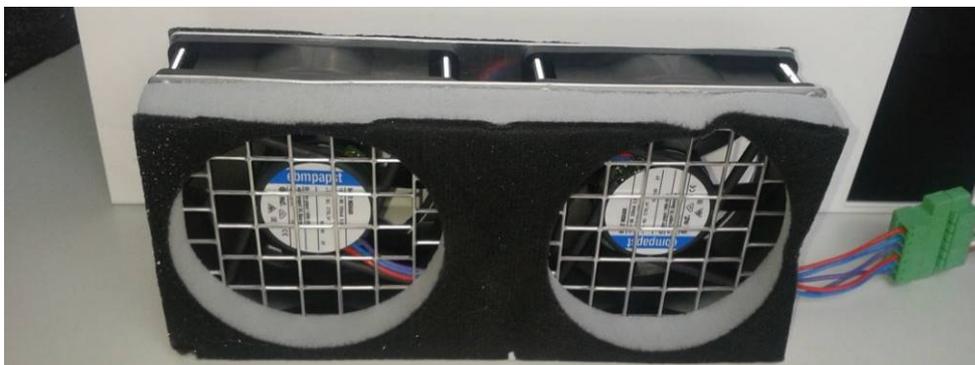


Abbildung 46: Montagebox für die 2 Lüfter (Quelle: ISE).

Das Gehäuse der Lüfter wurde vom Hersteller so entwickelt, dass die Strömung möglichst wenig von Kanten und Verwirbelungen gestört wird. Beim Airfox werden zwei Lüfter mit einer Metallplatte und einem Metallgitter verbunden. Auf das Gitter wird Schaum zum Schallschutz geklebt. Der Volumenstrom wird durch die Montageplatte und durch das Gitter um 5% (Zuluft) und 13% (Abluft) reduziert. Deshalb wird vorgeschlagen über andere Montage- und Schallschutzlösungen nachzudenken.

6.6.2 Regenerativer Wärmetauscher

Der regenerative Wärmetauscher des Lüftungsgerät Airfox besteht aus Aluminium (sehr hohe Wärmeleitfähigkeit und ähnliche Trägheit wie bei Keramik). Um die Wärmeleitung von innen nach außen zu reduzieren, wurden zwei Schlitze in jede Platte gefräst. Die Temperaturverteilung in den Platten ist auch mit Edelstahl weit von der optimalen Verteilung entfernt. Der Effekt der Schlitze ist bei der Simulation erkennbar. Der Temperaturunterschied zwischen Anfang und Ende eines Zyklus erreicht ca. 1.1 K. Optimierungsmöglichkeiten:

Periodenzeit:

- Testreihe für unterschiedliche Periodenzeiten mit Messungen (Volumenstrom und Wärmerückgewinnungsgrad) zur Validierung der Simulationsergebnisse.
- Untersuchung zur optimalen Periodenzeit und Entwicklung einer passenden Regelungsstrategie (Anpassung der Periodenzeit zur Leistungsstufe).

Lüfter und Montage des Lüfters:

- Auswahl des am besten geeigneten Lüfters.
- Optimierung der Montage- und Schallschutzlösungen (Auswahl des Schallschutzmaterials nach Frequenzanalyse des Lüftergeräusches).

Regenerativer Wärmetauscher:

- Messungen mit anderen Materialien.
- Vorschlag eines neuen Wärmetauschertyps (Simulationen, Messungen und Optimierung).

7 Demonstration am Gebäude

7.1 Montage und Qualitätssicherung

In diesem Abschnitt wird die Montage der Fenstermaschine mit den Fotos (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun) präsentiert.

Montageschritte:

- 1. Phase: Vorbereitung vor der Montage (Bohrung)
- 2. Phase: Montage des teilvorgefertigten Fensterelements mit Abdichtung am Rohbau
- 3. Phase: Einbau des Sonnenschutzes und Fensters, Anarbeiten des WDVS Systems
- 4. Phase: Demontage des Bestandsfensters und Einbau des Lüftungsgerätes
- 5. Phase: Innenverkleidung und Putzarbeiten

7.1.1 Vorbereitung vor der Montage

Der erste Montageschritt ist die Bestandsaufnahme, in der die Druckfestigkeit der Wandbaustoffe ermittelt und das Aufmaß erstellt werden. Basierend auf dem Aufmaß, den Untersuchungen und den Vorgaben des Auftraggebers werden die maximalen Bauteilgrößen und die erforderlichen Eingriffe in die Bausubstanz festgelegt. Die vorhandene Fensterbank wird entfernt, um Raum für Technik zu gewinnen und Wärmebrücken zu vermeiden. Dazu wird auch den Platz für die Lüftungsgeräte mit einer Bohrung durch den Wand in der Leibung vorbereitet.



Vorbereitung von der Montage



Anzeichnen von Bohrungs- und Befestigungsstellen



Bohrung durch der Wand für das Anbringen der dezentralen Lüftung



Entfernen der vorhandenen Fensterbank

7.1.2 Montage des teilvorgefertigten Modulrahmens mit Abdichtung an den Rohbau

Die Modulrahmen werden auf der Baustelle mit Kleben und Schrauben verbunden. Für den vertikalen Transport des Rahmens mit Zubehör (integrierte Führungsschienen, der neue Fensterblendrahmen, Sonnenschutzpanzer) wird auf den Lastenaufzug zwischen Gerüst und Fassade verzichtet. Demzufolge wird den Rahmen von 2 Personen über das Gerüst bis zur Leibungsöffnung transportiert und befestigt. Um die sichere Abdichtung zwischen den Rahmen und Wand zu gewährleisten werden Dichtungsbänder benutzt.



Vorbereitung des Modulrahmens



Verbindung der Teile des
Modulrahmens (Kleben und
Schrauben)



Anbringen der Abdichtung
(Modulrahmen)



Montage des Modulrahmens an der
Wand



Befestigung des letzten Teils
(Sonnenschutzmodul) am
Modulrahmen



Befestigung des ersten
Rahmenmoduls



Befestigung des zweiten
Rahmenmoduls



Stromverkabelung für das
Lüftungsgerät

7.1.3 Einbau des Sonnenschutzes, Fensters und Anarbeiten des WDVS Systems

Der Modulrahmen und die Stromverkabelung an der Außenwand werden DIN-gerecht ins WDVS-System eingebracht.



Vorbereitung des WDVS-Systems



Anbringung des WDVS an die Wand (Stromverkabelung)



WDVS System am Modulrahmen



Überdämmung des Modulrahmens
(2cm)

7.1.4 Demontage des Bestandsfensters und Einbau des Lüftungsgerätes

Zuerst werden die alten Befestigungsmittel, innere Fensterbank und Verglasung entfernt. Die Demontage des alten Fensters wird durch Zerschneiden des alten Blendrahmens durchgeführt. Nachher werden die Hohlräume zwischen Leibungselement und Bestandswand mit Dämmmaterial ausgestopft, um Wärmebrücken zu vermeiden. Letztlich wird das innere Leibungselement und die Lüftungsgeräte montiert.



Demontage des Bestandsfensters



Anbringung der Wärmedämmung
(Fensterbank)



Vorbereitung des Platzes für Lüftungsgerät (Wand Innen)



Einbau der Lüftungsgeräte und Innenleibung

7.1.5 Die Innenverkleidung und Putzarbeiten

Das innere Leibungselement und das Lüftungsgerät werden verputzt. Die Außenputzarbeiten werden beendet.



Innenputzarbeiten



Außenputzarbeiten

8 Nach dem Einbau der Fenstermaschine am Gebäude

8.1 Monitoring und Auswertung

Das Demogebäude in Erfurt wurde vor und nach der Sanierung gemessen. Die Auswertung der Ergebnisse und der Einfluss der Sanierung auf dem inneren Komfort (Lufttemperatur, relative Feuchte, CO₂-Gehalt) werden in diesem Kapitel beschrieben. In diesem Gebäude wurden vier Lüftungsgeräte in zwei Zimmern eingebaut (in beiden Arbeitszimmern).

8.1.1 Messtechnik

Die vermessene Einheit ist ein Einfamilienhaus. Das Erdgeschoss und Obergeschoss wurden mit Sensoren ausgerüstet. Die folgenden Sensoren befanden sich in den Räumen:

- Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und CO₂ Gehalt
- Fensterkontakte

Die Messungen wurden vom 31-10-2016 bis 26-04-2017 (vor der Sanierung) und vom 18-12-2017 bis 17-04-2018 (nach der Sanierung) durchgeführt. In der ersten Phase wurden die Fensterkontakte am 15-02-2017 in der Wohnung installiert.

Das Gästezimmer wird in dieser Auswertung nicht betrachtet. Dieser Raum war vor und nach der Renovierung der Wohnung kaum genutzt. Dies wurde hauptsächlich anhand der CO₂ Werte geprüft. Dementsprechend ist er kein repräsentativer Wohnraum.

Die Lage der Fensterkontaktsensoren und der Lüftungsgeräte wird in der folgenden Abbildung gezeigt.

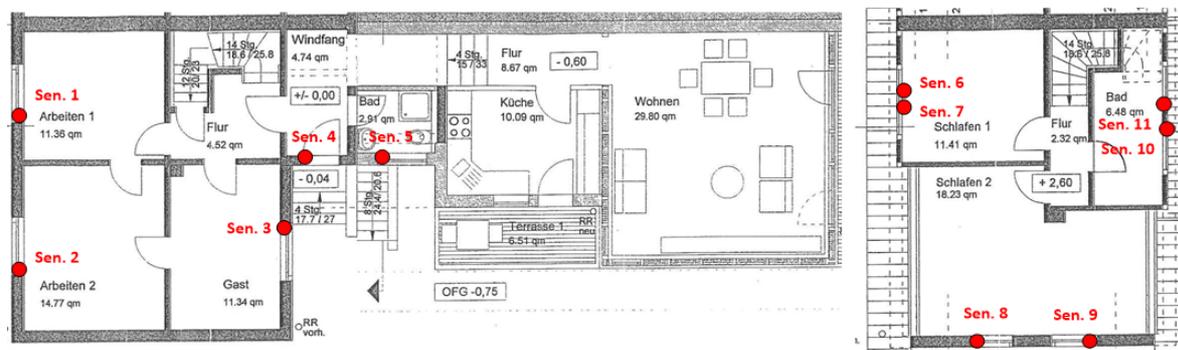


Abbildung 47: Lage der Sensoren (Rot) und Lüftungsgeräte (Blau). Links: Erdgeschoss. Rechts: Obergeschoss. LG= Lüfterpaar (Quelle: ISE).

8.1.2 Messfehler

Einige Messfehler wurden erkannt: Der Eingangstürsensor zeigte nach vier Tagen immer konstant offen. Es wurde berichtet dass der Sensor bei der Abholung falsch positioniert war (es fiel herunter und wurde danach falsch platziert). Des Weiteren gab es in der zweiten Messphase ein Messfehler im Bad des Erdgeschosses (Messgerät am 28-12-2017 plötzlich ausgefallen). Außerdem gab es nach der Sanierung einen Bewohner weniger, was keinen Messfehler verursacht aber kleinere interne Lasten zur Folge hat.

8.1.3 Darstellung der Messergebnisse

Die Tabelle 12 stellt einen Vergleich der über die Zeit gemittelten Temperaturen zu beiden Zeitpunkten, vor und nach Sanierung, dar. Aus den Ergebnissen ist erkennbar, dass die Temperaturen nach der Renovierung deutlich höher als davor sind.

Variable	Temperatur vor der Sanierung [°C]	Temperatur nach der Sanierung [°C]
Schlafzimmer 1	15.29	18.85
Schlafzimmer 2	17.97	16.92
Wohnzimmer	21.22	21.55
EG-Bad	16.77	18.08
DG-Bad	18.37	19.56
Arbeitszimmer 1	17.34	19.58
Arbeitszimmer 2	17.52	19.09
Küche	19.26	20.51

Tabelle 12: Raumtemperaturen vor und nach der Sanierung (Quelle: ISE).

Die Tabelle 13 zeigt die durchschnittlichen entsprechenden Mittelwerte über alle Räume vor und nach der Sanierung. Anschließend wurde untersucht, ob die Veränderung der gemessenen Werte signifikant unterschiedlich ist. Dafür wurden statistische Werkzeuge verwendet. Abhängig von der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen wurden p-Werte mittels statistischen Methoden berechnet.

Es wurde eine Normal-Verteilung angenommen, aber nur für die Temperatur. Es wurden die Mittelwerte vor und nach der Sanierung verglichen und ein p-wert errechnet.

Ein p-Wert niedriger als 0.05 bedeutet, dass die Stichproben signifikant unterschiedlich sind und die Mittelwerte einer Variable dieser Studie in verschiedenen Zeiträumen signifikant verschieden sind. W (wenn keine Normalverteilung festzustellen ist, wurde der „Wilcoxon Test“ verwendet). Obwohl die CO₂ Konzentration unterschiedlich signifikant ist, bleibt die Änderung unter dem Messfehlerbereich (50 ppm).

Variable	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchtigkeit [%]	CO ₂ [ppm]
Vor der Renovierung	17.97	41.55	498
Nach der Renovierung	19.26	40.21	530
p-wert	< 0.05	> 0.10	< 0.05

Tabelle 13: Signifikanztests der Mittelwerte der vermessenen Variablen (Quelle: ISE).

Die folgenden Bilder zeigen drei Tage aus zwei typischen Wochen, in welchen die Außenbedingungen ähnlich waren (vor der Sanierung 31.01/02.02.2017 – nach der Sanierung 19.12/21.12.2017 – Außentemperatur durchschnittlich 0°C nachts und 7°C tagsüber). Die Ergebnisse werden anschließend beschrieben.

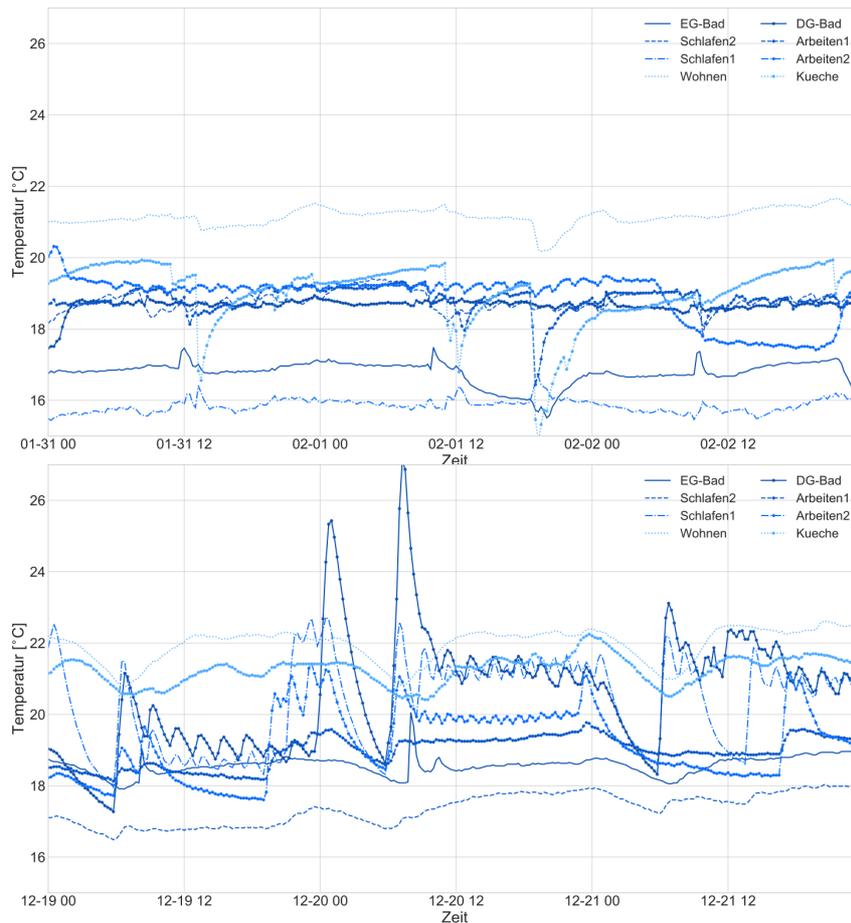


Abbildung 48: Temperaturverlauf in einer typischen Woche (Oben: vor der Sanierung; Unten: nach der Sanierung) (Quelle: ISE).

Wie erwartet, ist die durchschnittliche Temperatur höher nach der Sanierung als davor. In Schlafzimmer1 war das Fenster 007 in dieser Woche vor der Sanierung offen (was die kalten Temperaturen teilweise unter 16°C erklärt). Anders war es in Schlafzimmer 2, wo die Fenster nach der Sanierung offen blieben (Schlafzimmer 2 war nach der Renovierung der einzige Raum unter 18 °C). Vor der Renovierung war das Wohnzimmer der einzige Raum mit einer Temperatur über 20 °C. Nach der Sanierung sind verschiedene Räume über 20 °C mit ähnlichen Außenbedingungen zu erkennen.

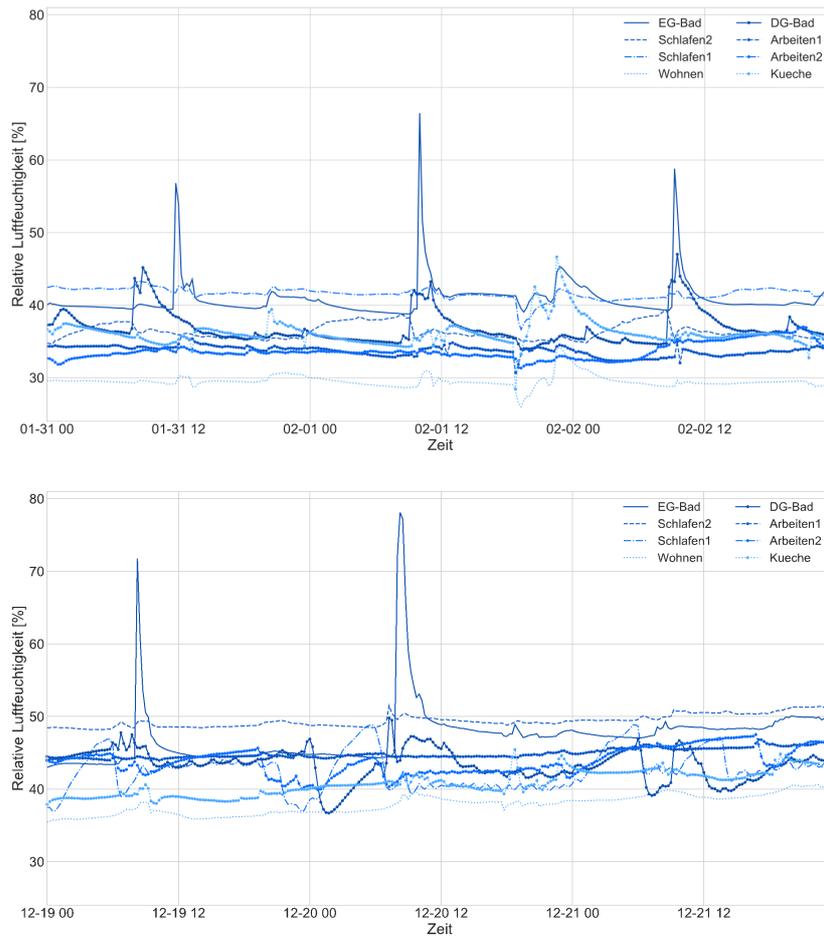


Abbildung 49: Relative Luftfeuchtigkeit in einer typischen Woche (Oben: vor der Sanierung; Unten: nach der Sanierung) (Quelle: ISE).

Die Spitzen der relativen Feuchte sind ähnlich vor und nach Sanierung. Die Temperatur dagegen unterscheiden sich. Die Feuchtespitzen entsprechen waren vor der Sanierung bei Temperaturen zwischen 16 °C und 18 °C. Nach der Sanierung treten Temperaturen über 19 °C mit bei den Feuchtespitzen auf. Dies verringert das Schimmelpilzrisiko und erhöht den Komfort.

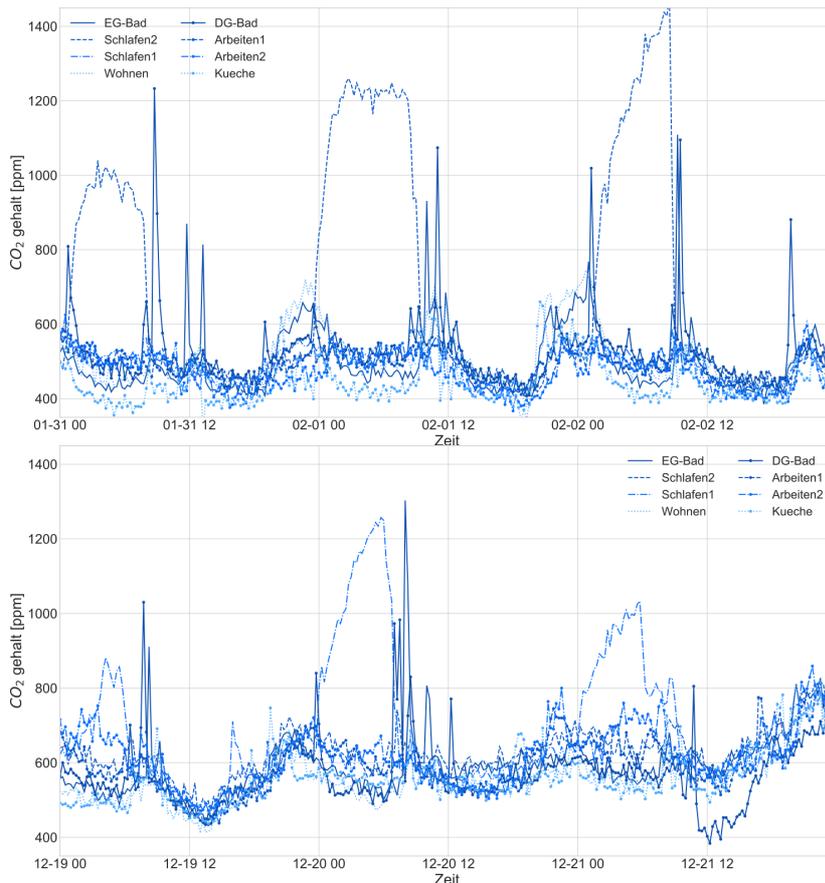


Abbildung 50: CO₂-Verlauf in einer typischen Woche (Oben: vor der Sanierung; Unten: nach der Sanierung) (Quelle: ISE).

Wegen der Luftdichtigkeit des Hauses und trotz Lüftungsanlage sind die allgemeinen CO₂ Werte nach der Sanierung deutlich höher (die Änderung der Mittelwertänderung ist laut Tabelle 12 signifikant). Vor und nach der Renovierung sind die höchsten CO₂-Lasten in Bädern und Schlafzimmern. Nach der Sanierung war Schlafzimmer 1 leer (ein Bewohner ist ausgezogen). Deswegen blieben die Fenster 6 und 7 immer geschlossen (im Gegensatz zu den Werten vor der Sanierung, wo Fenster 7 60% der Zeit offen war).

8.1.4 Luftaustausch in Wohngebäuden

Eine der Energieeinsparmaßnahmen, die bei Wohngebäuden angewendet werden können, ist eine hohe Luftdichtheit. Die erhöhte Gebäudeluftdichtheit minimiert die Wärmeverluste durch ungewollten Luftwechsel. Eine maximale Luftwechselrate wegen Infiltration von 0.6 h^{-1} (maximaler Wert) ist Voraussetzung für die Passivhauszertifizierung. Dieser Wert bedeutet, dass 60% des gesamten Luftvolumens der Wohnung in einer Stunde durch Infiltrationen gewechselt wird. Auf der anderen Seite muss einen Mindestluftwechsel nach der Norm DIN 1946-6 zum Feuchteschutz gewährleistet werden. Dies muss nicht unbedingt über mechanische Lüftung erfolgen, sondern kann auch über Fensterlüftung gedeckt werden. Im gemessenen Haus gilt dieses Prinzip ausgewählt für alle Räume ohne Fenstermaschine.

8.1.5 Lüftungsanlage

In der Wohnung wurden zwei Räume nach der Sanierung mit einer Lüftungsanlage ausgestattet. Es wurden ein Lüfterpaar pro Raum in Räumen Arbeiten-1 und Arbeiten-2 eingebaut und auf Lüftungsstufe 1 (7 m³/h) programmiert. Der Einfluss der Lüftungsanlagen in diesen Räumen kann in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Die Fenster blieben nach der Sanierung immer geschlossen, was die Wärmeverluste verringert. Vor der Sanierung blieben die Fenster im Schnitt 5 St./Tag offen. Der Energieverbrauch des Hauses wurde nicht gemessen.
- Die Raumtemperatur war allgemein 1.9 K höher (0.6 K höher als die durchschnittliche Temperaturänderung des Hauses), da die Abluftwärme zurückgewonnen wird.
- Obwohl sich die Anzahl der Bewohner verringert hat, waren CO₂-Werte leicht erhöht in Räumen mit vorwiegend geschlossenen Fenstern wegen des niedrigeren Luftaustausches (26 ppm höher im Schnitt, was im Messfehlerbereich liegt).
- Bei der Inbetriebnahme wurde bei den Pendellüftern die Stufe 1 gewählt und eingestellt. Es ist wahrscheinlich, dass diese Stufe während der Messung nicht geändert wurde. Diese Stufe hat einen niedrigen Volumenstrom von 7 m³/h (0.19-0.25 h⁻¹ pro Raum). Das könnte die höheren CO₂ Werte nach der Renovierung erklären, da diese Werte nicht die Mindestluftwechselrate der DIN 1946-6 erreichen.

8.1.6 Rebound-Effekt der Nutzer

In dieser Studie können die Auswirkungen der Sanierung auf den Nutzer erkannt werden. Der Rebound-Effekt ist die Änderung des Nutzerverhaltens durch eine Effizienzsteigerung der Technik, was einen höheren Verbrauch verursacht, und damit werden ggf. auch die geplanten Einsparungen verringert (Galvin 2014).

Ein Rebound-Effekt wurde im Fensteröffnungsverhalten im Demonstrationsgebäude Haus erkannt. Nachdem die Temperaturen in gesamtem Haus höher sind, fühlen die Nutzer sich thermisch wohler als davor (Abbildung 51 links).

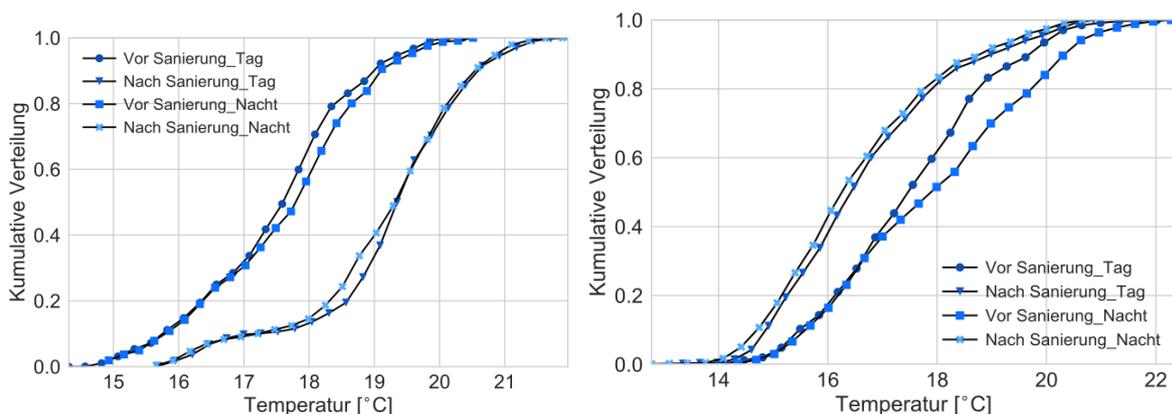


Abbildung 51: Kumulative Verteilung der Temperatur in Winter (Links: gesamtes Haus; Rechts: Schlafzimmer 2) (Quelle: ISE).

Eine kumulative Verteilung von 80 % von einer 20°C Temperatur bedeutet, dass die Temperatur 80% der Zeit unter 20°C steht.

Trotzdem gab es niedrige Temperaturen nach der Sanierung im Schlafzimmer 2 (Abbildung 51). Die Fenster im Schlafzimmer 2 waren in der zweiten Messperiode immer offen (gekippt). Vor der Renovierung waren diese Fenster kaum offen (3.5% im Durchschnitt). Die Verhaltensänderung hat ihren Grund in der Luftqualität: die Nutzer empfinden „schlechte“ Luftqualität und machen daher die Fenster auf. Ein anderer möglicher Grund ist, dass durch die zusätzliche Dämmung die operative Temperatur (arithmetisches Mittel zwischen der Raumlufttemperatur und der Strahlungstemperatur der Umgebungsflächen) gestiegen ist und als „zu warm“ empfunden wurde. Die operative Temperatur wurde nicht gemessen. Gekippte Fenster in Winter verursachen hohe Wärmeverluste und dadurch erhöht sich der Heizenergieverbrauch. Um die Luftqualität zu bewerten wurden die kumulativen Verteilungen in der Abbildung 52 dargestellt. Im gesamten Haus gab es einen niedrigeren CO₂ Gehalt vor der Sanierung (wahrscheinlich wegen der höheren Infiltrationsluftwechselrate) außer im Schlafzimmer 2. Es ist wahrscheinlich, dass der niedrigere CO₂ Gehalt im Schlafzimmer 2 nach Sanierung sich durch den hohen Anteil an Fensteröffnung erklärt.

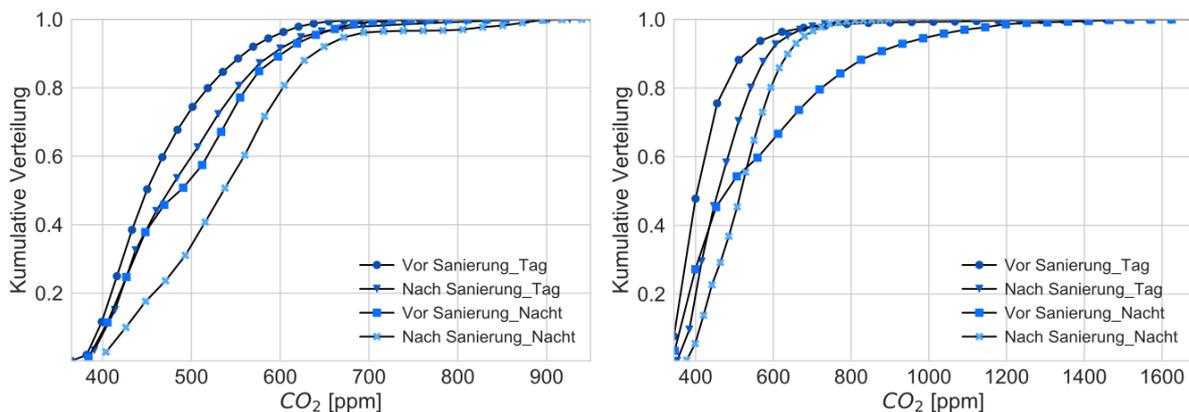


Abbildung 52: Kumulative Verteilung des CO₂ im Winter (Links: gesamtes Haus; Rechts: Schlafzimmer 2).

8.1.7 Schlussfolgerungen

- Das insgesamt höhere Temperaturniveau ist ein Anzeichen für eine erfolgreiche Sanierung und bietet einen besseren thermischen Komfort in der Heizperiode. Der Energieverbrauch wurde nicht gemessen.
- Es besteht ein niedrigeres Schimmelpilzrisiko in den kritischen Räumen: bei ähnlichen Werten der relativen Luftfeuchtigkeit sind die Temperaturen höher.
- Die Lüftungsanlagen ermöglichen kleinere Wärmeverluste, da die Abluftwärme zurückgewonnen wird.
- Der CO₂ Gehalt hat sich nach der Renovierung auch in den Räumen mit Lüftungsgeräten leicht verschlechtert. Das liegt wahrscheinlich daran, dass diese Räume nicht intensiv benutzt wurden (was an der geringen Fensteröffnung und am geringen insgesamt CO₂ Gehalt gesehen werden kann und auch daran, dass die Gerätesteuerung nicht genutzt wurde).

- Der Rebound-Effekt verursacht Ineffizienzen: die Nutzer empfinden „schlechte“ Luftqualität und öffnen die Fenster öfter als vor der Renovierung, was Energieverluste verursacht.

8.2 Thermografie

8.2.1 Messung

Am 28.2.2018 um 6.00 Uhr wurde die thermografische Analyse erneut durchgeführt, um die Wärmebrücken und Unregelmäßigkeiten der Fassade sowie Undichtigkeiten der Fenster- und Türöffnungen nach der Sanierung zu überprüfen. Da in die Laufe des Projektes nur zwei Fenstermaschinen an der Ostfassade nach Wunsch der Besitzer eingebaut wurden, werden die Ergebnisse die thermografischen Situationen nur an der Nord- und Ostfassade analysiert und gezeigt.

Projekt	Schwengelborn Straße 14
Ort	Erfurt
Objekt / Standort	Doppelhaushälfte
Prüfingenieur	Hr. Liedloff, Beck +Heun
Auftragsnummer	002-2018.02.27
Anwesende	Fr. GLiem, Hr. Liedloff
Gerätetyp	IR-E9 mobil
Emissionsgrad	0.98 [-](Annahme)
Umgebungstemperatur	-11,3 [°C]
Relative Luftfeuchte	87,6 [%]
Windgeschwindigkeit	0,5 [m/s]
Distanz	verschieden [m]

8.2.2 IR-Bilder

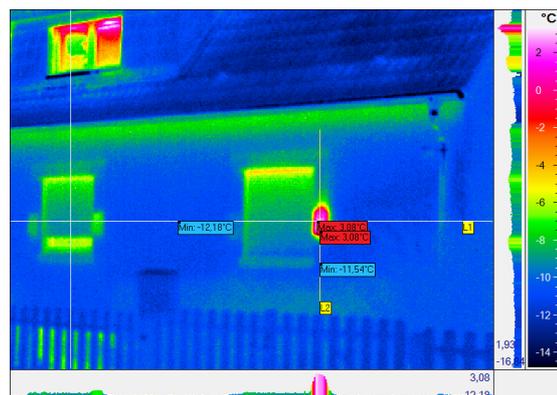


Abbildung 53: Vergleich von Foto und IR-Bild der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) nach der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).

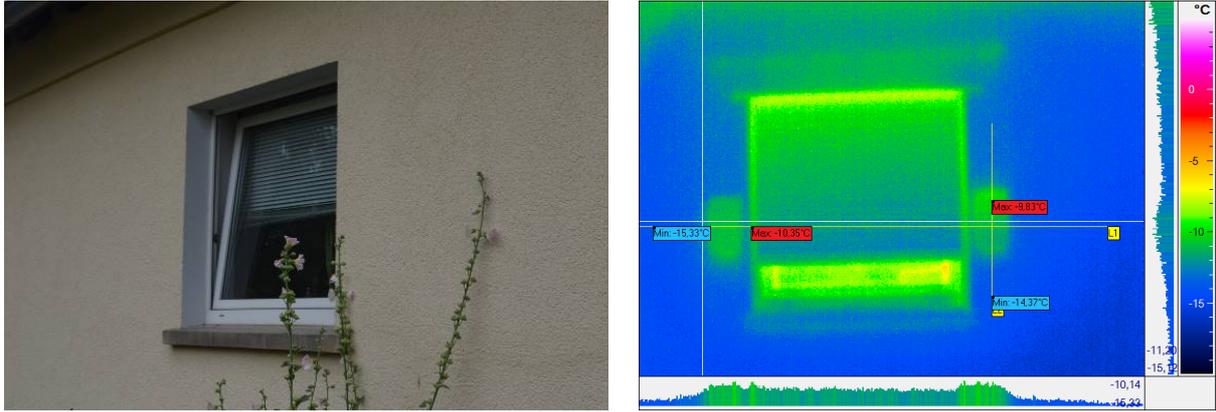


Abbildung 54: Vergleich von Foto und IR-Bild der Fenstermaschine (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) nach der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).

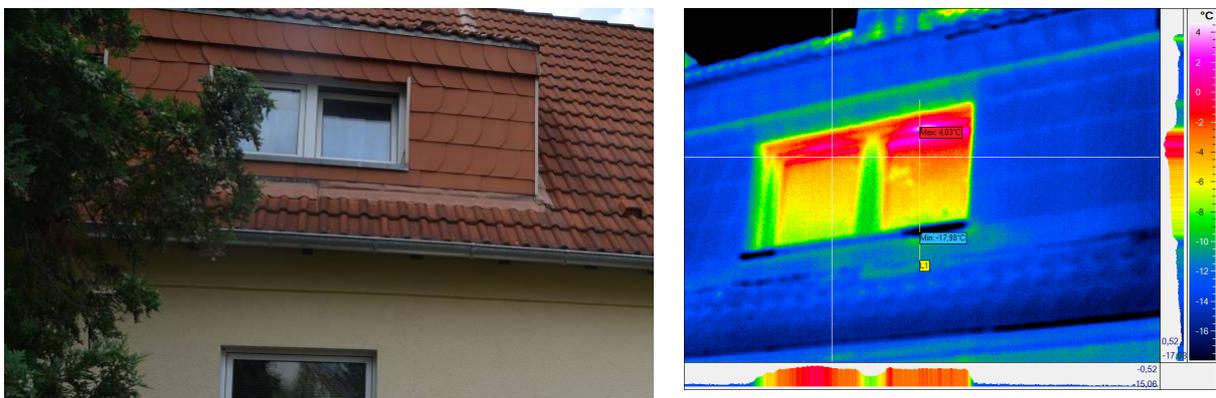


Abbildung 55: Vergleich von Foto und IR-Bild des Daches an der Ostfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) nach der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).

An der Ostfassade sind blaue Bereiche zu erkennen, die einen verbesserten niedrigen Wärmeabfluss wegen der zusätzlichen Wärmedämmung zeigen. Das gesamte Mauerwerk würde gedämmt und die zwei Fenstermaschinen eingebaut (siehe Abbildung 53). Die kritische Stelle in rosa Farbe ist die dezentrale Lüftungsanlage, die einen elektrotechnischen Fehler (zu große Luftabfuhr) aufweist (siehe Abbildung 53). Der Fehler wurde später beseitigt. In Abbildung 54 ist zu erkennen dass eine energetische Verbesserung die niedrigen Oberflächentemperaturen mit Bereich des Fensters erreicht wurden. Erhöhte, aber nicht kritische Oberflächentemperaturen sind zu beobachten wo der Rollladen nicht ganz geschlossen ist. Das Dach wurde nicht energetisch saniert. Auf Abbildung 55 ist ein erhöhter Wärmeabfluss durch die alten Fenster zu beobachten, die Wärme geht durch die Dachgaube und die Fenster verloren.

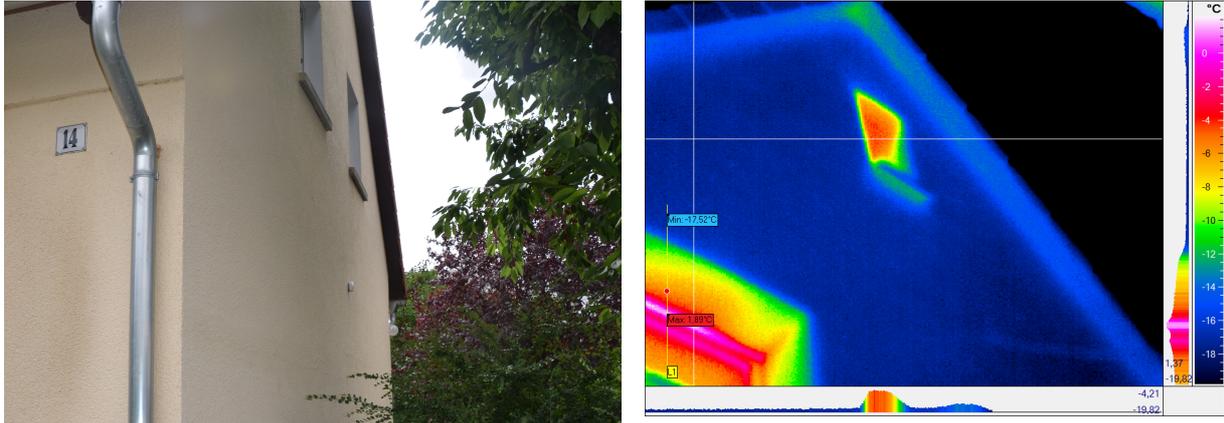


Abbildung 56: Vergleich von Foto und IR-Bild der Nordfassade (hohe Temperatur=lila, niedrige Temperatur=blau) nach der energetischen Sanierung (Quelle: Beck+Heun).

Gleichmäßig niedrige Temperaturverteilung ist an der Nordfassade (siehe Abbildung 56) wegen der zusätzlichen Wärmedämmung und großer Wärmeverluste wegen der alten Fenster (die nicht ausgetauscht wurden) zu beobachten.

8.2.3 Schlussfolgerungen

- Durch die zusätzliche Wärmedämmung an allen Fassaden und zwei Fenstermaschinen wurden die Wärmebrücken und Undichtigkeiten des Einfamilienhauses verbessert.
- Die Oberflächentemperaturen der Fassade sind gleichmäßig
- Die Lüftungsanlagen ermöglichen kleinere Wärmeverluste, müssen aber richtig konfiguriert sein
- die Nutzer ändern ihr Verhalten nicht und öffnen die Fenster öfter als vor der energetischen Sanierung

8.3 Wirtschaftliche Berechnung

8.3.1 Prinzipskizze

Die Fenstermaschine wurde grafisch im Konstruktionsdetail dargestellt und Kostenkennwerte (mit Mehrwertsteuer) ermittelt. In der wirtschaftlichen Berechnung werden die Fenstermaschine und Fenstertausch gegenüber gestellt. Alle Detailinformationen und die daraus abgeleiteten Auswertungen der Kostenplanung stammen von abgerechneten Forschungsprojekt und wurden vom Projektpartner Beck&Heun und Lehrstuhl für Baukonstruktion und Baustoffkunde ermittelt.

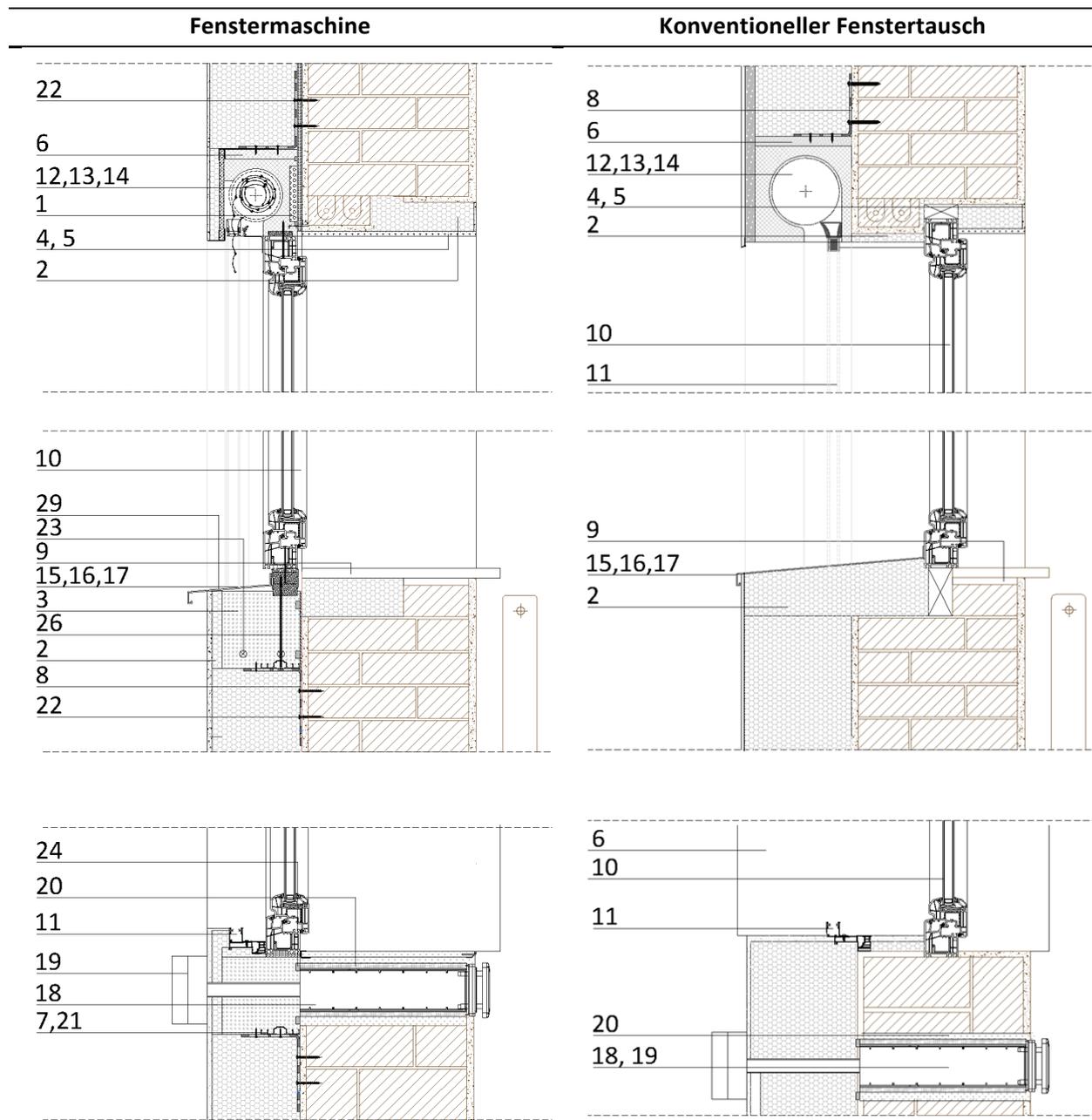


Tabelle 14: Prinzipskizze für Fenstermaschine und Fenstertausch mit dezentraler Lüftungsanlage und Sonnenschutzsystem (Quelle: TUM EBB).

8.3.2 Materialkosten/Detailbeschreibung/Legende

Bei jedem Produkt ist anhand der Vorfertigung und Montage (FM=Fenstermaschine, FT=Fenstertausch) die verbrauchte Menge und der Preis erfasst, um die relevanten Unterschiede klar darzustellen. Die Nummerierung bezeichnet die Position der verwendeten Materialien auf der Prinzipskizze. Am Ende der Tabelle wurden dann die Gesamtkosten für Fenstermaschine und Fenstertausch mit der dezentralen Lüftungsanlage und Sonnenschutzsystem zusammen berechnet.

Nr.	Aufbau	FM Menge	FM Gesamtkosten in EUR	FT Menge	FT Gesamtkosten in EUR
1	Slentite (B+H)	1½ Stück	14,40	0 Stück	0
2	Neopor 25kg/m³	1,5 m³	21,78	2 m³	29,04
3	PU 60kg/m³	0,1m³	3,15	0 m³	0
4	Leibungsplatte mit integrierter Putzschiene (Schmidt Formteilbau Kalziumsilikatplatten)	3,5 m	126	1,2 m	43,2
5	Selbstklebendes Umrandungsprofil für Leibungsplatte (Protekt)	3,5 m	10,5	1 m	3
6	Phonotherm 10mm (B+H)	1,2 m²	48	1,2 m²	48
7	Aluminium Shadowschiene (B+H)	4,5 m	9	4,5 m	9
8	Befestigungswinkel Edelstahl 100x160x5 (Wagner Stanztechnik)	13 Stücke	52	4 Stück	16
9	Fensterbank Kararamarmor 450x1100x20 (Polinski Fensterbänke)	1 Stück	49,25	1 Stück	49,25
10	Kunststofffenster2x (Aluplast ideal 4000 , Bewa plast)	1 Stück	225,10	1 Stück	225,1
11	Führungsschienen (RG-TG MINI 75mm B+H)	2,4 m	8,55	2,4 m	8,55
12	Rollladenpanzer (Heroal Hybrid RSH)	1 Stück	94,00	1 Stück	94,00
13	Welle (Heroal 40mm 8-Kantwelle)				
14	Motor (Elero)				
15	Fensterbank Alu (130mm Ausladung , Polinski Fensterbänke)	1 Stück	8,91	2 Stück	17,82
16	Seitliche Abschlussstücke Alu (Gleitprofil , Polinski Fensterbänke)	2 Stücke	4,28	2 Stück	4,28
17	Antidröhnmatte (Polinski Fensterbänke)	1 Stück	In Pos 15 enthalten	1 Stück	In Pos 15 enthalten
18	Lüftungsgerät AirFox 2x (ROOS)	2 Stücke	108	2 Stück	108
19	Abdeckungen 2x (Edelstahl ROKA)	2 Stücke	32	2 Stück	32
20	Rechteckschacht Kunststoff 30x300 2x (DALAP)	2 Stücke	In Pos 18 enthalten	2 Stück	In Pos 18 enthalten
21	Hammerkopfbefestiger mit Mutter und Scheibe 8x25	13 Stücke	6,5	6 Stück	3
22	Rahmendübel mit W-UR F10 Sechskantschraube AW40/SW13 Stahl verzinkt 10x10/80	26 Stücke	26	8 Stück	8
23	ASSY 3.0 Schrauben mit Senkfrästaschenkopf AW30 Teilgewinde 6x22/70	4 Stücke	1,6	0 Stück	0
24	VKP Plus Dichtungsband schwarz 15/8-12	1,6 m	1,28	1,2	0,96
25	Kabelklemme Fischer SF plus LS 3/13	6 Stücke	0,3	1 Stück	0,05
26	Fensterrahmenanker FB-FK-T30-7,5x300	6 Stücke	7,2	6 Stück	7,2

27	Fensteranschlussband Solido SL	4 m	2	4,5	2,25
28	Verglasungsklötze Breite 30mm verschiedene Dicken (Würth)	6 Stücke	0,42	4 Stück	0,28
29	Fensterbank , Zweite Dichtebene (illbruck ME 110 Allwetterfolie)	4 Stücke	2	1 Stück	0,5
30	1K Kleber Sabatac 750(SABA)	1	5,00	1 Stück	5
31	Residorplatten 10mm	0,5	26,00	0 m ²	0
Gesamt (in EUR)			893,22		705,57

Tabelle 15: Materialkosten im Vergleich für Fenstermaschine und Fenstertausch (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun).

8.3.3 Arbeitskosten

Die Arbeitskosten erfassen die Lohnkosten in Euro pro Stunde für die Montage am Demoprojekt bei der Fenstermaschine und konventionelles Fenstertausches in der Stadt Erfurt. Der Stundeneinsatz wurde für die beiden Verfahren gleich genommen, und zwar nach den Lohnkosten vom Projektpartner Beck&Heun (42,00€/h).

Phase	Aufbau	FM Stunden	FM Gesamtkosten in EUR	FT Stunden	FT Gesamtkosten in EUR
1	Vorbereitungen der Baustelle	2	84	4	168
1	Anzeichnen von Bohrungs- und Befestigungsstellen	0,5	21	1	42
1	Bohrung durch den Wand für das Anbringen der dezentralen Lüftung	0,5	21	4	168
1	Entfernen der vorhandenen Fensterbank	0,25	10,50	0,25	10,5
2	Vorbereitung des Modulrahmens	0,25	10,50	0	0
2	Verbindung der Teile des Modulrahmens (Kleben und Schrauben)	2	84	0	0
2	Anbringen der Abdichtung (Modulrahmen)	0,25	10,50	0	0
2	Montage des Modulrahmens an der Wand	1	42		
2	Befestigung des letzten Teils (Sonnenschutzmodul) am Modulrahmen	0,25	10,50	1	42
2	Stromverkabelung für Lüftungsgerät	2	84	2	84
3	Vorbereitung des WDVS Systems	1	42	2	84
3	Montage des neuen Fensters	0,5	21	2	84

4	Demontage des Bestandsfensters	0,5	21	0,5	21
4	Anbringung der Wärmedämmung (Fensterbank)	0,25	10,50	0,25	10,5
4	Vorbereitung des Platzes für Lüftungsgerät (Wand Innen)	1	42	1	42
4	Einbau des Lüftungsgeräts und Innenleibung (mit Elektro)	1	42	2	84
4	Innenputzarbeiten	2	84	1	42
4	Außenputzarbeiten	4	168	4	168
4	Abdeckhauben	0,25	10,50	0,25	10,5
Gesamt (in EUR)			819,00 EUR		1060,50 EUR

Tabelle 16: Arbeitskosten im Vergleich (Fenstermaschine und Fenstertausch) (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun).

8.3.4 Anfahrtkosten (20 Kilometer Hin- und Rückfahrt)

Für die Berechnung der zugehörigen Anfahrtkosten wurde Hin- und Rückfahrt (20 Kilometer) pro Handwerk genommen. Es wurde definiert, dass bei der energetischen Sanierung am Demogebäude in Erfurt alle Handwerke als der gleichen Stadt kommen.

Phase	Tätigkeit auf der Baustelle	Fenstermaschine			Fenstertausch					
		*B+H	*E	*F	*F	*FN	*FB	*SS	*T	*LI
1	Baustelle Besichtigung	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	Baustelle -Vorbereitung und Montage der Fenstermaschine	1								
2	Demontage und Montage des neuen Fensters				1					
2	Sonnenschutz einbau							1		
2	Einbau des neuen Lüftungsgerätes									1
2	Einbau der Fensterbank						1			
3	Anarbeiten des WDVS			1	1					
5	Demontage des Bestandsfensters und Einbau des Lüftungsgerätes	1	1							
6	Die Innenverkleidung und Putzarbeiten	1		1	1				1	
Gesamt in EUR		135,00 EUR (9x0,75€/Kmx20Km)			195,00 EUR (13 x 0,75€/Km x 20Km)					

Tabelle 17: Anfahrtkosten im Vergleich (*B+H=Beck & Heun, E=Elektriker, F=Fassadenbauer, FN=Fensterbauer, FB=Fensterbankbauer, LI=Lüftungsinstallateur, SS=Sonnenschutzbauer, T=Trockenbauer) (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun).

8.3.5 Gesamt Kostenberechnung

Die Tabelle unten zeigt die Gesamt Kostenberechnung für die Fenstermaschine und den Fenstertausch mit der dezentralen Lüftungsanlage und Sonnenschutzsystem. Die Angaben sind im Euro und entsprechen den realen Kosten des Forschungsprojekts.

	Fenstermaschine (in EUR)	Konventioneller Fenstertausch (in EUR)
Materialkosten	893,22	731,57
Arbeitskosten	819,00	1060,50
Anfahrtskosten	135,00	195,00
Gesamt (in EUR)	1847,22 EUR	1961,07 EUR

Tabelle 18: Gesamt Kostenberechnung in EUR (Quelle: TUM EBB, Beck+Heun).

Kostenberechnungen der Fenstermaschine und Fenstertausch geben, dass die Gesamt Kosten (Materialkosten, Arbeitskosten, Anfahrtskosten) bei der Fenstermaschine um 6 Prozent niedriger als die des Fenstertausches liegen. Anhand der Arbeitskosten kann man erkennen, dass konventioneller Fenstertausch mit den beteiligten Gewerken um 27 Prozent teurer als die Fenstermaschine ist. Im Unterschied zur Fenstermaschine treten beim Fenstertausch oft gestalterische, funktionale und organisatorische Probleme auf, die aber in dieser Berechnung nicht vorkommen. Wie erwartet sind die Anfahrtskosten der sechs beteiligten Gewerke um 31 Prozent höher als bei der Fenstermaschine mit nur 3 Gewerken. Da die Fenstermaschine ein Fensterelement mit integrierter Technik und optimierten Anschlussdetails ist sind aber nachfolgend die Materialkosten um 18 Prozent höher. Bei der Fenstermaschine wurden Materialien wie Slentite, Rahmen aus Phenolharzschaum und Befestigungsmittel verwendet die beim Fenstertausch ausfallen.

8.3.6 Schlussfolgerungen

-Die Vereinfachung und Beschleunigung im Bauablauf erfordert eine präzise Bauaufnahme und eine größere Planungsvorbereitung

-Ein großer Zeitverlust entsteht auf der Baustelle durch die Abhängigkeiten der beteiligten Firmen untereinander. Die Fenstermaschine wird von einer einzigen Firma eingebaut und spart 6 Prozent im Vergleich zum konventionellen Fenstertausch an Lüftungsarbeiten, Putzarbeiten, Sonnenschutzarbeiten und deren Koordination ein

- die Integration der dezentralen Lüftungsanlage im Fensterelement war wegen der Größe des (vom Industriepartner vorgegebenen) Elements nicht möglich. Ein Eingriff in den Rohbau (Bohrung durch die Wand) war erforderlich.

8.4 Nutzerbefragung

8.4.1 Befragung 2018

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde auch die Akzeptanz der Fenstermaschine durch Nutzerbefragung im Juni 2018 zur technischen Gebäudequalität, den unterschiedlichen Montagephasen und der energetisch-gestalterischen Performance durchgeführt. Das Ziel war, die Fenstermaschine in technischer und soziologischer Hinsicht zu bewerten, um den Umgang des Nutzers mit innovativer Technik zu untersuchen.

Die zwei Bewohner des Einfamilienhauses wurden persönlich (mit dem Fragebogen) vom Industriepartner Beck und Heun angesprochen, um ihre Wahrnehmung und Erfahrungen mit dem Fassadenelement zu teilen. Diese Informationen wurden analysiert, so dass die Qualität und die Montage der Fenstermaschine in der Zukunft noch verbessert werden kann.

Zu Beginn des Forschungsprojektes wurde vermutet, dass für die Bewohner bei der energetischen Sanierung verbesserte Wohnqualität (Lufttemperatur, Feuchtigkeit, Tageslicht) bei minimalen gestalterischen Änderungen erreicht wird. Die Nutzer hatten dabei aber keinen Einfluss auf die technischen Lösungen und den Montageablauf der Fenstermaschine, was zur positiven oder negativen Beurteilung führen konnte.

Die Befragung besteht aus 16 Fragen und wurden zu vier Themen-Gruppen zusammengefasst: Vor dem Einbau der Fenstermaschine (Produktenwicklung), der Einbau der Fenstermaschine (Baustelle), nach dem Einbau der Fenstermaschine (Produktfunktion) und Generelle Fragen. Der erste Themenbereich beschäftigte sich mit der Motivation, der Erwartungen und Kenntnissen der Nutzer über die Fenstermaschine. Herausgefunden werden sollte, ob die Bewohner aktiv oder inaktiv an der Produktentwicklung mitarbeiten und ob sie darüber zufrieden sind.

Übersicht von den Fragen (Quelle: EBB):

Vor dem Einbau der Fenstermaschine (Produktentwicklung)

- 1. Warum haben Sie sich vor der energetischen Sanierung für den Einbau der Fenstermaschine entschieden? Welche Qualitäten haben Sie überzeugt?*
- 2. Waren Ihnen die Produktdetails (Sonnenschutzsystem, Lüftungssystem, Verglasung) der Fenstermaschine im Vorfeld bekannt?*
- 3. Hatten Sie irgendwelche Bedenken über das Forschungsprojekt vor dem Einbau? Welche?*
- 4. Vor dem Einbau der Fenstermaschine wurde die Monitoring (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂) in Ihren Räumen durchgeführt. Waren Sie mit der Monitoring zufrieden? Warum?*
- 5. Das Konzept der Fenstermaschine (vorgefertigtes Sanierungsfenster mit der integrierten Technik) wurde Ihnen vor der Sanierung erklärt. Wie zufrieden waren Sie im Allgemeinen mit dem Konzept der Fenstermaschine vor der Sanierung?*

Der Einbau der Fenstermaschine (Baustelle)

- 6. Was hat Ihnen bei der Baustelle gefallen?*
- 7. Was hat Ihnen auf der Baustelle nicht gefallen?*
- 8. Wie viele Personen haben in der Zeit der Baustelle in der Wohnung gewohnt?*
- 9. Verlieft der Einbau der Fenstermaschine (Baustelle) so wie Sie es vorgestellt haben? Warum?*

Nach dem Einbau der Fenstermaschine (Produktfunktion)

10. Wie finden Sie die Behaglichkeit (Luftqualität, Lichtqualität, Raumklima) in den Räumen, wo die Fenstermaschine montiert wurde?

11. Wie finden Sie die Fassadengestaltung/Außen (Dicke der Dämmung, Luftauslässe, Leibungen,...) nach dem Einbau der Fenstermaschine?

12. Wie finden Sie die innere Raumgestaltung (Leibung, Fenstersitz nach Außen verschoben, Luftauslässe) nach dem Einbau der Fenstermaschine? Warum?

Generelle Fragen

13. Würden Sie das Produkt die Fenstermaschine anderen Personen empfehlen? Warum?

14. Wie wichtig sind Ihnen die folgenden Aspekte (Produktqualität, Baustelle: Zeit der Montage, Baukosten, Kundenbetreuung, Energieersparnis, Behaglichkeit) bei der Fenstermaschine?

15. Bitte geben Sie auf der Grundlage Ihrer derzeitigen Erfahrung (Fensteröffnung, Lüftung) mit der Fenstermaschine an, inwiefern Sie mit den folgenden Aussagen einverstanden sind: Die Fenstermaschine erfüllt meine Bedürfnisse. Die Nutzung von der Lüftung bei der Fenstermaschine ist einfach.

16. Hatten Sie bei der Nutzung von der Fenstermaschine irgendein Problem? Welches?

Die Bewohner des Einfamilienhauses sind ein Paar zwischen sechzig und siebzig mit Hochschulausbildung. Sie besitzen das Haus, haben schon ein Teil erweitert und wollten die energetische Sanierung des alten Teils durchführen, um das Hauses aufzuwerten.

Vor dem Einbau der Fenstermaschine (Produktentwicklung) wurde den Besitzern das Konzept der Fenstermaschine erklärt. Sie hatten keine zusätzlichen Grundbedenken. Sie waren mit dem Monitoring (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Co2) vor der Sanierung zufrieden und waren zuversichtlich im Bezug auf Fenstermaschine.

Der Einbau der Fenstermaschine (Baustelle) verlief mehr oder weniger wie die Besitzer sich es vorgestellt haben. Die nötigen Arbeiten im Innenraum haben Ihnen nicht gefallen.

Die Bewohner finden die Behaglichkeit (Luftqualität, Lichtqualität, Raumklima generell) nach der Sanierung in den Räumen, wo die Fenstermaschine montiert wurde, etwas besser. Die innere Raumgestaltung (Dicke der Dämmung, Luftauslässe, Leibungen,...) und Fassadengestaltung Außen finden Sie aber wegen unästhetischen Lüftungsabdeckungen etwas schlechter.

Das Produkt Fenstermaschine würden sie vielleicht anderen Personen empfehlen und Aspekte wie Produktqualität, Zeit der Montage, Baukosten, Kundenbetreuung, Energieersparnis finden sie sehr wichtig. Sie waren einverstanden mit den Aussagen, dass die Fenstermaschine die Bedürfnisse erfüllt und die Nutzung einfach ist.

8.4.2 Schlussfolgerungen

- Die Fenstermaschine wird bei den Bewohnern als interessantes Thema gesehen, es ist aber eine gewisse Skepsis in der Grundhaltung vorhanden.
- Für die Wahrnehmung der Fenstermaschine ist entscheidend, was von der Fenstermaschine zu sehen ist. Eine Zurückhaltung der Bewohner gegenüber der neuen sanierten Fassade ist wegen der unästhetischen Auslässe entstanden.

- Der Wohnkomfort (Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Co2) wird nach dem Einbau der Fenstermaschine positiver als früher bewertet.
- Die Arbeiten an der Fassade und in den Innenräumen wurden durch die Befragten stark wahrgenommen. Als zentrales und einziges Problem stellten sich die Innenarbeiten heraus, die als störend empfunden wurden.
- Die Befunde aus der Befragung haben die frühere Prognose bestätigt: eine bessere Energieeffizienz und Wohnkomfort ohne gestalterische Änderungen an der Fassade oder im Innern werden von den Bewohnern erwartet.

9 Fazit und Ausblick

Mit dem Forschungsvorhaben wurde anhand eines konkreten, kleinen Sanierungsprojektes Einfamilienhaus in Erfurt die Praxistauglichkeit der Fenstermaschine theoretisch und experimentell untersucht. Die zwei Fenster eines bestehenden Einfamilienhauses wurden durch ein weiterentwickeltes Sanierfenster ersetzt und der gesamte Planungs- und Bauprozess am Gebäude begleitet, geprüft und dokumentiert. Insgesamt konzentrieren sich die Untersuchungen auf den Bauprozess im Vergleich zum konventionellen Fenstertausch.

In einer Marktanalyse wurden die Hemmnisse, die einer Umsetzung aus Sicht von Bauherren, Wohnungsbauunternehmer, Verbände, Planer und Handwerk entgegenstehen, erarbeitet. Das Marktpotenzial der Fenstermaschine würde nach den Erkenntnissen nur mit hohem Grad an Vorfertigung, Minimierung bauphysikalischer und konstruktiver Probleme bei der Integration der Komponenten (Modulrahmen, Fenster, Sonnenschutz, Lüftungsgerät) und zum konventionellen Fenstertausch vergleichbare Kosten erreicht.

Das Forschungsprojekt Fenstermaschine I behandelte nach Auswahl einer Variante (nach außen öffnendes Fenster) die Erhöhung des Tageslichtanteils durch Integration des Blendrahmens im Modulrahmen der Fenstermaschine. Damit schränkten die Fensterprofile den Lichteinfall nicht ein und Tageslicht fiel über die gesamte Rohbauöffnung ein. So ergab sich ein Fensterelement mit einem um ca. 30 % höheren Glasanteil. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte die Idee noch einmal untersucht werden. Da bei nach außen öffnenden Fenstern ein außenliegender Sonnenschutz nicht möglich ist, die Reinigung der Fenster in den oberen Geschossen erschwert ist, eine Überdämmung des Blendrahmens ausfällt und die Größe des Modulrahmens sich vergrößert wurden die Integration des Blendrahmens in den Rahmen diesmal nicht weiter vertieft.

Beim dezentralen Lüftungsgerät wurde die Periodenzeit optimiert und damit der Wärmerückgewinnungsgrad leicht erhöht. Die Lüftungsgeräte in den Bereich der Fensterbrüstung zu bauen war es nicht möglich, da auf der Innenseite des Einfamilienhauses Heizkörper angebracht sind. Die seitliche Ausführung mit Wandausschnitt erlaubte, die Glasfläche nicht zu reduzieren und die Distanz zwischen den zwei Pendellüftern nochmals zu vergrößern und somit Kurzschlüsse besser zu vermeiden. Die bessere gestalterische Integration der dezentralen Lüftungsanlage im Fensterelement war wegen der Größe des (vom Industriepartner vorgegebenen) Elements nicht möglich. Ein Eingriff in den Rohbau (Bohrung durch die Wand) war erforderlich. Es zeigte sich, dass es weitere Potenziale zur Anpassung, Weiterentwicklung und Integration der dezentralen Lüftung mit den Schwerpunkten Schallschutz/Schallemissionen und Filterung gibt.

Zur Vermeidung von Wärmebrücken baut die Fenstermaschine auf dem Prinzip der Fensterzarge auf, einem umlaufenden Bauteil in welches das Fenster und die Gebäudetechnik eingesetzt sind. Die Einzelteile des Modulrahmens sind verklebt und verschraubt. Die Fenstermaschine ist mit Metallwinkeln an die Bestandswand des Einfamilienhauses angeschraubt und mit EPS-Dämmung nachgedämmt. Am hinteren Teil des Modulrahmens wurden die Abdichtungen angebracht, um sich der ungeraden Wand des Bestands anzupassen. Von außen und innen sind alle Befestigung unsichtbar.

Die Abdichtung der Fenstermaschine zum Mauerwerk erfolgt mittels Dichtungsbändern, die in die hintere Seite des Elements integriert sind. In der Werkstatt wurden Nuten in den Modulrahmen gesägt, um ausreichend Platz sicherzustellen. Nach dem Einlegen der Dichtbänder in die Nuten wird durch Anschrauben eine kraftschlüssige Verbindung des Dämmmoduls zur Wand gebildet. Da die Fenstermaschine an allen Seiten mit Dämmung nachgedämmt ist und die Fensterbänke in die Abdichtung integriert sind ist auch die Regenabdichtung gewährleistet.

Die experimentellen und numerischen Ergebnisse lassen erkennen, dass zusätzlicher Zeitaufwand bei der Fenstermaschine durch eine präzise Bauaufnahme und eine größere Planungstiefe entsteht. Die Fenstermaschine wurde in 6 Monaten mit den Projektpartnern weiterentwickelt und nur in zwei Tagen komplett montiert. Die Fenstermaschine wird von einer einzigen Firma eingebaut und spart um 6 Prozent Gesamtkosten ohne Betrachtung von Bauschäden, Bauverzögerung und mangelhafter Ausführung (im Vergleich zum konventionellen Fenstertausch).

Entwicklung, Anwendung und wissenschaftliche Begleitung eines vorgefertigten Fensterelementes mit integrierter Technik für die energetische Sanierung wurden durchgeführt und die Ziele der Forschungsarbeit somit erreicht. Im eingebauten Zustand bietet die Fenstermaschine bessere Innenraumqualität, Energieeffizienz und Kostenersparnis. In Zukunft sollen die technischen Aspekte so weiterentwickelt werden, dass die Fenstermaschine noch gestaltungsattraktiver wird.

Vortrag (Konferenzen)

- Rosenheimer Fenstertage 2017, 12.10.2017, Rosenheim, Deutschland
- Academic Leaders Program 2018, 29.01.2018, Puebla, Mexiko
- Fenster-Tür-Treff 2018, 8.3.2018, Alpbach, Österreich

Publikation

- Pungercar, V., Musso, F., & Bodensteiner, C. (2017). Prefabricated window with integrated technology for refurbishments "Window Machine" . ne-xt facades – Adaptive Facade Network , S. 48-49)
- Pungercar, V. (Oktober 2017). Die Fenstermaschine Vorgefertigte Sanierungsfenster mit integrierter Technik. (i. Rosenheim, Hrsg.) Rosenheimer Fenstertage 2017 , 23.)
- Vesna, P. (8.-9.. März 2018). Die Fenstermaschine . Vorgefertigte Sanierungsfenster mit integrierter Technik. Fenster Türen Treff 2018 Tagungsband , S. 6-11.)

10 Literaturverzeichnis

BASF. (20. 04 2015). *BASF*. Abgerufen am 14. 6 2018 von SLENTITE:
<http://www.polyurethanes.basf.de/pu/solutions/de/content/group/innovation/products/slentite/intro>

BBSR. (2015). *Energetische Sanierung von Großwohnsiedlungen*. Bonn: BBSR. BBSR. (2016). *Prognose der Bestandsmaßnahmen und Neubauleistungen im Wohnungsbau und im Nichtwohnungsbau*. Bonn: BBSR.

BBSR. (2015). *Wohnungsmarktprognose*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bonn: BBSR.

Beck+Heun. (10. 3 2015). *Beste Werte fürs Haus*. Abgerufen am 14. 2 2017 von Beck+Heun:
<http://www.beck-heun.de>

BMWi. (2014). *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. München: BMWi.

Bodensteiner, C., Musso, F., Dinkel, A., Coydon, F., Akarcay, A., & Liedloff, F. (2017). *Vorgefertigte Sanierfenster mit integrierter Technik, „Fenstermaschine“*. München: Fraunhofer IRB Verlag.

Bueno, B., Wienold, J., Katsifaraki, A., & Kuhn, T. (2017). A general method for the evaluation of the thermal impact of complex fenestration systems in building zones. In *Energy and Buildings 155* (S. 43–53).

Bueno, B., Wienold, J., Katsifaraki, A., & Kuhn, T. (2015). Fener: a Radiance-based modelling approach to assess the thermal and daylighting performance of complex fenestration systems in office spaces. In *Energy and Buildings 94* (S. 10-20).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. (09. 04 2014). *Klimaschutz*. Abgerufen am 24. 11 2016 von Nationale Klimapolitik: www.bmub.bund.de
Bundesverband Sonnenschutztechnik. (2017). *Bundesverband Sonnenschutztechnik*. Von presse.senft-partner.at: http://presse.senft-partner.at/News_Detail.aspx?id=25477&menueid=1660&tab=1&imageid=28396 abgerufen
CIS Solartechnik GmbH & Co. KG, Sto AG, TU Dresden - Institut für Baukonstruktion, Zentralverband Deutsches Baugewerbe. (2012). *Integration von CIS-Photovoltaik in Wärmedämm-Verbundsysteme*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Cremers, J. (2015). *Atlas Gebäudeöffnungen Fenster, Lüftungselemente, Aussentüren*. München: Detail.

Department of Psychiatry and Psychotherapy, Center for Medical Physics and Department of Psychiatry and Psychotherapy, Center for Medical Physics and Biomedical Engineering, Medical University of Vienna. (14. 2 2012). *National Library of Medicine*. Abgerufen am 5. 10 2017 von Differential modulation of the default mode network via serotonin-1A receptors.:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22308408>

Der Maler und und Lackiermeister. (2006). Empfehlungen für den Einbau/Ersatz von Metallfensterbänken. W Sachon.

Detail. (2016). Modulare Bauformen – Trend oder Zukunftsmodell? *Detail Research* , 6.
DIN 4108 . (2013). Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2:
Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.

Ender, T., Gritzki, R., Hartmann, T., & Richter, W. (2004). *Bewertung von dezentralen, raumweisen Lüftungsgeräten für Wohngebäude sowie Bestimmung von Aufwandszahlen für die Wärmeübergabe im Raum infolge Sanierungsmaßnahmen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Fachverband der Stuckateure für Ausbau und Fassade. (2018). Richtlinie Metallanschlüsse an Putz und Außenwärmedämmung . Stuttgart.

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München. (29. 11 2013). *Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe*. Abgerufen am 12. 7 2017 von http://www.fiw-muenchen.de/media/pdf/metastudie_waermedaemmstoffe.pdf

Giebeler, G., Fisch, R., Krause, H., Musso, F., Petzinka, K.-H., & Rudolphi, A. (2008). *Atlas Sanierung*. München: Burkhäuser.

Greml, A., Blümel, E., Kapferer, R., & Leitzinger, W. (2004). *Technischer Status von Wohnraumlüftungen*. Kufstein: bmvit.

Hausladen, G., de Saldanha, M., Liedl, P., & Sager, C. (2004). *Clima Design, Lösungen für Gebäude, die mit weniger Technik mehr können*. München: Callwey.

Heinz, E. (2016). *Wohnungslüftung -frei und ventilatorgestützt*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
Illuminating Engineering Society of North America. (IES LM-83-12.). *IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*. ISBN # 978-0-87995-272-3.
Institut Wohnung und Umwelt. (2018). *Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016*. Darmstadt.

marketmedia24. (12. Februar 2017). <http://www.marketmedia24.de>. Abgerufen am 19. juni 2017 von http://www.marketmedia24.de/PDFs/Presseinfos/2017/Presseinfo_Gardinen-Sonnenschutzmarkt_2017.pdf

Mürmann, H. (2006). *Wohnungslüftung*. Heidelberg: C.F. Müller Verlag.

Schreinermeister, J. (29. April 2013). Hilfskonstruktionen für die Montage. *Glasswelt* , S. 75.

Statistisches Bundesamt. (2015). <https://de.statista.com>. Von Anzahl der Zuwanderer nach Deutschland von 1991 bis 2016:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28347/umfrage/zuwanderung-nach-deutschland/> abgerufen

statista. (12 2017). *statista*. Abgerufen am 15. 1 2018 von Smart Home Report 2017 - Control and Connectivity: <https://de.statista.com/outlook/280/137/vernetzung-und-steuerung/deutschland#>

Statistisches Bundesamt. (2018). *Bauen und Wohnen*. Abgerufen am 11. 5 2018: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Bauen/Bauen.html>

Statistisches Bundesamt. (23. Dezember 2016). *Destatis Statistisches Bundesamt*. Abgerufen am 15. Januar 2017 von Presse & Service: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/12/PD16_473_122pdf.pdf?__blob=publicationFile

Stiell, W. (2009). *Typische Schadensbilder bei Fenstern und Fassaden – Mängelschwerpunkte. Rosenheimer Fenstertage 2009*. Rosenheim: ift Rosenheim.

Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V. (2017). *Brandschutzmaßnahmen*. Achern: DeSignInc.

Voigtländer, P. D. (2008). *Herausforderungen für die Immobilienwirtschaft*. Köln: IW Köln.