

## **Vorgefertigte Sanierfenster mit integrierter Technik „Fenstermaschine“**

Abschlussbericht zum Förderprojekt SWD – 10.08.18.7- 13.22  
April 2016

### Autoren:

Christian Bodensteiner, Dipl.-Ing. (FH) Architekt, TUM (Projektleitung)  
Prof. Dipl.-Ing. Florian Musso, TUM  
Arnulf Dinkel, Dipl.-Ing. Architekt, ISE  
Fabien Coydon, Dipl.-Ing., ISE  
Atilla Akarcay, Dipl.-Ing., B+H  
Frank Liedloff, M.Sc. Dipl.-Ing. (FH), B+H

Technische Universität München  
Fakultät für Architektur  
Institut für Entwerfen und Bautechnik  
Lehrstuhl für Baukonstruktion und Baustoffkunde  
Arcisstraße 21  
80333 München  
+49. (0)89. 289-22353  
christian.bodensteiner@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

Heroal GmbH & Co. KG  
Österwieher Straße 80, 33415 Verl





Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



Bundesministerium  
für Verkehr, Bau  
und Stadtentwicklung

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: II 3-F20-12-1-096 / SWD – 10.08.18.7- 13.22)

Projektlaufzeit: Oktober 2013 bis April 2016

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

Das Forschungsprojekt wurde unterstützt durch:

Fa. Achenbach  
Balanstraße 97, 81539 München  
Zusammenbau der Komponenten Variante 1 für Baumesse

Fa. Ehret  
Bahnhofstraße 14-18, 77972 Mahlberg  
Unterstützung bei der Untersuchung von Schiebeläden-integrierter Fotovoltaik

Fa. Fenestra  
Kneippstraße 5a, 69429 Waldbrunn  
Planung und Zurverfügungstellung des Fenesterelements Variante 1

STO SE&Co  
Ehrenbachstraße 1, 79780 Stühlingen  
Unterstützung bei der Untersuchung von Schiebeläden-integrierter Fotovoltaik

1.	Grundlagen	4
2.	Aspekte und Komponenten	7
3.	Kurzbeschreibung der Varianten	13
4.	Montageablauf	18
4.1	Montageschritte Variante 1 in Detailsequenzen	18
4.2	Montageschritte Variante 2 in Detailsequenzen	20
4.3	Montageschritte Variante 3 in Detailsequenzen	22
5.	Beschreibung der Arbeitsschritte anhand Variante 3	24
5.1	Grundlagenermittlung	24
5.2	Anbringen des Dämmmoduls an der Fassade	25
5.3	Komplettierung des Moduls	26
5.4	Fassadenfertigstellung	27
5.5	Demontage des alten Fensters	27
5.6	Anbringen der inneren Laibung	28
5.7	Revisionierbarkeit	28
5.8	Technische Daten	28
6.	Tageslichtperformance und Sonnenstrahlungstransmission	30
6.1	Simulationsergebnisse	31
6.2	Zusammenfassung	34
7.	Lüftung	35
7.1	Anforderungen	35
7.2	Umsetzung	38
8.	Bauphysikalische Untersuchung	45
8.1	Allgemein	45
8.2	Bestand	45
8.3	Ausführung der Variante 1	47
8.4	Variante 2	49
8.5	Variante 3	49
9.	Projektablauf, Prototypen, Bau 2015 und bautec 2016	52
10.	Schlussbetrachtung	57
10.1	Projektablauf	57
10.2	Ausblick	57
11.	Literatur	60

# 1. Grundlagen

Fast 40 % des Energieverbrauchs in Deutschland entfallen auf den Gebäudesektor. Während im Bereich des Neubaus der Verbrauch seit Einführung der EnEV im Jahr 2002 bzw. seit Einführung der ersten Wärmeschutzverordnung (WSchutzVO) im Jahr 1977 kontinuierlich sinkt, bedarf es im Gebäudebestand großer Anstrengungen, den Energieverbrauch zu reduzieren. Der weitaus größte Teil des Gebäudebestands datiert aus der Zeit vor 1977. Dabei schneiden Wohngebäude der Baujahre zwischen 1949 und 1979, die mehr als ein Drittel des gesamten Gebäudebestands ausmachen, im Energiebedarf am schlechtesten ab. [BMWi 2014]

Für die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung ist die energetische Sanierung dieses Bestands entscheidend. Allerdings liegt nach Angabe des BMWi die derzeitige Sanierungstätigkeit bei der Gebäudehülle bei jährlich nur knapp 1 Prozent [BMWi 2014]. Nachdem die Wirtschaftlichkeit einer

energetischen Sanierung der Gebäudehülle oftmals nur im Zusammenhang mit einer ohnehin anstehenden Sanierung gegeben ist, sind einerseits zusätzliche Anreize erforderlich, andererseits müssen Hindernisse abgebaut werden.

Während Außenwandkonstruktionen und Wärmeschutzverglasungen heute energetisch hochwertig und ausgereift sind, treten zwischen Fenster und Wand gestalterische, konstruktive, bauphysikalische, funktionale und organisatorische Probleme konzentriert auf. Der Bauablauf beim konventionellen Fenstertausch wird durch die Schnittstellen zwischen den beteiligten Gewerken an geometrisch und bauphysikalisch anspruchsvollen Stellen erschwert. So sind „Beanstandungen im Bereich der (Fenster-)Anschlüsse zum Baukörper einer der häufigsten Merkmale in den juristischen Auseinandersetzungen am Bau.“ [STI 2009]

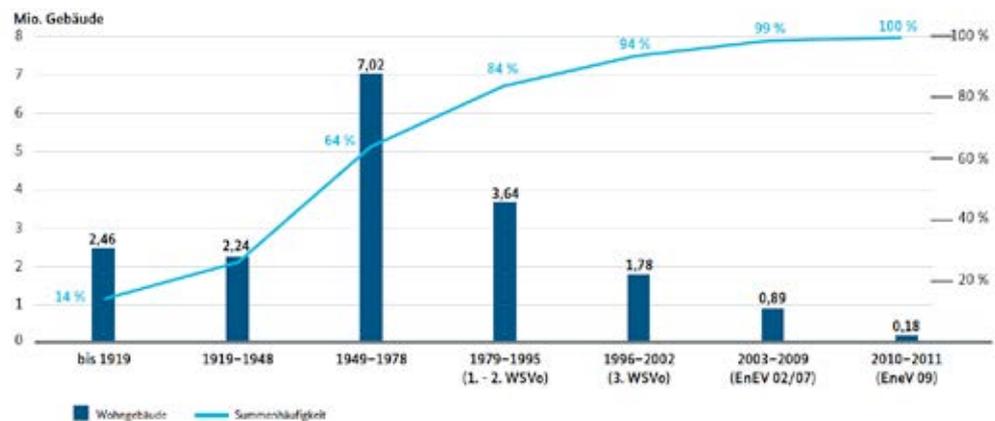


Abb. 1

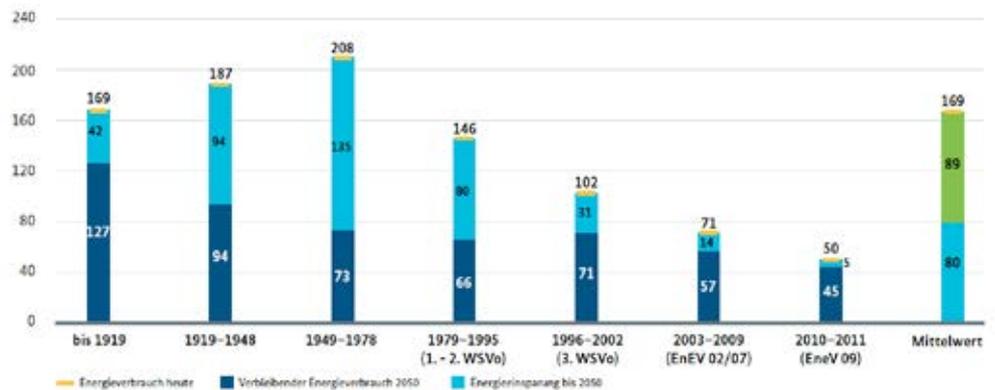


Abb. 2

- 1 Verteilung des Wohngebäudebestands gruppiert nach Baualter, Quelle: Sanierungsbedarf im Gebäudebestand, [BMWi 2014]
- 2 Verteilung des flächenbezogenen Energieverbrauchs heute und des Einsparpotenzials 2050, Quelle: ebd.

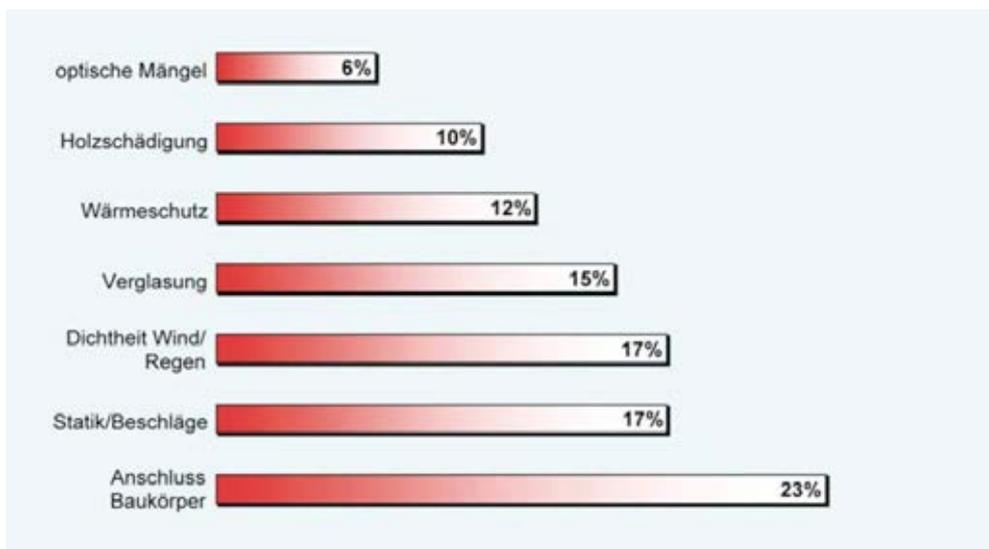


Abb. 3

Der Fenstertausch wird vorzugsweise in der warmen Jahreszeit durchgeführt, um die erforderlichen Mindesttemperaturen für die Verarbeitung der Materialien zu garantieren und um die Auskühlung der Wohnungen zu verhindern. Lang dauernde Sanierungsmaßnahmen wiederum stellen insbesondere in der warmen Jahreszeit eine hohe Belastung für die Mieter dar, die die Fenster öffnen wollen und nicht über längere Zeiträume hinter einem Gerüst leben wollen. Die vorprogrammierten Konflikte mit den Mietern halten viele Eigentümer davon ab, fällige oder sinnvolle Sanierungsarbeiten durchzuführen. Weitere Hemmnisse sind in der Komplexität der Maßnahme, der Unübersichtlichkeit der Lösungen und des Marktes zu sehen.

Das Forschungsprojekt „Vorgefertigte Sanierfenster mit integrierter Technik“ befasst sich mit der Thematik eines beschleunigten, störungsminimierten Bauablaufs unter Integration von fenstertypischer Technik, aber auch mit der Integration von allgemeiner Gebäudetechnik in das Fensterelement – verbunden mit der Optimierung der Anschlussdetails.

Aufgrund des Schwerpunkts des Sanierungsbedarfs in Deutschland, aber auch aufgrund der besten Anwendbarkeit der industriellen Vorfertigung auf den Gebäudebestand aus dieser Zeit geht das vorliegende Forschungsprojekt von typischen Bestandkonstruktionen aus

den 1950er bis 1970er Jahren aus, an denen bisher noch keine energetischen Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Den Fassaden dieser Gebäude liegen meist einfache Geometrien zugrunde, die Fensteröffnungen sind in der Regel auf wenige verschiedene Formate je Gebäude beschränkt, die Ausführungen folgen in den Details in den überwiegenden Fällen den gleichen Prinzipien. Diese Fassaden sind somit für eine Vorfertigung der Fensterelemente prädestiniert.

Im Unterschied zu anderen, ähnlich gelagerten Forschungsprojekten (TES EnergyFaçade – prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope und: Fraunhofer, energieoptimiertes Bauen: Entwicklung von vorgefertigten, multifunktionalen Systemen zur energetischen Sanierung von Wohngebäuden) werden keine großflächigen vorgefertigten Bauteile untersucht, die Fenstermaschine wird als eigenes Bauteil gesehen – mit Anschlüssen an Medien, die auf der umgebenden Wand installiert werden.

Zur wirtschaftlichen Bedeutung der Branche schreibt der Verband Fenster und Fassade: „In Deutschland gibt es laut einer Studie des VFF aus dem Jahr 2011 rund 6700 Fensterbaubetriebe mit etwa 100 000 Beschäftigten. Die Unternehmen erwirtschaften danach pro Jahr etwa 9,5 Milliarden Euro. Dazu kommen noch die vielen Betriebe und Mitarbeiter

3 Typische Schadensbilder bei Fenstern und Fassaden, Quelle: Rosenheimer Fenstertage [STI, 2009]

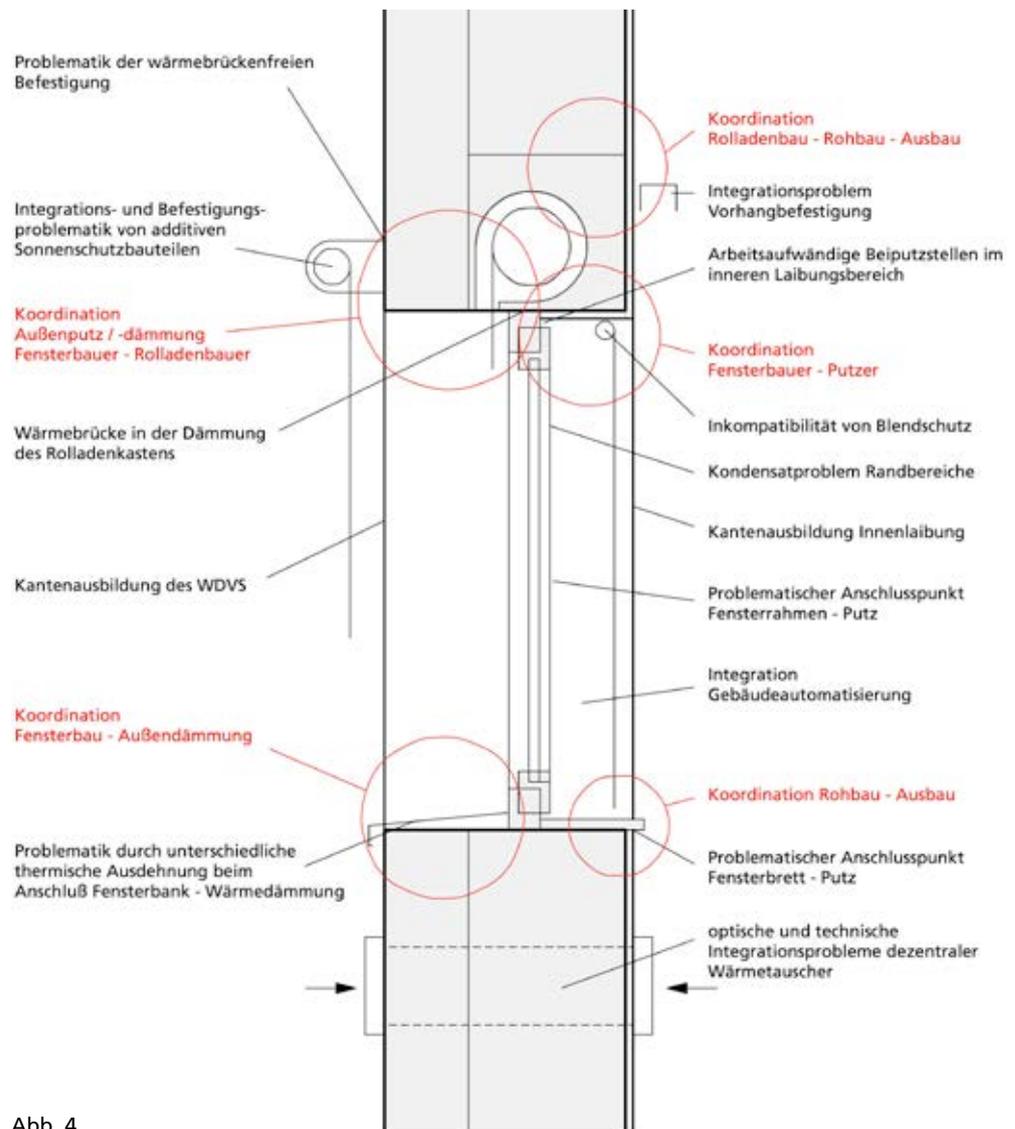


Abb. 4

der Zulieferindustrie [...] Inclusive aller wesentlichen vor- und nachgelagerten Industriezweige arbeiten rund 300 000 Mitarbeiter in rund 58 000 Betrieben in der deutschen Fenster- und Fassadenbranche. Sie erwirtschaften pro Jahr insgesamt rund 34 Milliarden Euro.“[VFF 2014] Dabei wurden 2012 ca. 22 Mio. qm Fenster hergestellt.

## 2. Aspekte und Komponenten

Die Fenstermaschine baut auf dem Prinzip der Fensterzarge auf, einem umlaufenden Bauteil in welches ein Fenster eingesetzt ist, einer Bauweise, die sich bislang noch nicht auf breiter Ebene durchgesetzt hat. Abgesehen von einigen Anbietern werden Fensterzargen bislang in der Regel objektbezogen entwickelt. Dem Gedanken der Vorfertigung folgend ist das Fenster als integraler Bestandteil des Elements geplant. Die Verwendung zugekaufter Fensterelemente würde zwar eine große Vielfalt der Lösungen ermöglichen,

widerspricht aber der angestrebten Vereinfachung und Standardisierung des Gesamtproduktes und damit der Rationalisierung im Herstellungsprozess. Sollte sich das Prinzip der Fenstermaschine auf breiter Ebene durchsetzen, steigert sich die Lösungsvielfalt durch die Zahl der Anbieter.

Aus einer zu Beginn des Projektes vorhandenen großen Vielfalt von Lösungsansätzen wurden die im Folgenden dargestellten Aspekte und Komponenten die die Fenstermaschine inkorporieren

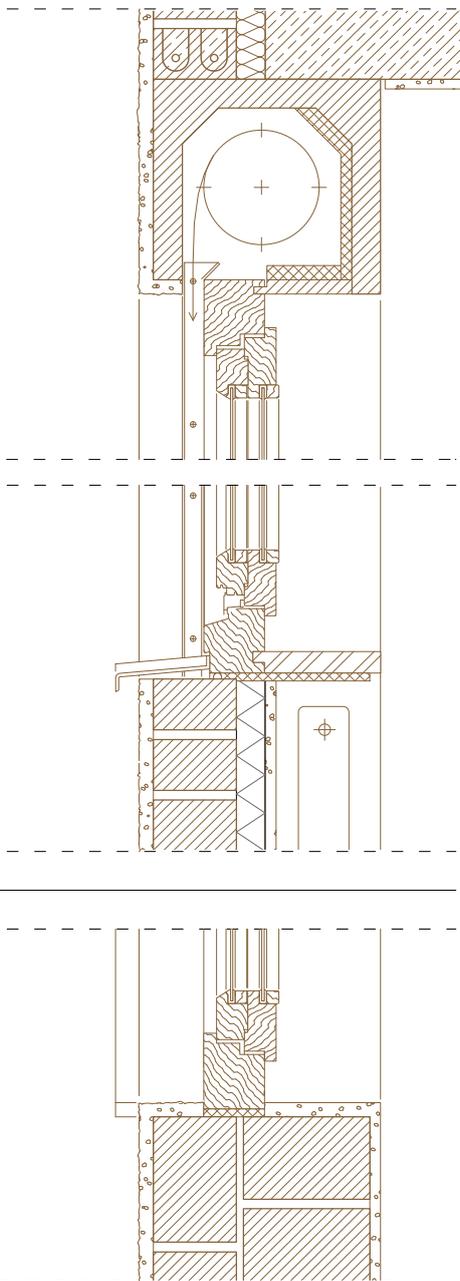


Abb. 5

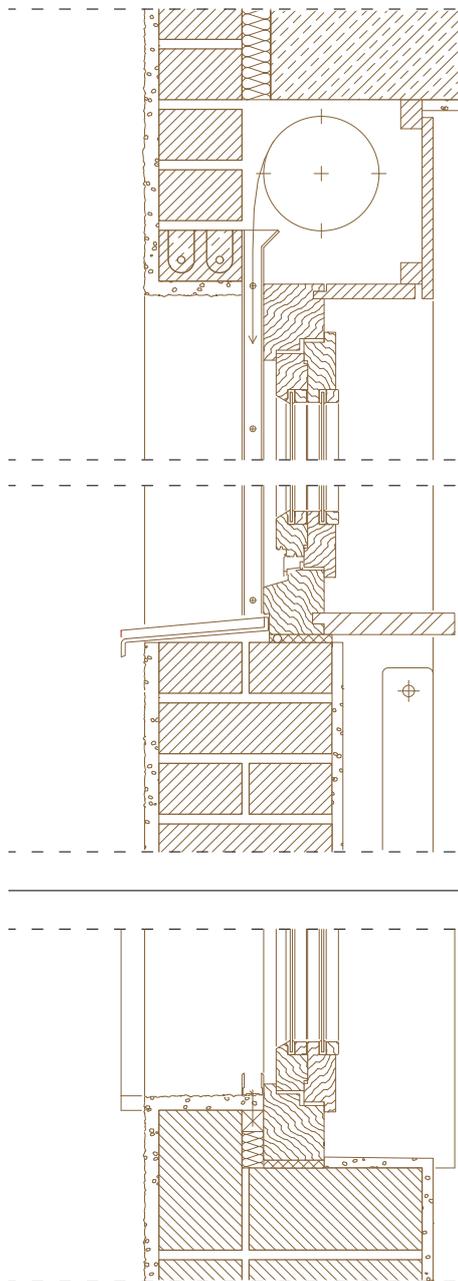


Abb. 6

- 5 Typisches Bestandsfenster A,  
oben Vertikalschnitt,  
unten Horizontalschnitt  
Zeichnung: EBB
- 6 Typisches Bestandsfenster B,  
oben Vertikalschnitt,  
unten Horizontalschnitt  
Zeichnung: EBB

könnten, einer näheren Untersuchung unterzogen und über mehrere Auswahlrunden drei Varianten von Prototypen zugeordnet. Gleichzeitig wurden drei Lösungen für die Lüftung ausgewählt und den drei Prototypen zugewiesen.

### **Vereinfachte Bauabwicklung / Modularität**

Die Schnittstellen zwischen den Gewerken verursachen im Bauablauf einen hohen Koordinations- und Kontrollaufwand. Sie erfordern Zeitpuffer im terminlichen Ablauf und bringen oft Lücken in der Leistungserbringung mit daraus resultierenden Problemen und Qualitätseinbußen mit sich. Eine hohe Vorfertigung des Fensters und der Einbauelemente reduziert die Anzahl der erforderlichen Gewerke und die damit verbundenen Schnittstellen und Fehlerquellen. Improvisierte Lösungen bzw. durch schlechte Witterung oder durch ungünstige Arbeitsbedingungen beeinträchtigte Baustellenlösungen werden durch professionelle, in Serie gefertigte und erprobte, bei optimalen Bedingungen in der Werkstatt gefertigte Lösungen ersetzt. Gleichermaßen bringen der vorgefertigte Anschluss an das Bauwerk sowie an die Anschlussgewerke (z. B. Integration von Anputzleisten in den erforderlichen Längen ohne Stückelung etc.) technische Vorteile und Zeitgewinn in der Montage.

Ein beschleunigter Bauablauf reduziert den für die Sanierung erforderlichen Zeitraum und damit die Kosten der Maßnahme. Nachdem ein Teil der Arbeiten in die Fabrik bzw. die Werkstatt verlagert wird, verringert sich die Belastung der Bewohner vor Ort durch Staub und Lärm etc. als auch die zeitliche Dauer der Belastung (Gerüststandzeiten).

Unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit des Aufwands sind standardisierte, allgemeingültige Lösungen im Vorteil. Die vorgefertigten Lösungen sollten sich möglichst universell auf die vorgefundene Bestandssituation anwenden lassen, andererseits aber dem Planer einen großen Gestaltungsspielraum einräumen. Ein hoher gestalterischer Anspruch mit zeitgemäßem Erscheinungsbild ist ein weiterer, den Einsatz des Elements fördernder Aspekt. Die einzelnen Komponenten werden

weitestgehend nach dem Baukastenprinzip als einzelne Module entwickelt, die nach individueller Anforderung zum Einsatz kommen und gegebenenfalls auch nachgerüstet werden können. Ähnlich dem Prinzip einer Modellreihe im Automobilbau gibt die Maximalausstattung die Form vor, die Einzelelemente werden je nach gewünschter Ausstattung eingebaut.

Die Verwendung der alten Bestandsfenster als Schutzelement für die Dauer des Baustellenbetriebs ist dabei beabsichtigt, muss aber von Fall zu Fall auf Machbarkeit untersucht werden. Dabei ist der Abstand des neuen Fensters vom alten Fenster entscheidend, ebenso die Frage, inwieweit das neue Fenster von außen passgenau montiert werden kann. Für ein Folgeprojekt beabsichtigte Untersuchungen an einem Demonstrationsobjekt können hier neue Erkenntnisse bringen.

### **Toleranzaufnahme**

Während Maßabweichungen vom Sollmaß bei dem vorgefertigten Fensterelement selbst auf ein Minimum reduziert werden können, sind im Bestand Toleranzabweichungen aller Größenordnungen möglich. Auf Grundlage eines zu Beginn der Planung durchzuführenden exakten Aufmaßes werden die Toleranzen des Bestandes und die planerischen Konsequenzen bestimmt.

### **Fensterebene**

Hinsichtlich der schlecht gedämmten Wandkonstruktionen der relevanten Bauzeit ist eine Dämmung der Fassade im Zuge des Fensteraustauschs ohnehin naheliegend. Bei den untersuchten Varianten wird das Sanierfenster daher außen vor die Bestandsmauer in die neue Dämmebene gesetzt. Dies hat mehrere Vorteile:

- Die Isothermen verlaufen ohne größere Versprünge weitgehend linear, es entstehen keine Wärmebrücken im Bereich des Anschlusses Fenster/ Wanddämmung.
- In der Fensterlaibung ist keine Wärmedämmung erforderlich, die in der Regel die Fenstergröße und damit Tageslichteinfall und solare Gewinne zusätzlich deutlich einschränkt.

- Das Bestandsfenster kann erst nach Einbau des neuen Fensters ausgebaut werden, die mit dem Fenstertausch verbundenen Störungen des Nutzers werden minimiert.

Durch Verzahnung mit der Dämmebene/Überdeckung der Rohbauöffnung durch die Fenstermaschine wird verhindert, dass zusätzliche fenstertypische Schwachstellen (z. B. durch Erhöhung des Fugenanteils) entstehen.

## Fenster – Licht und Luft

### Öffnungsarten/elektrische Öffnung

Aufgrund des großen Marktanteils wurden den Varianten 2 und 3 konventionelle Dreh-Kipp-Fenster zugrunde gelegt. Hinsichtlich großer Vorteile bei der realisierbaren Fenstergröße wurde bei Variante 1 ein nach außen öffnendes Fenster gewählt.

Je nach Öffnungsrichtung und Komfortanspruch kommt bei großer Laibungstiefe eine elektrische Öffnung der neuen Fenster in Frage und wurde als optionale Zusatzfunktion integriert.

### Tageslicht / natürliche Lüftung

Dem Aspekt, dass die nachträgliche Dämmung der Fassade und die damit verbundene Vertiefung der Fensterlaibung zu einem deutlichen Verlust des Lichteinfalls führt, wird in der Diskussion der energetischen Sanierung bislang kaum Beachtung geschenkt. Abgesehen von den negativen Auswirkungen auf die Psyche des Menschen gehen hier solare Gewinne verloren, auch ist ein Mehrbedarf an elektrischer Energie für künstliche Beleuchtung erforderlich. Je nach Einbauebene der neuen Fenster wird eine Laibungsdämmung erforderlich, die den Lichteinfall weiter einschränkt. Durch Anordnung des Fensters in der Ebene der neuen Dämmung, wie sie in allen drei Varianten verfolgt wurde, kann die Laibungsdämmung entfallen. Variante 3 erzielt sogar einen deutlichen Zugewinn an Tageslicht, der Verlust durch die Dämmung wird mehr als kompensiert.



Abb. 7



Abb. 8



Abb. 9

### Dämmung und Verkleidung

Neue Tendenzen in der Baustoffindustrie weisen den Weg zu einer Verschlankung von Bauteilen: Durch Vakuumverglasungen (U-Werte von derzeit ca.  $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) können Glasaufbaustärken und Glasgewichte und damit die gesamte Rahmenkonstruktion deutlich reduziert werden. Ob sich

- 7 Nach außen öffnendes Fenster „side-wing“, Foto: Fenestra Fensterbau/Waldbrunn
- 8 Nachgerüsteter Sonnenschutz mit Tageslichteinbußen, Foto: EBB
- 9 Rollladen-Insektenschutz-Kombination Quelle: Heroal



Abb. 10



Abb. 11



Abb. 12

- 10 Fensterbaumesse Frontale 2014, Lüftungssysteme der Firma Beck+Heun
- 11 Fensterbaumesse Frontale 2014, Lüftungssysteme der Firma Hautau
- 12 Fensterbaumesse Frontale 2014, Lüftungssysteme der Firma Siegenia

diese durchsetzen, bleibt abzuwarten. Neue Dämmstoffe wie z. B. BASF Slen-tite  $\lambda = 0,016 \text{ W/mK}$  könnten wieder zu geringeren Dämmstoffstärken führen. Dieser Tendenz wurde im Forschungsprojekt bereits Rechnung getragen. Die Varianten 1 und 2 wurden bereits mit vergleichsweise geringen Dämmstärken entwickelt, die Variante 3 ist in reduziertem Ausmaß ebenfalls anpassungsfähig.

### Sonnen- Blend- Sichtschutz

Hinsichtlich der steigenden Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz – bedingt durch den Klimawandel und steigende Komfortansprüche – gewinnt der Sonnenschutz zunehmend an Bedeutung. Abgesehen von gestalterischen Problemen verkleinert die Nachrüstung von Sonnenschutzanlagen oftmals die Fensteröffnung zusätzlich und reduziert den Lichteinfall. Insbesondere bei den für die 1950er und 1960er Jahre typischen kleinen Fenstergrößen beeinträchtigen all diese Faktoren den passiven Solarenergieeintrag und die Wohnqualität erheblich.

Rollladen und Raffstore teilen sich derzeit die Marktanteile ungefähr zu gleichen Teilen. Schiebeläden, Lamellen, Klappläden bzw. textiler Sonnenschutz haben nur einen sehr geringen Marktanteil.

Der Rollladen bietet bei etwas höherem Platzbedarf in der Bautiefe ein höheres Sicherheitsgefühl. Platzsparende Kombinationsmöglichkeiten mit Insektenschutz sind hier bereits Standard. Platzsparende Sanierrollläden schließen allerdings hermetisch und ohne Lichtschlitze ab. Der Raffstore hat in der Bautiefe einen etwas geringeren, in der Bauhöhe allerdings höheren Platzbedarf. Der Windanfälligkeit stehen viele Nutzungsmöglichkeiten gegenüber. Platzsparende Kombinationsmöglichkeiten mit Insektenschutz sind noch zu entwickeln. Aufgrund des tendenziell höheren Platzbedarfs wurden die Varianten 2 und 3 mit Rollläden entwickelt, so dass ein Raffstore gleichermaßen eingesetzt werden kann. Nachdem beide Systeme bei nach außen öffnenden Fenstern nicht in Frage kommen, wurden bei Variante 1 im Scheibenzwischenraum des Glases integrierte Lamellen eingesetzt.

Vorhangschienen sind generell in den Innenzargen als optionaler Blend- bzw. Sichtschutz integriert.

### **Insektenschutz**

Insektenschutz wurde bei allen Varianten in leicht revisionierbarer Ausführung integriert.

### **Mechanische Lüftung**

Die Entwicklung hin zu immer besser gedämmten und dichten Gebäudehüllen verbunden mit der Anforderung an eine Reduktion der Lüftungswärmeverluste verlangt nach einer kontrollierten, nutzerunabhängigen Lüftung mit Wärmerückgewinnung. Im Neubau stellt sie bereits einen wesentlichen Faktor zur Erreichung der bauordnungsrechtlichen Genehmigung dar. Im Neubau wie bei der Sanierung stellt sie die hygienischen und bautechnischen Forderungen der DIN EN 1946-6 sicher. Bei Sanierungsvorhaben wird die Lüftung bevorzugt so ausgeführt, dass bauliche Maßnahmen innerhalb der Wohneinheiten auf ein Minimum reduziert werden können.

Entwicklungen fensterintegrierter Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung sind auf dem Markt und auf aktuellen Baufachmessen in verschiedenster Ausführung zu finden. Nachdem die bisher auf dem Markt vertretenen Systeme mit deutlichen Nachteilen behaftet sind, besteht hier ein großer Entwicklungsbedarf. Auch im Neubau ist der Verzicht auf aufgesetzte (sichtbare) Lüftungsauslässe ein wichtiges Entscheidungskriterium für Planer und Bauherren.

Aufgrund der Bedeutung des Themas wurde der Lüftung ein eigenes Kapitel (7) in diesem Forschungsbericht gewidmet.

### **Heizung**

Die Integration von Heizflächen in das innere Fensterbrett wurde nur ansatzweise untersucht, da dieser Aspekt ganz individuell von der bestehenden bzw. geplanten Gebäudehaustechnik abhängt. Grundsätzlich aber gelten die im Folgenden genannten Aspekte ebenfalls für die Sanierung der Heizungsverteilungssysteme und Heizflächen.



Abb. 13

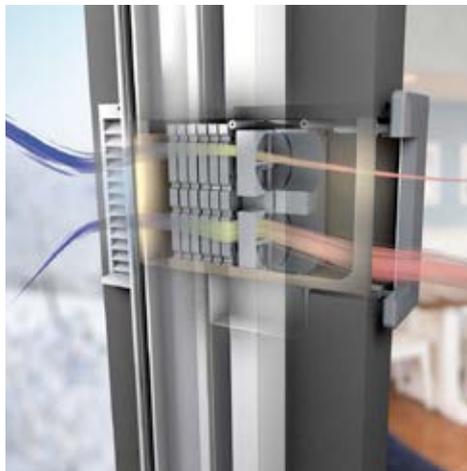


Abb. 14

### **Installationen – Übergabe innen / außen**

Im Zuge der energetischen Sanierung mit Außendämmung der Fassade eröffnet die Leitungsführung der technischen Gebäudeausrüstung an der Außenseite der Außenwand neue Möglichkeiten: Installationen, die im Gebäudeinneren nur mit hohem Aufwand und mit erheblicher Störung der Bewohner verbunden sind, können hier vergleichsweise unkompliziert mit minimaler Störung der Bewohner und ohne Raumverlust verlegt werden. Gestalterisch unbefriedigende Verkofferungen, Aufputzleitungen oder Installationssockelleisten können vermieden werden. Das erweiterte Fensterelement dient der Übergabe zwischen Innen und Außen – nach Möglichkeit ohne weitere Eingriffe in die Massivbauteile.

13 Aufgesetzte Lüftungsauslässe, Quelle: EBB

14 B+H Airfox, Quelle: B+H



Abb. 15

Die im Fensterelement integrierten Funktionen werden durch in die innere Laibungszarge eingebaute Steuerungselemente angesteuert.

### Fotovoltaik

Grundsätzlich bietet sich die Belegung von Sonnenschutz-Schiebeläden mit Fotovoltaik-Modulen an, da diese sowohl im geschlossenen als auch im geöffneten Zustand der Sonne ausgesetzt sind. Der Übergang des gewonnenen Stroms über die beweglichen Bauteile ist dabei störungsunanfällig zu lösen. Aktuell ist die an individuelle Fenstermaße angepasste Kleinserienfertigung, ebenso wie der Stromertrag an vertikalen, oft in der Himmelsrichtung ungünstig ausgerichteten oder verschatteten Fassaden weit von einer Wirtschaftlichkeit entfernt. Daher und aufgrund des geringen Marktanteils von Schiebeläden und der vergleichbar kleinen Flächen wurden die Untersuchungen nicht weiter vertieft.

### Innenlaibung

Die Abbruchkanten des alten Fensters werden bei allen drei Varianten durch eine Innenzarge verdeckt. Das erspart die Verputzarbeiten der inneren Fensterlaibung. Neben den potenziellen Verschmutzungen und Belastungen der bewohnten Räume entfallen die Trocknungszeiten des Putzes und die anschließenden Malerarbeiten. Zwei Gewerke weniger, die zu koordinieren sind.

Dabei sind Verkleidungen aus unterschiedlichen Materialien denkbar und können entsprechend zur Wahl angeboten werden. Im Projekt wurde von

Verkleidungen aus Holz, Holzwerkstoffen oder Metall als gerade oder angeschrägte (Lichteinfall) Innenzarge ausgegangen. In die Verkleidungen sind Bedienelemente für die Technik, Lüftungsgitter und Vorhangschienen integrierbar.

Je nach Ungenauigkeiten und Unebenheiten des Bestandes können die Toleranzen aufgenommen werden, oder aber man stößt mit dieser Ausführung an Grenzen und kommt an ausgleichenden Maßnahmen nicht vorbei. Alternativ ist es auch möglich die Innenseite konventionell zu verputzen, was allerdings die bekannte Problematik der Putz- und Malerarbeiten in genutzten Wohnungen mit sich bringt und die vorgefertigte Integration der Bedienelemente verhindert, andererseits auch das Innenmaß nicht verkleinert.

### Montage

Die Elemente werden generell von außen montiert. Größere Elemente werden entweder im Zwischenraum zwischen Gerüst und Gebäude von oben „eingefädelt“ oder – ohne Gerüst – mit einem Hubsteiger montiert. Daneben könnten grössere Elemente auch geteilt werden zum einfacheren Transport und Montage.

### Lebenszyklus / Recycling

Ausgehend von einer durchschnittlichen Lebensdauer von Fenstern von ca. 40 bis 50 Jahren liegt es je nach Gebäudezustand und je nach Materialität der Fassade nahe, den nächsten Fenstertausch mit in die Überlegungen einzubeziehen. Steigende Nutzererwartungen an einen störungsminimierten Fenstertausch sprechen für eine präzise Schnittstelle zwischen Fenster und Fassade, die wie bei den Varianten 1 und 2 einen einfachen und schnellen Austausch gewährleistet.

Die Demontage im Zuge des Gebäudeabbruchs erfolgt in umgekehrter Reihenfolge zur Montage. Die sortenreine Trennbarkeit der Materialien ist als Ziel für die Weiterentwicklung zur Serienreife formuliert. Gleiches gilt für die Austauschbarkeit von Bauteilen mit kürzerer Lebensdauer.

15 Rückseite des PV-Moduls Sto Ventec ARTline Invisible, Quelle: Sto

### 3. Kurzbeschreibung der Varianten

#### Variante 1 – nach außen öffnendes Fenster

Das nach außen öffnende Fenster ermöglicht, Fensterflügel und Blendrahmen außerhalb der Maueröffnung des Bestandsmauerwerks (Lochmaß) anzuordnen. Die Fensterprofile schränken den Lichteinfall nicht ein, das Tageslicht fällt annähernd über die gesamte Rohbauöffnung ein. Damit kann der auf den Lichteinfall negativen Auswirkung nachträglich aufgebracht Dämmungen begegnet werden. Auch können die oft spärlich dimensionierten Lochfenstermaße typischer Wohnbauten der Nachkriegszeit maximal ausgenutzt werden. Bei den der Untersuchung zugrunde gelegten Standardfensterlochmaßen von 1250 × 1500 mm ergibt sich für Variante 1 ein Fensterelement mit einem um ca. 30 % höheren Glasanteil. Von innen ist der Fensterrahmen unsichtbar, man sieht nur Glas. Da bei nach außen öffnenden Fenstern ein außenliegender Sonnenschutz nicht zielführend ist, sind Sonnenschutzlamellen im Scheibenzwischenraum angeordnet (s. Abb. 18). Außenseitig sind Blendrahmen und Fensterflügel durch eine Stufenverglasung vor der Witterung geschützt. Auch hier ist nur das Glas sichtbar, wenn auch der die Konstruktion abdeckende Rand geschwärzt ist. Nachteile ergeben sich bei der Reinigung der Fenster in den oberen Geschossen. Hier besteht noch Entwicklungsbedarf für Beschlagsysteme wie sie z.B. im skandinavischen Ausland verbreitet sind hinsichtlich großformatiger Lösungen und neuer Öffnungskombinationen.

Zur Montage:

Zunächst wird eine Montagezarge auf die Fassade montiert. Das Fensterelement selbst wird erst nach Fertigstellung der Fassadendämmung (WDVS oder VHF) montiert und muss nicht geschützt werden (siehe „Montageschritte Variante 1 in Detailsequenzen“). Erst danach wird das alte Bestandsfenster demontiert und die Laibung mit einer Innenzarge verkleidet.

Die als Senk-Klapp-Fenster geplante Lösung ist ebenso als nach außen öffnender Drehflügel denkbar.

#### Variante 2 – Comeback der Fenstereinfassung

Während über lange Zeiträume hinweg randlos ausgeschnittene Fenster überwogen, zeichnet sich in der aktuellen Entwicklung der Fassadengestaltung ein Trend zur Einfassung der Fenster durch eine abgesetzte Fasche ab. Dieser Rahmen kann zur Integration technischer Einbauteile genutzt werden.

Bei dem kürzlich fertig gestellten Wohn- und Geschäftsgebäude in der Kaiserstraße 28 in München (Architekten be\_planen) wurde die Luftführung in der Fasche der vorgefertigten Fenster integriert. Die Faschen wurden zuletzt



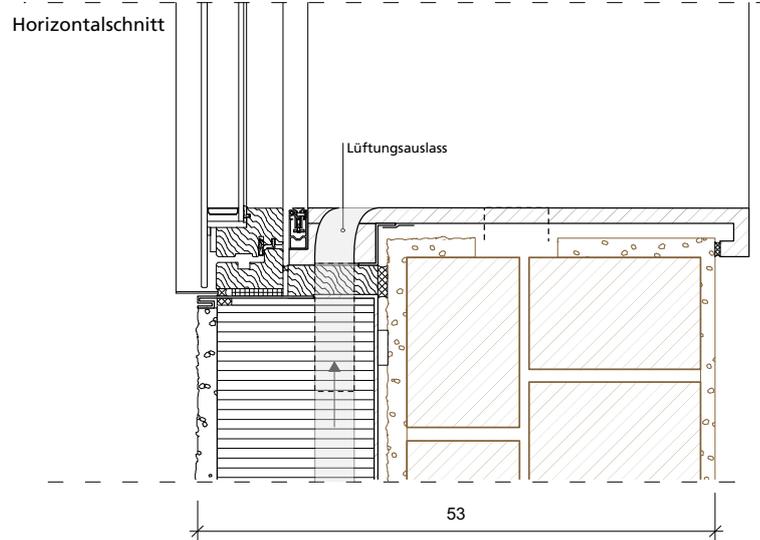
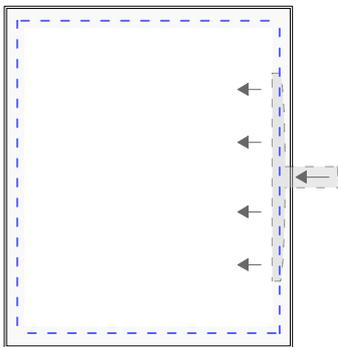
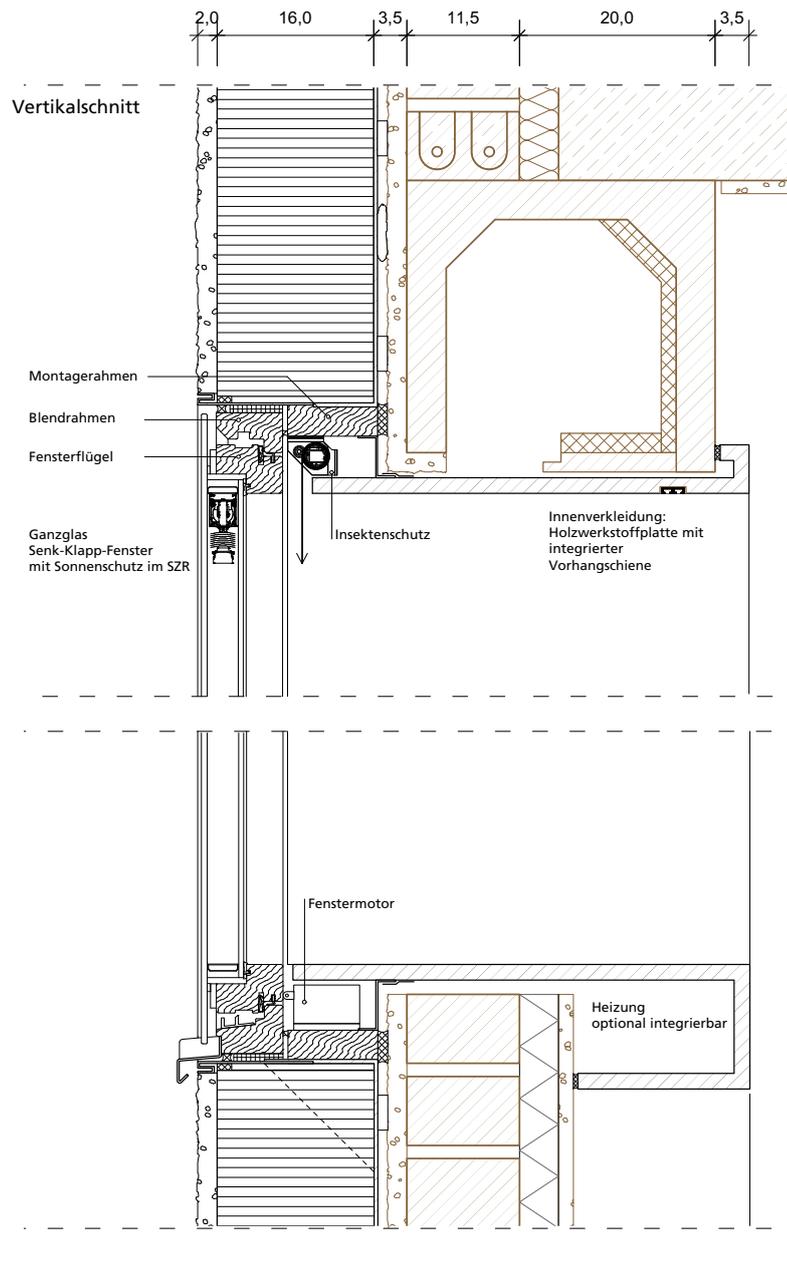
Abb. 16



Abb. 17

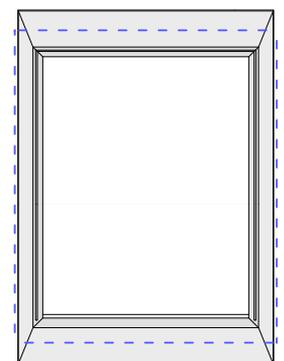
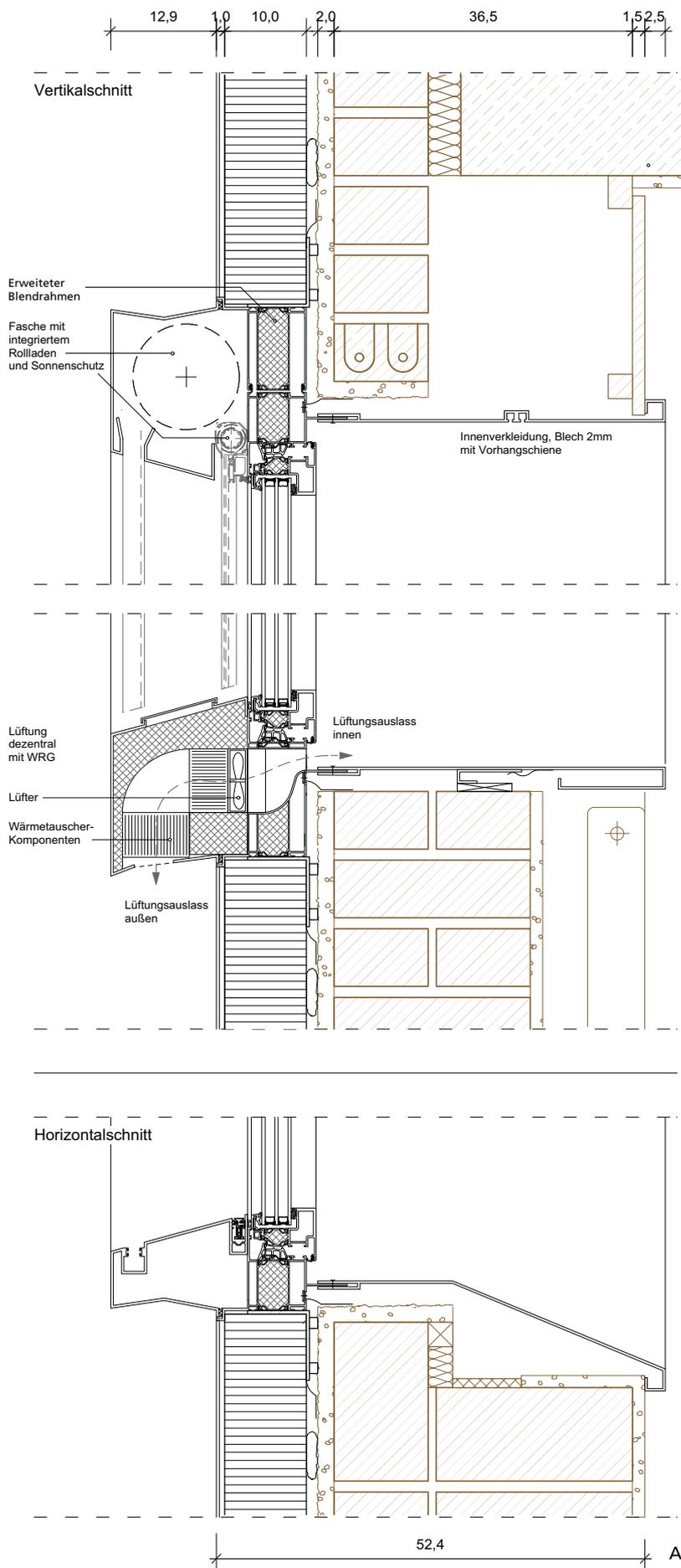
16 München, Nymphenburger Straße, Quelle: EBB

17 Kaiserstraße 28, Detail Fenster, Architekten be\_planen, Quelle: EBB

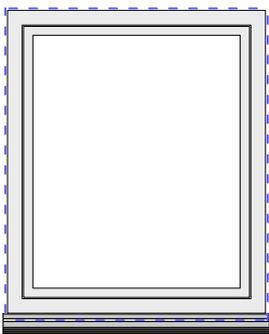
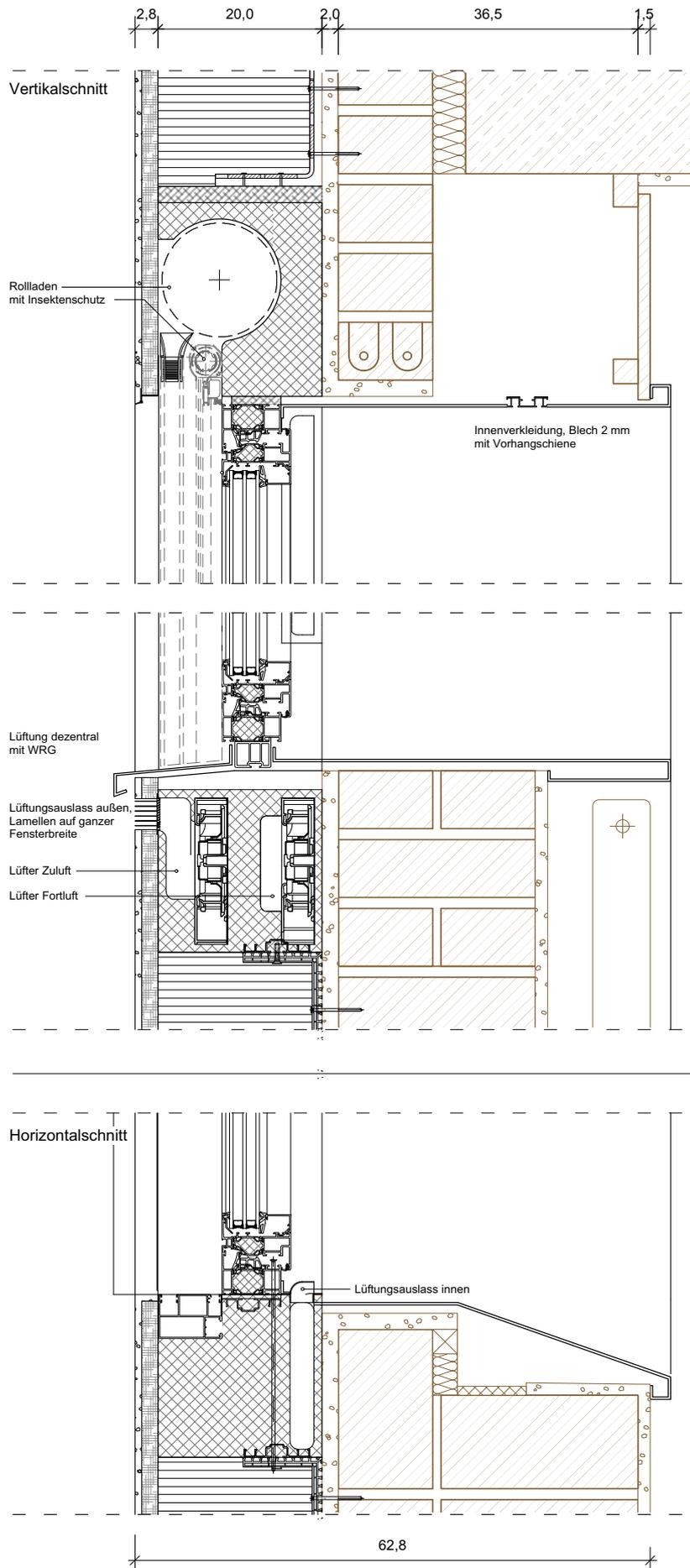


18 Variante 1, Schnitt und verkleinerte Ansicht, gestrichelte Linie: Rohbauöffnung; Zeichnung: EBB

Abb. 18



19 Variante 2, Schnitt und verkleinerte Ansicht, gestrichelte Linie: Rohbauöffnung; Zeichnung: EBB



20 Variante 3, Schnitt und verkleinerte Ansicht, gestrichelte Linie: Rohbauöffnung; Zeichnung: EBB

Abb. 20

von außen aufgesetzt. Anders als im vorliegenden Forschungsprojekt sind hier dezentrale Lüftungsgeräte im Brüstungsbereich der Fenster angeordnet, also nicht ins Fensterelement integriert.

Die umlaufende Fasche der Variante 2 bietet viel Spielraum bei der Integration zusätzlicher Komponenten, auch hinsichtlich zukünftiger Anpassbarkeit. Durch Aktivierung der statischen Kapazitäten der Einzelteile kann der zusätzliche Materialeinsatz minimiert werden.

Im Montagerahmen der Variante 2 werden dezentrale „Air-Fox“- Lüftungsgeräte von Beck+Heun integriert. Diese sind so abgewandelt, dass sie unter der Fensterbank ohne Eingriff in den Massivbau integriert werden können. Das Dreh-Kipp-Fenster kann – zur Wartung oder zum Austausch – wahlweise von außen (Gerüst, Hubsteiger) oder von innen montiert werden. Die Technikbauteile sind über integrierte Schienen an einem erweiterten Blendrahmen montiert und sind durch Abnehmen der Fasche einfach revisionierbar. Die Dichtbänder werden in das Rahmenprofil eingeklipst und nur noch am Rohbau verklebt.

### **Variante 3 – WDVS-Integriertes Fenster**

Der komplett vorgefertigte Montagerahmen der Variante 3 wird in das WDVS integriert. Er verbleibt im Bauwerk, wird also bei einem Fenstertausch nicht demontiert. Die Fenstermaschine wird als vorgefertigtes Element mit einem integrierten, neu konzipierten dezentralen Lüftungsgerät in den Montagerahmen eingebaut, die einzelnen Komponenten können in begrenztem Umfang einzeln ausgetauscht werden. Die Lüftung ist so integriert, dass keine Durchbrüche durch den Massivbau erforderlich sind. Die Entwicklung des Lüftungsgeräts und der Einbausituation ist noch nicht abgeschlossen und soll in der geplanten Fortsetzung des Projektes weiterentwickelt werden.

## 4. Montageablauf

Die in der Fenstermaschine verbauten Systeme sind – soweit sie mechanischen Belastungen unterliegen – entweder durch Demontage des Fensters (von außen) oder durch Demontage der Innenverkleidung revisionierbar. Die in die Fassade integrierten Leitungssysteme sind wartungsfrei herzustellen.

### 4.1 Montageschritte Variante 1 in Detailsequenzen

Hinweis: Der Bestand ist sepiafarben, neue Bauteile sind schwarz dargestellt

#### Anbringen der Montagezarge an der Fassade

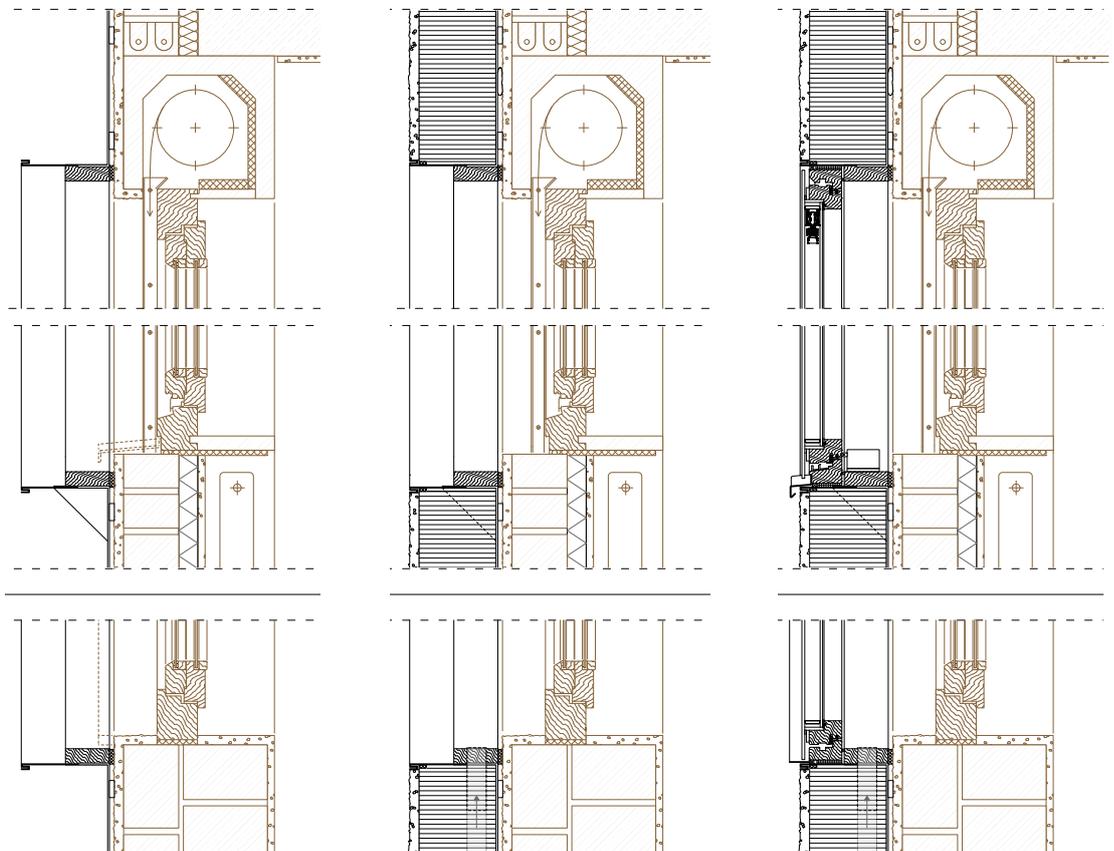
Die Montagezarge wird als mit allen Befestigungswinkeln und Anschlüssen für die Lüftungsleitungen komplett vorgefertigtes Element auf die Baustelle geliefert und in einem Montageschritt am Gebäude verankert, dann angeichtet. Stromanschlüsse bzw. Leerrohre werden integriert.

#### Montage Fassadendämmung und -bekleidung

Die Wärmedämmung wird montiert und verputzt bzw. mit Plattenmaterial verkleidet. Die Montagezarge definiert den Abschluß des Dämmsystems. Die in der WD integrierten Lüftungsleitungen werden an die Montagezarge angeschlossen.

#### Montage Fensterelement

Das passgenaue Fensterelement, bestehend aus Blendrahmen und Flügelrahmen wird in die Montagezarge eingesetzt und verschraubt. Im Prototyp wird ein motorisch betriebenes Senk-Klapp-Fenster eingebaut.



### Demontage Bestandsfenster

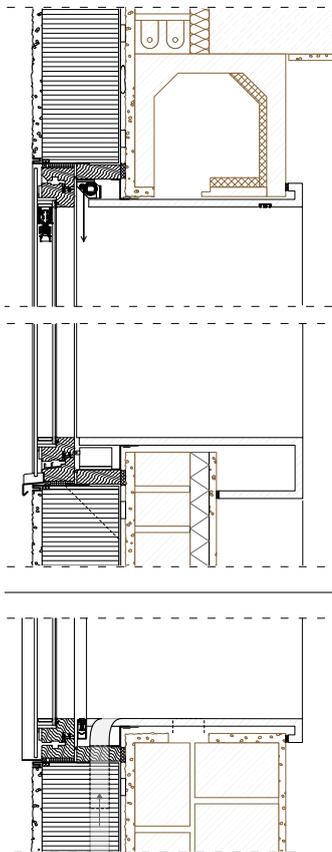
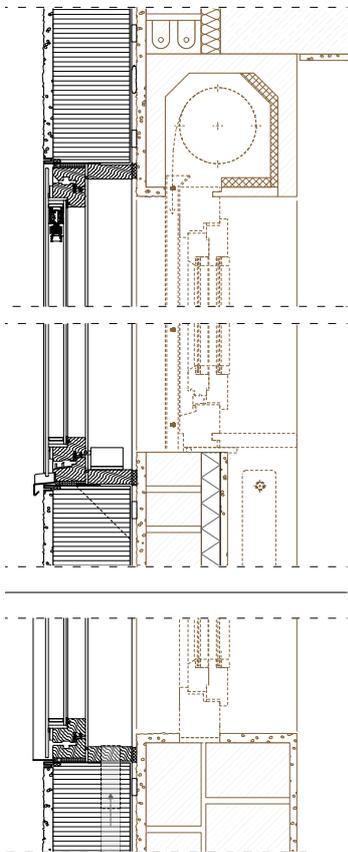
Das Bestandsfenster wird nach Montage des neuen Fensters oder – wenn es die Witterung zulässt unmittelbar davor – von innen demontiert. Um eine maximale neue Fenstergröße zu realisieren, wird der alte Blendrahmen komplett entfernt.

### Montage Innenlaibung

Die Innenlaibung (Material MDF, lackiert) wird eingepasst und überdeckt die Spuren des alten Fensters. Optional kann ein neues Heizsystem in die Brüstung integriert werden.

### Revisionierbarkeit

Die Montagezarge definiert die Schnittstelle zwischen Fenstermaschine und Fassade und eröffnet die Möglichkeit, die Fassadendämmung vor Montage der Fenster fertigzustellen. Sie verbleibt im Gebäude. Die im SZR integrierten Lamellen sind wartungsfrei. Im Falle eines Schadens ist das Glas von außen auszutauschen. Der Fensteraustausch ist unabhängig von der Fassade möglich. Die Innenzarge wird bei Bedarf von innen revidiert.



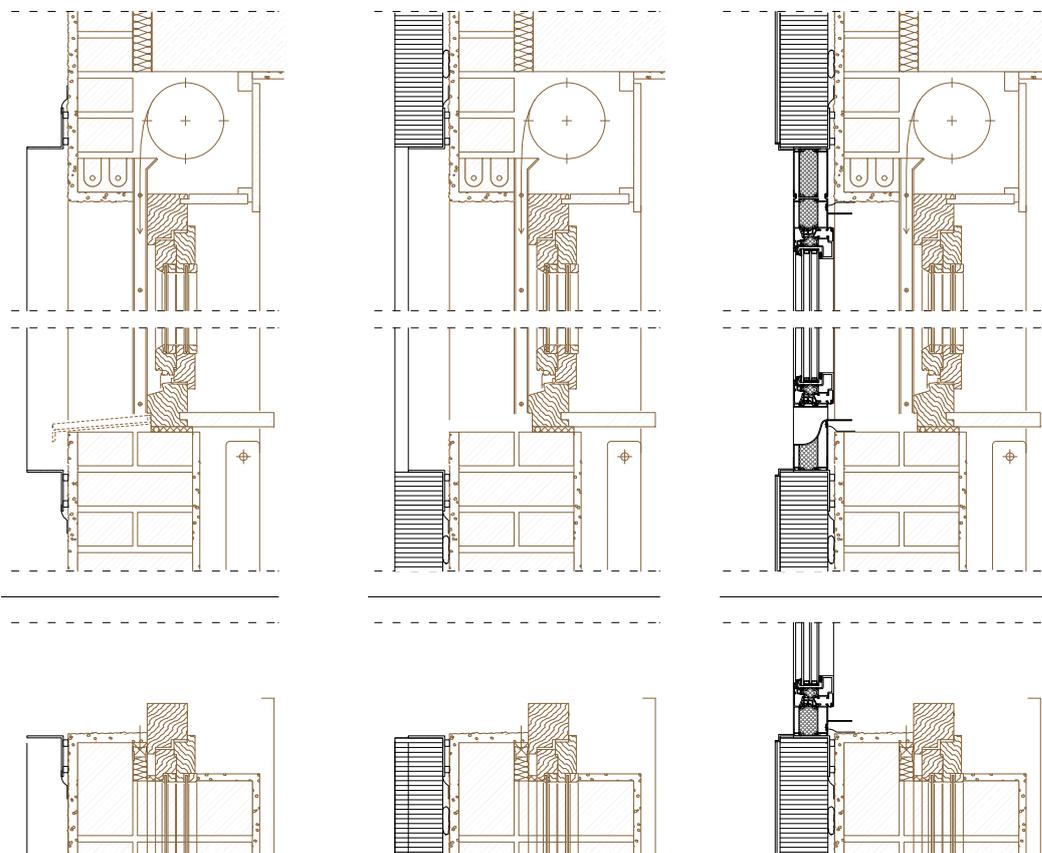
## 4.2 Montageschritte Variante 2 in Detailsequenzen

Hinweis: Der Bestand ist  
sepiafarben, neue Bauteile  
sind schwarz dargestellt.

Montage des auf die  
Fenstergröße abgestimmten,  
vorkonfektionierten  
Abschlusswinkels und  
Herstellung der Andichtung  
an den Rohbau. Strom-  
anschlüsse bzw. Leerrohre  
werden integriert.

Montage Fassadendäm-  
mung und -bekleidung.  
Die Wärmedämmung  
wird montiert und ver-  
putzt bzw. mit Platten-  
material verkleidet. Der  
Winkel definiert den  
Abschluss des Dämm-  
systems.

Montage Fensterelement.  
Das breite Rahmenprofil  
des Fensterelements  
sieht die Aufnahme der  
Befestigung von Technik,  
Faschen, Fensterandich-  
tung (innen) und Innen-  
bekleidung bereits vor.



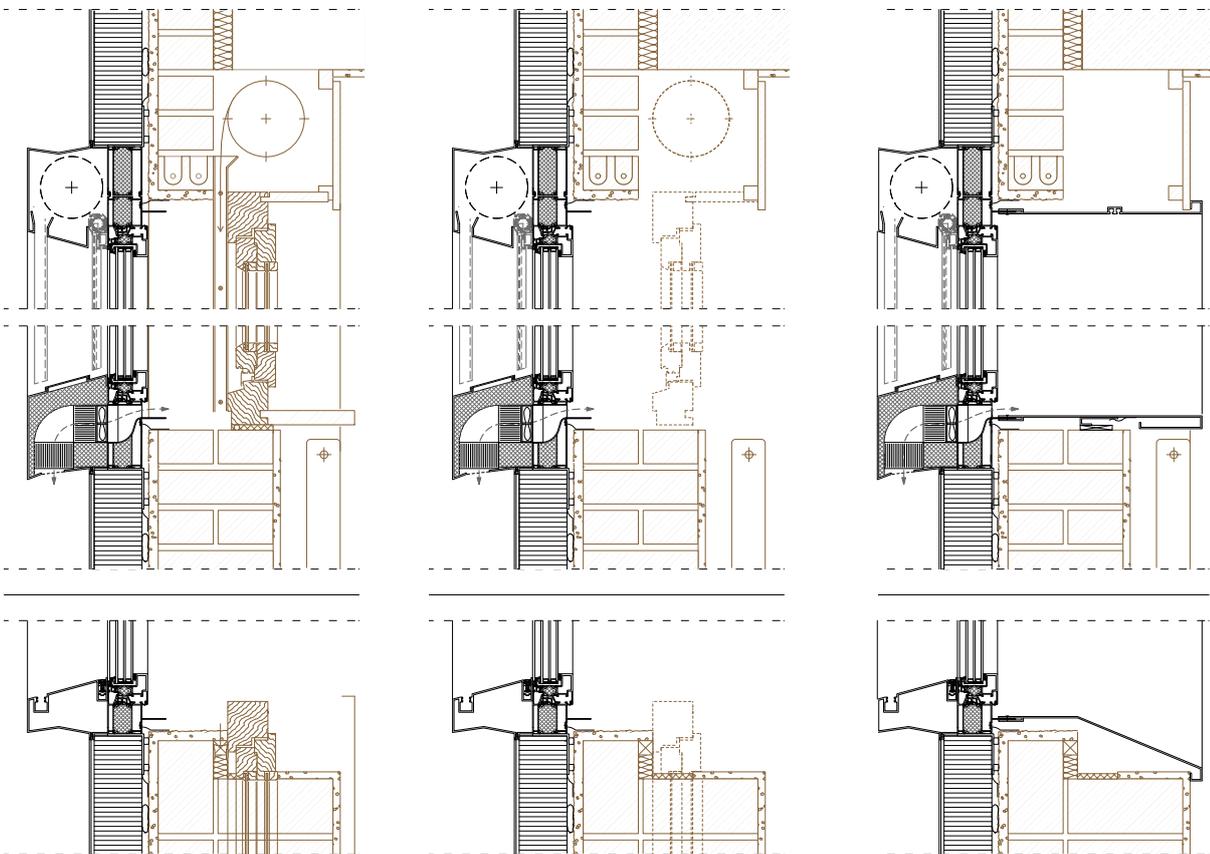
Montage der Technischelemente wie Rollläden, Insektenschutz und Lüftung an den vorgesehenen Befestigungspunkten des Fensterrahmens sowie Montage der Faschen.

### Demontage Bestandsfenster

Das Bestandsfenster wird nach Montage des neuen Fensters oder – wenn es die Witterung zulässt unmittelbar davor – von innen demontiert. Um eine maximale neue Fenstergröße zu realisieren, wird der alte Blendrahmen komplett entfernt.

Demontage Bestandsfenster. Die Innenverkleidung (hier: Material Stahlblech, lackiert) wird eingepasst und überdeckt die Spuren des alten Fensters.

Die Technischelemente werden von außen revidiert. Der Fenster-austausch ist unabhängig von der Fassade möglich. Die Innenzarge wird bei Bedarf von innen revidiert.

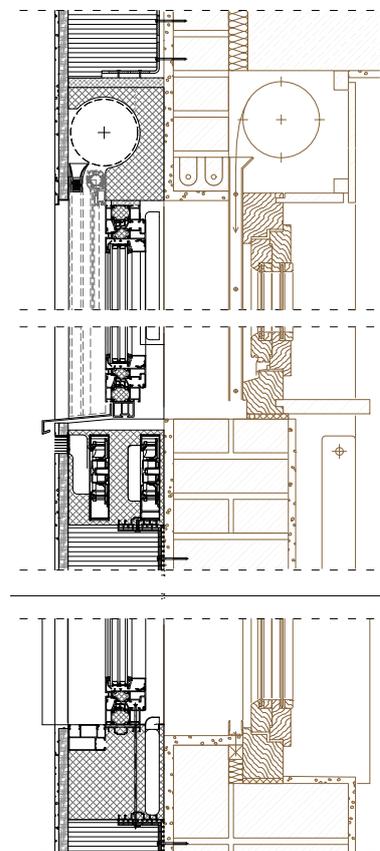
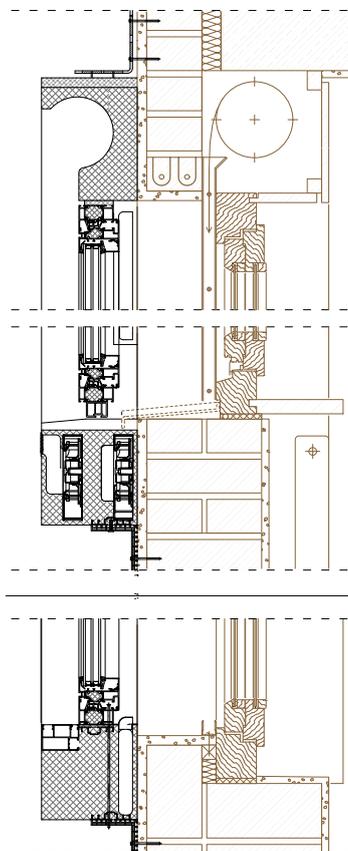


### 4.3 Montageschritte Variante 3 in Detailsequenzen

Hinweis: Der Bestand ist sepia-  
farben, neue Bauteile sind  
schwarz dargestellt

Montage des komplett vor-  
konfektionierten Fensterele-  
ments mit Andichtung an den  
Rohbau.

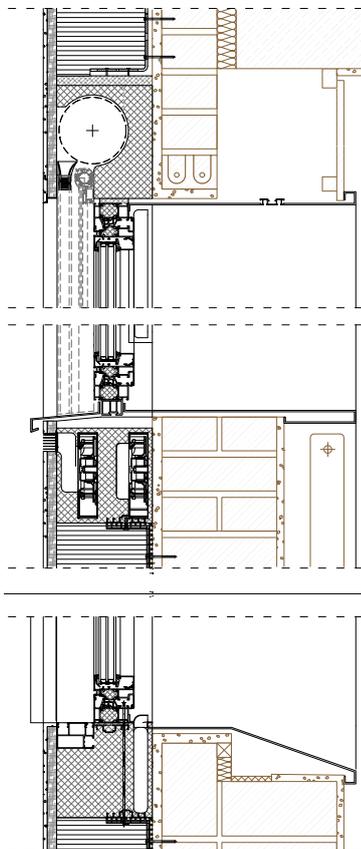
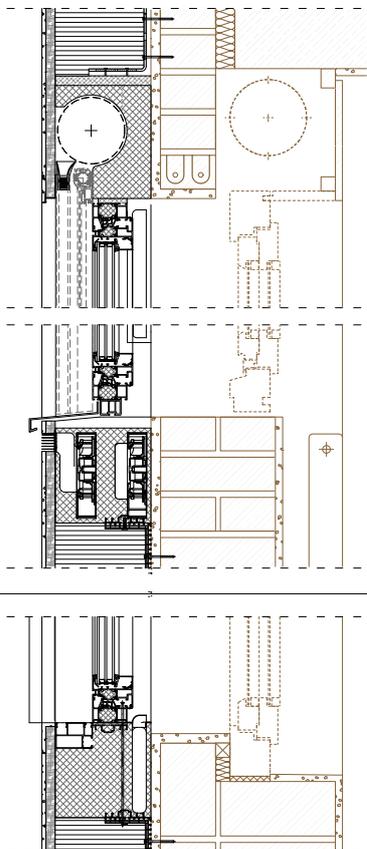
Einbau Sonnenschutz und  
Insektenschutz, Anarbeiten des  
WDVS-Systems



### Demontage Bestandsfenster

Das Bestandsfenster wird nach Montage des neuen Fensters oder – wenn es die Witterung zulässt unmittelbar davor – von innen demontiert. Um eine maximale neue Fenstergröße zu realisieren, wird der alte Blendrahmen komplett entfernt.

Die Innenverkleidung (hier: Material Stahlblech, lackiert) wird eingepasst und überdeckt die Spuren des alten Fensters.



## 5. Beschreibung der Arbeitsschritte anhand Variante 3

### 5.1 Grundlagenermittlung

#### **Untergründe – Putz – Steine – Mörtel – Festigkeit**

Im Vorfeld ist im Zuge der Bestandsaufnahme die Bausubstanz zu untersuchen. Hierbei ist das Augenmerk auf die Klassifizierung des vorhandenen Mauerwerks gerichtet.

- Druckfestigkeit der Ziegel bzw. der sonstigen Wandbaustoffe
- Druckfestigkeit des Mörtels – Mörtelklasse (Fuge und Putz)
- Haftverbund zwischen Mörtel und Ziegel (Fuge und Putz)

#### **Aufmaßerstellung, Festlegung von Toleranzen**

Vor Beginn der Baumaßnahme ist ein Aufmaß zu erstellen und vom Planer festzulegen, welche Schwankungen in den Bauteilgrößen und deren Fluchtgenauigkeit toleriert werden. Diese können von den Toleranzen im Hochbau abweichen.

- Maßtoleranzen Lochöffnungen in Länge und Breite, einheitliche Ober- und Unterkanten in Bezug auf den Meterriss
- Maßtoleranzen Lochöffnungen im Winkel

Basierend auf dem Aufmaß, den Untersuchungen und den Vorgaben des Auftraggebers werden die maximalen Bauteilgrößen und die erforderlichen Eingriffe in die Bausubstanz festgelegt.

Durch die Toleranzen in den Öffnungsweiten, in den Abweichungen der Brüstung und des Sturzes vom Meterriss sowie der Genauigkeit des Lotes (Winkels) kann bei einer einheitlichen Systemgröße der „kleinste gemeinsame Nenner“ um ein festzulegendes Maß (für jedes Bauvorhaben individuell) voneinander abweichen. Diese Abweichungen müssen bei der Wahl des Befestigungsmittels berücksichtigt werden.

#### **Vorhandene Laibungsausbildungen – innere Laibung**

Innere Laibungen können entweder verputzt oder verkleidet sein.

Auf verschiedene Varianten der Bestandslaibungen kann unterschiedlich reagiert werden. Die vorgeschlagenen Laibungsverkleidungen aus Holzwerkstoffplatten (Variante 1) oder Metallblech (Variante 2) ermöglichen einen schnellen Bauablauf ohne Trocknungszeiten. (Putz)

#### **Vorhandene Laibungsausbildungen – äußere Laibung**

An der Außenseite der Fensteröffnung sind die Bestandslaibungen als Putz oder mit Verkleidung ausgebildet. Vorhandene Friese oder Faschen können wieder aufgegriffen und in die Fenstermaschine integriert werden. Es ist zu empfehlen, den alten Laibungsanschlag zu entfernen. Der Platzgewinn ermöglicht den Einbau eines größeren neuen Fensters. Diese Festlegung ist im Zuge der Planung zu treffen.

#### **Vorhandene Fensterbank**

Um Kondenswasser und Wärmebrücken zu vermeiden, muss die vorhandene Fensterbank entweder entfernt oder eine thermische Trennung hergestellt werden. Die Entscheidung für eine der Varianten ist situationsabhängig und in Absprache mit dem Planer und Bauherren im Zuge der Planung zu treffen.

Bei Verbleib der vorhandenen Fensterbank im Mauerwerk muss eine thermische Trennung und die Einkürzung der Fensterbank auf die Vorderkante der Fassadenfläche erfolgen. Beides ist jedoch mit starken Vibrationen und hoher Lärmbelastung für die Bewohner verbunden. Aus diesem Grund und wegen des zusätzlichen Platzgewinns wird die vollständige Entfernung der Fensterbank favorisiert.

Der gewonnene Raum kann für die Unterbringung eines Teils der technischen Ausstattung genutzt werden. Bei der Ausnutzung des Platzgewinns ist allerdings die vorgeschriebene Mindestbrüstungshöhe zu beachten.

#### **Vergleich**

- Thermische Trennung
  - starke Vibrationen, Lärmbelastung
  - Einkürzung auf Fassade nötig

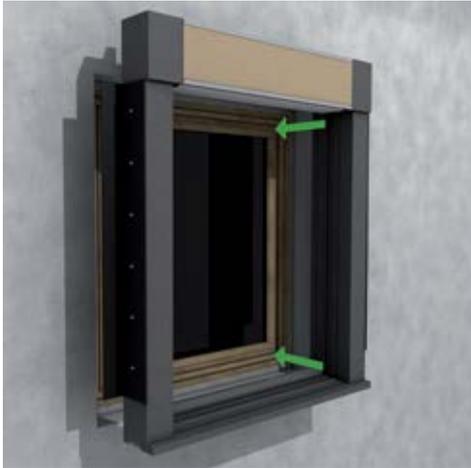


Abb. 24

Entfernung Fensterbank

- + Platzgewinn
- + Vermeidung von Wärmebrücken
- + Zeitersparnis
- + Raum für Technik

## 5.2 Anbringen des Dämmmoduls an der Fassade

### Sonnenschutz (optional)

Der Sonnenschutz (Rollladenpanzer oder Raffstore) wird im Werk vorgefertigt und montiert. Bei besonders großen Elementen wird der Sonnenschutz lose mitgeliefert und vor Ort montiert.

### Transport der Fenstermaschine zum Einbauort

Für den vertikalen Transport des Dämmmoduls werden die Elemente vormontiert und dann auf der Baustelle ähnlich der Montage eines Türfutters montiert.

Der vertikale Transport des vormontierten Elementes kann z. B. über Lastenaufzüge zwischen Gerüst und Fassade oder entlang der Außenseite des Gerüsts durchgeführt werden. Dies ist schon zu Beginn der Arbeiten zu berücksichtigen, indem das Gerüst in ausreichendem Abstand von der bestehenden Fassade befestigt wird. Für die Montage des geplanten WDVS-Systems ist ohnehin ein größerer Wandabstand erforderlich.

Vor dem Einsetzen in die Laibungsöffnung sollte die Montage des neuen Blendrahmens an das Dämmmodul erfolgen.



Abb. 25

Alternativ: Montage in Einzelteilen

Transport und Montage sind alternativ auch in Einzelteilen möglich. Da dies der Idee der Fenstermaschine widerspricht, ist diese Variante hier nur der Vollständigkeit und zum Vergleich der Vor- und Nachteile aufgeführt:

Werden die Einzelteile über das Gerüst bis zur Laibungsöffnung transportiert, muss das Modul auf dem Gerüst montiert und ausgerichtet werden. Dies kann im Einzelfall aufgrund der Platzverhältnisse oder mangels ausreichend dimensionierten Lastenaufzugs erforderlich sein.

Die zur Verfügung stehende Montagefläche auf dem Gerüst ist begrenzt, dies erschwert die exakte Ausrichtung des Moduls und kann im Extremfall zu einem Verziehen des Rahmens führen.

Die sichere Verbindung und Abdichtung der Lüftungskanäle erfolgt über verschiedene Dichtungssysteme.

Der ausführenden Fachfirma müssen aussagekräftige Zeichnungen und Montageanleitungen vorliegen. Dazu zählen unter anderem Zeichnungen der seitlichen variablen Winkel und aller Profile.

Vor dem Einsetzen in die Laibungsöffnung sollte hier ebenfalls die Montage des neuen Blendrahmens an das Dämmmodul erfolgen.

24 Anbringen Träger-element,  
Quelle: B+H

25 Montage Blend-rahmen,  
Quelle: B+H

## Vergleich:

### In Einzelteilen

- + geringeres Einzelgewicht
- hoher Zeitaufwand vor Ort
- + besser anpassbar an bauliche Maßveränderungen
- ggf. improvisierte Lösungen
- oftmals ungenügende Planung
- Ungenauigkeit und Witterungsabhängigkeit der Baustellenmontage
- Vielzahl von Fugen, Schnittstellen, und Abhängigkeiten
- Fügungen vor Ort, Materialien später schwer trennbar

### Vormontiert

- relativ hohes Gesamtgewicht
- + Zeitersparnis
- + geringere Fehlerquote bei Verbindung der integrierten Systeme
- + Montage durch Systemspezialisten unter Verwendung geprüfter Systemlösungen
- + Planung erfolgt zwingend vorab
- + Präzision u. Witterungsunabhängigkeit der Werkstattmontage
- + minimierte Schnittstellen, verschiedene Gewerke in einer Hand
- + Definierte, trennbare Verbindungen (Recycling)

### Montage des Blendrahmens

Die Montage des neuen Blendrahmens erfolgt von außen, möglichst noch vor dem Anbringen des gesamten Dämmmoduls an der Außenwand. Die Befestigung geschieht gemäß RAL-Befestigungsleitfaden mechanisch – zur Bildung einer kraftschlüssigen Verbindung des Fensterrahmens zum Dämmmodul.

Um die Störung des Nutzers so gering wie möglich zu halten, erfolgt das Einhängen der Fensterflügel unmittelbar nach Demontage des alten Blendrahmens von innen.

### Abdichtung zum Mauerwerk

Die Abdichtung des Dämmmoduls zum Mauerwerk erfolgt mittels Dichtungs- und Multifunktionsbändern. Durch kombinierten Einsatz verschiedener Stärken können Unebenheiten (Abplatzungen, Faschenversatz, etc.) ausgeglichen werden.

Nach dem Einlegen der Dichtbänder in die Nuten wird durch Anschrauben eine kraftschlüssige Verbindung des Dämmmoduls zur Wand gebildet. Auch die Abdichtung mittels Schäumen ist gemäß Stand der Technik denkbar, allerdings bisher nicht in den Montagerichtlinien enthalten. Im Sinne einer sortenreinen Entsorgung nach Nutzungsende werden Dichtbänder bevorzugt.

Für die langfristige Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit der integrierten Systeme ist der sichere Sitz der Montagezarge (Var. 1) bzw. des Dämmmoduls (Var. 3) unverzichtbar. Das Bauteil muss dauerhaft mit dem Gebäude verbunden werden (statische Anforderungen beachten).

### Laibungsanschlag

Für alle Varianten der Fenstermaschine spielt es keine Rolle, ob die Laibung mit oder ohne Anschlag ausgeführt ist. Die Montage der Fenstermaschine erfolgt in jedem Fall auf die Außenwand, also vor der Laibung.

### Fassadenflucht

Durch die Montage der Dämmmodule werden für die nachgestellten Gewerke an der Fassade die Maße und Fluchten weitestgehend vorgegeben. Deshalb gelten hier die Vorschriften aus der DIN „Toleranzen im Hochbau“, oder die gegebenenfalls davon abweichenden, vertraglich festgehaltenen Vorgaben des Auftraggebers. (siehe Grundlagenermittlung)

## 5.3 Komplettierung des Moduls

Von außen wird das Dämmmodul mit allem Zubehör fertiggestellt. Das sind im Einzelnen: Führungsschienen, Sonnenschutz und die Blendrahmenabdichtung.

### Führungsschienen

Die Ausführung des Schienensystems richtet sich nach Art des vorgesehenen Sonnenschutzes, also ob die Verschattung durch Rollladenpanzer oder Raffstore realisiert wird. Der Insektenschutz läuft in einer Schiene parallel zum Sonnenschutz. Die Führungsschienen werden in das integrierte Aufnahmemodul für Führungsschienen eingeklipst und verschraubt.

### Sonnenschutz

Sollte der Sonnenschutz nicht werkseitig vormontiert sein, erfolgt jetzt die Montage.

### Abdichtung

Die Abdichtung und Versiegelung des Fensterrahmens sowohl von der Innenseite als auch von der Außenseite erfolgt nach den RAL-Richtlinien mit Multifunktionsbändern. Dadurch wird gewährleistet, dass der Fensterrahmen von innen her luftdicht und von außen her schlagregendicht angebracht ist. Eine Überdämmung des Blendrahmens ist nicht notwendig, kann aber im Bedarfsfall mittels speziellem Schienenprofil realisiert werden.



Abb. 26



Abb. 27

## 5.4 Fassadenfertigstellung

Anschließend erfolgt ggf. die Überdämmung des Dämmmoduls und DIN-gerechte Einbindung ins WDVS-System. Die Art und Stärke der Überdämmung ist im Vorfeld mit den Systemgebern abzustimmen. Die Fertigstellung der Fassade erfolgt durch die nachfolgenden Gewerke.

## 5.5 Demontage des alten Fensters

Demontage des alten Fensters und Fassadenfertigstellung können parallel erfolgen. (Besser: Demontage Altfenster zuletzt)

Für die Bestandssituation gibt es verschiedene Varianten:

- eingeputzter Blendrahmen
- Fensterlaibung ohne Anschlag
- Fensterlaibung mit Anschlag

Im Normalfall wird die Fensterdemontage durch Zerschneiden des alten Blendrahmens erfolgen. Nach dem



Abb. 28

Lösen der alten Befestigungsmittel und dem Entfernen des umgebenden Putzes kann der Blendrahmen entfernt werden.

Nach Demontage des Fensterelementes erfolgt die Vorbereitung der Stromzufuhr für das Lüftungselement, sofern nicht bereits auf der Außenfassade ver-

26 Fassadenfertigstellung, Quelle: B+H

27 Demontage Altfenster, Quelle: B+H

28 Montage innere Laibung, Quelle: B+H

legt. (Vorteil: keine Fräs- und Putzarbeiten im Gebäude bzw. Aufputzleitungen)

Die Fensterflügel werden eingehängt und justiert.

### **5.6 Anbringen der inneren Laibung**

Das innere Laibungselement muss vor Ort anpassbar sein. In diesem Zuge können Hohlräume, die zur Vermeidung bauphysikalischer Probleme unbedingt geschlossen werden müssen, z. B. mit Dämmmaterial ausgestopft bzw. ausgeblasen werden. Unebenheiten können vor Ort durch Dichtmittel wie Dichtbänder ausgeglichen werden. Der Anschluss an die vorhandene Innenwand ist über eine gleichmäßige Schattenfuge zu realisieren.

Dabei ist die Vielfalt der zu beachtenden Altbauwände und deren Besonderheiten zu beachten:

- Tapete
- Putz
- Trockenbau
- Fliesen
- Holzvertäfelung

### **5.7 Revisionierbarkeit**

#### **Dämmmodul**

Das Dämmmodul ist als Montagehilfe und Montagerahmen konzipiert. Es fasst die verschiedenen Bauteile zusammen, so dass diese im Werk zusammengefügt werden können. Eine spätere Demontage ist nicht vorgesehen und kann nur im Zuge einer Erneuerung oder zumindest Überarbeitung der WDVS-Fassade erfolgen.

#### **Sonnenschutz und Insektenschutz**

Die Revisionierbarkeit des Sonnenschutzes und des Blendrahmens ist durch den bewährten Aufbau des Rollladen- bzw. Raffstorekastens gegeben. Beim Rollladenkasten ist der Rollladenpanzer nach Entfernen des Abrollprofils bzw. der integrierten Insektenschutzkassette zugänglich. Auch die Revisionierung beim Raffstorekasten ist für Fachfirmen problemlos möglich. Der Mieter wird durch Wartungsarbeiten an der Verschattungseinheit nur geringfügig beeinträchtigt.

### **Integrierte Systeme**

Die Demontage der im Dämmmodul verbauten Systeme ist nur im Notfall möglich, allerdings darf diese nur von Fachfirmen durchgeführt werden. Alle Leitungssysteme und Lüftungselemente sind so auszulegen, dass ihre Funktionsfähigkeit über die gesamte zu gewährleistende Lebensdauer der WDVS-Fassade wartungsfrei gegeben ist.

#### **Fenster**

Eine spätere Demontage des Fensters ist möglich, darf aber aufgrund der Komplexität des Systems nur von Fachfirmen ausgeführt werden.

#### **Blendrahmen**

Der Blendrahmen wird so angebracht, dass die ggf. notwendige Demontage/Montage sowohl von innen als auch von außen möglich ist. Durch die Montage von innen können die Kosten für die Gerüststellung bzw. den Einsatz eines Hubsteigers für Arbeiten an einzelnen Fenstern eingespart werden. Bei einer Montage von außen können die Arbeiten weitestgehend ohne Störung der Bewohner durchgeführt werden.

### **5.8 Technische Daten**

#### **Statik des Elements**

Vertikallast

Da die Befestigungsebene des Fensters in der Dämmebene und somit vor der Laibung liegt, muss das Dämmmodul/der Montagerahmen die komplette Last des Fensters als Vertikallast tragen.

Für eine heute übliche Dreifachverglasung kann ca. 40 kg pro m<sup>2</sup> veranschlagt werden. Dazu kommt eine „Mannlast“ von 100 kg am äußeren Flügelende bei offenem Fenster.

Horizontallasten

Diese sind objektbezogen und hängen von verschiedenen Faktoren ab:

Standort: Land (nationaler Anhang)

Windlastzone

- Geländekategorie
- Lage über NN
- Exponiertheit

- Gebäudehöhe
- Gebäudegeometrie
- Position des Fensters am Gebäude
- Windrichtung

**Trägermaterial des Dämmmoduls**

Für die Herstellung des Dämmmoduls wird von Beck+Heun folgender Dämmstoff verwendet: Beck+Heun EPS 100 kg, Lambda = 0,040 W/mK. An der Weiterentwicklung von geeigneten Dämmstoffen wird permanent gearbeitet.

**Dichtigkeit**

Bei der Betrachtung der Dichtigkeit sind im Fensterbereich zwei Arten von Bedeutung. Erstens die Schlagregendichtheit gemäß DIN EN 12208. Zweitens die Luftdichtheit, welche in der DIN EN 12207 (Luftdurchlässigkeit der Fugen) definiert wird.

Es sind hier mehrere Verbindungsstellen zu unterscheiden. Das Dämmmodul ist in sich dicht, weil es als Grundkörper aus einem einheitlichen EPS-Block besteht.

Die Abdichtung des Dämmmoduls von außen gegen das Mauerwerk erfolgt durch Dichtungs- und Multifunktionsbänder. Neben der Dichtwirkung können damit Unebenheiten ausgeglichen werden.

Auch die Abdichtung der inneren Laibung gegenüber der vorhandenen Wand sollte mit Dichtungsbändern erfolgen.

**Anzahl der Bauteile**

Erklärtes Ziel bei der Entwicklung der Fenstermaschine war die Integration sämtlicher rund ums Fenster benötigter Einzelkomponenten in ein Bauteil.

Dies lässt sich in Variante 3 nicht verwirklichen, da ein Teil der Fenstermaschine von außen auf das Mauerwerk montiert wird und erst nach Entfernung des im Altbau vorhandenen Blendrahmens die innere Laibung angebracht werden kann. Unter optimalen Rahmenbedingungen können wir also von zwei Bauteilen sprechen:

- Dämmmodul außen
- innere Laibung

Letztlich ist die Anzahl der Bauteile abhängig von der Fenstergröße, den Gegebenheiten auf der Baustelle, den Wünschen des Bauherren und dem Zustand des Gebäudes, bezogen auf Lotrechtheit und Maßabweichungen der einzelnen Laibungsöffnungen von einander.

Ziel wird in jedem Fall eine möglichst hohe Vorfertigung sein, um den Montageaufwand auf der Baustelle zu verringern und Fehlerquellen zu minimieren.

**Gegenüberstellung vorhandene Beck+Heun-Produkte – Fenstermaschine Var. 3**

Kriterium	Roka- CO <sub>2</sub> mpact-Shadow SA	Fenstermaschine Var. 3
Befestigungsebene	• in Mauerwerksebene	• integriert im Dämmmodul
Lüftungssystem	• separat erhältlich	• integriert
Montage Dämmung	• in die Laibung hinein	• vor der Laibung
Statik	• selbsttragendes Element	• Element trägt Fenster

## 6. Tageslichtperformance und Sonnenstrahlungstransmission

Die 3 Varianten wurden simuliert und mit dem Bestand verglichen. Für das Bestandsfenster und alle drei Varianten wurde das selbe Rohbauöffnungsmaß zu Grunde gelegt. Die Simulationen wurden am Fraunhofer ISE durchgeführt von Jinsuk Kang und Bruno Bueno.

### Randbedingungen:

- Wetterdatei: Frankfurt/Main (Meteonorm).
- Raumgeometrie: 4,00 × 4,34 × 2,50 m
- Fensteröffnung: 2 Fenster à 1,23 × 1,48 m
- Fensterrichtung: Süd
- Wandstärke: 30 cm
- Dämmstärke: 16 cm (0 cm für die Bestandssimulation)

### Simulationstool:

Fener (Bueno et al 2015, Ward et al 2011)

### Definition von Tageslichtparametern:

Tageslichtautonomie

Tageslichtautonomie ist für Bürogebäude (hier übernommen auch für Wohngebäude) durch den Anteil der Arbeitsstunden definiert, an denen Tageslicht ein bestimmtes Niveau erreicht (es wird angenommen, dass unter diesem Niveau elektrisches Licht angeschaltet werden muss).

$$DA_{300lx} [\%] = \frac{\text{working hours with daylight illuminance} \geq 300lx}{\text{total working hours}} \cdot 100$$

Tageslichtfaktor

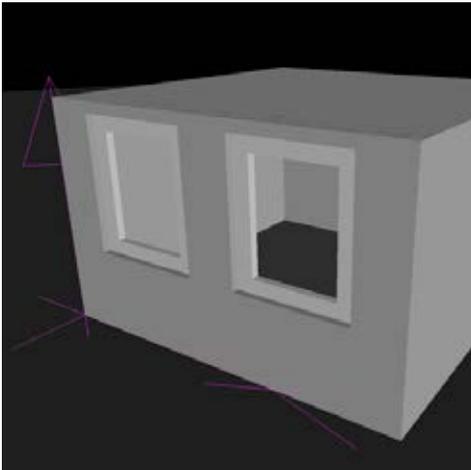
Das Tageslichtfaktor (%) ist das Verhältnis des internen Lichtniveau zu externem Lichtniveau.

$$DF = Ei/Eo \cdot 100.$$

Ei = indoor illuminance. Eo = Outdoor illuminance.

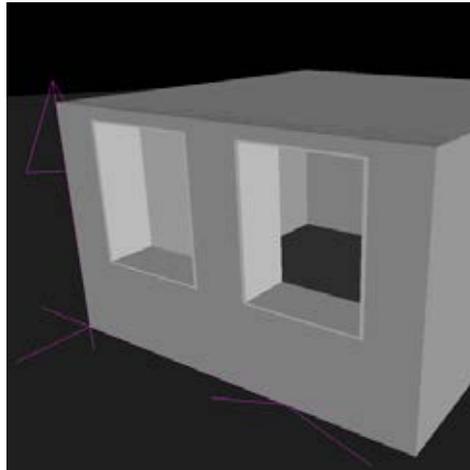
## 6.1 Simulationsergebnisse

### Referenz: Bestandssimulation

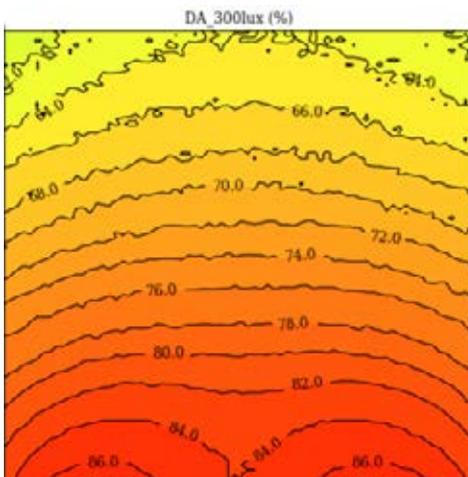


Raum- und Fenstergeometrie

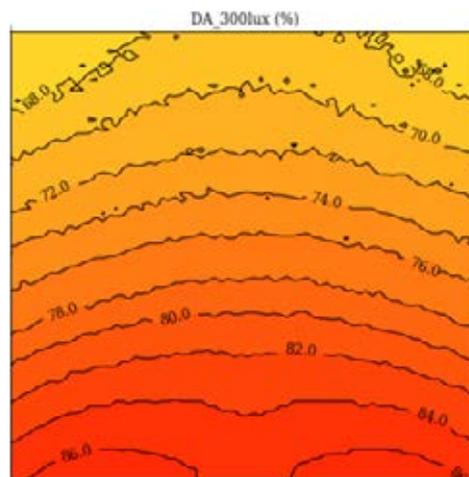
### Variante 1



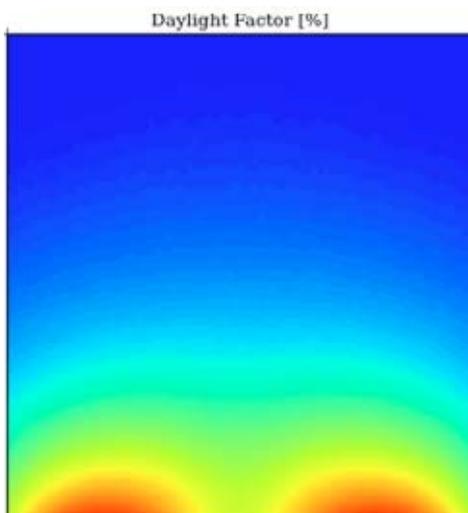
Raum- und Fenstergeometrie



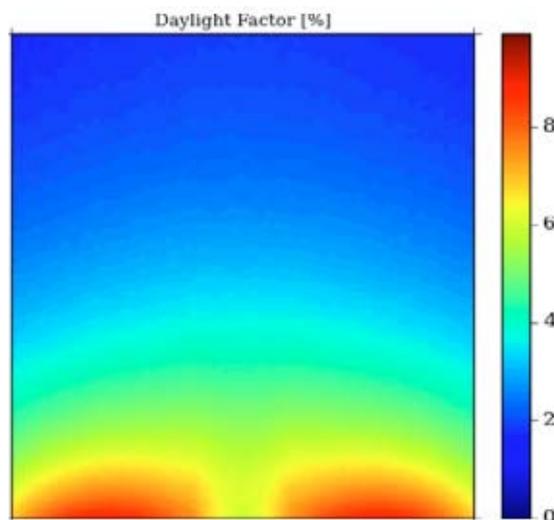
Tageslichtautonomie  
Mittelwert = 73,56 %



Tageslichtautonomie  
Mittelwert = 76,43 %



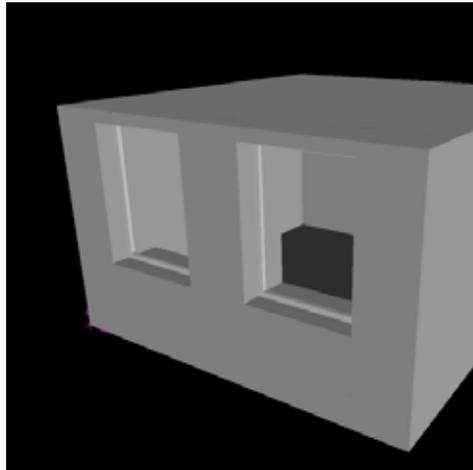
Tageslichtfaktor  
Max = 8,56 %  
Mittelwert = 3,14 %  
Min = 1,32 %



Tageslichtfaktor  
Max = 8,79 %  
Mittelwert = 3,58 %  
Min = 1,65 %

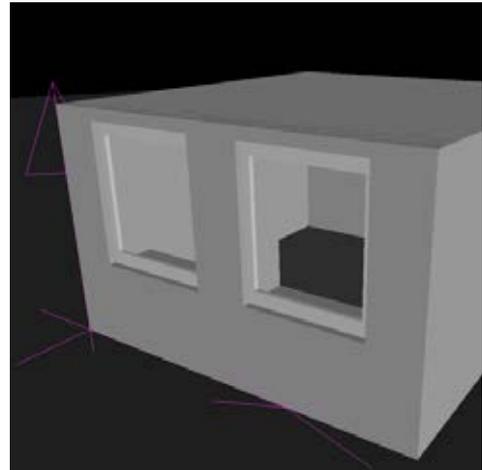
29 Simulationsergebnisse Bestand und Variante 1  
Quelle: ISE

**Variante 2**

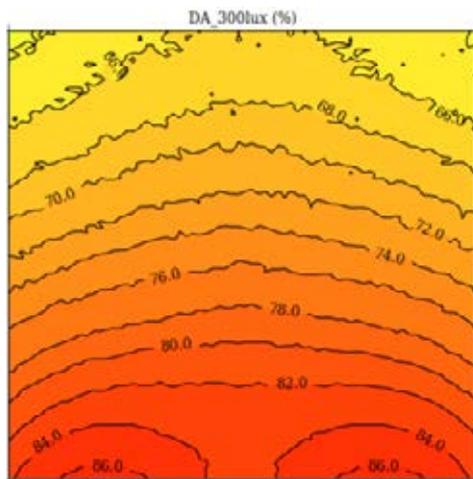


Raum- und Fenstergeometrie

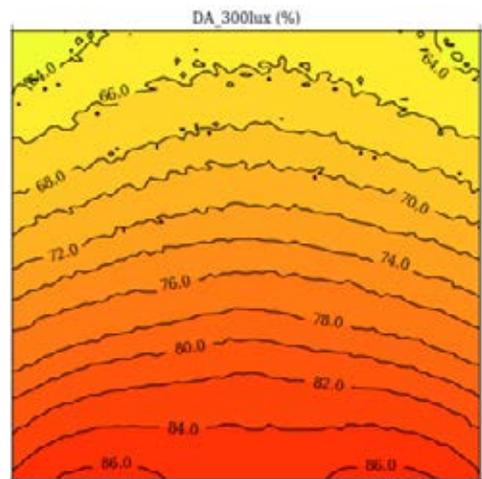
**Variante 3**



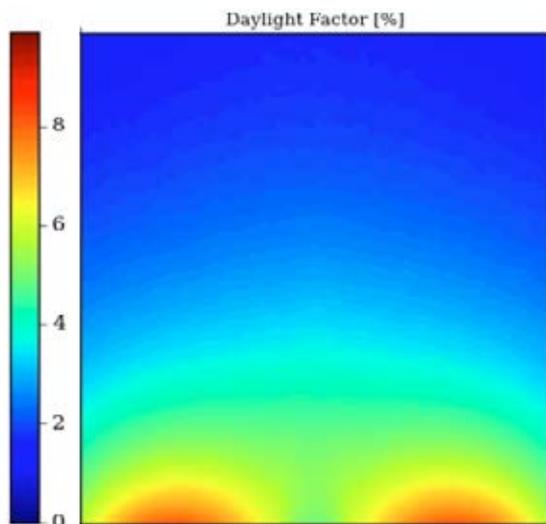
Raum- und Fenstergeometrie



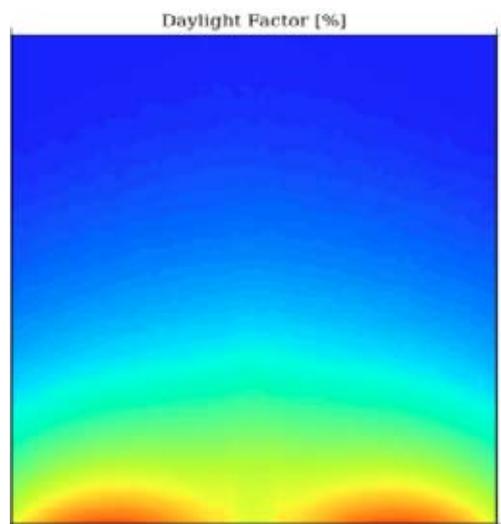
Tageslichtautonomie  
Mittelwert = 74,49 %



Tageslichtautonomie  
Mittelwert = 74,08 %



Tageslichtfaktor  
Max = 8,05 %  
Mittelwert = 3,18 %  
Min = 1,44 %



Tageslichtfaktor  
Max = 8,16 %  
Mittelwert = 3,15 %  
Min = 1,39 %

30 Simulationsergebnisse Variante 2 und 3  
Quelle: ISE

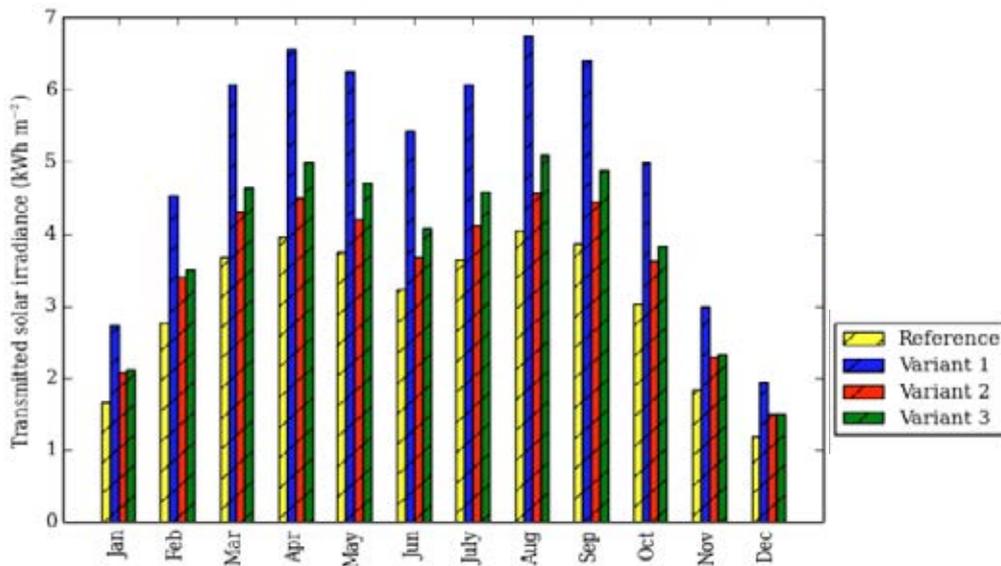


Abb. 31

	Fenstergröße (m <sup>2</sup> )	Abstand zwischen Außenfläche Verglasung und Außenfläche Fassade (m)	Tageslichtautonomie (% Mittelwert)	Tageslichtfaktor (% Mittelwert)	Jährliche Sonneneinstrahlungstransmission (kWh/m <sup>2</sup> )
Bestand	1,02	0.075	73,56	3,14	36,67
Variante 1	1,64	0	76,43	3,58	60,72
Variante 2	1,36	0.202	74,49	3,18	42,70
Variante 3	1,30	0.078	74,08	3,15	46,27

Abb. 32

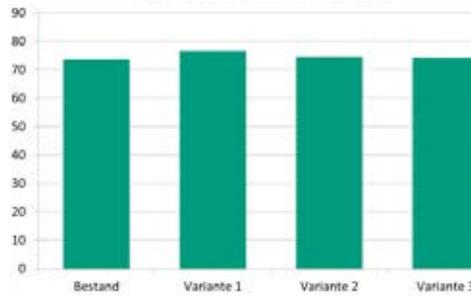


Abb. 33

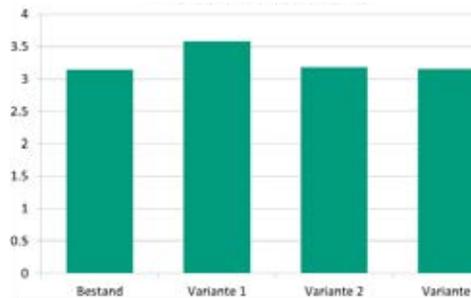


Abb. 34

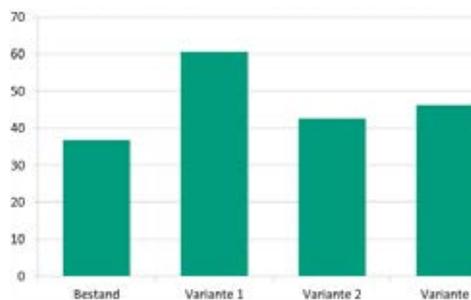
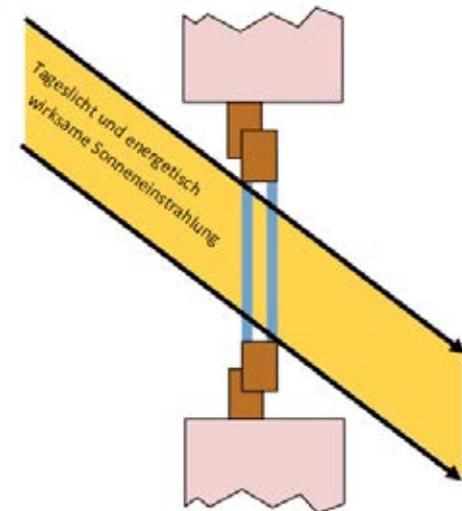


Abb. 35

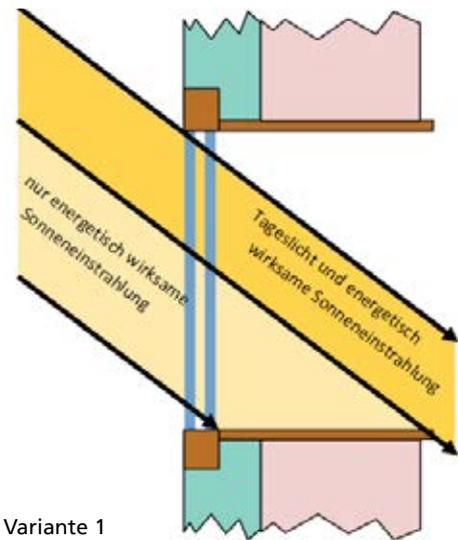
- 31 Monatliche Sonneneinstrahlungstransmission pro Quadratmeter Bodenfläche, Quelle: ISE
- 32 Zusammenfassung, Quelle: ISE
- 33 Tageslichtautonomie (% Mittelwert), Quelle: ISE
- 34 Tageslichtfaktor (% Mittelwert), Quelle: ISE
- 35 Jährliche Sonneneinstrahlungstransmission (kWh/m<sup>2</sup>), Quelle: ISE

## 6.2 Zusammenfassung

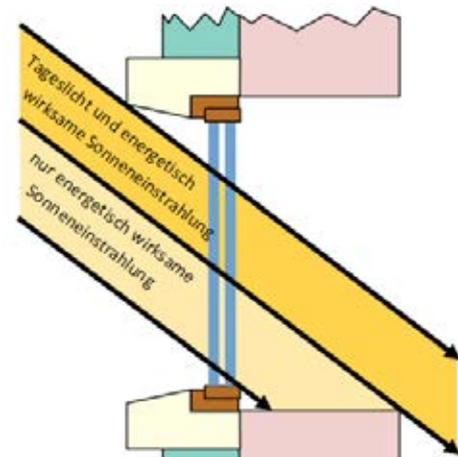
Wie erwartet liefert Variante 1 die besten Ergebnisse, sowohl bezüglich Tageslicht als auch bezüglich Sonnenenergiegewinne. Bei Tageslichtautonomie sind die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Varianten sehr niedrig. Die Dämmdicke spielt dabei die größte Rolle. Bei den Sonnenenergiegewinnen spielt die Größe und die Lage der Fensterscheiben die entscheidende Rolle.



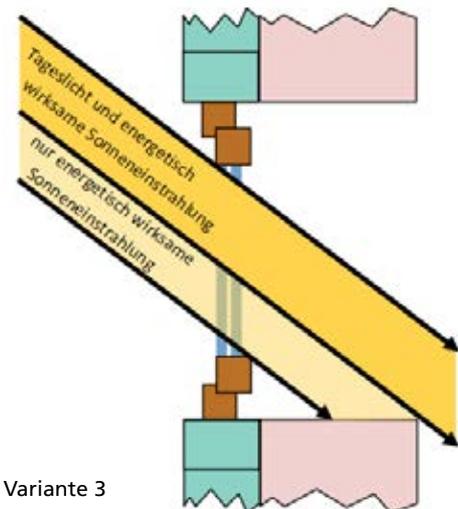
Bestand



Variante 1



Variante 2



Variante 3

## 7. Lüftung

### 7.1 Anforderungen

Dezentrale Lüftungsgeräte bringen den Vorteil mit sich, dass außer den Ein- und Auslässen innerhalb der Wohnung keine Lüftungsleitungen verlegt werden müssen.

Die Marktanalyse von Produkten für dezentrale Lüftung, die für das Forschungsprojekt relevant sind, gliedert sich wie folgt nach Konzept und Einbausituation:

zwei verschiedene Lüftungskonzepte:

- regenerative Wärmerückgewinnung: alternierende Luftrichtung, Wärmerückgewinnung durch Speicherstein meistens aus Keramik, Geräte funktionieren paarweise (SEVi, inVENTer, Lunos, Airfox)
- klassischer Wärmetauscher: kontinuierliche Lüftung (Premivent, Ventotherm, Aeromat, Ventra,
- AirPurModul, I-tec Fenster, Innovent)

Einbausituationen:

- direkt in der Fassade
- an der Fensterbank
- an der Fensterlaibung
- am Fensterrahmen (ohne Kernbohrung)

Als Fazit werden die Fakten zusammengefasst: es gibt auf dem Markt kein Gerät, das folgende Kriterien erfüllt:

- geringer Installationsaufwand bei Sanierungen (keine Kernbohrung)
- $WRG \geq 80 \%$
- geringer Einfluss auf die Wärmedämmung der Gebäudehülle
- Volumenstrom  $\geq 50\text{m}^3/\text{h}$
- Elektrische Leistung  $\leq 15\text{ W}$

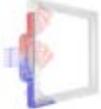
Diese Kriterien sind der Mindestanspruch an dezentrale Lüftungsgeräte, der im Projekt Fenstermaschine umgesetzt werden soll. Dies auch im Hinblick auf eine zukünftige Marktgängigkeit des Forschungsansatzes. Dazu nachfolgend der tabellarische Überblick der Geräte am Markt (Abb. 37+38).

		Façade integrated			
Manufacturer Name		Zehnder ComfoAir 70	Roos Air Midi	Siegenia Aerolife	SEVI 200
Type		Balanced system	Balanced system	Balanced system	Regenerative concept functions by pair
Size	mm	660 x 440 x 145	620 x 605 x 190	490 x 467 x 178	Diameter 220 Lenght 300
Heat recovery	/	89%	77%	66%	91%
Moisture recovery	/	79%	No	No	not available
Max airflow	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	65	80	70	48 (for 2 devices)
Min airflow	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	15	20	29	15 (for 2 devices)
Max electrical power	W				18
Max electrical power for both fresh and exhaust air	W	19	45	33	36
Min electrical power	W				2,7
Min electrical power for both fresh and exhaust air	W	4	6,5	11	5,4
Max sound pressure level	dB	36,3	33,7	41	
Min sound pressure level	dB	10,9	16,2	24	16,8
Acoustic insulation from outside noise	dB	40	not available	52	39
Size of the core hole or wall opening	/	Diameter 270 mm	2 x Diameter 103 mm	Diameter 110 mm	Diameter 220 mm
Minimal wall thickness	mm	275	none	150	300
Picture					

		Façade integrated			
Manufacturer Name		inVENTer 25	Lunos e <sup>90</sup>	Lunos e <sup>2</sup>	Helios Ecovent 60
Type		Regenerative concept functions by pair	Regenerative concept two in one with possibility of exhaust only	Regenerative concept functions by pair	Regenerative concept functions by pair
Size	mm	Diameter 260 Lenght 270	Diameter 162 Lenght 300	Diameter 162 Lenght 300	Diameter 352 Lenght 350
Heat recovery	/	92%	85%	90%	70%
Moisture recovery	/	not available	not available	25%	not available
Max airflow	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	54 (for 2 devices)	20	38 (for 2 devices)	60 (for 2 devices)
Min airflow	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	20 (for 2 devices)	5	17 (for 2 devices)	17 (for 2 devices)
Max electrical power	W	6	4,5	3,3	4
Max electrical power for both fresh and exhaust air	W	12	4,5	6,6	8
Min electrical power	W	3	1	1,4	1
Min electrical power for both fresh and exhaust air	W	6	1	2,8	2
Max sound pressure level	dB	42	43	26	30
Min sound pressure level	dB	28	23	16,5	18
Acoustic insulation from outside noise	dB	not available	not available	42	39
Size of the core hole or wall opening	/	Diameter 260 mm	Diameter 162 mm	Diameter 162 mm	Diameter 352 mm
Minimal wall thickness	mm	270	300	300	350
Picture					

37 Marktanalyse dezentrale Lüftung, fassadenintegriert, Quelle: ISE

Window integrated					
Manufacturer Name		Premivent	Schüco VentoTherm	Siegenia Aubi Aeromat VT with heat recovery	HAUTAU Ventra
Type		Balanced system	Balanced system	Balanced system	Balanced system
Size	mm	922 x 396 x 115	1050 x 220 x 50	1000 x 320 x 100	485 x 240 x 98
Heat recovery	/	89%	45%	62%	86%
Moisture recovery	/	70%	No	No	No
Max airflow	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	50	30	42	30
Min airflow	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	15	15	19	8
Max electrical power	W				
Max electrical power for both fresh and exhaust air	W	12	13	21	34,5
Min electrical power	W				
Min electrical power for both fresh and exhaust air	W	7	5	10	3,8
Max sound pressure level	dB	33,7	37,7	34	62
Min sound pressure level	dB	19,7	25,9	17	26
Acoustic insulation from outside noise	dB	not available	42	50	41
Size of the core hole or wall opening	/	986 mm x 178 mm	none	1000 mm x 100 mm	485 mm x 98 mm
Minimal wall thickness	mm	414 min concrete thickness: 240	Installation direct on the window frame	Installation direct on the window frame	240
Picture					

Window integrated					
Manufacturer Name		Airfox (Beck+Heun)	AirPurModul	I-tec Fenster	Geneo Inovent
Type		Regenerative concept functions by pair	Balanced system	Balanced system	Balanced system
Size	mm	300 x 300 x 125	not available	not available	not available
Heat recovery	/	85%	69% - 84%	86%	not available
Moisture recovery	/	not available	No	No	No
Max airflow	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	40 (for 2 devices)	45	not available	not available
Min airflow	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	15 (for 2 devices)	11	not available	not available
Max electrical power	W	18			
Max electrical power for both fresh and exhaust air	W	36	not available	not available	not available
Min electrical power	W	8,6			
Min electrical power for both fresh and exhaust air	W	17,2	not available	not available	not available
Max sound pressure level	dB	not available	not available	not available	not available
Min sound pressure level	dB	not available	not available	not available	not available
Acoustic insulation from outside noise	dB	not available	not available	not available	not available
Size of the core hole or wall opening	/	300 mm x 125 mm	none	none	none
Minimal wall thickness	mm	300	Installation in existing roller shutter casing	Installation direct on the window frame	Integrated in window frame
Picture					

38 Marktanalyse dezentrale Lüftung, fensterintegriert, Quelle: ISE

## 7.2 Umsetzung

Bezüglich der Integration von Lüftungstechnik wurden folgende Wege für die Prototypen beschriftet:

Für Variante 1

Zu- und Abluftanschlüsse für die Versorgung der Räume werden über Lüftungskanäle in der Dämmebene angeschlossen.

Für Variante 2

Hier wird ein dezentrales Lüftungsgerät vollständig im gedämmten Rahmen integriert.

Für Variante 3

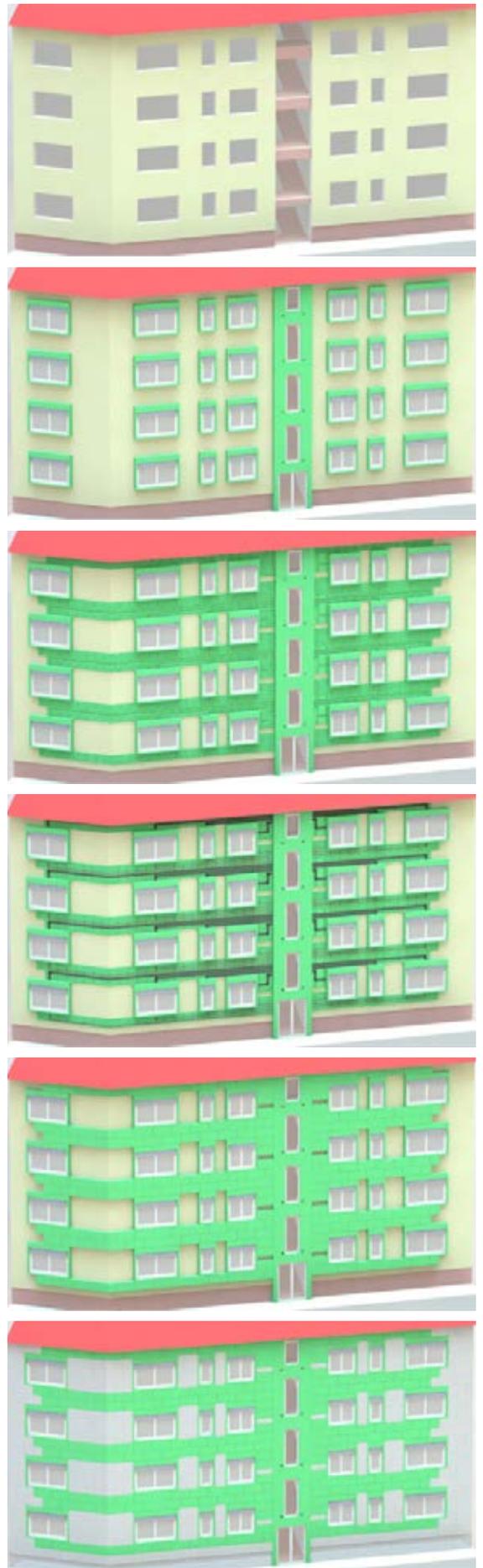
Die von Beck+Heun entwickelten „Airfox Lüfter“ werden in abgewandelter Form in einer Fensterzarge so integriert, so dass keine Eingriffe in das Bestandsmauerwerk erforderlich sind.

### Variante 1

Die Zu- und Abluftanschlüsse werden für eine Versorgung der Räume über Lüftungskanäle in der Dämmebene vorgesehen. Dies erfordert zentral gelegene Lüftungsgeräte, die mehrere Räume einer Wohnung oder auch mehrere Wohnungen versorgen.

Der Nachteil einer dezentralen Lüftung im Vergleich zu einer zentralen Lüftung liegt darin, dass allein schon der Filterwechsel das Betreten der Wohnungen und damit einen hohen logistischen Aufwand erfordert. Die Vielzahl der Geräte bringt außerdem eine entsprechende Störanfälligkeit mit sich. Wohnungsunternehmen scheuen den Aufwand, zu den Mietern in die Wohnung zu kommen, weswegen oftmals dezentrale Konzepte nicht in Frage kommen.

Für das Forschungsprojekt fiel deshalb die Entscheidung für eine Lösung, die für zentrale Lüftungsanlagen in Kombination mit fassadenintegrierten Luftleitungen geeignet ist und damit die Vorteile der zentralen und der dezentralen Lüftung miteinander verbindet: Die Wartung der Anlage erfolgt an zentraler Stelle, die Leitungen werden außerhalb der Wohnungen verlegt. In den nachfolgenden Darstellungen ist der Sanierungsprozess eines Mehrfa-



39 Ablauf Fassaden-  
sanierung mit integ-  
rierter Lüftung in der  
Dämmebene,  
Quelle: ISE

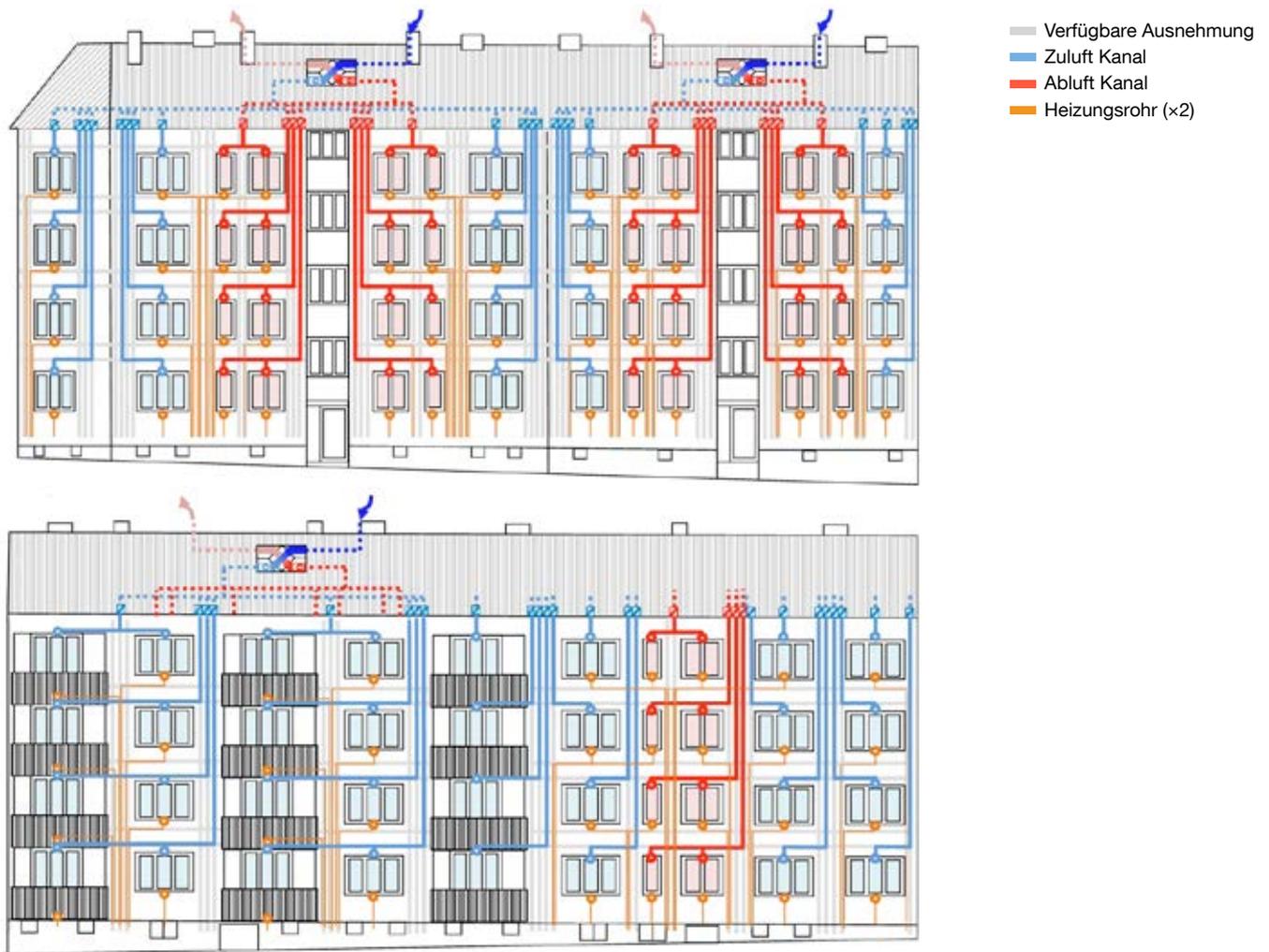


Abb. 40

milienhauses gezeigt, der die Lüftungsleitungen in der Dämmebene vorsieht mit Anschlüssen für Zu- und Abluft an den vorgefertigten Fensterelementen und einem zentralen Lüftungsgerät am oder im Treppenhaus.

Beispiel für eine horizontale Verteilung der Leitungen: Abb. 39

Es sind auch Verlegearten mit Lüftungsanlagen im Dachraum oder im Keller möglich – wie in einem Beispiel für eine senkrechte Verteilung der Leitungen auf der Fassade in Abb. 40 schematisch dargestellt.

Die dazu gehörenden Fenstermodule benötigen dazu die passenden Anschlüsse. Je Wohnung gibt es Lufteinlässe (Wohnzimmer und Schlafzimmer) und Luftauslässe (Bad und Küche). In den Abbildungen 41–43 ist zu sehen, wie derartige Zu- und Abluftanschlüsse

positioniert und ausgeformt sein könnten:

Die Verteilung der Luft aus dem zentralen Lüftungsgerät in den Wohnungen erfolgt als minimal-invasive Lösung

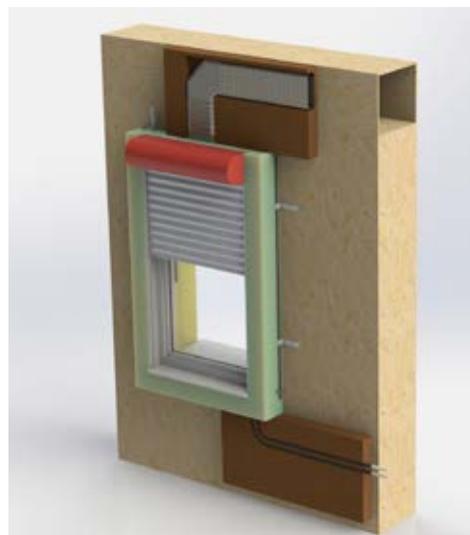


Abb. 41

40 Verlegeschema Lüftung in der Fassade mit Lüftungsgerät im Dachraum, Quelle: ISE

41 Einbausituation Zuluft / Abluft über Fenstersturz, Quelle: ISE



Abb. 42

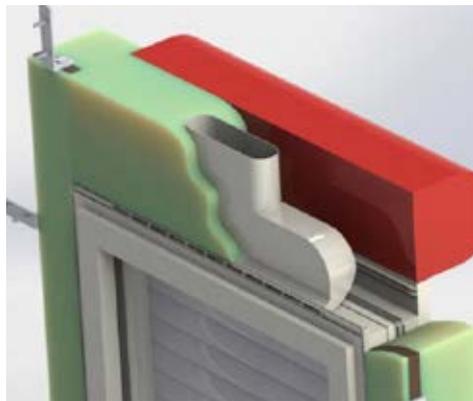


Abb. 43

ohne Kernbohrungen. Für den gewählten Prototyp Variante 1 der Fenstermaschine wird eine Luftführung gewählt, die seitlich in der Laibung von der Dämmebene durch den Fensterrahmen geführt wird. Dies ermöglicht eine hohe Öffnung und ein zugfreies langsames Einströmen der Frischluft. Es wäre auch möglich, diese Öffnung oben im Fenstersturz vorzusehen. In der gewählten Variante ist der Bauraum dort jedoch für Rollos vorgesehen. Der gewählte (maximale) Querschnitt ist beispielhaft gewählt, um im Maximalfall die Abluft für eine 100m<sup>2</sup> Wohnung über zwei Abluftanschlüsse zu führen (Bad und Küche) – bei gleichen Rohrquerschnitten in der Fassade.

Die Entwicklung eines optimierten Luftanschlusses könnte auch für optimierte Zuluftöffnungen genutzt werden als reines Zuluftelement. Durch den Einbau im gedämmten Fensterrahmenelement ergeben sich gute Möglichkeiten zur Filterung und Schalldämmung.



Abb. 44

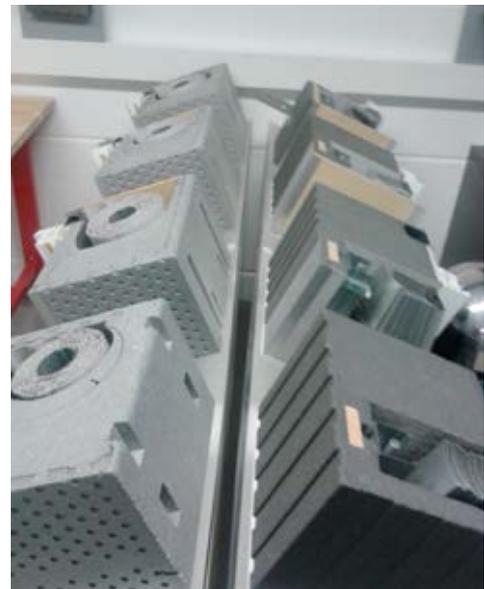


Abb. 45

Querschnitt Luftleitungen (Innere Maße)



Abb. 46

- 42 Einbausituation Zuluft / Abluft über Fenstersturz Detail, Quelle: ISE
- 43 Einbauteil Luftversorgung im Fensterrahmen-Dämmelement – vom Innenraum gesehen, Quelle: ISE
- 44 Projekttreffen 22.10.2013 Werk Beck+Heun, Quelle: ISE
- 45 Projekttreffen 22.10.2013 Werk Beck+Heun, Quelle: ISE
- 46 Querschnitt einer Luftleitung in der Dämmebene der Fassade, Standard-Maß der Fa. Aldes, Quelle: ISE, TUM EBB

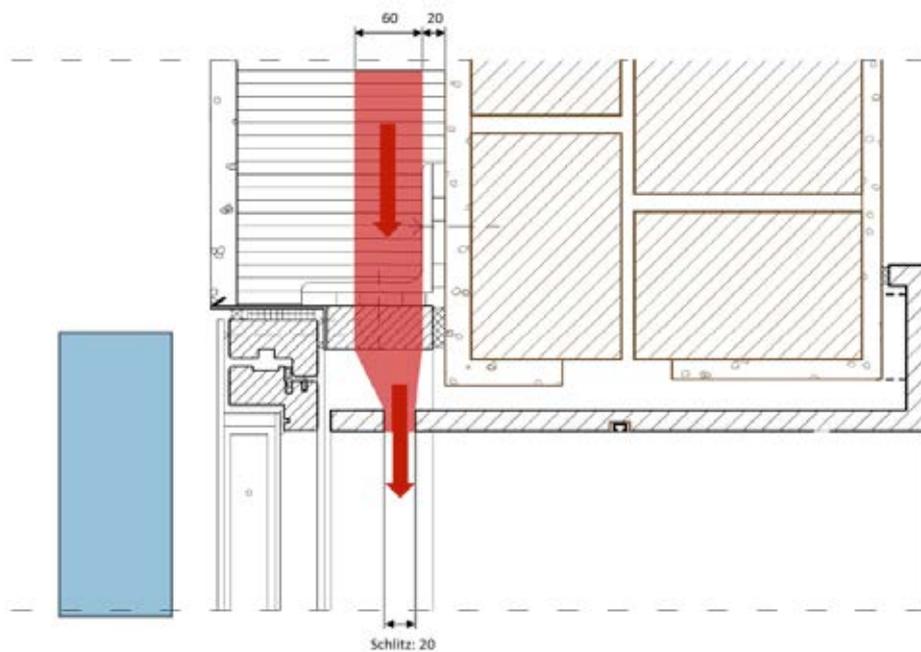


Abb. 47

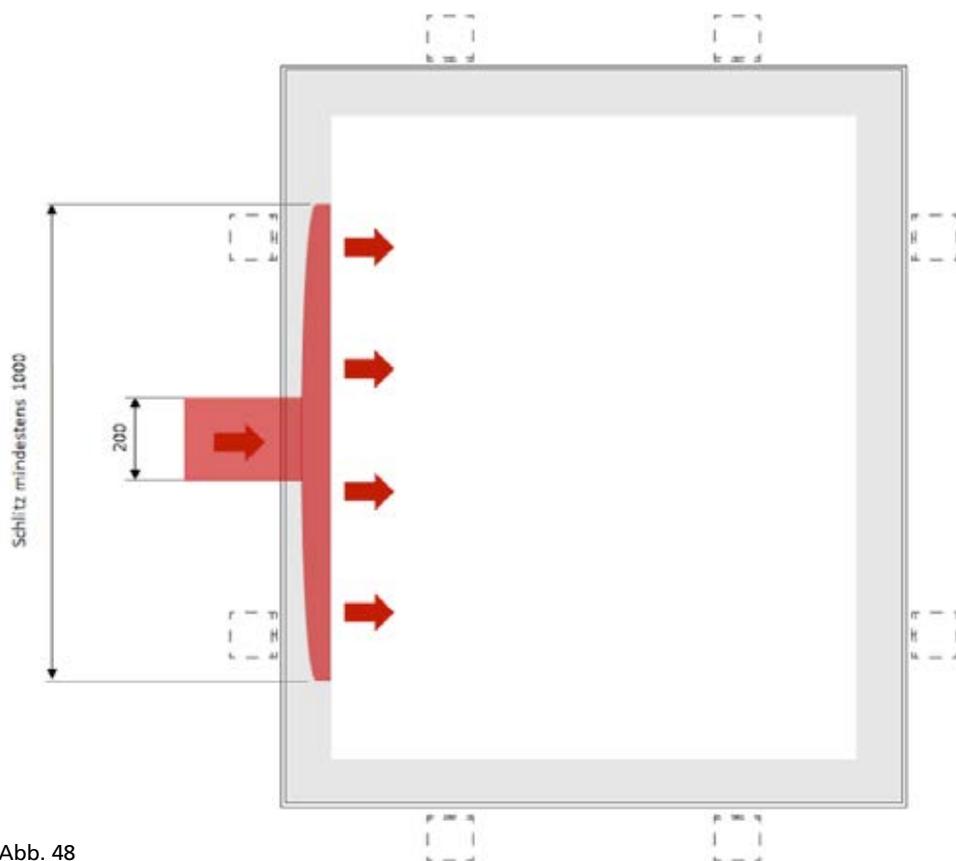


Abb. 48

47 Horizontalschnitt durch Fensterlaibung, Zuluft seitlich in der Laibung, Quelle: ISE, TUM EBB

48 Ansicht von außen, Zulufführung seitlich in der Laibung, Quelle: ISE, TUM EBB

## Variante 2

Das dezentrale Lüftungskonzept, das vom Fraunhofer ISE für dieses Projekt entwickelt wird, berücksichtigt die folgenden Parameter:

- Einbausituation: in der Dämmebene/integriert im vorgefertigten Fenstermodul
- Kontinuierliche Lüftung
- gezielter Wärmerückgewinnungsgrad > 85 %
- gezielte elektrische Leistung < 15W bei 50m<sup>3</sup>/h
- einfache Wartung

Die unten stehenden Bilder verdeutlichen die Konzeption der dezentralen Lüftung, wie sie zusammen mit dem Dämmrahmen eine funktionale Einheit bildet.

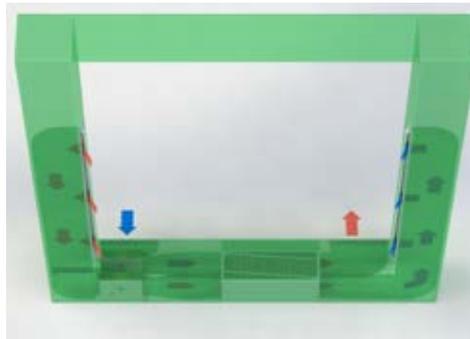


Abb. 49

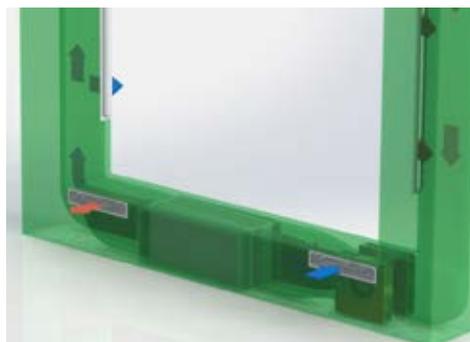


Abb. 50

49 Dämmrahmen mit integrierter dezentraler Lüftung (Innenseite),  
Quelle: ISE

50 Dämmrahmen mit integrierter dezentraler Lüftung (Außenseite),  
Quelle: ISE

51 Maße Enthaltetauscher,  
Quelle: ISE

Die einzelnen Komponenten werden auf das Konzept hin optimiert und lassen sich wie folgt beschreiben:

**Wärmetauscher:**

Es wird ein Enthaltetauscher (Wärme- und Feuchterückgewinnung) eingesetzt, der zwei Vorteile mit sich bringt:

- Komfort: die Luft wird im Winter nicht zu trocken
- Baubarkeit: kein Kondensatablauf nötig

Der Enthaltetauscher besteht aus zwei Bauteilen:

- eine Membrane, die für Wärme- und Feuchtettransport sorgt
- ein Abstandhalter, der die Luft in den Wärmetauscher so führt, dass ein Gegenstrombereich im Wärmetauscher entsteht.

Die Maße des Wärmetauschers wurden so ausgelegt, dass er in eine 16 cm dicke Außenwanddämmung passt und eine entsprechende Effizienz für die auftretenden Luftmengen erzielt.

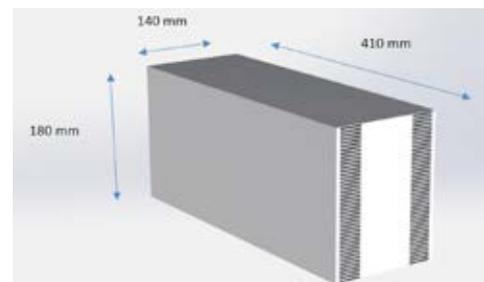
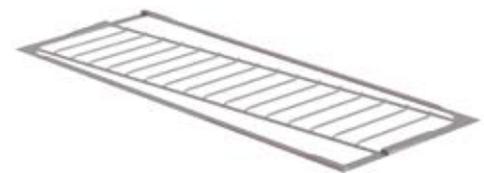


Abb. 51

Verschiedene CFD (computational fluid dynamics) Simulationen wurden gerechnet (etablierte Methode der Strömungsmechanik), um die Strömungsverläufe innerhalb des Wärmetauschers zu optimieren. Die ersten Ergebnisse zeigen eine sehr gute Verteilung der Luft im Gegenstrombereich des Wärmetauschers, was einen sehr hohen Wirkungsgrad erwarten lässt. Die Analyse der markt gängigen Geräte zeigt auch, dass die Wärmetauscher bei vielen Geräten noch nicht optimiert sind. Die Optimierung der anschließenden Luftstrecken im Konzept wurde ebenfalls nach strömungstechnischen Kriterien vorgenommen. Vor allem in diesen Bereichen haben die am Markt erhältlichen Geräte erhebliche Defizite.

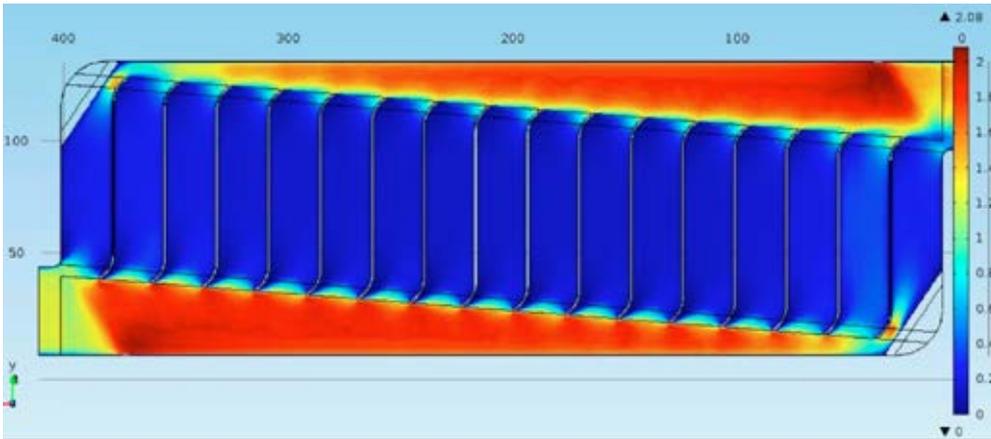


Abb. 52



Abb. 53

Diese Maßnahmen sollen dazu beitragen, die benötigten Lüfterleistungen zu reduzieren und damit auch einen erheblichen Beitrag zur Geräuschreduzierung zu bringen.

Der Wärmetauscher besteht aus ca. 90 voneinander getrennten Strömungsebenen wie in Abb. 51 dargestellt. Eine Lösung, um die profilierten Abstandhalter der Strömungsebene zu produzieren, muss noch gefunden werden. Die ersten Versuche wurden mit Rapid Prototyping (3D-Druck) bei Beck+Heun gemacht. Die einzelnen Ebenen werden durch eine Membran getrennt, über die die Wärme an die nächste Ebene übertragen wird. Gleichzeitig weist die Membran die Eigenschaft auf,

Wasserdampf durchzulassen, also wird ein Teil der Luftfeuchte und der darin enthaltenen Energie ebenfalls übertragen. Zusammen führt das zu einer sehr hohen Effizienz des Wärmetauschers.

Es wurde festgestellt, dass Rapid Prototyping an die technischen Grenzen gelangt, wenn eine Filigranität der Teile gefordert wird, wie bei diesem Wärmetauscher notwendig. Es werden Lösungen gesucht die Teile wirtschaftlich herzustellen.

Entwicklung der Lüfter:  
Auch die Lüfter müssen für die Systeme optimiert werden. Diese müssen verschiedene optimale Arbeitspunkte mit minimalem Stromverbrauch und

52 Erste Ergebnisse der CFD-Simulation, Quelle: ISE

53 Erster Versuch – Abstandhalter produziert bei Beck+Heun mit Rapid Prototyping, Bild: A. Dinkel, F. Coydon, ISE

Geräuschentwicklung aufweisen. Die Firma EBM Papst ist Technologie- und Weltmarktführer in diesem Bereich, und zwei angepasste, optimierte Lüfter (Zu- und Abluft) wurden von dieser Firma nach Absprache mit dem Fraunhofer ISE geliefert.

- Maße: 180 × 180 × 40
- Technische Daten

Spannungsart		DC
Nennspannung	in V	24
Nennspannungsbereich	in V	12 .. 28
Drehzahl	in min <sup>-1</sup>	2650
Leistungsaufnahme	in W	4,3
Min. Umgebungstemperatur	in °C	-30
Max. Umgebungstemperatur	in °C	75
Volumenstrom	in m <sup>3</sup> /h	110
Schalleistungspegel	in B	5,7

Diese versprechen optimale Effizienz und Geräuschkomfort.

Um das Konzept zu überprüfen sind folgende Schritte notwendig:

- Wärmetauscher Prototyp herstellen
- Lösung für die Wartung erarbeiten

### Variante 3

Hier wird Zu- und Abluft mittels 2 Airfox-Geräten der Firma Beck+Heun gewährleistet.

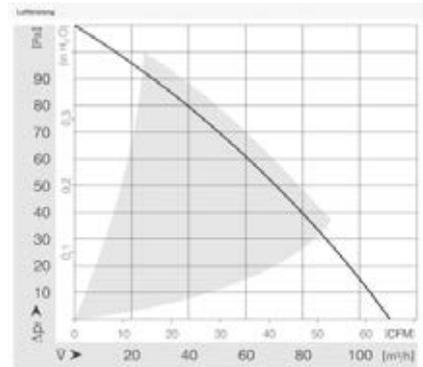


Abb. 54

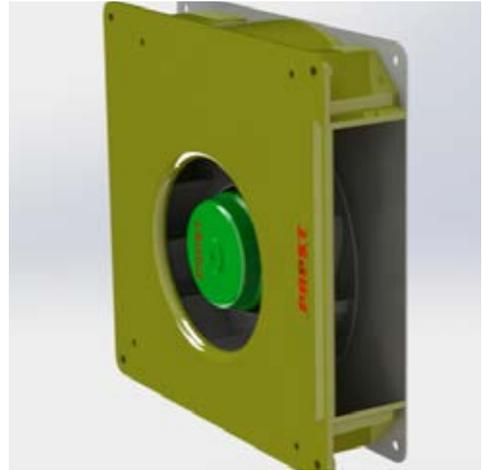


Abb. 55

54 Technische Daten Lüfter, Bild: A. Dinkel, F. Coydon, ISE

55 Ansicht Lüfter, Bild: A. Dinkel, F. Coydon, ISE

## 8. Bauphysikalische Untersuchung

### 8.1 Allgemein

#### Vergleichbarkeit

Um die Vergleichbarkeit der im Forschungsprojekt untersuchten Varianten zu gewährleisten, sind bei der bauseitigen Bauteilgeometrie und den eingesetzten Materialien sowohl beim Bestand als auch bei den Varianten weitestgehend identische Baustoffe sowie Bauteilabmessungen zugrunde gelegt worden. Abweichungen gibt es bei den Aufbaustärken des WDVS.

Die unterschiedlichen Varianten wurden nach folgenden Untersuchungskriterien überprüft bzw. bewertet:

- minimale Innenoberflächentemperaturen an den kritischen Stellen
- Wärmeströme über das Bauteil
- Wärmebrückenkoeffizienten ( $\psi$ -Werte)
- Schimmelpilzgefahr
- Taupunktgrenze

Die Punkte, an denen die niedrigsten Oberflächentemperaturen entstehen und die mit der Abhängigkeit der Variante unterschiedliche Temperaturverläufe aufweisen, sind als kritische Stellen benannt (kritische Stelle A und kritische Stelle B). Bei dieser Betrachtung sind die kritischen Stellen des Stahlbetondeckenanschlusses nicht berücksichtigt, da die Änderung der Varianten an diesen Stellen keinen großen Einfluss auf die Innenoberflächentemperaturen hat.

#### Bauphysikalische Hintergründe

Zweidimensionale Wärmebrückenanalysen sind normgemäß die akzeptierte Methode, um Feuchteschäden zu minimieren und das Risiko des Schimmelpilzes zu untersuchen. Die Untersuchungen zu Keimung und Wachstum von Schimmelpilzen auf verschiedenen Nährböden liefern grundlegende Informationen für die Normanforderungen. Gemäß der Randbedingungen, die in der DIN 4108-2 beschrieben sind (rel. Luftfeuchtigkeit 50 %, Innenraumtemperatur 20 Grad Celsius, minimale relative Luftfeuchte auf der Bauteiloberfläche 80 % für die Auskeimung des Schimmelpilzes) 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.

Von den Normanforderungen ausdrücklich ausgenommen sind Fenster (Verglasung und Rahmen), da diese nicht sorptionsfähig sind und keinen Nährboden für den Pilz anbieten (regelmäßiges Putzen gegen Staubablagerungen ist hierbei vorausgesetzt). Auf solchen Oberflächen liegt die geprüfte kritische Oberflächentemperatur bei 9,3 Grad Celsius. (Der Nährboden kann erst bei Unterschreitung der Tauwassergrenze entstehen).

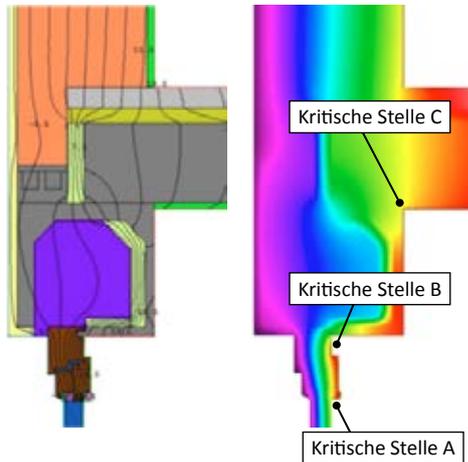
Mithilfe einer zweidimensionalen Wärmebrückenanalyse werden die Oberflächentemperaturen an den kritischen Stellen und die Wärmeströme über den Bauteilanschluss ermittelt.

### 8.2 Bestand

Für den untersuchten Gebäudebestand aus den 50er bis 70er Jahren wurde bei der Bearbeitung der thermischen Betrachtung Bezug auf die Bekanntmachung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vom 30. Juli 2009 (Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand) genommen. Somit sind die unter Punkt Allgemein aufgeführten Randbedingungen gewährleistet.

Bei den Bestandssituationen handelt es sich um einen 25 cm tiefen und einen deckengleichen Sturz mit einer Stahlbetondecke (200 mm WLS 2,3 W/m<sup>2</sup>\*K) Bei der Variante mit deckengleichen Sturz wurde von einem darunter liegenden Beton-Rollladenkasten ausgegangen. Die gesamte Außenhaut ist mit einem zweilagigen, aufgerauten Kalkzementputz (ca. 25 mm) überzogen. Die einzige vorhandene Dämmung (WLG 040 mit 40 mm) besteht im Deckenbereich zwischen Stahlbetondecke und Ziegelsturz, was den damaligen Standard entspricht. Für die damals üblichen Holz-Verbund-

Materialbezeichnung	Lambda [W/m*K]	Schichtdicke [mm]
Ziegel Mauerwerk	0,21	300
Ortbeton	2,3	180
Gipsputz	0,7	15
Außenputz	0,35	20
Estrich	1,4	45
Dämmung	0,035	160



Auswertungstabelle zum Bestand					
U <sub>w</sub> [W/m²*K]	kritische Stelle A [°C]	kritische Stelle B [°C]	kritische Stelle C [°C]	längenbezogener Leitwert L <sup>2D</sup> [W/m²*K]	U-Wert Außenwand [W/m²*K]
2,57	10,2	8,9	12,2	4,046	0,6

Abb. 56

fenster mit 2-fach-Verglasung wurde der Wärmedurchgangskoeffizient des gesamten Fensters (U<sub>w</sub>) mit 2,6 W/m²\*K angenommen.

Mithilfe dieser Werte wurden am Bestandszustand die minimalen Innenoberflächentemperaturen und die Wärmebrückenkoeffizienten ermittelt:

Das Bauteil im Istzustand weist hohe Wärmeverluste und damit verbundene niedrige Innenoberflächentemperaturen auf. Die Innenoberflächentemperaturen liegen in den kritischen Bereichen zwischen 12,2 Grad Celsius und 8,9 Grad Celsius.

Der Wärmedurchgang liegt bei 1,93 W/K\*m².

### Erläuterung zur Auswertungstabelle Bestand (Abb. 56)

#### Spalte 1

Der U<sub>w</sub>-Wert; das Indice w steht für window = Fenster. Dieser Wert beschreibt

den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) für das gesamte Fenster und berücksichtigt bei der Berechnung die Fensterverglasung (U<sub>g</sub>) als auch den Fensterrahmen (U<sub>f</sub>).

Der aus der Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand entnommene Wert 2,57 W/m²\*K entspricht dem damaligen Standard und liegt deutlich über den heutigen Mindestanforderungen.

#### Spalte 2

Kritische Stelle A ist der Übergang vom Blendrahmen zur Verglasung.

Der Wert von 10,2 °C stellt eine Oberflächentemperatur dar, die in diesem Bereich entstehen würde, wenn für den betreffenden Raum die normativen Bedingungen eingesetzt werden. Obwohl dieser Wert unter der 12,6-Grad-Grenze liegt, entsteht die Schimmelpilzgefahr erst bei der Unterschreitung der Tauwassergrenze. Vorausgesetzt ist hier, dass die Oberflächen nicht sorptionsfähig sind.

#### Spalte 3

Kritische Stelle B beschreibt die Schnittstelle zwischen den Blendrahmen und dem Rollladenkasten. Mit 8,9 Grad Celsius liegt die Oberflächentemperatur deutlich unter der Tauwassergrenze. Somit ist ein Kondensatanfall gegeben. Unter Berücksichtigung der erforderlichen Wachstumsbedingungen, Temperatur, Feuchte und Nährboden muss mit der Schimmelpilzgefahr gerechnet werden. Zusätzliche Bauschäden können ebenfalls nicht ausgeschlossen werden.

#### Spalte 4

Die kritische Stelle C liegt zwischen im inneren Eckbereich der Ortbeton-Decke und der Außenwand. Mit 12,2 Grad Celsius liegt die Oberflächentemperatur unter der normativ festgesetzten Schimmelpilzgefahr.

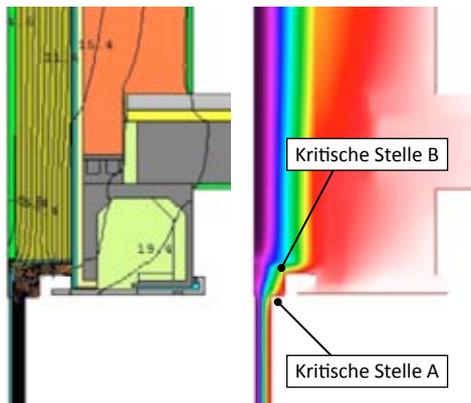
Da die Stelle C durch die bei diesem Forschungsprojekt eingesetzten WDV-Systeme eliminiert wird und diese in allen Varianten zum Einsatz kommen, wird diese im Weiteren nicht mehr berücksichtigt.

#### Spalte 5

Der Längenbezogene Leitwert L<sup>2D</sup> beschreibt den Quotienten aus län-

56 Bestand (v.o.n.u.) Materialkenndaten, Ergebnisse, Auswertungstabelle Quelle: B+H

Materialbezeichnung	Lambda [W/m*K]	Schichtdicke [mm]
Ziegel Mauerwerk	0,21	300
Ortbeton	2,3	180
Gipsputz	0,7	15
Styropor	0,035	variabel
Estrich	1,4	45
Dämmung	0,035	160
Trittschalldämmung	0,04	30



Auswertungstabelle zur Variante 1.1				
Uw [W/m²*K]	kritische Stelle A [°C]	kritische Stelle B [°C]	längenbezogener Leitwert L <sup>2D</sup> [W/m²*K]	U-Wert Außenwand [W/m²*K]
1,06	10,7	10,9	1,532	0,158

Abb. 57

genbezogenem Wärmestrom und Temperaturdifferenz zwischen zwei wärmetechnisch durch die Konstruktion in Verbindung stehenden Umgebungen. Mithilfe dieses Wertes können Vergleiche zwischen verschiedenen Varianten und deren Wärmeströme dargestellt werden.

#### Spalte 6

Dieser Wert beschreibt den Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand und ist mit der Berücksichtigung des Bauzeitraumes aus der oben erwähnten Bekanntmachung entnommen worden.

### 8.3 Ausführung der Variante 1

Die Variante 1 wird mit zwei unterschiedlichen Fensterverglasungen untersucht und beurteilt.

### Variante 1.1 – Fenestra Top Wing, Holz Glas, 2-fach-Verglasung

Auf die Außenfassade wurde ein 16 cm starkes WDVS-System (WLG 035) aufgebracht. Nach der Demontage des alten Fensters wurde die alte Verschattungsanlage entfernt und der leere Rollraum mit Dämmung ausgestopft und mit einer Blende verschlossen. Weiterführende energetische Maßnahmen wurden bei der Bearbeitung dieses Themas nicht verfolgt, da sie die Vergleichbarkeit der Varianten verfälschen würden.

In den nachfolgenden Abbildungen werden die einzelnen Bauteile mit ihren jeweiligen Schichtdicken und den dazugehörigen Wärmeleitfähigkeiten dargestellt.

#### Erläuterung zur Auswertungstabelle zur Variante 1.1 (Abb. 57)

##### Spalte 1

Der errechnete Wert von 1,06 W/m²\*K liegt unter den gesetzlichen Mindestanforderungen. Dieser Wert könnte durch die Verwendung einer 3-fach-Verglasung noch verbessert werden, wodurch sich das Eigengewicht der Scheiben deutlich erhöht. Je nach Glasstärke werden dann Gewichte bis 45 kg/m² erreicht.

##### Spalte 2

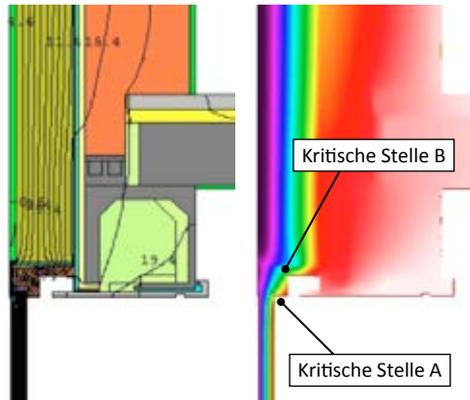
Kritische Stelle A\* beschreibt die Schnittstelle zwischen Fensterrahmen und Verglasung. Bei dieser Variante liegt dieser Wert bei 10,7 Grad Celsius. Obwohl dieser Wert unter der 12,6-Grad-Grenze liegt, entsteht die Schimmelpilzgefahr erst bei der Unterschreitung der Tauwassergrenze. Voraussetzung dafür ist, dass die Oberflächen nicht sorptionsfähig sind.

##### Spalte 3

Kritische Stelle B\* ist die innere Ecke des Fenstermaschinenrahmens. Sie befindet sich im Übergang vom WDVS-Abschluss zum Blendrahmen. Der Wert von 10,9 °C stellt eine Oberflächentemperatur dar, die in diesem Bereich entsteht, wenn für den betreffenden Raum die in der DIN 4108-2 Abs. 6.2.2 beschriebenen Randbedingungen wie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum besteht.

57 Variante 1.1 (v.o.n.u.) Materialkenndaten, Ergebnisse, Auswertungstabelle Quelle: B+H

Materialbezeichnung	Lambda [W/m*K]	Schichtdicke [mm]
Ziegel Mauerwerk	0,21	300
Ortbeton	2,3	180
Gipsputz	0,7	15
Styropor	0,035	variabel
Estrich	1,4	45
Dämmung	0,035	160
Trittschalldämmung	0,04	30



Auswertungstabelle zur Variante 1.2				
Uw [W/m²*K]	kritische Stelle A [°C]	kritische Stelle B [°C]	längenbezogener Leitwert L <sup>2D</sup> [W/m*K]	U-Wert Außenwand [W/m²*K]
0,91	11,1	11,6	1,362	0,158

Abb. 58

#### Spalte 4

Der Längenbezogene Leitwert  $L^{2D}$  beschreibt den Quotienten aus längenbezogenem Wärmestrom und Temperaturdifferenz zwischen zwei wärmetechnisch durch die Konstruktion in Verbindung stehenden Umgebungen. Mithilfe dieses Wertes können Vergleiche zwischen verschiedenen Varianten und deren Wärmeströme dargestellt werden.

#### Spalte 5

Beschreibt den Wärmedurchgangkoeffizienten der Außenwand und ist mit der Berücksichtigung des Bauzeitraumes aus der oben erwähnten Bekanntmachung entnommen worden

\* Dieser Wert liegt zwar unter der gesetzlich festgelegten Temperaturgrenze für Schimmelpilzwachstum (12,6 Grad Celsius), aber auf Grund der nicht sorptionsfähigen Oberfläche entsteht die Gefahr für Schimmelpilzwachstum erst bei der Unterschreitung der Tauwassergrenze von 9,3 Grad Celsius.

### Variante 1.2 – Fenestra Top Wing, Holz Glas, 3-fach-Verglasung

Bei dieser Variante wurde das Fenster Top Wing, Holz Glas, 2-Fach-Verglasung durch Top Wing Holz Glas, 3-Fach-Verglasung ersetzt. Alle anderen Komponenten wurden beibehalten.

### Erläuterung zur Auswertungstabelle zur Variante 1.2 (Abb. 58)

#### Spalte 1

Der errechnete Wert von 0,91 W/m²\*K liegt unter den gesetzlichen Mindestanforderungen.

#### Spalte 2

Kritische Stelle A\* beschreibt die Schnittstelle zwischen den Fenesterrahmen und die Verglasung. Bei dieser Variante liegt dieser Wert bei 11,1 Grad Celsius. Obwohl dieser Wert unter der 12,6-Grad-Grenze liegt, entsteht die Schimmelpilzgefahr erst bei der Unterschreitung der Tauwassergrenze. Vorausgesetzt ist hier, dass die Oberflächen nicht sorptionsfähig sind.

#### Spalte 3

Kritische Stelle B\* ist die innere Ecke des Fenstermaschinenrahmens. Sie befindet sich im Übergang vom WDVS-Abschluss zum Blendrahmen.

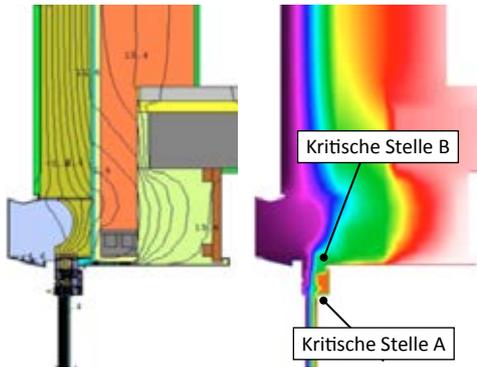
Der Wert von 11,6 °C stellt eine Oberflächentemperatur dar, die in diesem Bereich entstehen würden, wenn für den betreffenden Raum die in der DIN 4108-2 Abs. 6.2.2 beschriebenen Randbedingungen wie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum bestehen.

#### Spalte 4 und 5

siehe Erläuterung zur Auswertungstabelle Variante 1.1

58 Variante 1.2  
(v.o.n.u.)  
Materialkenndaten,  
Ergebnisse, Auswertungstabelle  
Quelle: B+H

Materialbezeichnung	Lambda [W/m*K]	Schichtdicke [mm]
Ziegel Mauerwerk	0,21	300
Ortbeton	2,3	180
Gipsputz	0,7	15
Styropor	0,035	variabel
Estrich	1,4	45
Dämmung	0,035	160
Trittschalldämmung	0,04	30



Auswertungstabelle zur Variante 2				
U <sub>w</sub> [W/m²*K]	kritische Stelle A [°C]	kritische Stelle B [°C]	längenbezogener Leitwert L <sup>2D</sup> [W/m*K]	U-Wert Außenwand [W/m²*K]
0,85	12,7	9,2	1,37	0,158

Abb. 59

## 8.4 Variante 2

### Revisionierbare Fenstermaschine mit Heroal W72, 3-fach-Verglasung

Ausgewählt wurde das Fenster Heroal W 72. Auf die Außenfassade wurde ein 16 cm starkes WDV-System (WLG 035) aufgebracht, dessen außenliegende Putzschicht eine Wärmeleitfähigkeit von 0,35 W/m\*K hat. Nach der Demontage des alten Fensters wurde die alte Verschattungsanlage entfernt und der leere Rollraum mit Dämmung (Wärmeleitfähigkeit von 0,35 W/m\*K) ausgestopft und mit einer Blende verschlossen. Weiterführende energetische Maßnahmen wurden bei der Bearbeitung dieses Themas nicht verfolgt, da sie die Vergleichbarkeit der Varianten verfälschen würden.

#### Erläuterung zur Auswertungstabelle zur Variante 2

Spalte 1

Der errechnete Wert von 0,85 W/m²\*K liegt unter den gesetzlichen Mindestan-

forderungen. Dieser Wert stellt einen sehr guten Wärmedämmwert für die aktuellen Anforderungen dar.

Spalte 2

Kritische Stelle A\* beschreibt die Schnittstelle zwischen den Fensterrahmen und die Verglasung. Bei dieser Variante liegt dieser Wert bei 12,7 Grad Celsius. Somit ist dieser Wert über der 12,6-Grad-Grenze und es besteht keine Schimmelpilzgefahr mehr.

Spalte 3

Kritische Stelle B\* ist die innere Ecke des Fenstermaschinenrahmens. Sie befindet sich im Übergang vom WDV-Abschluss zum Blendrahmen.

Der Wert von 9,2 °C stellt eine Oberflächentemperatur dar, die in diesem Bereich entstehen würde, wenn für den betreffenden Raum die in der DIN 4108-2 Abs. 6.2.2 beschriebenen Randbedingungen wie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum bestehen. Hier wurde nicht nur die minimale Oberflächentemperatur für Schimmelpilz (12,6) sondern auch die Tauwassergrenze unterschritten.

Spalte 4 und 5

siehe Erläuterung zur Auswertungstabelle Variante 1.1

## 8.5 Variante 3

### Vollständig in das WDV-System integrierte Fenstermaschine

Bei dieser Variante wurde das Fenster Heroal W 72 ausgewählt. Auch hier wurde zur besseren Vergleichbarkeit mit einem 16 cm starken WDV-System (WLG 035) gerechnet. (Wärmeleitfähigkeit 0,35 W/m\*K.) Nach der Demontage des alten Fensters wurde die alte Verschattungsanlage entfernt und der leere Rollraum mit Dämmung ausgestopft und mit einer Blende verschlossen.

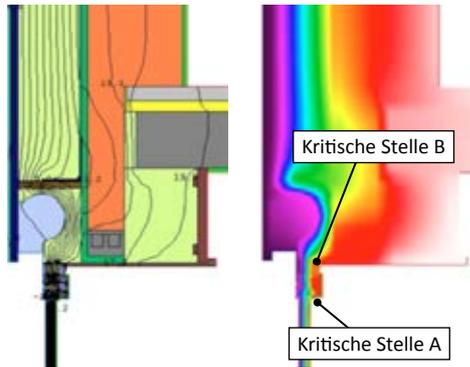
#### Erläuterung zur Auswertungstabelle zur Variante 3

Spalte 1

Der errechnete Wert von 0,85 W/m²\*K liegt unter den gesetzlichen Mindestanforderungen und stellt einen für heutige Verhältnisse sehr guten Wärmedämmwert dar.

59 Variante 2 (v.o.n.u.) Materialkenndaten, Ergebnisse, Auswertungstabelle Quelle: B+H

Materialbezeichnung	Lambda [W/m*K]	Schichtdicke [mm]
Ziegel Mauerwerk	0,21	300
Ortbeton	2,3	180
Gipsputz	0,7	15
Styropor	0,035	variabel
Estrich	1,4	45
Dämmung	0,035	200
Trittschalldämmung	0,04	30



Auswertungstabelle zur Variante 3				
Uw [W/m²*K]	kritische Stelle A [°C]	kritische Stelle B [°C]	längenbezogener Leitwert L <sup>2D</sup> [W/m²*K]	U-Wert Außenwand [W/m²*K]
0,85	13,1	14,9	1,053	0,134

Abb. 60

### Spalte 2

Kritische Stelle A\* beschreibt die Schnittstelle zwischen den Fensterrahmen und die Verglasung. Bei dieser Variante liegt dieser Wert bei 13,1 Grad Celsius. Somit ist dieser Wert über der 12,6-Grad-Grenze und es besteht keine Schimmelpilzgefahr mehr.

### Spalte 3

Kritische Stelle B\* ist die innere Ecke des Fenstermaschinenrahmens. Sie befindet sich im Übergang vom WDVS-Abschluss zum Blendrahmen.

Der Wert von 14,9 °C stellt eine Oberflächentemperatur dar, die in diesem Bereich entstehen würde, wenn für den betreffenden Raum die in der DIN 4108-2 Abs. 6.2.2 beschriebenen Randbedingungen wie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum bestehen. Somit ist dieser Wert über der 12,6-Grad-Grenze und es besteht keine Schimmelpilzgefahr mehr.

### Spalte 4 und 5

siehe Erläuterung zur Auswertungstabelle Variante 1.1

## Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Gesamtübersicht der Varianten					
	Ist-Zustand	Variante 1.1	Variante 1.2	Variante 2	Variante 3
Uf [W/m²*K]		1,435	1,435	1,3	1,3
Ug [W/m²*K]		1,005	0,847	0,6	0,6
Uw [W/m²*K]	2,57	1,06	0,91	0,85	0,85
kritische Stelle unten	10,2	10,7	11,6	12,7	13,1
kritische Stelle oben	8,9	10,9	11,1	9,2	14,9
L <sup>2D</sup> [W/m²*K]	4,0464	1,532	1,362	1,37	1,053
U-Wert Außenwand [W/m²*K]	0,596	0,158	0,157	0,157	0,134
Psi-Wert W/m²K	0,723	0,206	0,165	0,406	0,12

Abb. 61

In diesem Forschungsprojekt sind 4 unterschiedliche Varianten mithilfe einer FEM Software (Therm 7.3) simuliert, und die Ergebnisse mit dem Bestandszustand als auch untereinander verglichen worden.

Die Varianten sind grundsätzlich nach den berechneten Wärmeströmen und den Innenoberflächentemperaturen verglichen und beurteilt worden. Hierzu

sind die Anforderungsgrenzen von der DIN 4108-2 herangezogen worden.

Die ausführliche Ergebnisse aller ermittelten Kenngrößen sind in der Abb. 61 dargestellt.

Der Bauteilanschluss hat erwartungsgemäß im Istzustand die höchsten Wärmeverluste, und es besteht teilweise die Gefahr, dass auf der Innenoberfläche

60 Variante 3 (v.o.n.u.) Materialkenndaten, Ergebnisse, Auswertungstabelle Quelle: B+H

61 Gesamtübersicht der Varianten, Quelle: B+H

der Taupunkt unterschritten wird. (siehe den längenbezogenen Leitwert  $L^{2D}$ : 4,046 W/m\*K)

Durch den Einsatz von neuen Holzfenstern mit 2-Fach-Verglasung (Variante 1.1), sowie die Aufbringung des WDVS-Systems, werden die Wärmeverluste deutlich reduziert. Jedoch entstehen durch den umlaufenden Abschluss des WDVS-Systems zum Trägerelement, welcher aus Edelstahl gefertigt wird, geringe Innenoberflächentemperaturen im Fensterbereich.

Wenn die 2-fach-Verglasung der Variante 1.1 durch eine 3-fach-Verglasung ersetzt wird, werden die Wärmeverluste um 12 % reduziert, und die Oberflächentemperaturen steigen von 10,7 auf 11,6 Grad Celsius (Variante 1.2).

Obwohl die Variante 2 durch den Einsatz der 3-fach-Verglasung an der kritischen Stelle A höhere Innenoberflächentemperaturen erreicht, bringt die gute Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums erhoherte Wärmeverluste mit sich. Diese Verluste machen sich bei der Berechnung der Transmissionswärmeverluste bemerkbar.

Bei der Variante 3 wird durch das 4 cm stärkere WDV-System in Kombination mit dem Heroal W 72 Fenster der längenbezogenen Leitwert auf 1,053 W/m\*K reduziert, und die Innenoberflächentemperaturen erhöhen sich deutlich.

Aus bauphysikalischer Sicht liefert die Variante 3 die geringsten Wärmeverluste und höchsten Innenoberflächentemperaturen.

## 9. Projektablauf, Prototypen, Bau 2015 und bautec 2016

Nach Besichtigung der Werke der Industriepartner wurden in Forschungssitzungen in Erfurt, Verl, Freiburg und München die technischen Spezifikationen gemäß den Auswahlkriterien für die Fenstermaschine weiter detailliert. Über mehrere Auswahlrunden wurde die Variantenauswahl auf drei Lösungen reduziert, die weiter untersucht werden sollten.

Im Herbst 2014 wurde mit der Herstellung der Prototypen der Varianten 1 und 3 (Die Variante 2 war noch in Entwicklung) im Werk der Fa. Beck+Heun in Erfurt begonnen. Zur Ausstellung der Variante 1 auf der Baumesse erfolgte die Endmontage in München. Für das Modell wurde ein funktionsfähiges Senk-Klapp-Fenster der Fa. Fenestra in ein Leichtbau-Wandsegment mit



Abb. 62



Abb. 63

62 Werksbesichtigung bei Beck+Heun, Quelle: EBB

63 Verarbeitung Dämmmaterial bei B+H, Quelle: EBB

WDVS und vorbereiteter Wandöffnung montiert. Zur Prüfung der Umsetzbarkeit wurden realitätsnahe Bauteilabmessungen gewählt. Die Lüftungsleitungen wurden in der Dämmebene integriert, der Verlauf der Leitungen durch Ausschnitte im WDVS-Aufbau sichtbar gemacht (Abb. 65+66). Als letztes erfolgte die Montage der Innenverkleidung.

Auf der Baumesse im Januar 2015 in München wurde das Forschungsprojekt der Öffentlichkeit vorgestellt.



Abb. 64



Abb. 65



Abb. 66

- 64 Prototypenherstellung im Werk B+H  
Foto: EBB
- 65 Variante 1 nach Einbau Montagezarge und Dämmung  
Foto: EBB
- 66 Anschluss Lüftungsleitung Detail  
Foto: EBB



Abb. 67



Abb. 68



Abb. 69

67 Variante 1, Montage der Innenzarge  
Foto: EBB

68 Variante 1, Einbau Fenster, Foto: EBB

69 Variante 1, Einbau Fenster, Foto: EBB

70 Variante 3, Einbau-variante Wärmetauscher, Foto: EBB



Abb. 70



Abb. 71

### Messestand Zukunft Bau Funktionsmodell 1:1 Var. 1

Die Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums und des BBSR präsentierte Technologien und Werkzeuge für das nachhaltige und kostengünstige Planen und Bauen. Die Schwerpunkte waren u. a. die energetische Gebäudemodernisierung, Sanieren und Modernisieren, Kosten und Wirtschaftlichkeit, Bausysteme aus Forschung und Praxis.

Auf dem Messestand war das Funktionsmodell der Variante 1 im Maßstab 1:1 ausgestellt.

### Messestand Fraunhofer Ausschnittsmodell Var. 1/Retrokit

Das Fraunhofer- Institut für Solare Energiesysteme ISE war u. a. mit dem Thema „Vorfertigung mehrfach funktionaler Fassaden“ vertreten. Am Fraunhofer ISE werden im Rahmen verschiedener Forschungs- und Entwicklungsprojekte vorgefertigte Fassadensysteme entwickelt, die es ermöglichen Lüftungs-, Heizungs- und Sanitärsysteme systematisch zusammen mit der Wärmedämmung der Fassade einzubauen. Das ausgestellte Exponat vereinte Systemlösungen des Projektes Retrokit mit der Variante 1 der Fenstermaschine.



Abb. 72



Abb. 73

- 71 1:1 Funktionsmodell der Variante 1  
Foto: EBB
- 72 Eröffnung des Messestandes Zukunft Bau durch Bundesministerin Dr. Barbara Hendricks  
Foto: EBB
- 73 Messestand Fraunhofer: Systemlösung Projekte Retrokit/ Fenstermaschine Var. 1

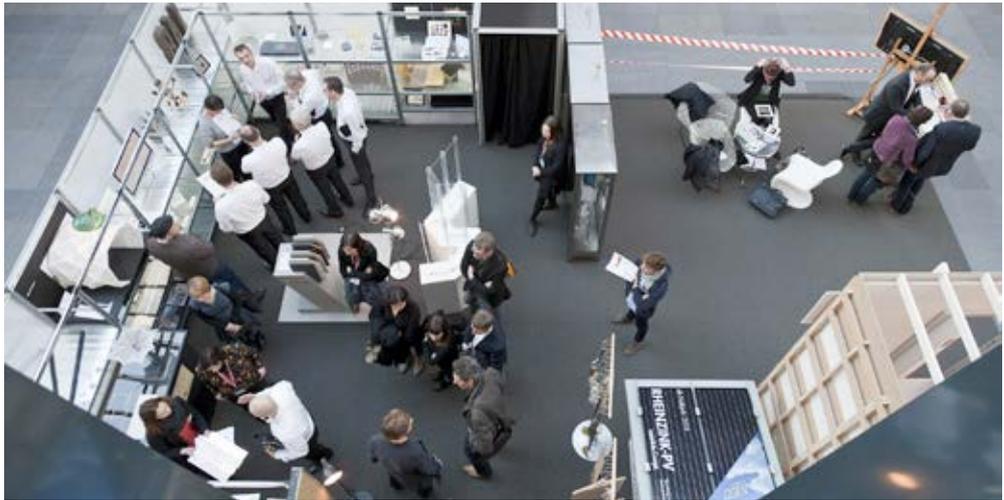


Abb. 74



Abb. 75

### **Detail research Lab Präsentation und 3D Modelle**

Das DETAIL research Lab zeigte auf der Baumesse ausgewählte Prototypen von Herstellen und weiterverarbeitenden Unternehmen sowie innovative Entwicklungen von Universitäten und Instituten.

Das Forschungsprojekt Fenstermaschine war mit einer Bildschirmpräsentation und mit abstrakten, als 3D-Druck hergestellten 1:10 Modellen der drei Varianten vertreten.

### **bautec 2016 Messestand Zukunft Bau**

Auf der bautec 2016 in Berlin wurde das 1:1 Funktionsmodell der Variante 1 auf dem Messestand der Forschungsinitiative Bau ausgestellt und der Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Dr. Barbara Hendricks vorgestellt.

74 Messestand DETAIL research Lab, Foto: Julian Weininger

75 Modelle der Varianten 1,2,3 (v.l.n.r.), die als 3D-Druck auf dem Messestand DETAIL research Lab ausgestellt waren  
Foto: EBB

## 10. Schlussbetrachtung

### 10.1 Projektablauf

Im Rahmen der Zusammenarbeit wurde festgestellt, dass jeder Partner mit unterschiedlichen Softwaremodellen zur zeichnerischen Umsetzung arbeitet. Eine Herausforderung war auch die Bereitstellung der nötigen Schnittstellen und Daten-Austauschformate. Bei einer interdisziplinären Zusammenarbeit ist es unabdingbar für Projekt und später auch für Produktentwicklungen, sich auf geeignete Formate zu verständigen. Idealerweise sollte Software verwendet werden die auch schon die jeweiligen Produktionsmaschinen mit entsprechenden Daten versorgen können. Das erleichtert auch das Konstruieren am gemeinsamen Modell und kann mit Kollisionsprüfungen ausgestattet werden. Für zukünftige Projekte sollten dafür

entsprechende Ressourcen bereitgestellt werden.

### 10.2 Ausblick

Aufgrund der Schwierigkeiten in der Koordination verschiedener Gewerke am Bau, der weitverbreiteten Terminprobleme im Bauablauf und der Häufigkeit von Baumängeln ist die Idee der Fenstermaschine und ihr Potenzial selbst für Laien sofort nachvollziehbar. Die Gewerke im deutschen Baugewerbe sind allerdings ebenso wie die Hersteller von Bauprodukten stark spezialisiert. Je komplexer und fachübergreifender ein Produkt ist, desto schwieriger sind diese Hürden zu überbrücken: Wer stellt das Produkt her, wer konfektioniert das Element für das jeweilige spezifische



Abb. 76

76 Das Modell der Variante 1 wurde der Bundesministerin Dr. Barbara Hendricks auf der bautec 2016 auf dem Messestand Zukunft Bau präsentiert  
Foto: BBSR

Sanierungsobjekt, wer baut es ein? Für die integrierte Technik müssen schlüssige Schnittstellen festgelegt werden um den planenden Architekten und Fachplanern einfache Lösungen an die Hand geben zu können.

Ein gewisser Widerspruch liegt in der Diskrepanz zwischen der Integration technischer Einbauteile und den einfachen Standards des Wohnungsbestands aus den 50er bis 70er Jahren auf die das Forschungsprojekt in erster Linie fokussiert. Auch ist die Mietklientel dieser Wohnungen nicht immer mit einem hochtechnischen Anspruch kompatibel. Viele Wohnungsunternehmen setzen bei energetischen Sanierungen nur den gesetzlichen Mindeststandard um. Man setzt hier darauf, dass sich technisch höherwertige Maßnahmen nicht durchsetzen werden oder begründet dies mit den großen Widerständen der Bewohner und der Wirtschaftlichkeit. Bei Sanierungen von Nachkriegsbauten kommen oft nicht einmal Rollläden zur Ausführung, die Nachrüstung einer Lüftung mit WRG wird als zu teuer abgelehnt. Statt dessen wird häufig auf zentrale Absaugung ohne WRG mit Nachströmöffnungen im Fensterbereich gesetzt. Komforteinbußen durch Zugerscheinungen werden dabei hingenommen, Zugewinne bei der Tageslichtausbeute bzw. Kompensationen der Tageslichtverluste werden als nachrangig und nicht entscheidend eingestuft. Die Fenstermaschine kann aber nur in den Bereich der Wirtschaftlichkeit vordringen, wenn möglichst viele ihrer technischen Potenziale zur Verwendung kommen und wenn hohe Stückzahlen realistisch sind.

Die derzeit niedrigen Energiekosten, verbunden mit kurzen Betrachtungszeiträumen bei Rentabilitätsberechnungen stellen ebenso ein Hindernis bei der Umsetzung der Fenstermaschine dar wie geänderte Zielvorstellungen durch oft wechselnde Besetzungen der Führungsspitze von Wohnungsunternehmen.

Ein Blick in andere Bereiche (Kommunikation, Mobilität) zeigt, wie sehr hochentwickelte Technik mittlerweile auf selbstverständliche Weise unseren Alltag erleichtert. Gleichzeitig ist festzustellen, dass beispielsweise die

Effizienz verbauter Lüftungsanlagen in Wohnungen oftmals schlichtweg an dem Nutzerverhalten scheitert. Die Wohnung war schon immer ein Bereich, in dem sich technische Neuerungen langsamer durchsetzen. Dies liegt hauptsächlich an den deutlich längeren Lebensdauerzyklen im Bauwesen. Während technische Neuerungen im Handy oder im Auto innerhalb weniger Jahre zum Standard werden, dauert es im Bauwesen ein Vielfaches. Inwieweit sich hochwertige technische Lösungen wie sie dieses Forschungsprojekt verfolgt auf breiter Ebene durchsetzen ist daher letztendlich eine Frage der Zeit. Einsparungseffekte und die damit verbundenen Vorteile werden ebenso wie steigende Energiekosten, neue gesetzliche Anforderungen und höhere Komfortansprüche dazu beitragen, den Prozess zu beschleunigen.

Die Wirtschaftlichkeit der Fenstermodule ist an die Komplexität der integrierten Technik gekoppelt. Je mehr integrierbare Komponenten projektspezifisch in Anspruch genommen werden, desto mehr lohnen sich Mehraufwendungen gegenüber einem konventionellen Fenstertausch finanziell. Einsparungen bei der Wartung fließen in eine Langzeitbetrachtung der Kosten mit ein.

Wo neben der fenstertypischen Technik zusätzlich Gebäudetechnik in das Fensterelement eingebunden wird, können Eingriffe in die Bausubstanz ebenso wie die damit verbundene Störung der Bewohner weiter reduziert werden. Die Verlegung haustechnischer Installationen auf der Außenwand innerhalb der Gebäudedämmung eröffnet völlig neue Möglichkeiten der Sanierung bei minimaler Störung der Nutzer. Die Fenstermaschine fungiert dabei als Übergabestation bzw. integriert sogar die Endverbraucher direkt im Element.

Ein großer Zeitverlust auf der Baustelle entsteht durch die Abhängigkeiten der beteiligten Firmen untereinander. Die Fenstermaschine wird von einer einzigen Firma eingebaut und spart im Bereich des Fensters die Putzarbeiten, Malerarbeiten, Sonnenschutzarbeiten und deren Koordination ein. Die technischen Gewerke stellen nur noch die Anschlussarbeiten fertig soweit erforderlich.

Die Vereinfachung und Beschleunigung im Bauablauf erfordert eine präzise Bauaufnahme und eine größere Planungstiefe. Im Bauprozess verschiebt sich damit der Aufwandsschwerpunkt von der Realisierung hin zur Planung und Fertigung. Hinsichtlich der Reduktion der verschiedenen verbauten Materialien und der sortenreinen Trennung (Rezyklierbarkeit) eröffnet die Vorfertigung neue Möglichkeiten.

Insbesondere die Vorteile der Beschleunigung der Baustellenprozesse und der Mängelvermeidung machen die Fenstermaschine auch für den Neubau interessant.

### **Varianten 1 bis 3**

#### **Variante 1**

Tiefe Laibungen nachträglich aufgebracht Fasadendämmungen schränken das einfallende Tageslicht erheblich ein. Die bisherige einseitige Betrachtung der Transmissionswärmeverluste vernachlässigt dabei die Aspekte der Sonneneinstrahlungstransmission und der psychologischen Folgen. Das nach außen öffnende Fenster der Variante 1 ermöglicht einen großen Zugewinn an Tageslicht, ein völlig neuer Raumeindruck wird möglich: Trotz Offenbarkeit des Fensters ist von innen nur das Glas sichtbar, der Rahmen bleibt von der Rohbauöffnung verdeckt. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die der Witterung ausgesetzten Bauteile fast komplett aufs Glas reduziert sind. Die Witterungsbeständigkeit des Glases ist dabei ein ebenso positiver Faktor wie die Reduktion der Bauteile und insbesondere der aufeinandertreffenden, verschiedenen Materialien (mit z. B. unterschiedlichem Verhalten bei Temperaturschwankungen.) Hinsichtlich der Tageslichtautonomie der Räume ist die Fenstergröße allerdings zu vernachlässigen.

Für nach außen öffnende Fenster besteht Entwicklungsbedarf für Beschlagssysteme wie sie z. B. im skandinavischen Ausland verbreitet sind hinsichtlich großformatiger Lösungen und neuer Öffnungskombinationen. Zum Fensterputzen in den oberen Geschossen wendefähige Flügel sind bislang nur in sehr begrenzter Größe verfügbar.

Bei fassadenbündiger Anordnung entstehen im Anschlussbereich an die Montagezarge geringe Innenoberflächentemperaturen. Auch hier wurde ein Entwicklungsbedarf festgestellt.

#### **Variante 2**

Die umlaufende Fasche der Variante 2 bietet viel Spielraum bei der Integration zusätzlicher Komponenten, auch hinsichtlich zukünftiger Anpassbarkeit. Die Revisionierung erfolgt von außen. Durch Aktivierung der statischen Kapazitäten der Einzelteile kann der zusätzlich Materialeinsatz noch minimiert werden. Gestalterisch ist einerseits die umlaufende Fasche vorgegeben, diese bietet aber auch viele Variationsmöglichkeiten. Lüftungsöffnungen und Führungsschienen sind direkt in die Fasche eingearbeitet.

Ein fest verankerter Montagerahmen definiert die Schnittstelle zur Fasadendämmung. Die revisionierbare, sichtbare Fasche ist auf diesem Rahmen montiert. Bei dieser Variante folgt die Innenzarge der durch den alten Fensteranschlag vorgegebenen Geometrie und bringt mit dem steileren Lichteinfall mehr Tageslicht ins Gebäude.

#### **Variante 3**

Die Variante 3 profitiert im Handling vom geringen Gewicht des Dämmmoduls. Das Element wird als ein Bauteil komplett vorgefertigt auf die Baustelle geliefert, so dass nur noch die Innenzarge montiert werden muß. Da das Element in das WDVS eingeputzt wird, ist es als solches nicht revisionierbar. 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. Die integrierte Lüftungstechnik ist noch in Entwicklung.

Auf Grundlage der im Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse ist beabsichtigt, in der nächsten Projektphase die Praxistauglichkeit der Variante 3 an einem konkreten Demonstrationsprojekt zu erproben.

## 11. Literatur

- [1]  
Bachmann, Andreas. (2009). *Anschluss von WDVS an Fenster*, in Fachzeitschrift: *GFF Zeitschrift für Glas Fenster Fassade Metall*, Nr. 5, 42–45.
- [2]  
Baldenhofer, Karl-Otto et al. (1989) *Fenstereinbau mit Zargen. Untersuchung über die Möglichkeit der Befestigung und Abdichtung der Fenster zum Baukörper über Zargen*, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [3]  
Baldenhofer, Karl-Otto et al. (1989). *Fenstereinbau mit Zargen*. In Fachzeitschrift: *Fenster und Fassade*, Jg.16, Nr.2, S.46-53; Stuttgart: IRB Verlag
- [4]  
Baldenhofer, Karl-Otto. et al. (1989), *Untersuchung über die Möglichkeit der Befestigung und Abdichtung der Fenster zum Baukörper über Zargen*. Abschlussbericht, AZ.: B I5-800185-106. Stuttgart: IRB Verlag
- [5]  
Berger, Wilfried. (2001). *Zargenbauweise – Schadenfreier Einbau von Haustüren und Fenstern* In Fachzeitschrift: *Bauhandwerk*. Jg. 23, Nr. 3, 50–53
- [6] [BMWI 2014]  
Hrsg. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Öffentlichkeitsarbeit (2014) *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand*. Berlin
- [7] [BMWI 2015]  
BMWI (03.03.2015) *Eine Frage des Jahrgangs: So viel Energie verbrauchen alte Gebäude*. [Internetseite] Retrieved (15.07.2015) from (<http://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2015/4/Meldung/infografik-energiekosten-gebäude.html>)
- [8]  
Bueno, Bruno., et al. (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*, Volume 94,10–20.
- [9]  
(1999). *Der schnelle Dreh. Anwendung: Zargenmontage* in Fachzeitschrift: *Trockenbau Akustik*, Jg.16, Nr.9, 66-67
- [10]  
Giebeler Georg (Hrsg). (2008). *Atlas Sanierung, Instandhaltung, Umbau, Ergänzung*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- [11]  
Kompetenzzentrum „Kostengünstig qualitätsbewusst Bauen“ im Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin (2006) *Info-Blatt Nr. 4.2, Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten*, Berlin
- [12]  
Krippner, Roland. Musso, Florian. (2007). *Basics Fassadenöffnungen*. Basel: Birkhäuser Verlag
- [13]  
Pätzold, Matthias. Musso, Florian. (2009). *Grundlagen und Entwicklungen bei Wärmedämmverbundsystemen zur Einführung der EnEV* in Fachzeitschrift: *DETAIL*, 1070–1078
- [14]  
Sack, Norbert. et al. (2009) *Holzbau der Zukunft. Teilprojekt 13. Entwicklung von Grundlagen für die Integration von Elektronik im Fenster-, Fassaden- und Türenbau. Teilbericht 1: Erarbeitung von Grundlagen. Teilbericht 2: Kraftbetätigte Fenster*. Reihe Holzbauforschung H 007/13 Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag

[15]

Schmid, Josef. (1993) *Fensteranschlüsse am Baukörper – bauphysikalisch und konstruktiv richtig gelöst*. Tl.2 In Fachzeitschrift: *bauzeitung*. Jg. 47, Nr. 4, 67–69

[16]

Schmid, Josef. (1991). *Entwicklungstendenzen bei Fenstern, Türen und Fassaden*, In Fachzeitschrift: *BM. Bau- und Möbelschreiner*. Nr. 12, 44–45

[17]

Seifert, Erich. (1976). *Instandhaltung und Instandsetzung von Fenstern*. In Fachzeitschrift: *FHR-Nachrichten*. Sondernr.

[18]

Sollanek, Rainer. (2000). *Schnell und sicher montiert. Special: Zargenmontage* in Fachzeitschrift: *Trockenbau Akustik* Jg. 17, Nr. 4, 82

[19] [STI 2009]

Stiell, Werner. (2009). *Typische Schadensbilder bei Fenstern und Fassaden – Mängelschwerpunkte*. Rosenheimer Fenstertage 2009. ift Rosenheim, 101–104

[20] [VFF 2014]

Verband Fenster und Fassade. (2014) *Fenster- und Türenbranche rechnet mit gutem Jahr 2014*. [Internetseite] Retrieved (23.04.2014) from: (<http://www.window.de/1503.html>)

[21]

Ward, G. et al., 2011. *Simulating the daylight performance of complex fenestration systems using bidirectional scattering distribution functions within radiance*. in Fachzeitschrift: *Leukos, Journal of the Illuminating Engineering Society of North America* 7, 1–19.