



Bauaufsichtlich anerkannte Stelle
für Prüfung, Überwachung und
Zertifizierung
Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile
und Bauarten
Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht ESB-002/2009 HOKI

Erarbeitung einer vereinfachten Berechnungsmethode für Doppelfassaden für die Integration in die deutsche EPBD- Energieeffizienzbewertungsmethode DIN V 18599 (Bewertungsmethode GDF)

Das Vorhaben wurde gefördert vom Bundesamt für
Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der For-
schungsinitiative „Zukunft Bau“
Aktenzeichen: 10.08.18.7-06.34

Dipl.-Ing. Ingo Heusler
Dipl.-Ing. (FH) Herbert Sinnesbichler
Dipl.-Ing. Hans Erhorn
Dipl.-Ing. Andreas Nimtsch

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Gerd Hauser

Abteilungsleiter

Dipl.-Ing.
Hans Erhorn

Bearbeiter

Dipl.-Ing.
Ingo Heusler

Dipl.-Ing.
Andreas Nimtsch

Dipl.-Ing. (FH)
Herbert Sinnesbichler



IBP-Bericht Nr. ESB-002/2009 HOKI

Erarbeitung einer vereinfachten Berechnungs- methode für Doppelfassaden für die Integration in die deutsche EPBD-Energieeffizienz- bewertungsmethode DIN V 18599 (Bewer- tungsmethode GDF)

Das Vorhaben wurde gefördert vom Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative
„Zukunft Bau“
Aktenzeichen: 10.08.18.7-06.34

*Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet.*

Der Bericht umfasst
73 Seiten Text
20 Tabellen
49 Abbildungen

Dipl.-Ing. Ingo Heusler
Dipl.-Ing. (FH) Herbert Sinnesbichler
Dipl.-Ing. Hans Erhorn
Dipl.-Ing. Andreas Nimtsch

Holzkirchen, 27. Mai 2009

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung (BBR) unter dem Aktenzeichen 10.08.18.7-06.34 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



Bundesamt
für Bauwesen und
Raumordnung

FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft **BAU**

Die beteiligten Industriepartner waren:

- Hydro Building Systems GmbH / Wicona Bausysteme GmbH,
- Interpane Glas Industrie AG,
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft AG,
- Zumtobel Staff GmbH.

Wir bedanken uns für die finanzielle und fachliche Unterstützung aller Förderer des Vorhabens.

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Vorgehensweise	4
3	Durchführung der Untersuchungen	6
3.1	Freilanduntersuchungen	6
3.1.1	Beschreibung der Versuchsräume	6
3.1.1.1	Bauliche Gegebenheiten	6
3.1.1.2	Glasdoppelfassaden (GDF)	8
3.1.1.3	Technische Ausstattung Versuchsräume	9
3.1.1.4	Mess- und steuerungstechnische Ausstattung	14
3.1.1.5	Messstellenübersicht	14
3.1.1.6	Beschreibung Messsensorik	17
3.1.1.7	Steuerungs- und Regelungstechnik	19
3.1.1.8	Messdatenerfassung IMEDAS™	20
3.1.2	Nutzungsrandbedingungen	22
3.1.2.1	Nutzungsprofil DIN V 18 599 Teil 10	22
3.1.2.2	Steuerung Sonnenschutz	24
3.1.2.3	Steuerung Beleuchtung	24
3.1.2.4	Steuerung Glasdoppelfassade	24
3.2	Instationäre Simulationsrechnungen	25
3.2.1	Simulationsmodell	25
3.2.2	Validierung des Simulationsmodells anhand der Messung	31
3.2.3	Variantenbildung	36
4	Darstellung und Auswertung der Ergebnisse	37
4.1	Unterschiede der beiden Doppelfassaden im Versuch	37
4.1.1	Verhalten am Beispiel strahlungsreicher Winter-/ Sommertage	37
4.1.1.1	Strahlungsreicher Wintertag	37
4.1.1.2	Strahlungsreicher Sommertag	42
4.1.2	Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Raum, in der Glasdoppelfassade und außen	48
4.2	Instationäre Variantenrechnungen	49
4.2.1	Bestehender Bewertungsansatz für Glasdoppelfassaden	49
4.2.2	Parameteranalyse	53
4.2.3	Vereinfachtes Berechnungsmodell für die Normung	65
5	Beschreibung des neuen Berechnungsmodells	66
5.1	Anwendungshinweise	66
5.2	Berechnungsmodell	66
5.3	Kennlinien Einfachverglasung außen	67
5.4	Kennlinien Zweifachverglasung außen	69
5.5	Veranschaulichung anhand der Versuchsrandbedingungen	70
6	Zusammenfassung und Ausblick	71
7	Literatur	72

1 Einleitung

Der Fassadenzwischenraum (Luftraum) von Glasdoppelfassaden (GDF) wirkt als thermische Pufferzone zwischen Gebäude- und Außenklima. Innerhalb dieser Pufferzone laufen instationäre Vorgänge ab, die die Energiebilanz des betrachteten Gebäudes beeinflussen. Bislang waren genaue Berechnungen dieses energetischen Verhaltens nur durch instationäre Simulationsprogramme möglich. Da derartige Berechnungen sehr zeitaufwendig sind, ist es unüblich diese im frühen Planungsstadium einzusetzen.

Für die Nachweisführung im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV) [16] ist es jedoch bereits im frühen Planungsstadium eines Gebäudes notwendig, Aussagen zum energetischen Verhalten zu treffen, um zu prüfen, ob die Anforderungen an den maximal zulässigen Energiebedarf erfüllt sind bzw. wo Verbesserungen notwendig sind. Bei der nach EnEV anzuwendenden Rechenvorschrift für Nichtwohngebäude DIN V 18599 [1] handelt es sich um ein Monatsbilanzverfahren, bei dem der Einfluss einer Glasdoppelfassade hinsichtlich der Energiebilanz eine wichtige Rolle spielen kann.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens soll das bereits in der DIN V 18599 eingesetzte Berechnungsverfahren für Glasdoppelfassaden verbessert werden, um unterschiedliche Typen von Glasdoppelfassaden berücksichtigen zu können. Des Weiteren soll neueren Erkenntnissen aus messtechnischen Evaluierungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens „Weiterentwicklung und Evaluierung von Technologien und von Bewertungsmethoden zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EnEff06)“ [22] gewonnen wurden, Rechnung getragen werden.

2 Vorgehensweise

Die bauphysikalischen Vorgänge im Fassadenzwischenraum einer Doppelfassade sind äußerst vielfältig und unterliegen starken instationären meteorologischen sowie baulichen Einflüssen. Durch rechnerische Modelle ist daher immer nur eine Annäherung an die realen Verhältnisse möglich, da nicht alle Randbedingungen und physikalischen Vorgänge in vollem Umfang nachvollzogen werden können.

Um Gebäude mit Glasdoppelfassaden dennoch im Rahmen der Energieeinsparverordnung und der damit verbundenen Rechenvorschrift DIN V 18599 auf vereinfachte und damit im Planungsprozess handhabbare Weise energetisch bewerten zu können, sind pragmatische Rechenansätze mit hinreichender Genauigkeit gefragt.

Dabei muss klar sein, dass ein derartiger vereinfachter Berechnungsansatz nicht jedes Doppelfassadensystem erfassen kann, da die baulichen Variationsmöglichkeiten und deren energetische Auswirkungen sehr groß sind. Die Berechnungsmethodik soll vielmehr den Großteil marktüblicher Doppelfassadensysteme abdecken können. Spezielle Systemlösungen müssen durch aufwendigere Simulationsrechnungen oder messtechnisch analysierte Musterfassaden bewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden natürlich belüftete, geschossweise getrennte Glasdoppelfassaden betrachtet. Die Belüftung der an die Doppelfassade angrenzenden konditionierten Räume erfolgt mechanisch. Die äußere Verglasung kann aus Ein- oder Zweischeibenverglasung bestehen, die Tiefe des Fassadenzwischenraums bis 1,5 m betragen. Weitere Festlegungen beziehen sich auf die Zu- und Abluftöffnungen der Glasdoppelfassade, die in Kapitel 5 erläutert werden.

Alle anderen Doppelfassadensysteme müssen instationär oder messtechnisch bewertet werden.

Zur Erarbeitung der vereinfachten Bewertungsmethode wurde eine zweigleisige Herangehensweise gewählt:

Messung:

Auf dem Freigelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen besteht mit dem VERU-Gebäude (**V**ersuchseinrichtung für **e**nergetische und **r**aumklimatische **U**ntersuchungen) die Möglichkeit ganze Fassadensysteme unter realen Witterungsbedingungen messtechnisch analysieren zu können. Die langjährige messtechnische Erfahrung bei Freilanduntersuchungen am Institutsstandort Holzkirchen bietet hierbei die größtmögliche Genauigkeit einer realitäts- und damit praxisnahen Abbildung und Bewertung von Fassadensystemen. Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten zwei gleich große, westorientierte Versuchsräume am VERU-Gebäude mit unterschiedlichen Glasdoppelfassaden ausgestattet werden. Die Messungen dienen einerseits dazu, die bauphysikalischen Potenziale und Unterschiede der beiden gewählten Doppelfassadentypen darzustellen. Andererseits bieten Sie die Möglichkeit, Rechenmodelle zu überprüfen. Auf die Einzelheiten der Versuchsdurchführung wird in Kapitel 3.1 näher eingegangen.

Rechnung:

Um neben den messtechnisch erfassten Doppelfassadentypen weitere praxisübliche Fälle bewerten zu können werden ergänzend zu den Messungen Simulationsrechnungen durchgeführt. Das Grundmodell für die Simulationsrechnungen bildete einer der beiden Versuchsräume. Dadurch kann das Grundmodell anhand der Messergebnisse überprüft und optimiert werden. An dem daraus entwickelten Grundmodell werden Variantenrechnungen durchgeführt, wodurch die energetischen Auswirkungen unterschiedlicher Eigenschaften von Glasdoppelfassaden, deren versuchs-technische Abbildung nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich wäre, untersucht werden können. Auf die Einzelheiten der Simulationsrechnungen wird in Kapitel 3.2 näher eingegangen.

Mit den aus Messung und Rechnung gewonnenen Erkenntnissen wird eine Berechnungsmethode entwickelt, die den bestehenden Ansatz in DIN V 18599 aufgreifen und weiterentwickeln soll.

Dabei ist folgendes zu beachten:

- Es handelt sich um eine energetische Bewertungsmethode mit Hilfe von Monatsbilanzen.
- Die Bewertungsmethode ist nicht für die Auslegung oder den Entwurf von Glasdoppelfassaden gedacht.
- Die Bewertungsmethode dient nicht der Darstellung von Behaglichkeitsaspekten, es können z. B. keine Maximaltemperaturen innerhalb der Glasdoppelfassade ermittelt werden.
- Die bautechnische und bauphysikalische Bemessung von Glasdoppelfassaden ist nicht Gegenstand der Bewertungsmethode. Die Bewertungsmethode dient ausschließlich der energetischen Bewertung von Glasdoppelfassaden im Rahmen des Nachweises nach Energieeinsparverordnung.

3 Durchführung der Untersuchungen

Die Bewertung des energetischen Verhaltens von Glasdoppelfassaden war bisher nur mit (komplexen) Bewertungswerkzeugen (Simulation) möglich. Die DIN V 18599 bietet eine erste vereinfachte Methode an, die aber noch sehr grobe Einflussparameter aufweist. Es soll eine akzeptable Genauigkeit für die energetische Bewertung von Alternativfassaden im Rahmen der EnEV-Nachweise erreicht werden. Die Hauptaufgabe besteht in der Abschätzung der Luftwechselrate im Fassadenzwischenraum.

3.1 Freilanduntersuchungen

3.1.1 Beschreibung der Versuchsräume

Für die messtechnischen Untersuchungen von September 2007 bis Juni 2008 wurden am VERU-Versuchsgebäude [22] zwei gleich große, typische Büroräume im Erdgeschoss eingerichtet. Die Räume besitzen unterschiedliche Doppelfassadenausführungen und unterschiedliche Sonnenschutzsysteme. Es wurde in beiden Räumen die gleiche Anlagentechnik und das gleiche Beleuchtungssystem gewählt. Die Komponenten der Versuchsräume wurden gemeinsam mit den beteiligten Industriepartnern ausgewählt. Ziel war die Herstellung von zwei identischen Büroräumen hinsichtlich Orientierung, Geometrie und Ausstattung, denen aber Glasdoppelfassaden vorgestellt sind, die hinsichtlich ihrer wärmetechnischen Eigenschaften Extremfälle darstellen.

3.1.1.1 Bauliche Gegebenheiten

Die Grundfläche der Räume beträgt jeweils $15,4 \text{ m}^2$ (ca. $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$). Jeder Versuchsraum besitzt eine eigene Nummerierung, die eine eindeutige Zuordnung der gemessenen Verbrauchsdaten bzw. der gemessenen Sensordaten ermöglicht. Die Bezeichnung der Versuchsräume beginnt mit der Angabe der Etage, dann folgt die Nummerierung innerhalb einer Etage. Hierbei steht EG-S1 für den südlich und EG-M1 für den mittig im VERU-Gebäude angeordneten Versuchsraum. Da grundsätzlich nur die beiden genannten Räume betrachtet werden, ist zur Vereinfachung zumeist vom Raum S1 oder M1 die Rede. Nach Westen orientiert befinden sich die beiden Glasdoppelfassaden GDF-S1 und GDF-M1. Die Südfassade sowie die sonstigen umschließenden Bauteile sind opak. In Bild 1 sind die beiden Versuchsräume im Erdgeschoss-Grundriss des VERU-Gebäudes dargestellt.

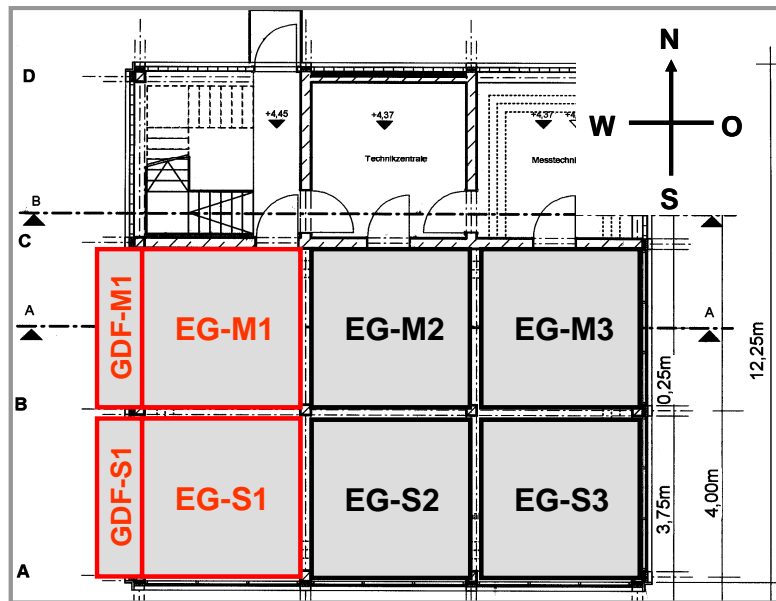


Bild 1: Anordnung der beiden Versuchsräume (rot gekennzeichnet) im VERU-Erdgeschoss.

Zur Vermeidung einer gegenseitigen thermischen Beeinflussung wurden die Trennbauteile zwischen den Versuchsräumen, gegen den nördlichen angrenzenden Technikbereich und gegen außen wärmetechnisch gedämmt. Die Aufbauten sind im Einzelnen wie folgt ausgeführt.

Wand zwischen den Versuchsräumen EG-S1 und EG-M1:

Die Zwischenwand besteht aus einer Leichtbaukonstruktion mit zweilagiger Gipskartonbeplankung (2,5 cm Dicke) und einem Mineralwollkern von 15 cm. Der Wärmedurchlasswiderstand der Zwischenwand beträgt $3,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ (U-Wert $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Wand zu den benachbarten Versuchsräumen EG-S2 und EG-M2:

Die Zwischenwand besteht aus einer Leichtbaukonstruktion mit zweilagiger Gipskartonbeplankung (2,5 cm Dicke) und einem Mineralwollkern von 16 cm. Der Wärmedurchlasswiderstand der Zwischenwand beträgt $4,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ (U-Wert $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Außenwand (opake Südfassade Versuchsraum EG-S1):

Die Außenwand besteht aus einer Sandwichkonstruktion (Alublech 4,5 mm, Mineralwolle 12 cm, Alublech 4,5 mm), die zur Minimierung der Wärmeverluste nach außen zusätzlich mit Mineralwolle (Dicke ca. 22,5 cm) innenseitig gedämmt und anschließend zweilagig mit Gipskartonplatten (Gesamtdicke 2,5 cm) beplankt wurde. Der Wärmedurchlasswiderstand der Außenwand beträgt $8,3 \text{ m}^2\text{K/W}$ (U-Wert $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Trennwand zum Technikbereich:

Zur Reduzierung der thermischen Beeinflussung Richtung Technikbereich im Norden des Gebäudes wurde die bestehende 25 cm dicke Betonwand raumseitig mit einer zusätzlichen Dämmschicht von 10 cm Mineralwolle versehen und anschließend zweilagig mit Gipskartonplatten beplankt. Der Wärmedurchlasswiderstand der Trennwand beträgt $2,7 \text{ m}^2\text{K/W}$ (U-Wert $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Decken:

Die Decke zwischen EG und 1. OG des VERU-Gebäudes besteht aus 25 cm Stahlbeton, 3 cm Trittschalldämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/mK sowie einem 5 cm dicken Estrichbelag mit einer Wärmeleitfähigkeit von 1,4 W/mK. Der Wärmedurchlasswiderstand der Trenndecke beträgt 1,0 m²K/W (U-Wert 0,78 W/m²K).

Bodenaufbau Erdgeschoss:

Der Bodenaufbau im nicht unterkellerten Erdgeschoss besteht aus 8 cm extrudiertem Polystyrol, 15 cm Betonplatte, 3 cm Trittschalldämmung und anschließend 5 cm Estrich. Der Wärmedurchlasswiderstand des Bodens beträgt 3,0 m²K/W (U-Wert 0,31 W/m²K).

Türen:

Die Türe zwischen den beiden Versuchsräumen sowie zum nördlichen Technikbereich besteht aus einer Holzstäbchenplatte (Dicke 40 mm) als Mittellage sowie einer beidseitigen Deckschicht aus Schichtstoffplatten (Dicke 0,8 mm).

Opake Hüllflächen des Doppelfassadenvorbaus:

Die opaken Hüllflächen des Doppelfassadenvorbaus (Abschluss nach Süden und Norden bzw. unten und oben) wurden als Sandwichkonstruktion (Alublech 3 mm, Mineralwolle 6 cm, Alublech 3 mm) ausgeführt. Der Wärmedurchlasswiderstand der Paneele beträgt 1,7 m²K/W (U-Wert 0,54 W/m²K).

Trennwand Fassadenzwischenraum GDF:

Die Trennwand im Fassadenzwischenraum der Doppelfassade zwischen den beiden Versuchsräumen wurde als Leichtbaukonstruktion mit einlagiger Beplankung aus Sperrholzplatten (Dicke 8 mm) und einem Mineralwollkern von 40 cm ausgeführt. Der Wärmedurchlasswiderstand der Trennwand beträgt 11,1 m²K/W (U-Wert 0,09 W/m²K).

3.1.1.2 Glasdoppelfassaden (GDF)

Die Glasdoppelfassaden beider Versuchsräume weisen die gleiche Konstruktion und die gleichen geometrischen Abmessungen auf. Innenseitig ist eine Wärmeschutzverglasung eingebaut. Die äußere Verglasung der Doppelfassade S1 (Isolierverglasung) enthält einen integrierten Sonnenschutz, wohingegen bei der Doppelfassade M1 aussenliegend eine hochtransparente Einfachverglasung eingebaut wurde und der Sonnenschutz im Fassadenzwischenraum vor der inneren Verglasung platziert wurde. Die Einzelheiten zu den Aufbauten der Glasdoppelfassaden finden sich in Tabelle 1 und Tabelle 2.

Bild 2 zeigt die im Rahmen des Forschungsvorhabens realisierten westorientierten Doppelfassaden am VERU-Versuchsgebäude.



Bild 2: Außenansichten von Südwest bzw. West der am VERU-Versuchsgebäude realisierten Doppelfassaden.

3.1.1.3 Technische Ausstattung Versuchsräume

Im folgenden Kapitel wird die technische Ausstattung der Versuchsräume im Detail dargestellt. Die Auswahl der einzelnen Systeme, Komponenten und Bauteile erfolgte in enger Abstimmung mit den am Forschungsvorhaben beteiligten Industriepartnern. Ziel war es hierbei, in der Praxis vorkommende Raum- und Fassadenszenarien abzubilden, wobei auch die Chance genutzt wurde innovative Systeme unter realen Bedingungen testen zu können.

In tabellarischer Form werden die jeweiligen Komponenten und deren spezifische Kenndaten und Parameter dargestellt. Eine Beschreibung der einzelnen Kenndaten ist in der folgenden Übersicht zusammengestellt.

U	Wärmedurchgangskoeffizient
U_g	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung
g_{\perp}	Gesamtenergiedurchlassgrad bei senkrechtem Strahlungseinfall
τ_v	Lichttransmissionsgrad
U_f	Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen
U_w	Wärmedurchgangskoeffizient Fenster
g_{tot}	Gesamtenergiedurchlassgrad unter Berücksichtigung des Sonnenschutzes (bei einem Lamellenwinkel von 45 °)
P	Leistung
V	Volumenstrom
dT	Temperaturdifferenz
WRG	Wärmerückgewinnungsgrad
Q_{IWQ}	Interne Wärmequelle
A_{NGF}	Nettogrundfläche (konditionierte Fläche nach EnEV)
h	Höhe

EG-M1:

Der Versuchsraum EG-M1 befindet sich mittig im Erdgeschoss an der Westseite des VERU-Versuchsgebäudes. Bild 3 zeigt einen Blick in den Innenraum sowie die Außenansicht der Fassade bei geschlossenem Behang. Die äußere Verglasungsebene besteht aus einer Einfachverglasung. Die innenseitige Verglasung ist als Wärmeschutzverglasung ausgeführt. Der Versuchsraum wird über einen elektrischen Radiator beheizt und über eine Metallkassettendecke gekühlt. Der Raum wird mechanisch gelüftet wobei ein Außenluftvolumenstrom von 40 m³/h während der Betriebszeit realisiert wird. Der Wärmerückgewinnungsgrad für die Lüftungsanlage beträgt 60 %. Der Raum wird über konventionell abgehängte Spiegelrasterleuchten beleuchtet, die tageslichtabhängig gedimmt werden. Der etwa 15 m² große Büroraum ist für eine Personenbelegung mit 1 Person ausgelegt. Tabelle 1 zeigt zusammenfassend die einzelnen Ausstattungskomponenten und deren wesentliche bauphysikalische Parameter.



Bild 3: Innen- und Außenansicht (mit geschlossenem Behang) Versuchsraum EG-M1.

Tabelle 1: Übersicht technische Ausstattung Versuchsraum EG-M1.

Ausstattungsmerkmal	Beschreibung	Eigenschaften
Außenseitige Verglasung GDF	Einfachverglasung (Pilkington Optiwhite 8 mm)	$U_g = 5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g_{\perp} = 0,90$ $\tau_v = 0,91$
	Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil U-Wert Rahmen	0,77 $U_f = ,3 \text{ W/m}^2\text{K}$
	U-Wert Fenster inkl. Rahmen	$U_w = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$
Innenseitige Verglasung GDF	Wärmeschutzverglasung (Interpane iplus S/SE)	$U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g_{\perp} = 0,51$ $\tau_v = 0,72$
	Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil U-Wert Rahmen	0,68 $U_f = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
	U-Wert Fenster inkl. Rahmen	$U_w = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
Sonnenschutz	Im Fassadenzwischenraum vor innerer Verglasung (Warema Leichtmetall-Jalousie Typ E50 A2, Lamellenbreite 50 mm)	$g_{\text{tot}} = 0,09$
Heizung	Elektrischer Radiator (Honeywell HR-41125 E)	$P = 2500 \text{ W}$
Kühlung	Kühldecke (Metallkassettendecke System Lindner LMD-B 100)	$P = 92,4 \text{ W/m}^2$, 1.223 W $V = 533 \text{ l/h}$ $dT = 17/26 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Lüftung	Mechanisch mit Wärmerückgewinnung	$V = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ WRG 60 %
Beleuchtung	Spiegelrasterleuchte (Zumtobel CLARIS-2)	Vorschaltgerät: EVG $P_{\text{Anschluss}} = 248 \text{ W}$ Beleuchtungsart: direkt/indirekt tageslichtabhängig gedimmt
Nutzung	Einzelbüro (1 Person)	$Q_{\text{IWQ}} = 1.014 \text{ Wh/d}$
Nutzfläche	-	$A_{\text{NGF}} = 15,4 \text{ m}^2$
Raumhöhe	Abgehängte Metallkassettendecke	$h = 2,82 \text{ m}$

EG-S1:

Der Versuchsraum EG-S1 befindet sich im Erdgeschoss an der Westseite des VERU-Versuchsgebäudes südlich benachbart zum Versuchsraum EG-M1. Bild 4 zeigt einen Blick in den Innenraum sowie die Außenansicht der Fassade bei geschlossenem Behang. Die äußere Verglasungsebene besteht aus einer unbeschichteten Doppelverglasung mit zwischenliegendem Sonnenschutz. Die innenseitige Verglasung ist als Wärmeschutzverglasung ausgeführt. Der Versuchsraum wird über einen elektrischen Radiator beheizt und über eine Metallkassettendecke gekühlt. Der Raum wird mechanisch gelüftet wobei ein Außenluftvolumenstrom von $40 \text{ m}^3/\text{h}$ während der Betriebszeit realisiert wird. Der Wärmerückgewinnungsgrad für die Lüftungsanlage beträgt 60 %. Der Raum wird über konventionell abgehängte Spiegelrasterleuchten beleuchtet, die tageslichtabhängig gedimmt werden. Der etwa 15 m^2 große Büroraum ist für eine Personenbelegung mit 1 Person ausgelegt. Tabelle 2 zeigt zusammenfassend die einzelnen Ausstattungskomponenten und deren wesentliche bauphysikalische Parameter.



Bild 4: Innen- und Außenansicht (mit geschlossenem Behang) Versuchsraum EG-S1.

Tabelle 2: Übersicht technische Ausstattung Versuchsraum EG-S1.

Ausstattungsmerkmal	Beschreibung	Eigenschaften
Opake Außenfassade	Aluminiumrahmenkonstruktion mit Paneel-Ausfachung und zusätzlicher Innendämmung	$U = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$
Außenseitige Verglasung GDF	Doppelverglasung (ISOLAR Solarflex E)	$U_g = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g_{\perp} = 0,76$ $\tau_v = 0,82$
	Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil U-Wert Rahmen	0,77 $U_f = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$
	U-Wert Fenster inkl. Rahmen	$U_w = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
Innenseitige Verglasung GDF	Wärmeschutzverglasung (Interpane iplus S/SE)	$U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g_{\perp} = 0,51$ $\tau_v = 0,72$
	Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil U-Wert Rahmen	0,68 $U_f = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
	U-Wert Fenster inkl. Rahmen	$U_w = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
Sonnenschutz	Zwischenliegend in äußerer Doppelverglasung	$g_{\text{tot}} = 0,20$
Heizung	Elektrischer Radiator (Honeywell HR-41125 E)	$P = 2500 \text{ W}$
Kühlung	Kühldecke (Metallkassettendecke System Lindner LMD-B 100)	$P = 92,4 \text{ W/m}^2$, 1.223 W $V = 533 \text{ l/h}$ $dT = 17/26 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Lüftung	Mechanisch mit Wärmerückgewinnung	$V = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ WRG 60 %
Beleuchtung	Spiegelrasterleuchte (Zumtobel CLARIS-2)	Vorschaltgerät: EVG $P_{\text{Anschluss}} = 248 \text{ W}$ Beleuchtungsart: direkt/indirekt tageslichtabhängig gedimmt
Nutzung	Einzelbüro (1 Person)	$Q_{\text{IWQ}} = 1.014 \text{ Wh/d}$
Nutzfläche	-	$A_{\text{NGF}} = 15,4 \text{ m}^2$
Raumhöhe	Abgehängte Metallkassettendecke	$h = 2,82 \text{ m}$

3.1.1.4 Mess- und steuerungstechnische Ausstattung

Das VERU-Versuchsgebäude verfügt über ein umfangreiches, modular aufgebautes Mess-, Steuerungs- und Regelungssystem (MSR-System). Es gibt MSR-Komponenten für die Versorgungsanlagen des Gesamtgebäudes, solche für die Etagen und solche für die einzelnen Messräume. Im Baukörper und in den Versuchsräumen sind weitere Sensoren integriert. Beide Teilsysteme ermöglichen es, die relevanten Energieströme aus den und in die Versuchsräume zu erfassen und zu regeln. Für die eigentlichen Untersuchungen steht außerdem ein Pool von flexibel einsetzbaren MSR-Kanälen mit zugehöriger Sensorik und Aktorik zur Verfügung. Diese können in den Versuchsräumen zur Durchführung der Experimente und zur Klärung spezieller Fragestellungen verwendet werden. Um die genannten Anforderungen zu erfüllen, sind sowohl Mess- und Steuerungs-Hardware als auch leistungsfähige Software-Programme notwendig. Für die letztgenannte Aufgabenstellung wird im VERU-Versuchsstand das am IBP entwickelte Software-System „Ime-das™“ verwendet. Einzelheiten zum System könnten dem IBP-Bericht WTB-02-2007 „Weiterentwicklung und Evaluierung von Technologien und von Bewertungsmethoden zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EnEff06)“ [22] entnommen werden.

3.1.1.5 Messstellenübersicht

Zur Erfassung aller für die Untersuchungen relevanten Energieströme sowie zur Beurteilung der thermischen und visuellen Zustände im Raum wurden in beiden Versuchsräumen zahlreiche Messsensoren installiert. Zur Erfassung der Heizleistungen wurde die elektrische Leistungsaufnahme der Heizradiatoren gemessen. Zur Erfassung der Kühlleistungen wurden jeweils die Vor- und Rücklauftemperaturen der Hydraulikkreise sowie die Massenströme gemessen. Zur Bilanzierung des Energietransports über die mechanische Lüftungsanlage wurden in jedem Versuchsraum in den Zuluft- und in den Abluftvolumenstromkreis Luftvolumenstromsensoren eingebaut sowie die Temperatur am Lufteintritt in bzw. beim Luftaustritt aus dem Versuchsraum gemessen.

Neben diesen Energiebilanzanteilen für die Beheizung, Kühlung und Belüftung der beiden Versuchsräume wurde darüber hinaus die elektrische Leistungsaufnahme für die künstliche Beleuchtung sowie die Leistungsaufnahme der internen Wärmequellen gemessen. Die internen Wärmequellen beinhalten die Wärmeabgabe der Personen im Raum sowie deren Arbeitsmittel wie Computer, Monitore, Drucker etc.. Diese Wärmemenge wurde dem Versuchsraum über so genannte Kühllastsimulatoren zugeführt. Hierunter versteht man eine elektrisch beheizte Röhre, die ein ähnliches Verhältnis zwischen konvektiver und radiativer Wärmeabgabe wie Personen im Raum aufweist. Eine Beschreibung dieser Kühllastsimulatoren zeigt Bild 5.

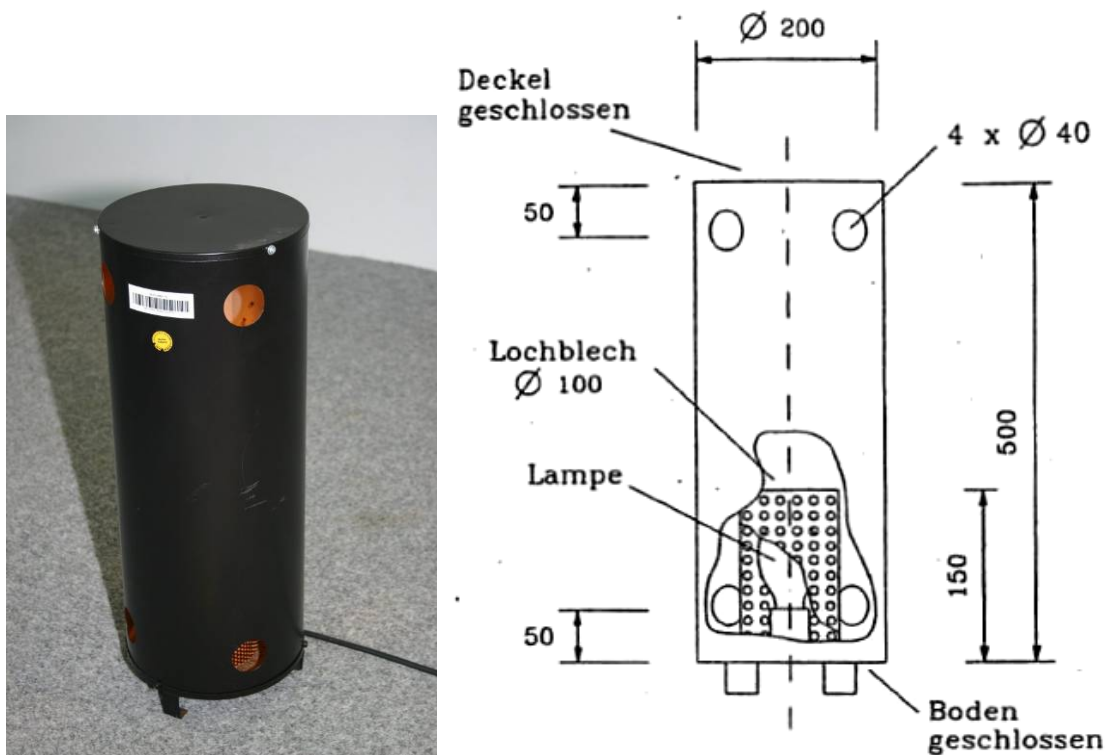


Bild 5: Kühllastsimulator gemäß FGK-Vorschrift KD1, Vorschriften des Fachinstitutes Gebäude-Klima e.V. für Wärmetechnische Messungen an Kühldeckenelementen.

Neben den energetischen Parametern wurden auch zahlreiche Messgrößen zur Beurteilung der Behaglichkeit bzw. thermischen Verhältnisse im Raum und der Glasdoppelfassade aufgezeichnet. Im Einzelnen waren dies zunächst die Lufttemperaturen, gemessen in unterschiedlichen Höhen. Die Lufttemperatursensoren im Raum befinden sich in den Höhen 0,1 m, 1,1 m und 1,7 m über dem Boden. Auf etwa gleichem Höhenniveau der Position 0,1 m und 1,7 m wurden im Fassadenzwischenraum der Glasdoppelfassade Lufttemperaturen gemessen sowie zusätzlich in einer Höhe von etwa 3,0 m über dem Boden, so dass die Temperaturschichtung im Gesamtquerschnitt des Fassadenzwischenraums erfasst wurde (unten, mittig, oben). Zur Vermeidung einer eventuellen Aufheizung der Lufttemperatursensoren durch einfallende Solarstrahlung befindet sich um den Temperatursensor ein Strahlungsschutz aus einer hochverspiegelten Kunststoffröhre. Neben den Lufttemperaturen wurde in Raummitte an der Messposition 1,1 m über Boden die operative Temperatur mit Hilfe eine so genannten Globe-Thermometers sowie die relative Luftfeuchte gemessen. Darüber hinaus wurden an den Oberflächen der Umschließungsflächen Oberflächentemperatursensoren installiert. Im Einzelnen finden sich diese am Boden, an den Decken, an den Zwischenwänden, beidseitig an der inneren Verglasungsebene sowie innenseitig an der äußeren Verglasungsebene.

Zur Bilanzierung der Wärmeströme über den Boden, die Decken, die Zwischenwände sowie die Fassaden wurden zusätzlich zu den Oberflächentemperatursensoren Wärmestrommesser installiert, mit deren Hilfe eine genauere energetische Bilanzierung der einzelnen Versuchsräume möglich ist.

Zur Beurteilung der visuellen Behaglichkeit bzw. zur Überprüfung einer ausreichenden Helligkeit an den Arbeitsplätzen wurden Beleuchtungsstärkesensoren jeweils auf Arbeitsplatzniveau installiert.

Neben einer ausreichenden Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz ist für die visuelle Behaglichkeit auch eine blendfreie Fassade essentiell. Zur Beurteilung der Blendsituation an der Fassade wurden im Raum zusätzliche Leuchtdichtesensoren installiert, die wesentliche Teile der transparenten Fassadenfläche erfassen und deren gemessene mittlere Leuchtdichte als Beurteilungsmaß für die Blendung an der Fassade herangezogen werden kann. Dadurch konnten auch Aussagen über die Funktionsweise der gekoppelten Beleuchtungs-/Sonnenschutzsteuerung gemacht werden, die als Ergänzung zum Forschungsprojekt für den beteiligten Industriepartner im Bereich Beleuchtung von Interesse waren. Bild 6 zeigt in einer Übersicht schematisch die gemessenen Parameter sowie die Position der einzelnen Messsensoren im Versuchsraum.

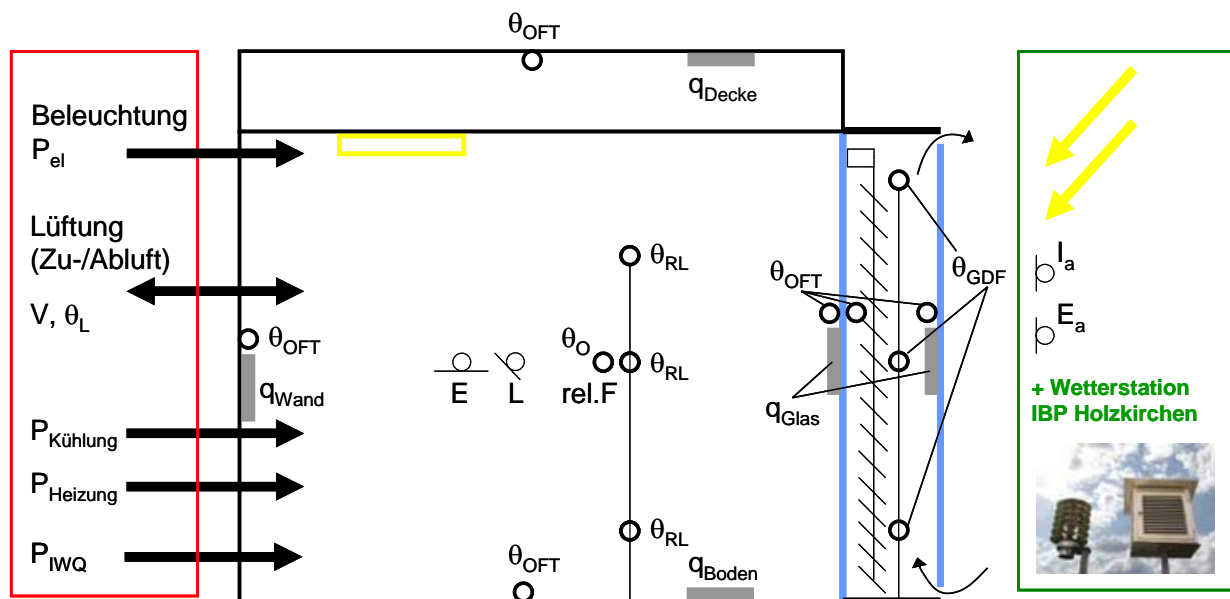


Bild 6: Messstellenübersicht Versuchsräume.

θ_{RL}	Raumlufttemperatur (0,1 m / 1,1 m / 1,7 m Höhe)
θ_o	Operative Raumtemperatur (Globe-Thermometer 1,1 m Höhe)
rel.F	relative Luftfeuchte (1,1 m Höhe)
θ_{OFT}	Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen
$P_{Kuehlung}$	Kühlleistung
$P_{Heizung}$	Heizleistung
P_{IWQ}	Leistung interne Wärmequellen
V, θ_L	Volumenstrom und Temperaturen Lüftung (Zu-/Abluft)
P_{el}	Elektrische Leistung Beleuchtung
E	Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz
L	Leuchtdichte an der Fassade
q	Wärmestromdichte
I_a	Direktstrahlung
E_a	vertikale Beleuchtungsstärke

Die Klimadatenerfassung erfolgt über die zentrale Wetterstation am IBP-Holzkirchen. Diese erfasst die wesentlichen meteorologischen Randbedingungen wie Globalstrahlung gerichtet und diffus, Außenlufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie den Luftdruck. Zusätzlich werden unmittelbar am VERU-Gebäude noch weitere Außenlufttemperaturen sowie die gerichtete Strahlung an den Orientierungen Ost, Süd und West messtechnisch er-

fasst. Zusätzlich zu den gemessenen Strahlungsdaten wird die gerichtete Beleuchtungsstärke in Fassadenorientierung sowie horizontal auf dem Dach des VERU-Versuchsgebäudes gemessen.

3.1.1.6 Beschreibung Messsensorik

Im Folgenden sollen die wesentlichen messtechnischen Komponenten zur Erfassung der relevanten Systemparameter sowie zur Darstellung des energetisch thermischen Verhaltens der beiden Versuchsräume sowie der dort installierten Anlagensysteme dargestellt werden. In Bild 7 (linke Bildhälfte) ist ein Globe-Thermometer zur Bestimmung der operativen Temperatur im Raum dargestellt. Dieses besteht aus einer schwarz lackierten hohlen Kupferkugel und einem PT100-Widerstandsthermometer in einer Edelstahlhülse mit der Sensorspitze im Zentrum der Kugel. Die Genauigkeit des Temperatursensors beträgt $\pm 0,3$ K (DIN EN 60751 Klasse B). Ebenfalls in Bild 7 (rechtes Bild) ist ein Temperatursensor zur Erfassung der Lufttemperatur im Raum dargestellt. Der PT100-Keramik-Widerstand ist mit einem Strahlungsschutz umgeben, der eine Erwärmung des Sensors bei direkter Sonnenbestrahlung verhindert. Der Strahlungsschutz besteht aus einer selbstklebenden Spiegelfolie mit einem Reflexionsgrad von 92 Prozent. Er ist aus zwei zentrisch angeordneten Röhren mit den Durchmessern 45 und 65 mm aufgebaut. Der Strahlungsschutz ist 100 mm hoch, der Sensor befindet sich in einer Höhe von etwa 30 mm oberhalb der Unterkante der Röhre. Die Genauigkeit des Thermometers beträgt $\pm 0,1$ K (DIN EN 60751 Klasse 1/3 B).



Bild 7: Temperatursensoren zur Bestimmung der operativen Temperatur (linke Bildhälfte) und der Lufttemperatur (rechte Bildhälfte).

In Bild 8 ist die zur Messung der Fassadenleuchtdichte und der Beleuchtungsstärke auf den fiktiven Arbeitsplätzen verwendete Messsensorik dargestellt. Die rechte Bildhälfte zeigt einen Photometerkopf für Beleuchtungsstärkemessungen zur Beurteilung der Beleuchtung am Arbeitsplatz. Die $V(\lambda)$ -Anpassungsgüte nach DIN 5032 T6 beträgt $f_1 < 3\%$ (Klasse A) mit einer kosinuskorrigierten räumlichen Bewertung $f_2 < 1,5\%$. In der linken Bildhälfte ist ein Photometerkopf mit Leuchtdichtevorsatz dargestellt. Die $V(\lambda)$ -Anpassungsgüte nach DIN 5032 T6 beträgt ebenfalls $f_1 < 3\%$ (Klasse A) und die kosinuskorrigierte räumliche Bewertung $f_2 < 1,5\%$.



Bild 8: Photometerkopf zur Bestimmung der Leuchtdichte (linke Bildhälfte) und Beleuchtungsstärke (rechte Bildhälfte).

Bild 9 zeigt eine Luftströmungssonde. Die Strömungsmessung erfolgt jeweils kalorimetrisch nach dem Wärmeübertragungsprinzip. Ein beheizbares Thermo-Widerstandselement wird relativ zur Mediumtemperatur auf eine konstante Übertemperatur geregelt. Die Wärmeabgabe an das Medium steigt mit zunehmendem Massenstrom. Die Heizspannung ist ein direktes Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Die Messgenauigkeit beträgt $\pm 0,15$ m/s zuzüglich ± 6 % vom Messwert.

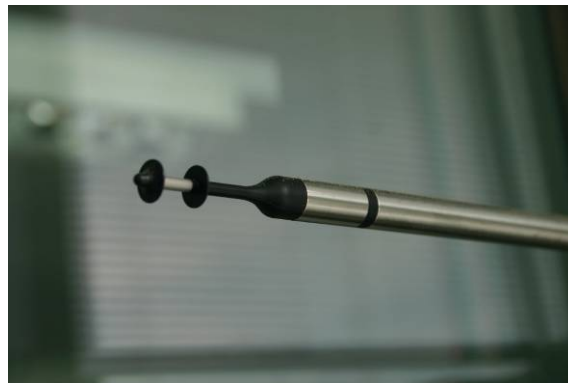


Bild 9: Luftströmungssonde.

Die Massenströme der Kühlkreise werden mit Hilfe von magneto-induktiven Durchflussmessern in Kombination mit hochgenauen PT100-Tauchfühler-Thermometern ermittelt. Die Tauchfühler zur Bestimmung der Vor- und Rücklauftemperaturen besitzen eine Genauigkeit von $\pm 0,03$ K. Die Grundgenauigkeit des magneto-induktiven Durchflussmessers liegt bei $\pm 0,5$ % vom jeweiligen Messwert.

3.1.1.7 Steuerungs- und Regelungstechnik

Für den Betrieb der einzelnen Anlagensysteme ist eine umfangreiche zentrale Regel- und Steueranlage mittels innovativer, prozessoffener, speicherprogrammierbarer Steuerungs-Software (SPS-Software) vorhanden (Bild 10). Hierdurch wird im Wesentlichen die Grundausstattung zur Bereitstellung der (Wärme- und) Kälteversorgung, sowie für die thermische Luftaufbereitung sichergestellt. Die Steuerung ist weitgehend modular konzipiert, um bei Umbauarbeiten am VERU-Versuchsgebäude laufende Messungen nicht zu stören. Hierdurch kann auch ein hohes Maß an Ausfallsicherheit für die einzelnen Systeme gewährleistet werden.

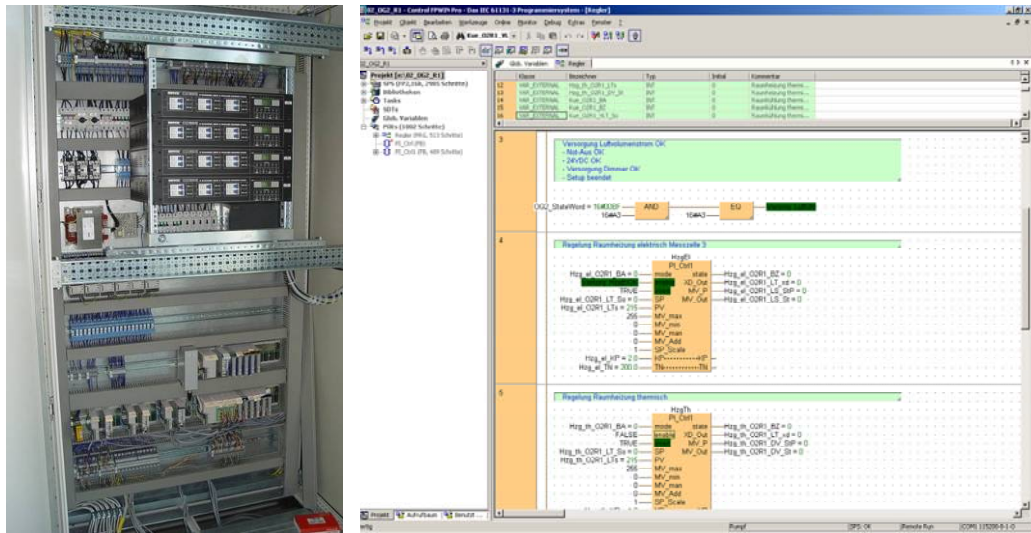


Bild 10: Modular aufgebaute SPS-Steuerung mit beispielhafter Darstellung der Programmieroberfläche.

Des Weiteren befindet sich eine herstellereigene Steuerung für die Sonnen- und Beleuchtungssysteme in den Versuchsräumen. Hierdurch werden die Behänge gemäß den Vorgaben des Untersuchungsprogramms gesteuert. Am Dach des VERU-Gebäudes wurde ein Tageslichtmesskopf installiert, der eine mittlere Beleuchtungsstärke der Umgebung misst (Bild 11) und diese an den kombinierten Steuerungsrechner für den Sonnenschutz und für die Kunstlichtsysteme überträgt.



Bild 11: Tageslichtmesskopf am Dach des VERU-Gebäudes.

Dieser Steuerungsrechner ist mit der zentralen Messdatenbank verknüpft, hierdurch ist es einerseits möglich, dass der Steuerungsrechner Informationen wie z.B. der mittleren Beleuchtungsstärke der Umgebung über die Messdatenerfassung bekommt. Darüber hinaus werden die jeweiligen Zustände der Sonnenschutzsysteme wie die Behänglänge und die Lamellenwinkel erfasst und in der zentralen Datenbank abgespeichert und stehen somit für spätere Analysen und Auswertungen zur Verfügung. Bild 12 zeigt die Übersichtseite zur Steuerung der beiden Sonnenschutzsysteme sowie der Kunstlichtsteuerung.

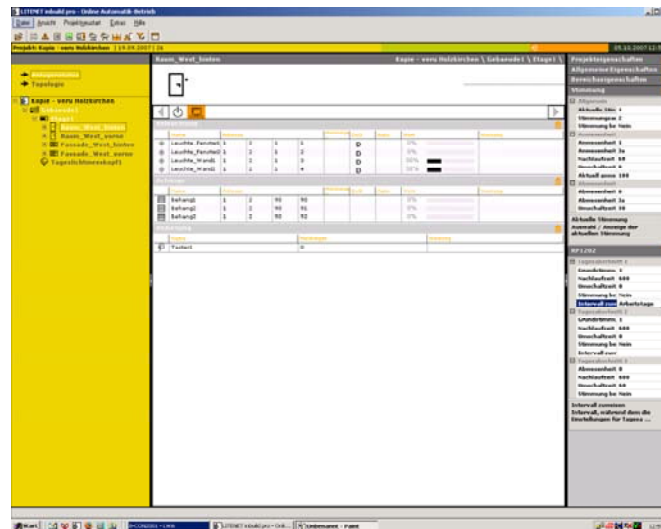


Bild 12: Eingabeoberfläche zur Steuerung der Sonnenschutzsysteme und der Kunstlichtsteuerung.

In den jeweiligen Untermenüs können vom zentralen Steuerrechner aus die jeweiligen Parameter zur Steuerung der Systeme eingegeben bzw. überwacht werden. Wesentliche Größe ist die maximal zulässige mittlere Beleuchtungsstärke der Umgebung, ab der Sonnenschutzbehänge bevorzugt in Sonnenschutzstellung gefahren werden.

3.1.1.8 Messdatenerfassung IMEDAS™

Imedas™ ist ein am IBP entwickeltes und für die Belange der Bauphysikforschung optimiertes Software-System für die Bereiche Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik (MSR). Es handelt sich um ein servergestütztes System, das alle Projektinformationen bündelt und sie den am MSR-Projekt Beteiligten über entsprechende Funktions-Module zur Verfügung stellt. Die Bearbeitung erfolgt über normale Webbrowser. Im Einzelnen besteht Imedas™ aus folgenden Modulen:

- Planungswerkzeug (Prüfstands-Konfiguration)
- Mess- und Kommunikationsprogramm
- Visualisierung mit und ohne integrierte HMI-Funktionen
- Zentrale Datenbank für Mess- und Zustandswerte
- Dokumentations- und Informationssystem
- Benutzer- und Projektverwaltung

Alle beschriebenen Software-Module laufen auf einem zentralen Server, ausgenommen die Messprogramme, diese sind auf eigenen Messrechnern installiert. Jedes dieser Module ist über den Startbildschirm (siehe Bild 13) erreichbar.

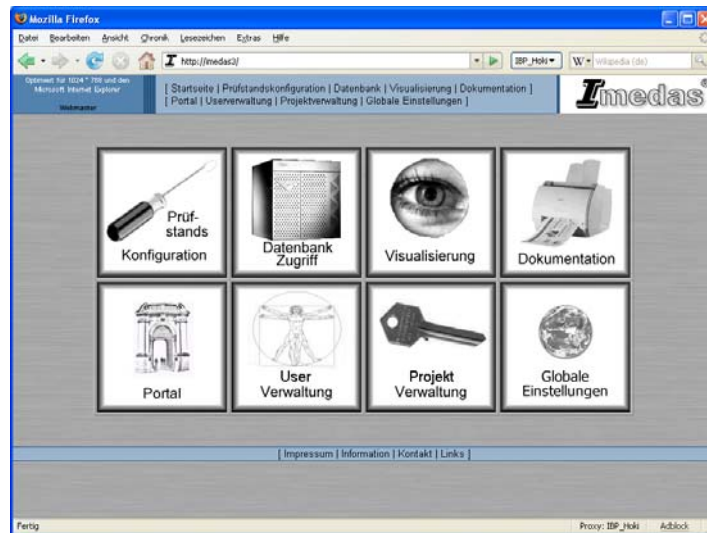


Bild 13: Startseite Imedas™-Softwaresystem.

Entgegen kommerziell erhältlichen Software-Systemen erlaubt Imedas™ einen ganzheitlichen Ansatz, um das Thema MSR-Technik zu bearbeiten. Dadurch, dass es im eigenen Haus entwickelt wurde, besteht zudem die Möglichkeit auf neue Anforderungen flexibel zu reagieren.

Details zu Imedas™ können dem IBP-Bericht WTB-02-2007 „Weiterentwicklung und Evaluierung von Technologien und von Bewertungsmethoden zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EnEff06)“ [22] entnommen werden.

3.1.2 Nutzungsrandbedingungen

Um die Untersuchungen so praxisnah wie möglich durchführen zu können, wurde ein einheitliches Nutzungsprofil für beide Versuchsräume in Anlehnung an DIN V 18 599 verwendet.

3.1.2.1 Nutzungsprofil DIN V 18 599 Teil 10

Gemäß Teil 10 der DIN V 18 599 wird ein Einzelbüro mit einem Arbeitsplatz von 7:00 bis 18:00 Uhr genutzt. Die tägliche Betriebszeit der Raumluftechnik, Heizung und Kühlung beginnt 2 Stunden vor der Nutzungszeit, also ab 5:00 Uhr und endet mit dem Ende der Nutzungszeit um 18:00 Uhr.

Die Raumsolltemperatur beträgt im Heizfall 21 °C und im Kühlfall 24 °C. In der Nacht und an den Wochenenden wird die Raumlufthtemperatur während der Heizperiode um 4 K auf dann 17 °C reduziert. Pro Person wurden die Versuchsräume mit 40 m³/h Außenluftvolumenstrom während der Betriebszeit beaufschlagt.

Der Wartungswert der Beleuchtungsstärke auf Arbeitsplatzniveau beträgt 500 lx. Die künstliche Beleuchtung wurde tageslichtabhängig gedimmt ohne Abwesenheitszeiten von Personen zu berücksichtigen. Die Beleuchtung wurde in Zusammenspiel mit dem Sonnenschutz gemäß einer neuen Steuerung des Industriepartners für die Beleuchtung gedimmt, die anhand der gemessenen mittleren Beleuchtungsstärke der Umgebung und einer, mit Hilfe des im Raum gemessenen Tageslichtquotienten ermittelten Raumkennlinie, den Kunstlichtbedarf ermittelt. Die Beleuchtung wurde während der Nutzungszeit aktiviert. Die tatsächlichen Einschaltzeiten bzw. Leistungsstufen waren hierbei vom Tageslichtangebot und dem Regelungsalgorithmus der Beleuchtungssteuerung abhängig.

Gemäß DIN V 18 599 ergeben sich bei täglich 6 Vollnutzungsstunden und mittlerer spezifischer Leistung für den Wärmeeintrag durch Personen 5 W/m² und für Arbeitshilfen 7 W/m². Hieraus errechnet sich eine tägliche Wärmezufuhr von 72 Wh/m² und Person. Im Versuch wurden 6 W/m² über die Nutzungszeit (11 h) verteilt über so genannte Kühllastsimulatoren (siehe Kapitel 3.1.1.5) dem Raum zugeführt.

Tabelle 3 zeigt die verschiedenen Nutzungsrandbedingungen für das Nutzungsprofil „Einzelbüro“ gemäß DIN V 18599.

Tabelle 3: Nutzungsprofil „Einzelbüro“ DIN V 18599-10.

Tabelle A.1 — Nutzung Einzelbüro

Einzelbüro		Nr. 1			
Nutzungszeiten		von	bis		
tägliche Nutzungszeit	Uhr	7:00	18:00		
jährliche Nutzungstage $d_{\text{Nutz,a}}$	d/a	250			
jährliche Nutzungsstunden zur Tagzeit t_{Tag}	h/a	2543			
jährliche Nutzungsstunden zur Nachtzeit t_{Nacht}	h/a	207			
tägliche Betriebszeit RLT und Kühlung	Uhr	5:00	18:00		
jährliche Betriebstage für jeweils RLT, Kühlung und Heizung $d_{\text{op,a}}$	d/a	250			
tägliche Betriebszeit Heizung	Uhr	5:00	18:00		
Raumkonditionen (sofern Konditionierung vorgesehen)					
Raum-Solltemperatur Heizung $\vartheta_{i,h,\text{soll}}$	°C	21			
Raum-Solltemperatur Kühlung $\vartheta_{i,c,\text{soll}}$	°C	24			
Minimaltemperatur Auslegung Heizung $\vartheta_{i,h,\text{min}}$	°C	20			
Maximaltemperatur Auslegung Kühlung $\vartheta_{i,c,\text{max}}$	°C	26			
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb $\Delta\vartheta_{i,NA}$	K	4			
Feuchteanforderung	–	mit Toleranz			
Mindestaußenluftvolumenstrom \dot{V}_A					
personenbezogen	m ³ je Stunde und Person	40			
flächenbezogen	m ³ /(h · m ²)	4			
mech. Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel (Praxis)		von	bis		
Luftwechsel (allgemein)	h ⁻¹	2	3		
Luftwechsel (volle Kühlfunktion über ZuLuft)	h ⁻¹	4	8		
Beleuchtung					
Wartungswert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m	lx	500			
Höhe der Nutzebene h_{Ne}	m	0,8			
Minderungsfaktor k_A	–	0,84			
relative Abwesenheit C_A	–	0,3			
Raumindex k	–	0,9			
Minderungsfaktor Gebäudebetriebszeit F_t	–	0,7			
Personenbelegung					
maximale Belegungsdichte	m ² je Person	gering	mittel	hoch	
		18	14	10	
Interne Wärmequellen					
		Vollnutzungsstunden (h/d)	max. spezifische Leistung (W/m²)		
			tief	mittel	hoch
Personen (70 W je Person)		6	4	5	7
Arbeitshilfen ^a		6	3	7	15
Wärmezufuhr je Tag ($q_{i,p} + q_{i,inc}$)	Wh/(m ² · d)		42	72	132
^a tief/mittel/hoch entspricht 50/100/150 W je Person für Arbeitshilfen					

3.1.2.2 Steuerung Sonnenschutz

Die beiden Büroräume wurden mit unterschiedlichen Sonnenschutzsystemen ausgestattet. Bei dem Versuchsraum S1 befindet sich der Sonnenschutz an der äußeren Verglasungsebene zwischen den beiden Glasscheiben der Zweischeibenverglasung. Bei dem Versuchsraum M1 befindet sich der Sonnenschutz im Fassadenzwischenraum an der inneren Verglasungsebene.

Die beiden Systeme sind über ein herstellerepezifisches Bussystem an einen zentralen Leitrechner angekoppelt. Durch eine Anbindung an die zentrale Messdatenbank konnten während des gesamten Untersuchungszeitraumes jeweils die aktuellen Behänglängen und Lamellenwinkel abgespeichert und so für spätere Auswertungen zur Verfügung gestellt werden. Die beiden Systeme wurden in Abhängigkeit der Himmelhelligkeit während der Nutzungszeit von 7.00 – 18.00 Uhr gesteuert.

Die zentrale Steuerung der Behänge wurde so konzipiert, dass bei Überschreitung des vorgegebenen Grenzwertes der mittleren Beleuchtungsstärke der Umgebung und ab einer direkten Sonnenstrahlung auf die Doppelfassade der Sonnenschutz heruntergefahren wurde. Der Lamellenwinkel wurde in Abhängigkeit vom jeweiligen Sonnenhöhenwinkel so eingestellt, dass die Sonnenstrahlung immer senkrecht darauf trifft. Außerhalb der Nutzungszeit und an den Wochenenden wurden während der Winterperiode (Oktober – März) alle Systeme geöffnet und während der Sommerperiode an den Wochenenden zur Vermeidung einer zusätzlichen Aufheizung der Versuchsräume vollständig geschlossen.

3.1.2.3 Steuerung Beleuchtung

Die beiden Büroräume wurden mit einem identischen Beleuchtungssystem ausgestattet. Durch den Hersteller wurde für beide Versuchsräume eine eigene Kennlinie des Tageslichtquotienten für den vorderen und hinteren Raumbereich bei geöffnetem / geschlossenem Sonnenschutz-Behang messtechnisch ermittelt. Sobald während der Nutzungszeit der hintere oder vordere Raumbereich nicht mehr ausreichend mit Tageslicht versorgt wird, werden die hinteren bzw. vorderen Leuchten so gedimmt, dass der Sollwert der Beleuchtungsstärke erreicht wird.

3.1.2.4 Steuerung Glasdoppelfassade

Im Abstand von ca. 70 cm vor der inneren Wärmeschutzverglasung befindet sich die äußere Verglasungsebene der Doppelfassade. Der hierdurch aufgespannte Luftraum ist nach allen Umschließungsflächen hin hermetisch abgedichtet. Als Belüftungsmöglichkeit befinden sich im unteren und oberen Bereich der äußeren Fassade jeweils 3 einzelne Lüftungsklappen, die voneinander unabhängig geöffnet werden können. Diese Klappen dienen zur Belüftung der Doppelfassade, um z.B. eine Aufheizung der angrenzenden Versuchsräume während der Sommermonate zu begrenzen. Die Bruttoöffnungsfläche der einzelnen Klappen beträgt jeweils 0,33 m². Bild 14 zeigt die Luftgitter im unteren und oberen Bereich der Doppelfassade. In Bild 15 ist eine geöffnete Lüftungsklappe im oberen Fassadenbereich dargestellt. Die einzelnen Lüftungsklappen sind über die zentrale SPS-Steuerung separat schaltbar. Der aktuelle Schaltzustand wird in der zentralen Messdatenbank gespeichert. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden alle Lüftungsklappen gleichzeitig jeweils komplett geöffnet oder geschlossen. Gemeinsam mit den Partnern wurde vereinbart, die Lüftungsflächen in den ersten Messmonaten zu öffnen, in den Wintermonaten Januar, Februar und März zu schließen und ab April 2008 wieder zu öffnen. Durch das Öffnen der Lüftungsklappen während der Sommermonate soll die Doppelfassade über die Außenluft gekühlt werden, so dass sich die Aufheizung der Versuchsräume möglichst minimal gestaltet. Durch das Schließen der Lüftungsklappen während der Heizperiode kann sich der Luftraum in der Doppel-

fassade maximal aufheizen, wodurch die Transmissionswärmeverluste über die Verglasung reduziert werden können (Wintergarten).



Bild 14: Lüftungsgitter im unteren (linke Bildhälfte) und oberen Bereich der Doppelfassade (rechte Bildhälfte).



Bild 15: Innenansicht einer geöffneten Lüftungsklappe der Glasdoppelfassade.

3.2 Instationäre Simulationsrechnungen

Für die instationären Simulationsrechnungen wurde das Programm TRNSYS (**T**ransient **S**ystem **S**imulation program) [15] mit dem an das Mehrzonengebäudemodell von TRNSYS angekoppelten Luftströmungsmodell TRNFLOW [basierend auf dem Mehrzonenluftströmungsmodell COMIS (Conjunction of Multizone Infiltration Specialists)] gewählt, da mit dieser Programmkombination zusätzlich zur instationären Gebäudesimulation auch die Luftströmung im Fassadenzwischenraum der Doppelfassade simuliert werden kann.

3.2.1 Simulationsmodell

Der Versuchsraum EG-M1 des VERU-Gebäudes mit der zugehörigen westorientierten Doppelfassade bildete die Grundlage für die Erstellung des Simulationsmodells in TRNSYS und die Grundvariante für die nachfolgenden Variantenrechnungen. Der Versuchsraum selber wurde im Modell als eine Zone abgebildet, die Doppelfassade wurde in zwei Zonen unterteilt, so dass der Versuchsraum mit seiner Doppelfassade als 3-Zonen-Modell nachgebildet wird.

Wetterdaten:

Zur Validierung des Simulationsmodells wurde ein spezifischer Wetterdatensatz für Holzkirchen anhand der gemessenen Daten der Wetterstation des IBP Holzkirchen erstellt. Für die Variantenrechnungen wurde der Wetterdatensatz TRY 13 [23] verwendet.

Orientierung und geometrische Daten:

Die Orientierung und geometrischen Daten des Versuchsraums wurden im Modell übernommen. Der Fassadenzwischenraum der Doppelfassade wurde im Modell in zwei Zonen unterteilt, um zwei verschiedene Luftknoten und damit Temperaturen im unteren und oberen Bereich des Fassadenzwischenraums zu erhalten. Hierdurch konnten auch opake Brüstungsbereiche abgebildet werden.

Zeitprofile:

Die Zeitprofile der Betriebs- und Nutzungszeit aus dem Versuch wurden im Modell übernommen. Damit es bei der Validierung zu keinen Zeitverschiebungen zwischen Messung und Rechnung kommt, musste simulationstechnisch beachtet werden, dass das Jahr 2008 ein Schaltjahr ist und der 1. Januar auf einen Dienstag fällt.

Sonnenschutz:

Tabelle 4 zeigt die Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade des im Fassadenzwischenraum des Versuchsraums M1 eingebauten Sonnenschutzsystems in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels und der Lamellenstellung. Die zugehörigen TRNSYS-Kennwerte sind ebenfalls berechnet. Für die Annäherung im Modell wurde ein mittlerer Einstrahlwinkel von 15° bei geschlossenen Lamellen angenommen (farbig hinterlegte Zeile). Der Transmissionsgrad des Sonnenschutzsystems beträgt hierbei 50,7 %, der Reflexionsgrad 3,9 % und der Absorptionsgrad 45,4 %.

Die im Versuch angewandte Steuerung des Sonnenschutzes über die mittlere Beleuchtungsstärke der Umgebung (Tageslichtmeßkopf am Dach des VERU-Gebäudes) lässt sich in TRNSYS nicht exakt umsetzen. Der Sonnenschutz wird daher in der Simulation anhand der Weststrahlung gesteuert. Wenn die Weststrahlung Werte von über 200 W/m^2 annimmt wird der Sonnenschutz geschlossen und bei einem Rückgang der Weststrahlung auf Werte unter 150 W/m^2 wieder geöffnet. Für die Validierungsrechnungen wurde das reale Schaltverhalten aus dem Versuch an TRNSYS übergeben.

Tabelle 4: Umsetzung des im Versuch eingesetzten Sonnenschutzes in TRNSYS (farblich hinterlegt).

		Sonnenschutz "normal" eingebaut (Verglasung back = außen)															
		Herstellerangaben						Umsetzung in TRNSYS				Strahlungsbilanz TRNSYS					
		Systemkennwerte			Stoffkennwerte							Sonnenschutz					
Einstrahlwinkel [°] (Sonnenhöhenwinkel)		$\tau_{e,B}$	$\rho_{e,B}$	$\alpha_{e,B}$	$\tau_{a,B}$	$\rho_{a,B}$	$\alpha_{a,B}$	ISHADE	REFLISHADE	REFLOSHADE	CCISHADE	τ_e	Solarstrahlung durch den Sonnenschutz in den Raum	ans Fenster reflektierte Solarstrahlung	Konvektion an Luftknoten	langwellige Strahlung ans Fenster	$\Sigma Q_S =$
Lamellen geschlossen	0	5,1%	48,3%	46,6%	0,0%	58,0%	42,0%	94,9%	50,9%	50,9%	33,0%	48,5%	2,5%	23,4%	7,5%	15,1%	100,0%
	5	4,5%	49,3%	46,2%	0,0%	58,0%	42,0%	95,5%	51,6%	51,6%	33,0%	48,5%	2,2%	23,9%	7,4%	15,0%	100,0%
	10	4,2%	49,9%	45,9%	0,0%	58,0%	42,0%	95,8%	52,1%	52,1%	33,0%	48,5%	2,0%	24,2%	7,3%	14,9%	100,0%
	15	3,9%	50,7%	45,4%	0,0%	58,0%	42,0%	96,1%	52,8%	52,8%	33,0%	48,5%	1,9%	24,6%	7,3%	14,8%	100,0%
	20	3,6%	51,2%	45,2%	0,0%	58,0%	42,0%	96,4%	53,1%	53,1%	33,0%	48,5%	1,7%	24,8%	7,2%	14,7%	100,0%
	25	3,1%	52,0%	44,9%	0,0%	58,0%	42,0%	96,9%	53,7%	53,7%	33,0%	48,5%	1,5%	25,2%	7,2%	14,6%	100,0%
	30	2,9%	52,4%	44,7%	0,0%	58,0%	42,0%	97,1%	54,0%	54,0%	33,0%	48,5%	1,4%	25,4%	7,2%	14,5%	100,0%
	35	2,7%	53,3%	44,0%	0,0%	58,0%	42,0%	97,3%	54,8%	54,8%	33,0%	48,5%	1,3%	25,9%	7,0%	14,3%	100,0%
	40	2,4%	53,6%	44,0%	0,0%	58,0%	42,0%	97,6%	54,9%	54,9%	33,0%	48,5%	1,2%	26,0%	7,0%	14,3%	100,0%
	45	2,2%	54,0%	43,8%	0,0%	58,0%	42,0%	97,8%	55,2%	55,2%	33,0%	48,5%	1,1%	26,2%	7,0%	14,2%	100,0%
	50	2,0%	54,9%	43,1%	0,0%	58,0%	42,0%	98,0%	56,0%	56,0%	33,0%	48,5%	1,0%	26,6%	6,9%	14,0%	100,0%
	55	1,8%	55,2%	43,0%	0,0%	58,0%	42,0%	98,2%	56,2%	56,2%	33,0%	48,5%	0,9%	26,8%	6,9%	14,0%	100,0%
	60	1,5%	55,9%	42,6%	0,0%	58,0%	42,0%	98,5%	56,8%	56,8%	33,0%	48,5%	0,7%	27,1%	6,8%	13,8%	100,0%
	65	1,3%	57,0%	41,7%	0,0%	58,0%	42,0%	98,7%	57,8%	57,8%	33,0%	48,5%	0,6%	27,6%	6,7%	13,6%	100,0%
70	1,1%	57,9%	41,0%	0,0%	58,0%	42,0%	98,9%	58,5%	58,5%	33,0%	48,5%	0,5%	28,1%	6,6%	13,3%	100,0%	
Lamellen 45°-Stellung	0	27,8%	30,6%	41,6%	0,0%	58,0%	42,0%	72,2%	42,4%	42,4%	33,0%	48,5%	13,5%	14,8%	6,7%	13,5%	100,0%
	5	21,2%	32,9%	45,9%	0,0%	58,0%	42,0%	78,8%	41,8%	41,8%	33,0%	48,5%	10,3%	16,0%	7,3%	14,9%	100,0%
	10	14,9%	35,5%	49,6%	0,0%	58,0%	42,0%	85,1%	41,7%	41,7%	33,0%	48,5%	7,2%	17,2%	7,9%	16,1%	100,0%
	15	10,8%	37,2%	52,0%	0,0%	58,0%	42,0%	89,2%	41,7%	41,7%	33,0%	48,5%	5,2%	18,0%	8,3%	16,9%	100,0%
	20	9,5%	39,0%	51,5%	0,0%	58,0%	42,0%	90,5%	43,1%	43,1%	33,0%	48,5%	4,6%	18,9%	8,2%	16,7%	100,0%
	25	8,6%	40,7%	50,7%	0,0%	58,0%	42,0%	91,4%	44,5%	44,5%	33,0%	48,5%	4,2%	19,7%	8,1%	16,5%	100,0%
	30	7,8%	42,0%	50,2%	0,0%	58,0%	42,0%	92,2%	45,6%	45,6%	33,0%	48,5%	3,8%	20,4%	8,0%	16,3%	100,0%
	35	7,0%	43,9%	49,1%	0,0%	58,0%	42,0%	93,0%	47,2%	47,2%	33,0%	48,5%	3,4%	21,3%	7,9%	16,0%	100,0%
	40	6,5%	44,9%	48,6%	0,0%	58,0%	42,0%	93,5%	48,0%	48,0%	33,0%	48,5%	3,2%	21,8%	7,8%	15,8%	100,0%
	45	5,6%	46,3%	48,1%	0,0%	58,0%	42,0%	94,4%	49,0%	49,0%	33,0%	48,5%	2,7%	22,5%	7,7%	15,6%	100,0%
	50	5,0%	47,8%	47,2%	0,0%	58,0%	42,0%	95,0%	50,3%	50,3%	33,0%	48,5%	2,4%	23,2%	7,6%	15,3%	100,0%
	55	4,4%	48,6%	47,0%	0,0%	58,0%	42,0%	95,6%	50,8%	50,8%	33,0%	48,5%	2,1%	23,6%	7,5%	15,3%	100,0%
	60	4,0%	50,0%	46,0%	0,0%	58,0%	42,0%	96,0%	52,1%	52,1%	33,0%	48,5%	1,9%	24,3%	7,4%	14,9%	100,0%
	65	3,5%	51,0%	45,5%	0,0%	58,0%	42,0%	96,5%	52,8%	52,8%	33,0%	48,5%	1,7%	24,7%	7,3%	14,8%	100,0%
70	3,0%	52,1%	44,9%	0,0%	58,0%	42,0%	97,0%	53,7%	53,7%	33,0%	48,5%	1,5%	25,3%	7,2%	14,6%	100,0%	
Lamellen waagrecht	0	92,9%	2,8%	4,3%	0,0%	58,0%	42,0%	7,1%	39,4%	39,4%	33,0%	48,5%	45,1%	1,4%	0,7%	1,4%	100,0%
	5	88,4%	4,3%	7,3%	0,0%	58,0%	42,0%	11,6%	37,1%	37,1%	33,0%	48,5%	42,9%	2,1%	1,2%	2,4%	100,0%
	10	82,5%	6,2%	11,3%	0,0%	58,0%	42,0%	17,5%	35,4%	35,4%	33,0%	48,5%	40,0%	3,0%	1,8%	3,7%	100,0%
	15	75,9%	8,3%	15,8%	0,0%	58,0%	42,0%	24,1%	34,4%	34,4%	33,0%	48,5%	36,8%	4,0%	2,5%	5,1%	100,0%
	20	67,6%	10,8%	21,6%	0,0%	58,0%	42,0%	32,4%	33,3%	33,3%	33,0%	48,5%	32,8%	5,2%	3,5%	7,0%	100,0%
	25	58,4%	13,2%	28,4%	0,0%	58,0%	42,0%	41,6%	31,7%	31,7%	33,0%	48,5%	28,3%	6,4%	4,5%	9,2%	100,0%
	30	47,8%	15,9%	36,3%	0,0%	58,0%	42,0%	52,2%	30,5%	30,5%	33,0%	48,5%	23,2%	7,7%	5,8%	11,8%	100,0%
	35	36,7%	19,0%	44,3%	0,0%	58,0%	42,0%	63,3%	30,0%	30,0%	33,0%	48,5%	17,8%	9,2%	7,1%	14,4%	100,0%
	40	23,5%	22,4%	54,1%	0,0%	58,0%	42,0%	76,5%	29,3%	29,3%	33,0%	48,5%	11,4%	10,9%	8,7%	17,6%	100,0%
	45	17,4%	25,3%	57,3%	0,0%	58,0%	42,0%	82,6%	30,6%	30,6%	33,0%	48,5%	8,4%	12,3%	9,2%	18,6%	100,0%
	50	14,4%	27,7%	57,9%	0,0%	58,0%	42,0%	85,6%	32,4%	32,4%	33,0%	48,5%	7,0%	13,4%	9,3%	18,8%	100,0%
	55	12,2%	30,2%	57,6%	0,0%	58,0%	42,0%	87,8%	34,4%	34,4%	33,0%	48,5%	5,9%	14,6%	9,2%	18,7%	100,0%
	60	10,7%	32,1%	57,2%	0,0%	58,0%	42,0%	89,3%	35,9%	35,9%	33,0%	48,5%	5,2%	15,6%	9,2%	18,6%	100,0%
	65	9,4%	34,3%	56,3%	0,0%	58,0%	42,0%	90,6%	37,9%	37,9%	33,0%	48,5%	4,6%	16,6%	9,0%	18,3%	100,0%
70	8,6%	36,1%	55,3%	0,0%	58,0%	42,0%	91,4%	39,5%	39,5%	33,0%	48,5%	4,2%	17,5%	8,9%	18,0%	100,0%	

Beleuchtung:

Bei der Beleuchtung im Versuch handelt es sich um eine direkt/indirekt (direkt in den Raum sowie Abstrahlung zur Decke und anschließende Reflexion) wirksame Beleuchtung. In TRNSYS findet dies keine Berücksichtigung zumal dies keinen Einfluss auf den Wärmeeintrag in den Raum sondern die Effektivität der Beleuchtung hat. Im Versuch sind stabförmige Leuchtstofflampen mit elektronischem Vorschaltgerät (EVG) vorhanden. Für die Simulationsrechnungen in TRNSYS wurde der spezifische Anschlusswert aus dem Versuch von 16 W/m^2 verwendet.

Da vom Leuchtenhersteller keine Angaben zum konvektiven / radiativen Anteil der Wärmeabgabe der Leuchtmittel gemacht werden konnten, wurde In TRNSYS das typischerweise vorhandene Verhältnis von 40 / 60 % für Leuchtstofflampen angesetzt.

Die Steuerung der Beleuchtung im Versuch folgt dem Tageslichtangebot in Verbindung mit der jeweiligen Behangstellung. In TRNSYS wurde die Beleuchtung in Abhängigkeit der Globalstrahlung geschaltet ohne dass die Behangstellung berücksichtigt werden konnte. Bei einem mittleren Tageslichtquotienten im Raum von 5,5 % und der Annahme, dass 1 W/m^2 Globalstrahlung eine Beleuchtungsstärke von 125 lx im Raum bewirkt, muss die Beleuchtung bei einer Globalstrahlung unter 87 W/m^2 eingeschaltet werden, um 500 lx am Arbeitsplatz zu gewährleisten und sie wird bei Werten größer 73 W/m^2 wieder ausgeschaltet.

Für die Validierungsrechnungen wurde die elektrische Leistungsaufnahme der Beleuchtung aus dem Versuch in TRNSYS eingelesen.

Infiltration:

Der Infiltrationsluftwechsel, d. h. der permanente Außenluftwechsel aufgrund von Fugen und sonstigen Undichtheiten der Umfassungsbauteile wurde für den Fassadenzwischenraum der Glasdoppelfassade mit $0,1 \text{ h}^{-1}$ und für den Raum mit $0,2 \text{ h}^{-1}$ angesetzt.

Mechanische Lüftung:

Während der Betriebszeit wird der Versuchsraum mit einem Außenluftvolumenstrom von $40 \text{ m}^3/\text{h}$ beaufschlagt. Bei einem Netto-Raumvolumen von 52 m^3 ergibt dies einen Luftwechsel von $0,8 \text{ h}^{-1}$. Dieses Lüftungsszenario wurde auch beim Modellraum in TRNSYS umgesetzt.

Heizung:

Die Beheizung des Versuchsraums M1 erfolgt während der Betriebszeit über einen Radiator mit einer maximalen (gemessenen) Heizleistung von 2348 W auf eine Lufttemperatur von $21 \text{ }^\circ\text{C}$. Außerhalb der Betriebszeit kann die Lufttemperatur im Raum auf minimal $17 \text{ }^\circ\text{C}$ abfallen. Im TRNSYS-Modell wurde dies analog umgesetzt. Der konvektive / radiative Anteil der Wärmeabgabe des Radiators wurde mit 40 / 60 % angesetzt.

Kühlung:

Ab April 2008 wurden die Versuchsräume während der Betriebszeit auf eine Lufttemperatur von $24 \text{ }^\circ\text{C}$ gekühlt, außerhalb der Betriebszeit war keine Temperaturbeschränkung nach oben vorhanden. Die Kühldecke im Raum M1 hatte eine maximale Kühlleistung von 1220 W.

Interne Wärmequellen:

Über die Kühllastsimulatoren wurden dem Versuchsraum während der Nutzungszeit im Mittel $92,2 \text{ W}$ an Wärmeleistung zugeführt. Im TRNSYS-Modell wurde dies analog umgesetzt, wobei eine Aufspaltung auf Arbeitshilfen und Personen vorgenommen wurde.

Erdreichtemperatur:

Die Erdreichtemperatur wurde im TRNSYS-Modell mit konstant 15 °C angesetzt. Für die Validierung wurden die Daten der Wetterstation am IBP (Erdreichtemperatur in 0,5 m Tiefe) in TRNSYS eingelesen.

Lüftungsöffnungen GDF:

Jede der Lüftungsöffnungen im Versuch hat eine Brutto-Öffnungsfläche von 0,33 m². Am Fuß- und Kopfpunkt der äußeren Doppelfassadenebene befinden sich jeweils 3 Lüftungsöffnungen, so dass sich unten und oben jeweils Brutto-Öffnungsflächen von 1 m² ergeben. Die gesamte äußere Fassadenfläche beträgt 14,4 m² (Verglasung und Lüftungsöffnungen) bei einer Fassadenbreite von 3,7 m. Über Verschlussklappen wurden die Lüftungsklappen im Versuch entweder ganz geschlossen (geschlossener Zustand) oder mit dem maximalen Stellwinkel von 45 ° geöffnet (geöffneter Zustand). Zum Schlagregenschutz und als Insektenschutz befinden sich jeweils Lüftungsgitter in den Lüftungsöffnungen. Die Öffnungsflächen der Doppelfassade wurden im TRNFLOW-Modell als „Kippfenster“ umgesetzt. Die Lüftungsgitter weisen gemäß Herstellerangaben einen Durchflussbeiwert c_v von 0,2 auf. Dieser Wert stellt das Verhältnis zwischen tatsächlichem Durchfluss durch die Öffnung und theoretisch berechnetem Durchfluss nach der Bernoulli-Gleichung dar. Der Wert hängt bei einer großen Öffnung von der Ausbildung der Ecken der Öffnung, der Geometrie der Öffnung und den Umgebungsbedingungen auf beiden Seiten der Öffnung ab. Der Durchflussbeiwert wurde im TRNFLOW-Modell übernommen. Die 45 °-Kippstellung der Verschlussklappen wurde in TRNFLOW durch einen „opening factor“ von 0,43 modelliert (ein „opening factor“ von 1 bedeutet einen Stellwinkel von 90 °, ein opening factor von 0 bedeutet eine geschlossene Verschlussklappe mit Stellwinkel 0°).

Winddruck:

Wird der Wind durch ein Hindernis vollständig gestaut, baut sich gegenüber dem statischen Luftdruck in der ungestörten Strömung ein Überdruck auf, den man als Staudruck bezeichnet. Je nach Gebäudedimension- und form wird der Wind jedoch nicht vollständig gestaut, sondern es entstehen strömungsbedingte Druckdifferenzen entlang der Gebäudehülle. Diese lassen sich durch Druckbeiwerte (c_p -Werte) als Funktion des theoretisch zu erwartenden Staudrucks berechnen (siehe [26]). Im TRNFLOW-Modell wurden über die Westfassade gemittelte Druckbeiwerte gemäß Tabelle 5 für ein quadratisches, bis zu 3-geschossiges Gebäude (näherungsweise analog VERU-Gebäude) verwendet.

Tabelle 5: Angesetzte c_p -Werte für westorientierte VERU-Fassade nach [15].

Wind-Winkel zur Fassade							
0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
-0,5	0,35	0,7	0,35	-0,5	-0,4	-0,2	-0,4

Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der Bauteile:

Eine entscheidende Rolle beim Abgleich des TRNSYS-Modells mit dem Versuch spielen die Wärmeübergangskoeffizienten insbesondere der Außenbauteile. In TRNSYS wird der Strahlungsaustausch der Oberflächen explizit berechnet, während für die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten Vorgaben gemacht werden können. Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wurden anhand von Versuchsauswertungen für mittlere Verhältnisse gewählt.

Eine Zusammenfassung der Umsetzung der baulichen und anlagentechnischen Randbedingungen der Versuchsräume im Simulationsmodell ist in Tabelle 6 wiedergegeben.

Tabelle 6: Umsetzung Versuchsrandbedingungen in TRNSYS für Parameteranalyse.

Randbedingungen		M1		
		Messung	Rechnung	
Wetterdaten		Insitu (Holzkirchen)	TRY 13 (2004)	
Orientierung GDF		West		
Geometrische Daten	Raum	Breite [m]	3,68	
		Tiefe [m]	4,18	
		Höhe [m]	3,38	
		Nettogrundfläche [m ²]	15,4	
		Nettovolumen [m ³]	52,0	
	GDF	Breite [m]	3,68	
		Tiefe [m]	0,70	
		Höhe [m]	3,98	oben 2,88 unten 1,10
		Nettogrundfläche [m ²]	2,58	
		Nettovolumen [m ³]	10,25	
Zeitprofile	Betriebszeit	Montag - Freitag, 5:00 - 18:00 Uhr		
	Nutzungszeit	Montag - Freitag, 7:00 - 18:00 Uhr		
	Wochentag Jahresbeginn	01.01.2008 = Dienstag	Montag [bei Validierung entsprechende Anpassung der Zeitprofile (Schedules) erforderlich]	
	Anzahl Stundenwerte pro Jahr [h/a]	Jahr 2008: 8784 (Schaltjahr)	8760 (bei Validierung muss die Anzahl um 24 erhöht werden)	
Sonnenschutz	Typ	Jalousie, Lamellenbreite 50 mm, Farbe weißaluminium	siehe Kapitel 3.3.1	
	Position	im Fassadenzwischenraum an innerer Verglasung		
	Steuerung (Nutzungszeit)	abhängig von Himmelselligkeit (Tageslichtmesskopf VERU) in Verbindung mit spezifischer Raumkennlinie	abhängig von gerichteter Solarstrahlung (Weststrahlung): Schließen > 200 W/m ² Öffnen < 150 W/m ²	
Beleuchtung	Beleuchtungsart	direkt / indirekt	keine Auswahl möglich	
	Lampenart	Leuchtstofflampe, stabförmig mit elektronischem Vorschaltgerät (EVG)	Leuchtstofflampe, stabförmig mit verlustarmem Vorschaltgerät (VVG)	
	Spezifischer Anschlußwert [W/m ²]	16,1	16,1	
	konvektiv / radiativ [%]	keine Herstellerangabe verfügbar	40 / 60 angenommen	
	Steuerung (Nutzungszeit)	abhängig von Himmelselligkeit (Tageslichtmesskopf VERU) in Verbindung mit spezifischer Raumkennlinie	abhängig von Globalstrahlung und mittlerem Tageslichtquotient von 5,5 % gemäß Messung Zumtobel unter der Annahme, dass 1 W/m ² Globalstrahlung eine Beleuchtungsstärke von 125 lx hervorruft: ausschalten > 73 W/m ² einschalten < 87 W/m ²	
Infiltration	Infiltrationsluftwechsel GDF [h ⁻¹]	0,11 (Annahme)	0,11	
	Infiltrationsluftwechsel Raum [h ⁻¹]	ca. 0,21	0,21	
Mechanische Lüftung (Betriebszeit)	Außenluftwechsel [h ⁻¹]	0,77	0,77	
	Zuluftvolumenstrom [m ³ /(h Person)]	40	40	
	Abluftvolumenstrom [m ³ /(h Person)]	40	40	
Heizung (Betriebszeit)	Lufttemperatur Raum [°C]	21	21	
	Lufttemperatur Raum außerhalb Betriebszeit [°C]	17	17	
	Max. Heizleistung [W]	2348	2348	
	konvektiv / radiativ [%]	keine Herstellerangabe verfügbar	40 / 60	
Kühlung (Betriebszeit)	Lufttemperatur Raum [°C]	24	24	
	Lufttemperatur Raum außerhalb Betriebszeit [°C]	ohne Beschränkung	ohne Beschränkung	
	Max. Kühlleistung [W]	1220	1220	
Interne Wärmequellen (Nutzungszeit)	Arbeitslifen [W]	92,2	22,2	
	konvektiv / radiativ [%]		100 / 0	
	Beleuchtung [W]	248	248	
	konvektiv / radiativ [%]	keine Herstellerangabe verfügbar	40 / 60	
	Personen [W]	-	70	
	konvektiv / radiativ [%]	-	66,7 / 33,3	
Erdreichtemperatur [°C]	Insitu (Holzkirchen)	15	15	
Lüftungsöffnungen GDF	oben	Breite [m]	1,133	
		Höhe [m]	0,295	
		Einzelfläche [m ²]	0,33	
		Anzahl (Anordnung horizontal nebeneinander)	3	
		Gesamtfläche [m ²]	1,0	
		Durchflußbeiwert Wetterschutzgitter (c _d -Wert)	0,197	
		Stellwinkel Lüftungsklappe	geschlossen = 0° max. geöffnet = 45°	opening factor = 0,0 opening factor = 0,43
	unten	Breite [m]	1,133	
		Höhe [m]	0,295	
		Einzelfläche [m ²]	0,33	
		Anzahl (Anordnung horizontal nebeneinander)	3	
		Gesamtfläche [m ²]	1,0	
		Durchflußbeiwert Wetterschutzgitter (c _d -Wert)	0,197	
		Stellwinkel Lüftungsklappe	geschlossen = 0° max. geöffnet = 45°	opening factor = 0,0 opening factor = 0,43

3.2.2 Validierung des Simulationsmodells anhand der Messung

Aufgrund der Vielzahl der gezeigten „Stellschrauben“ zur Anpassung des TRNSYS-Modells an das Versuchs-Modell und durch den Umstand, dass einige Parameter nur näherungsweise in TRNSYS nachgebildet werden können, lässt sich erkennen, dass Simulations- und Messergebnisse nicht auf Anhieb übereinstimmen müssen und i. d. R. die Simulationsergebnisse iterativ den Messergebnissen angenähert werden müssen. Dieser Weg wird auch im vorliegenden Fall beschrieben. Hierbei ist ein Kompromiss zu finden, so dass einerseits die Rechnung der Messung möglichst nahe kommt und andererseits keine abwegigen Randbedingungen in den Berechnungen angesetzt werden. Dabei darf nicht vergessen werden, dass auch die Messungen gewisse Fehlertoleranzen aufweisen.

Es werden instationäre Temperaturverläufe im Fassadenzwischenraum der Doppelfassade sowie energetische Kenngrößen betrachtet, um die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen zu vergleichen. Betrachtet werden hierbei die Monate Januar bis Juli 2008. Von Januar bis März waren die Lüftungsklappen der Doppelfassade geschlossen, von April bis Juli geöffnet (45 °-Stellung der Verschlussklappen).

Die folgenden Grafiken (Bild 16 - Bild 22) zeigen im Vergleich die rechnerisch sowie messtechnisch ermittelten instationären Temperaturverläufe in der Glasdoppelfassade zusammen mit der Außenlufttemperatur. Die Grafiken zeigen, dass die Verläufe sowohl im geschlossenen Zustand der Doppelfassade (Monate Januar bis März 2008) als auch im geöffneten Zustand (45 °-Stellung der Lüftungsklappen in den Monaten April bis Juli 2008) sehr gut übereinstimmen. Dies belegen auch die Monatsmittelwerte der Temperaturen, bei denen die Abweichungen zumeist unter 0,5 K betragen (siehe Tabelle 7).

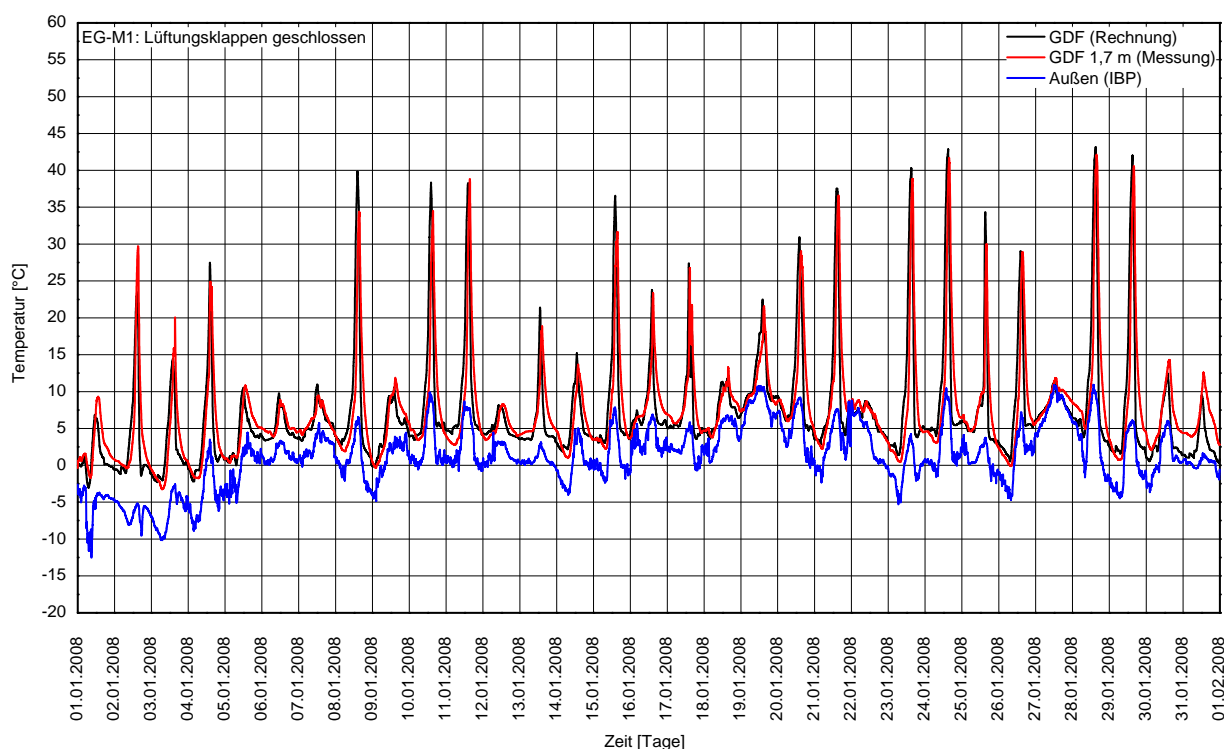


Bild 16: Januar 2008: Vergleich instationäre Temperaturverläufe im Fassadenzwischenraum und Außenluft Rechnung – Messung.

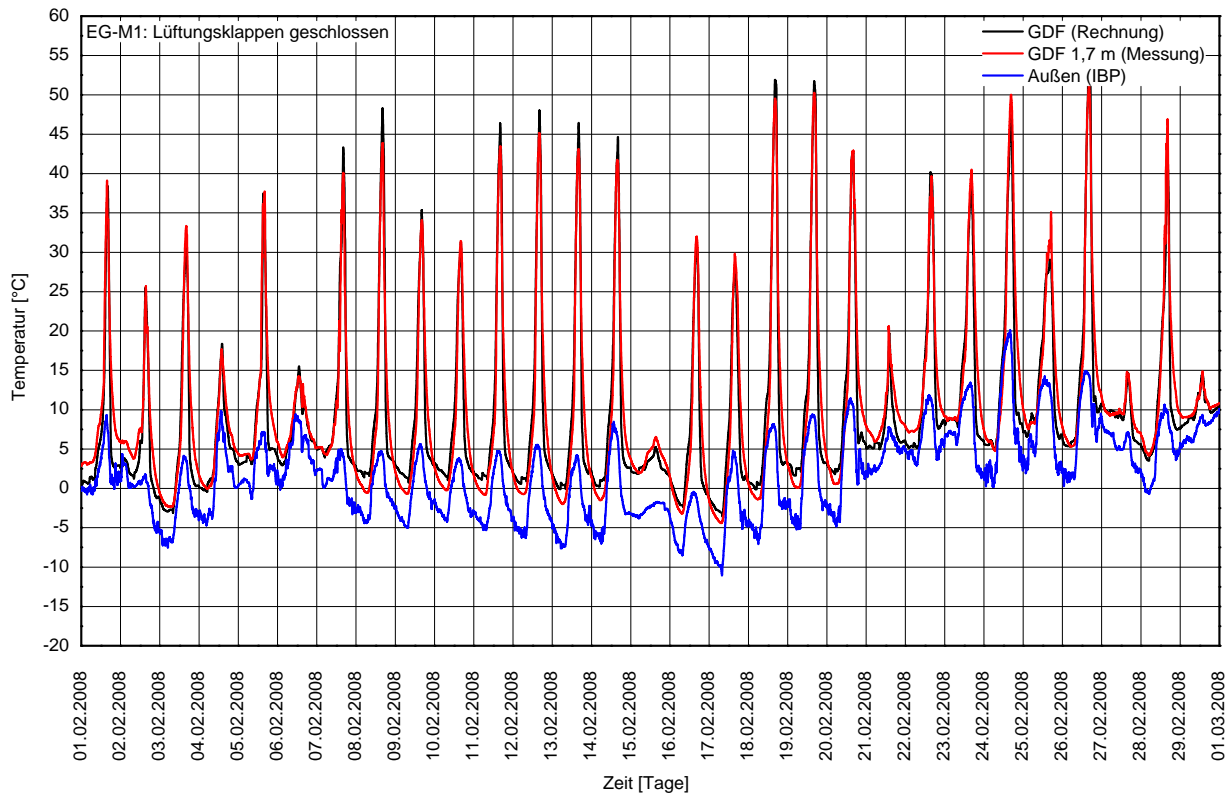


Bild 17: Februar 2008: Vergleich instationäre Temperaturverläufe im Fassadenzwischenraum und Außenluft Rechnung – Messung.

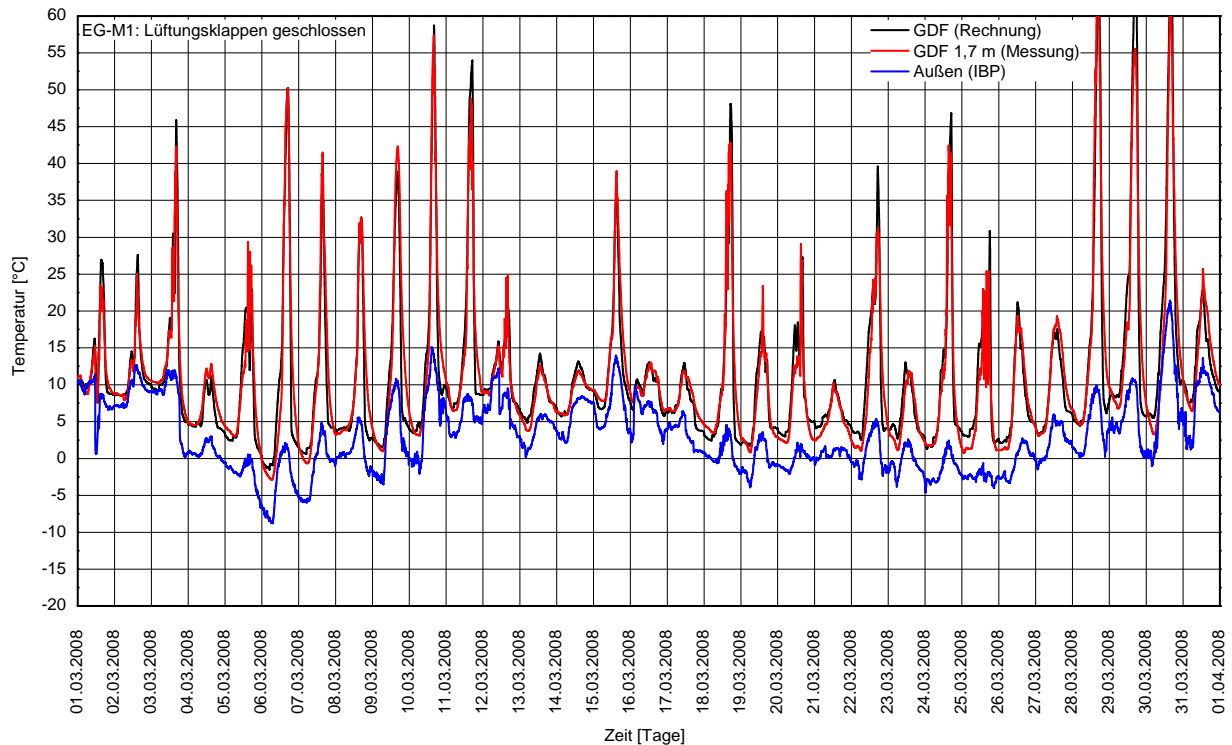


Bild 18: März 2008: Vergleich instationäre Temperaturverläufe im Fassadenzwischenraum und Außenluft Rechnung – Messung.

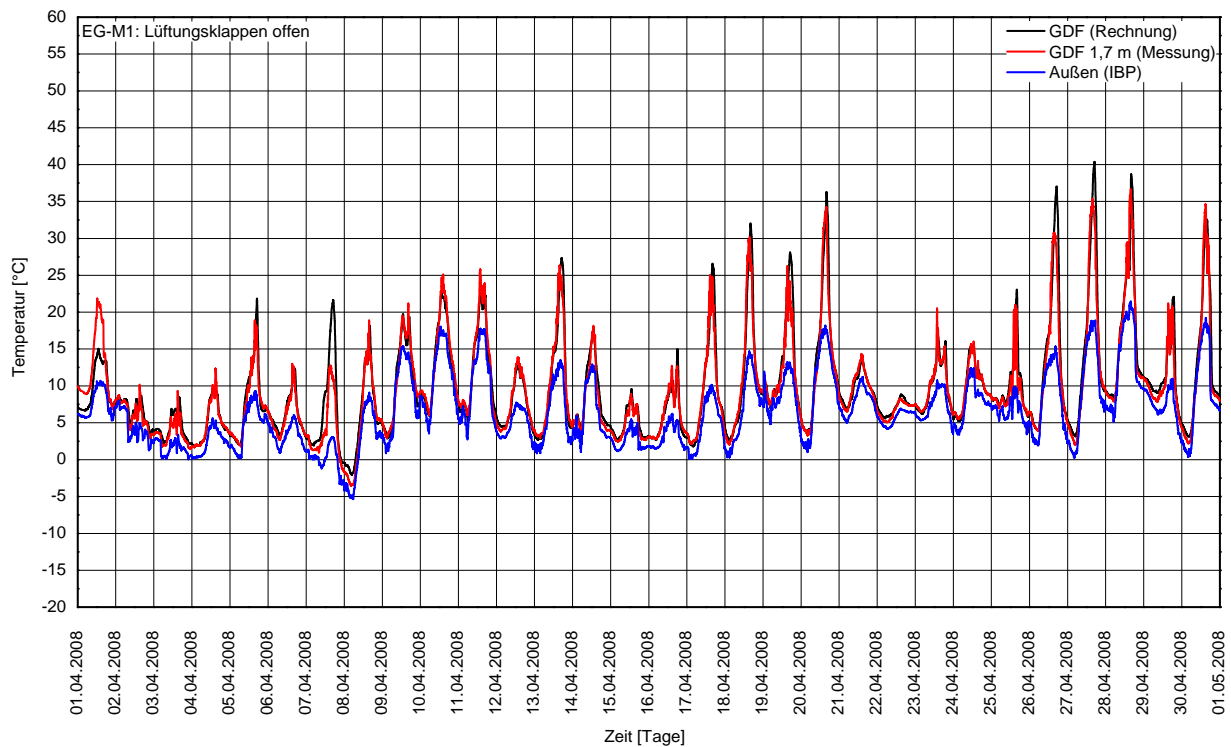


Bild 19: April 2008: Vergleich instationäre Temperaturverläufe im Fassadenzwischenraum und Außenluft Rechnung – Messung.

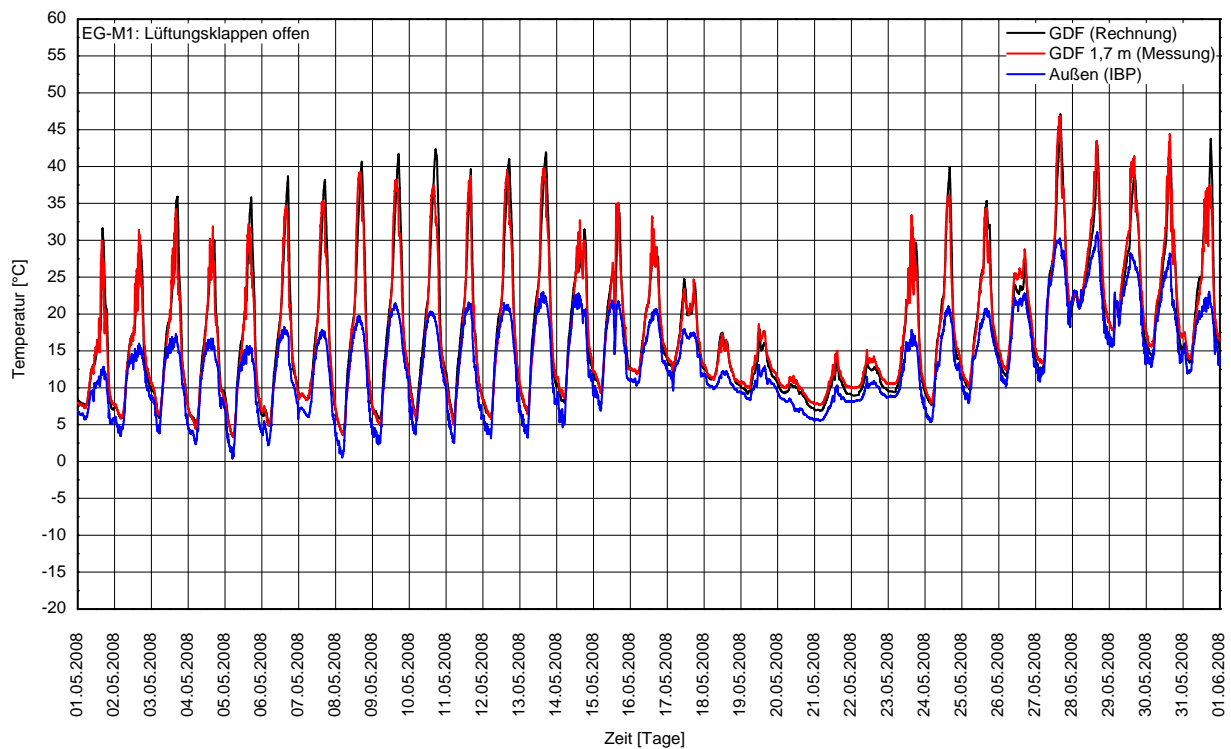


Bild 20: Mai 2008: Vergleich instationäre Temperaturverläufe im Fassadenzwischenraum und Außenluft Rechnung – Messung.

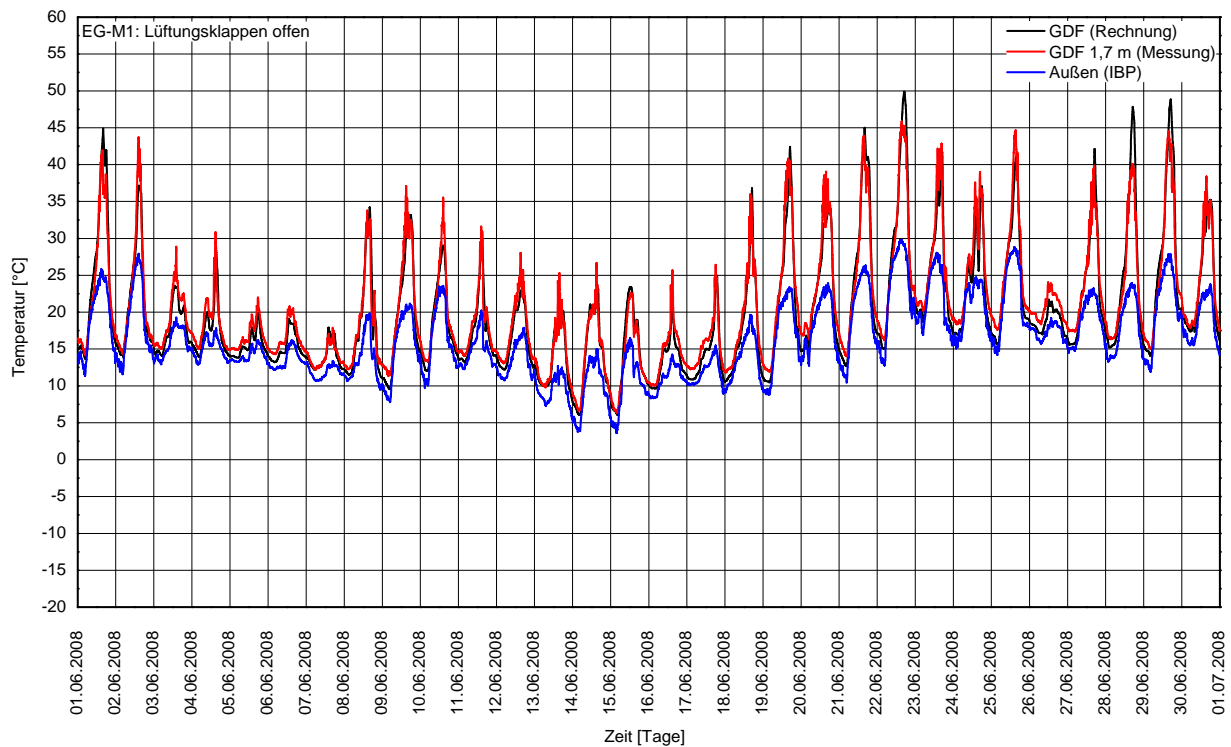


Bild 21: Juni 2008: Vergleich instationäre Temperaturverläufe im Fassadenzwischenraum und Außenluft Rechnung – Messung.

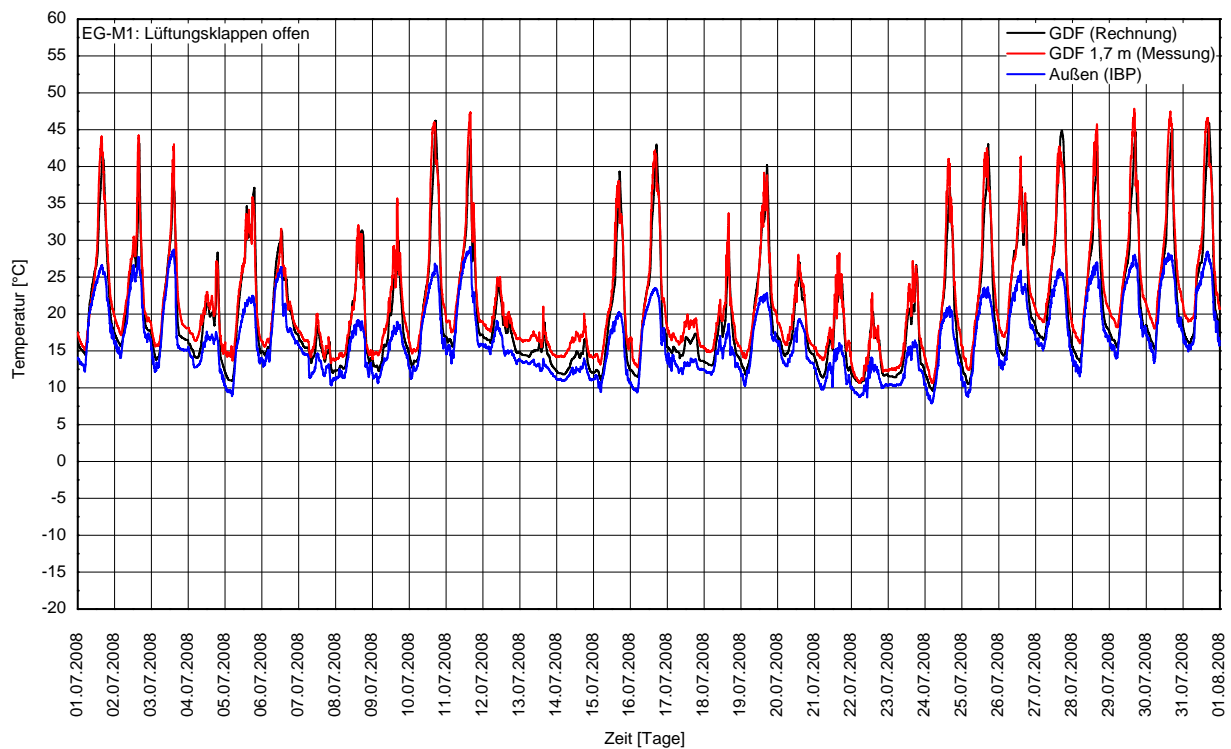


Bild 22: Juli 2008: Vergleich instationäre Temperaturverläufe im Fassadenzwischenraum und Außenluft Rechnung – Messung.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Monatsmittelwerte aus Messung und Rechnung für die Monate Januar bis Juli 2008: Außenlufttemperatur ϑ_e , Temperatur im Fassadenzwischenraum ϑ_u ; Raumlufttemperatur ϑ_i ; Operativtemperatur ϑ_{op} ; Nutzenergie Heizung und Kühlung.

		Ergebnisse										
		Temperaturen						Nutzenergie				
Raum M1	ϑ_e [°C] (IBP)	ϑ_u [°C] (1,70 m)	Differenz [K] (Absolutbetrag)	ϑ_i [°C] (1,70 m)	Differenz [K] (Absolutbetrag)	ϑ_{op} [°C] (Operativ, 1,10 m)	Differenz [K] (Absolutbetrag)	Heizung [kWh/m²]	Differenz [kWh/m²] (Absolutbetrag)	Kühlung [kWh/m²]	Differenz [kWh/m²] (Absolutbetrag)	
Januar 2008	Messung	1,2	7,4	0,3	19,3	0,0	19,3	0,1	11,6	3,8	-	-
	Rechnung		7,1		19,3		19,2		15,4		-	-
Februar 2008	Messung	1,8	10,1	0,6	20,1	0,5	20,1	0,5	7,8	2,3	-	-
	Rechnung		9,5		19,6		19,6		10,1		-	-
März 2008	Messung	3,0	11,1	0,0	19,9	0,1	20,1	0,2	6,8	2,4	-	-
	Rechnung		11,1		19,8		19,9		9,2		-	-
April 2008	Messung	6,4	9,3	0,3	20,8	0,2	21,1	0,4	4,1	0,9	0,1	0,1
	Rechnung		9,6		20,6		20,7		5,0		0,2	
Mai 2008	Messung	13,3	17,4	0,1	23,4	0,3	23,8	0,4	0,6	0,2	2,8	0,5
	Rechnung		17,3		23,1		23,4		0,8		3,3	
Juni 2008	Messung	16,1	20,5	0,8	24,8	1,1	25,2	1,2	0,0	0,1	1,4	1,9
	Rechnung		19,7		23,7		24,0		0,1		3,3	
Juli 2008	Messung	16,5	21,6	1,6	23,9	0,2	24,4	0,0	0,1	0,1	6,8	2,1
	Rechnung		20,0		24,1		24,4		0,0		4,7	

Lüftungsklappen geschlossen

Lüftungsklappen offen

Betrachtet man die Nutzenergien für Heizung und Kühlung in Tabelle 7, so sind größere Abweichungen zwischen Messung und Rechnung festzustellen. Folgende mögliche Ursachen für die Abweichungen kommen hierfür in Frage:

- Wärmetransport durch Trennbauteile zwischen benachbarten Raumzellen und Versuchsraum im VERU-Versuchsgebäude Eigentor lieber anders formulieren
- Auswirkungen von Wärmebrücken
- Regelung Radiatoren bzw. Kühldecke

3.2.3 Variantenbildung

Nach ausführlicher Diskussion werden in Abstimmung mit den Projektpartnern aus der Vielzahl möglicher Parameter, die bei der Konstruktion einer Doppelfassade eine Rolle spielen, diejenigen herausgegriffen, die einerseits Einfluss auf das thermische Verhalten (insbesondere den Luftwechsel im Fassadenzwischenraum) nehmen könnten und andererseits praxisrelevante bzw. gängige Kenngrößen darstellen, die für ein vereinfachtes Berechnungsverfahren dem Anwender zur Verfügung stehen. Im Einzelnen werden folgende Parameter bewertet:

- Öffnungsfläche der Doppelfassade (Zu-/ Abluftöffnungen)
- Tiefe des Fassadenzwischenraums
- Rahmenanteil der äußeren Verglasungsebene
- Typ der äußeren Verglasung
- Position und Typ des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum
- Farbe des Sonnenschutzes
- Fensterflächenanteil der inneren Verglasungsebene
- Typ der inneren Verglasung
- Orientierung der Doppelfassade
- Durchflussbeiwert der Lüftungsöffnungen

Bei den Berechnungen wird vorausgesetzt, dass die Doppelfassade geschossweise unterteilt ist und kein Luftaustausch zwischen der konditionierten Zone und dem Fassadenzwischenraum stattfindet. Der Gesamtdurchflussbeiwert der Doppelfassade kann durch die Art und Position des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum verändert werden. Dieser Effekt könnte ggf. mittels CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) oder aufwendiger Messungen bestimmbar gemacht werden. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens bleibt dieser Effekt unberücksichtigt.

In Tabelle 8 sind die verschiedenen Parameter mit den vorhandenen Kenngrößen der Grundvariante „Versuchsraum M1“ (= Referenz) sowie den untersuchten Kenngrößen anhand einer Variantenmatrix übersichtlich dargestellt.

Tabelle 8: Variantenmatrix für die Simulationsrechnungen.

Parameter	Referenz (= Versuchsraum M1)				
Zu-/ Abluffläche GDF (Verschlussklappe 45° geöffnet)	0,27 / 0,27 m ² /lfm	0,0 / 0,0 m ² /lfm	0,38 / 0,38 m ² /lfm	0,57 / 0,57 m ² /lfm	0,75 / 0,75 m ² /lfm
Tiefe Fassadenzwischenraum	0,7 m	1,5 m	1,0 m	0,5 m	
Rahmenanteil außen	23 %	10 %	30 %	40 %	
Verglasung außen	$U_g/g_{1/\tau_e} = 5,5/0,90/0,89$ (1-fach)	$U_g/g_{1/\tau_e} = 2,8/0,76/0,69$ (2-fach Isolier)	$U_g/g_{1/\tau_e} = 1,0/0,26/0,21$ (2-fach Sonnenschutz)	$U_g/g_{1/\tau_e} = 1,1/0,39/0,33$ (2-fach Sonnenschutz)	
Position und Kenngrößen Sonnenschutz	<ul style="list-style-type: none"> • an innerer Verglasung • lichtundurchlässig • weißaluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • an äußerer Verglasung • lichtundurchlässig • weißaluminium 	<ul style="list-style-type: none"> • an äußerer Verglasung • mittel lichtdurchlässig • pastellfarben 	<ul style="list-style-type: none"> • an innerer Verglasung • mittel lichtdurchlässig • pastellfarben 	
Farbe Sonnenschutz (lichtundurchlässig)	weißaluminium	weiß	pastellfarben	schwarz	
Fensterflächenanteil innen	100 %	75 %	50 %	25 %	
Verglasung innen	$U_g/g_{1/\tau_e} = 1,1/0,55/0,49$ (2-fach Wärmeschutz)	$U_g/g_{1/\tau_e} = 2,8/0,76/0,69$ (2-fach Isolier)	$U_g/g_{1/\tau_e} = 1,4/0,62/0,46$ (2-fach Wärmeschutz)	$U_g/g_{1/\tau_e} = 0,6/0,42/0,33$ (3-fach Wärmeschutz)	
Orientierung Doppelfassade mit Anpassung Druckbeiwerte c_p	West	Nord	Ost	Süd	
Durchflußbeiwert c_d Lüftungsgitter GDF	0,2	0,5	0,75		

4 Darstellung und Auswertung der Ergebnisse

4.1 Unterschiede der beiden Doppelfassaden im Versuch

4.1.1 Verhalten am Beispiel strahlungsreicher Winter-/Sommertage

In den Wintermonaten Januar bis März 2008 waren die Lüftungsklappen der beiden Doppelfassaden S1 und M1 geschlossen, um eine möglichst hohe Erwärmung der Luft im Fassadenzwischenraum, d. h. die größtmögliche thermische Pufferwirkung zu erreichen. Ab April 2008 waren die Lüftungsklappen der beiden Doppelfassaden S1 und M1 geöffnet. Dadurch wird eine Durchspülung der Doppelfassade mit Außenluft gewährleistet, wodurch die Aufheizung der Luft in der Doppelfassade reduziert werden soll.

4.1.1.1 Strahlungsreicher Wintertag

Bild 23 zeigt die Außenlufttemperatur, Globalstrahlung und Weststrahlung gemessen an der Wetterstation des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen für einen strahlungsreichen Wintertag (19.02.2008).

Anmerkung:

Die Messwerte werden immer nach der Mitteleuropäischen Zeit (MEZ) abgespeichert. Da in der Sommerzeit die Uhren auf die mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ) umgestellt werden (MEZ + 1h), ist in dieser Periode zu den Messzeiten 1 h zu addieren, um die entsprechende Uhrzeit zu erhalten. Die Nutzungsprofile wurden während der Sommermonate an die mitteleuropäische Sommerzeit angepasst.

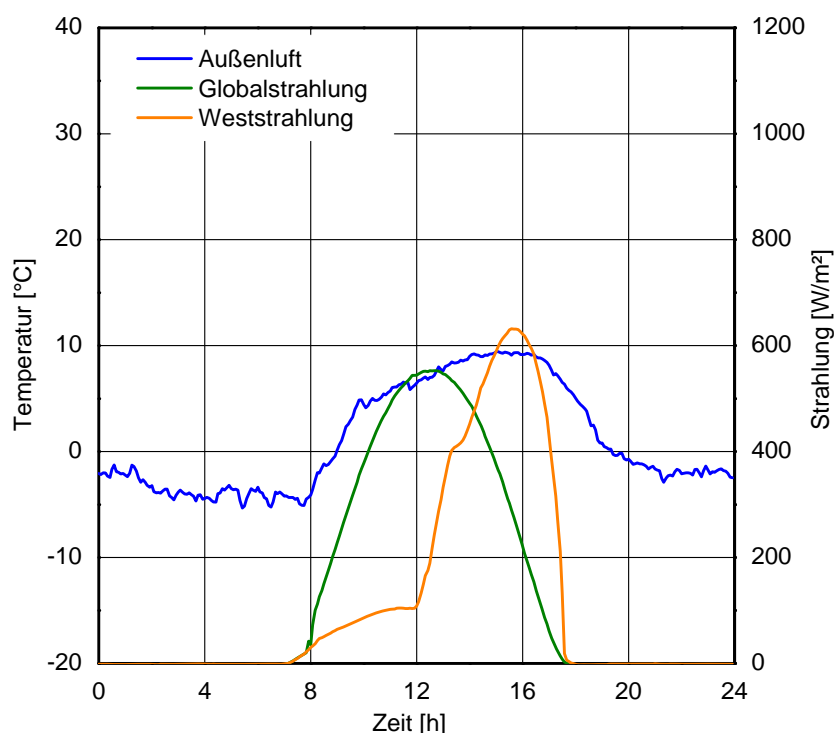


Bild 23: Klimadaten strahlungsreicher Wintertag (19.02.2008).

Sonnenschutz / Blendung:

Der Sonnenschutzbehang ist während der Nutzungszeit (7.00 Uhr bis 18.00 Uhr) aktiviert. Je nach Himmelhelligkeit und bei direkter Sonneneinstrahlung auf die Doppelfassade (Azimuth größer 180°) wird der Behang heruntergefahren und die Lamellen in eine Winkelstellung senkrecht zur Sonnenstrahlung gebracht (vgl. Kapitel 3.1.2.2). Beim Raum S1 ist zu erkennen, dass keine unterschiedlichen Lamellenstellungen angefahren werden (Lamellen immer voll geschlossen). Da bei diesem System die Ansteuerung unterschiedlicher Lamellenwinkel sehr komplex ist, wurden diese zunächst immer in den ganz geschlossenen Zustand gefahren. Der Behang S1 weist auf der raumzugewandten Seite eine hellere Oberfläche auf, als der Behang M1. Die innenseitig an der Fassade gemessene Leuchtdichte im Raum erreicht bei diesem System trotz geschlossenem Zustand an diesem Tag Werte bis zu 2500 cd/m^2 während im Raum M1 mit der im Fassadenzwischenraum befindlichen Jalousie deutlich niedrigere Werte gemessen werden.

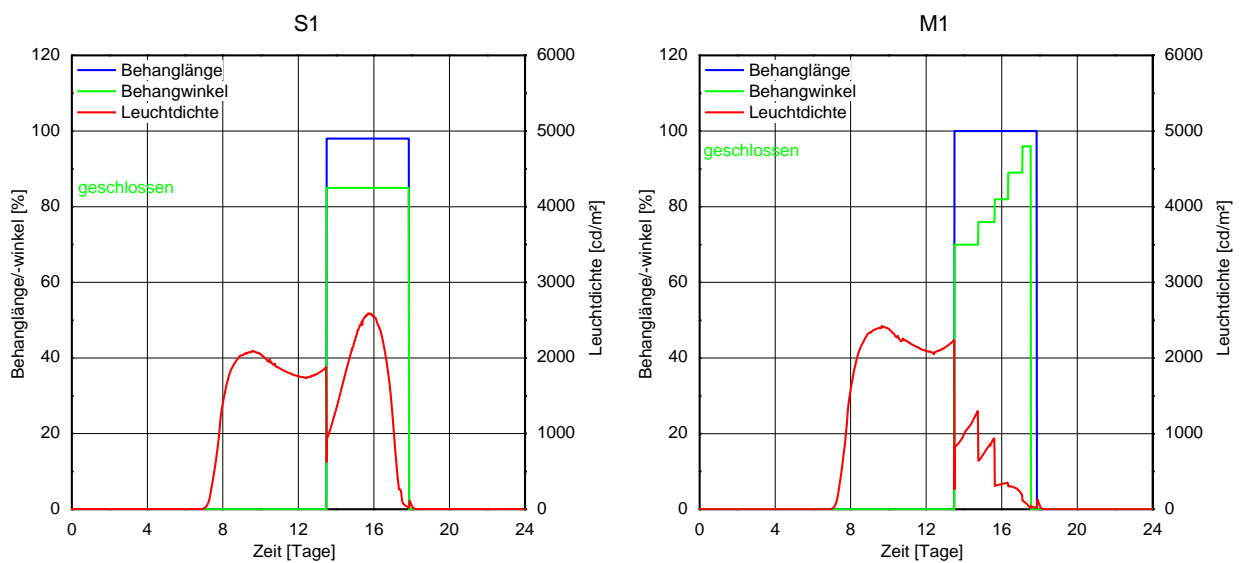


Bild 24: Behanglänge und -winkel sowie Leuchtdichte am 19.02.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

Lüftung:

Anhand der Volumenströme in Bild 25 ist zu erkennen, dass die Lüftung während der Betriebszeit von 05.00 bis 18.00 Uhr mit dem Vorgabewert von 40 m³/h in beiden Räumen identisch betrieben wird. Es wird Außenluft an der Nordfassade des VERU-Gebäudes angesaugt und über Rohrleitungen dem Raum als Zuluft zugeführt. Dabei wird die Luft durch einen Wärmetauscher an der Abluft vorbeigeführt und erwärmt. Der Wärmerückgewinnungsgrad beträgt 60 %. Die Abluft gelangt über Rohrleitungen nach Passieren des Wärmetauschers als Fortluft an der Nordfassade des VERU-Gebäudes nach außen.

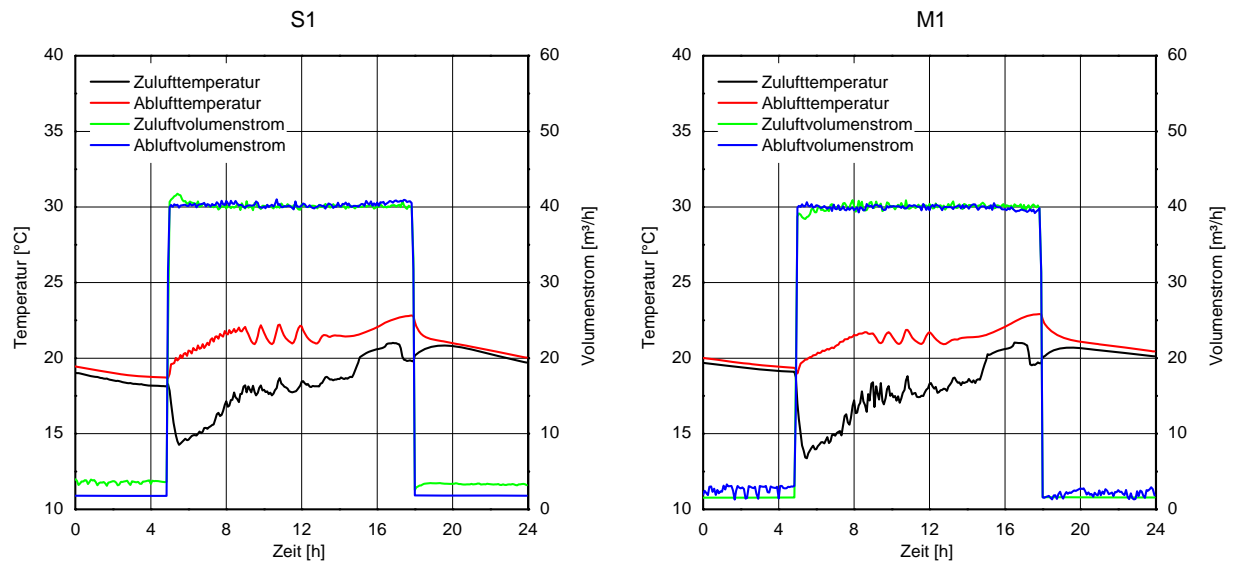


Bild 25: Zu- und Ablufttemperatur, Zu- und Abluftvolumenstrom am 19.02.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

Temperaturverlauf in der Glasdoppelfassade:

Bild 26 zeigt den Verlauf der Lufttemperaturen in der Glasdoppelfassade in den drei verschiedenen Messhöhen sowie die Außenlufttemperatur für beide Versuchsräume. Aufgrund der Westorientierung der Doppelfassade stellen sich die maximalen Temperaturen an diesem Wintertag erst nach 16.00 Uhr ein. Gut zu erkennen ist die Temperaturschichtung innerhalb der Doppelfassade. Mit dem thermischen Auftrieb steigt die wärmere, leichtere Luft in der Doppelfassade nach oben. Die Temperaturen nehmen von unten (Messhöhe 0,1 m) nach oben (Messhöhe 3,0 m) zu, wobei bei nachmittäglicher Besonnung der Temperaturanstieg am bodennahen Sensor (0,1 m) vermutlich aufgrund der Nähe zum Untergrund am geringsten ausfällt. Beim Raum M1 werden höhere Temperaturspitzen in der Doppelfassade erreicht. Hier befindet sich in der äußeren Verglasungsebene eine Einfachverglasung mit hoher Transparenz für Solarstrahlung, so dass ein Großteil der Solarstrahlung in den Fassadenzwischenraum gelangen und diesen erwärmen kann. Des Weiteren spielt das Sonnenschutzsystem eine Rolle. Beim Raum S1 befindet sich der Sonnenschutz in der äußeren Verglasungsebene im Scheibenzwischenraum, beim Raum M1 dagegen im Fassadenzwischenraum an der inneren Verglasungsebene. Am Nachmittag waren die Behänge von etwa 13.30 - 8.00 Uhr geschlossen (vgl. Bild 24). Beim Raum S1 wird die Solarstrahlung bereits an der äußeren Verglasungsebene zurückgehalten wodurch sich der Fassadenzwischenraum weniger erwärmt, während beim Raum M1 die Solarstrahlung ungehindert durch die äußere Verglasung in den Fassadenzwischenraum gelangen und diesen stärker erwärmen kann.

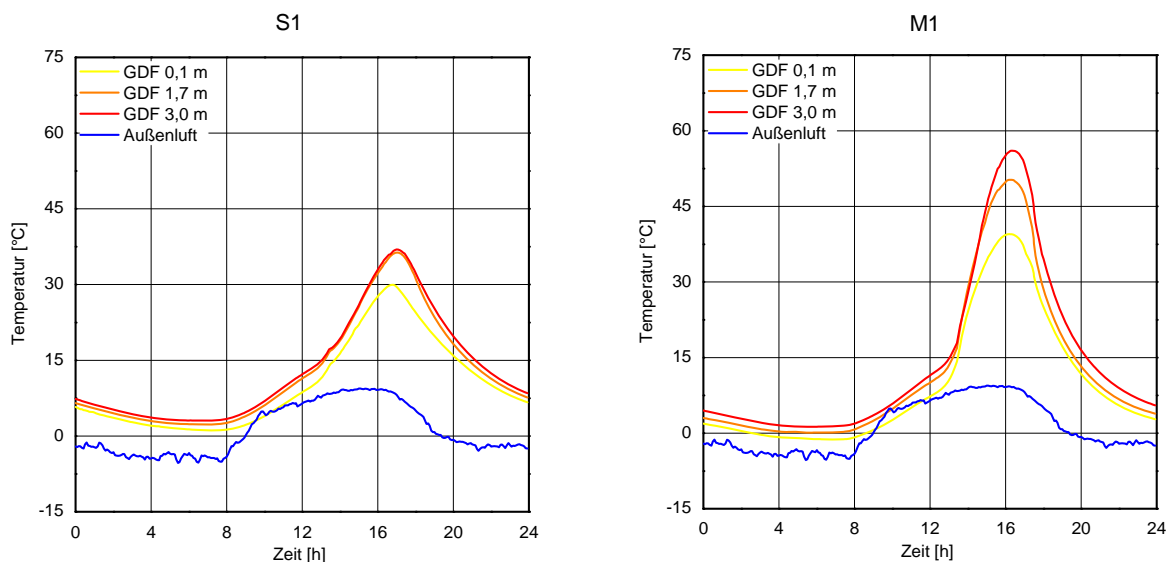


Bild 26: Lufttemperaturen in der Glasdoppelfassade sowie Außenlufttemperatur am 19.02.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

Raumklima:

Bild 27 zeigt die Raumlufttemperaturen in unterschiedlichen Höhen über Fußbodenniveau, die operative Raumtemperatur (1,10 m über Fußboden) sowie die relative Luftfeuchte (1,10 m über Fußboden) für die beiden Versuchsräume S1 (linke Grafik) und M1 (rechte Grafik). In der Nacht liegen alle Temperaturverläufe eng beieinander, während tagsüber die Raumlufttemperatur in Bodennähe (0,1 m) ca. 1-2 K niedriger als die übrigen Temperaturen verläuft. Um 5.00 Uhr schaltet die Heizung ein (Beginn der Betriebszeit) und heizt den Raum bis etwa 8.00 Uhr auf den Vorgabewert in 1,10 m Höhe von 21 °C auf. Nachts wird eine Temperaturabsenkung bis 17 °C zugelassen. Am Nachmittag stellen sich durch die solaren Gewinne Raumtemperaturen von ca. 23 °C (S1) und 24 °C (M1) ein. Die höhere Wärmelast im Fassadenzwischenraum M1 bewirkt eine höhere Temperatur des angrenzenden Raumes M1 als dies beim Versuchsraum S1 der Fall ist.

Die relative Luftfeuchte ist mit Werten von zumeist unter 20 % sehr niedrig, was bei einem unbewohnten Raum ohne Feuchtemitteln und dem relativ hohen Außenluftwechsel zu erwarten ist.

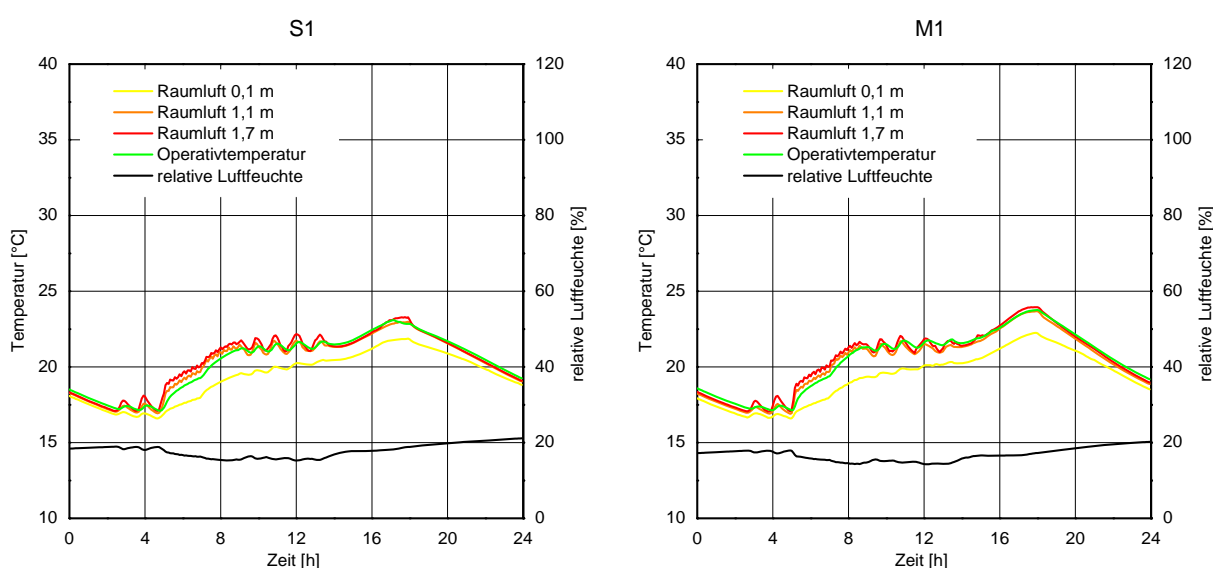


Bild 27: Raumklimawerte am 19.02.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

4.1.1.2 Strahlungsreicher Sommertag

Bild 28 zeigt die Außenlufttemperatur, Globalstrahlung und Weststrahlung gemessen an der Wetterstation des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Holzkirchen für einen strahlungsreichen Sommertag (10.07.2008).

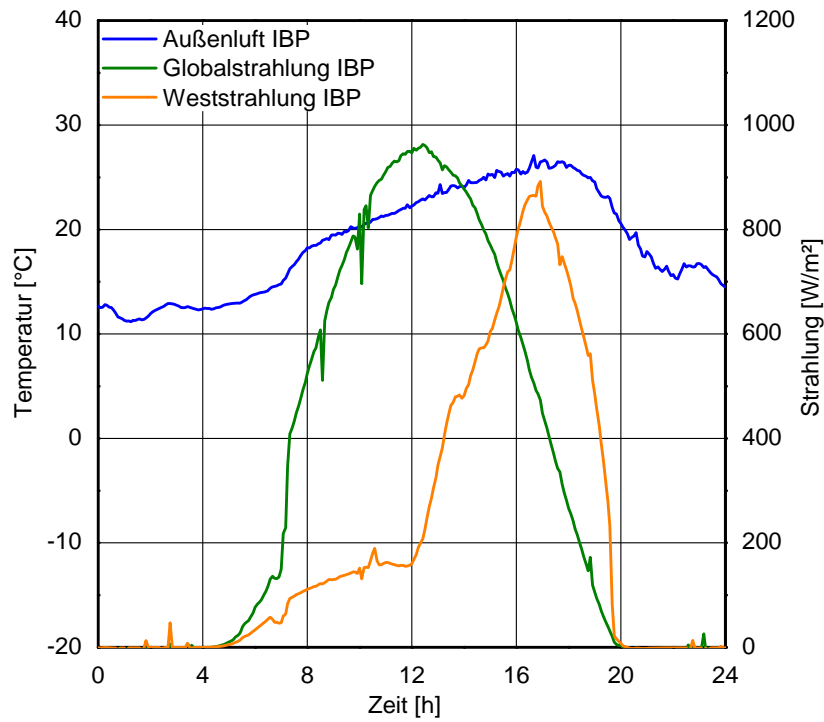


Bild 28: Klimadaten strahlungsreicher Sommertag (10.07.2008).

Sonnenschutz / Blendung:

Beim Raum S1 werden im Gegensatz zum Wintertag nun ebenfalls unterschiedliche Lamellenstellungen (-winkel) angefahren (Bild 29). Bei geschlossenen Behängen werden Leuchtdichten bis ca. 4500 cd/m^2 erreicht. In der Literatur werden häufig Leuchtdichten zwischen 2000 und 4000 cd/m^2 als Obergrenze für die Blendfreiheit am Arbeitsplatz genannt, die im Raum S1 an diesem Tag überschritten werden. Im Raum M1 treten am Nachmittag bei geschlossenem Behang in den angefahrenen Lamellenstellungen Leuchtdichten von über 6000 cd/m^2 auf.

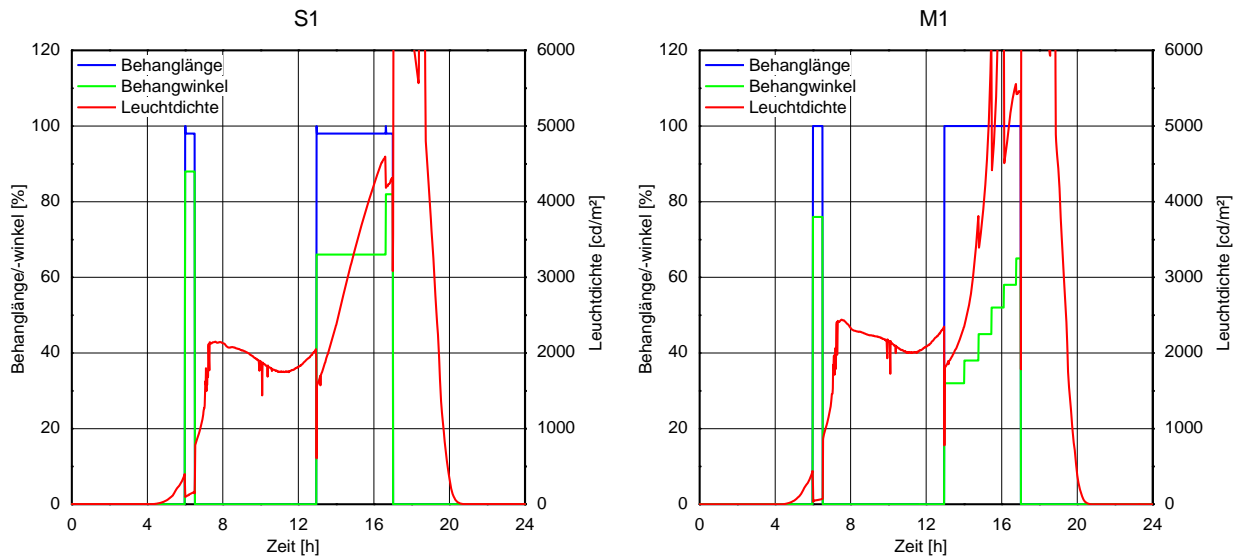


Bild 29: Behanglänge und -winkel sowie Leuchtdichte am 10.07.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

Lüftung:

Anhand der Volumenströme in Bild 30 ist zu erkennen, dass die Lüftung während der Betriebszeit von 05.00 bis 18.00 Uhr (04.00 bis 17.00 Uhr gemäß MEZ) mit dem Vorgabewert von 40 m³/h in beiden Räumen identisch betrieben wird. Es wird Außenluft an der Nordfassade des VERU-Gebäudes angesaugt und über Rohrleitungen dem Raum als Zuluft zugeführt. Anhand der Zulufttemperatur, die Werte über 24°C (Solltemperatur Kühlfall) annimmt, erkennt man, dass den Versuchsräumen mit der Zuluft Wärme zugeführt wird, die über die Raumkühlung wieder abgeführt werden muss. Die Ablufttemperatur entspricht während der Betriebszeit bei notwendiger Raumkühlung der Solltemperatur im Kühlfall von 24°C. Die Abluft gelangt über Rohrleitungen nach Passieren des Wärmetauchers als Fortluft an der Nordfassade des VERU-Gebäudes nach außen.

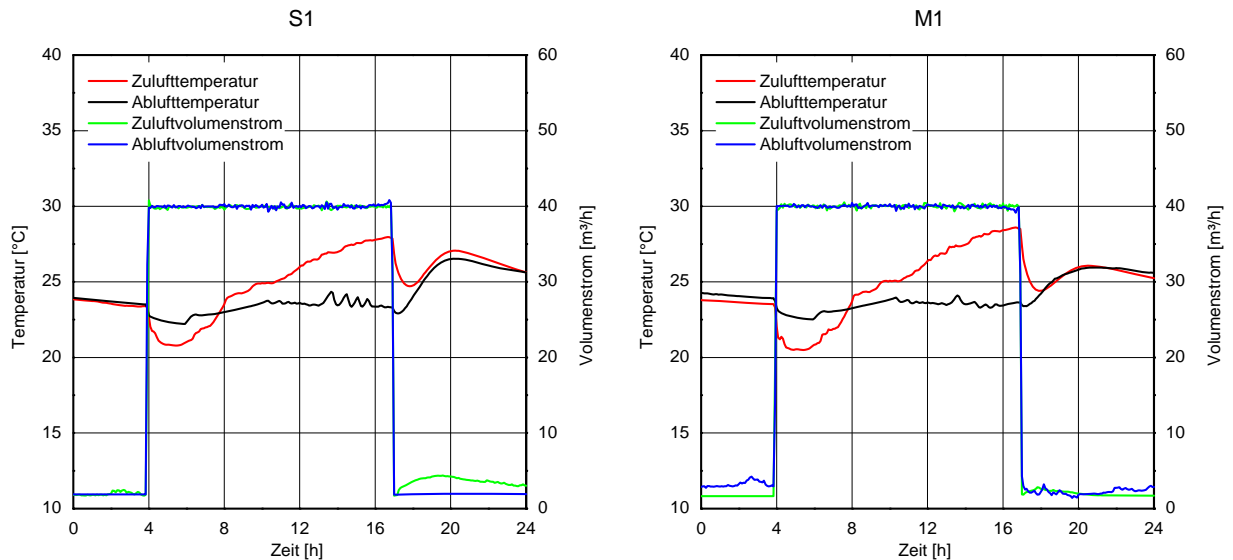


Bild 30: Zu- und Ablufttemperatur, Zu- und Abluftvolumenstrom am 10.07.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

Kühlung:

Bild 31 zeigt die Funktionsweise der Raumkühlung über die vorhandenen Kühldecken. Dargestellt sind der Volumenstrom sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen. Die Kühlkreispumpen schalten bei einer Raumtemperatur von 23,5°C zunächst im Kurzschlussbetrieb ein. Ab 24 °C mischt das Mischventil dem Kühlkreis Kaltwasser bis zu einer minimalen Vorlauftemperatur von 15°C bei; die Kaltwassermenge richtet sich nach dem Kühlbedarf. Nach Ende der Betriebszeit um 18.00 Uhr (17.00 Uhr gemäß MEZ) wird die Kühlung ausgeschaltet. Der Raum S1 erwärmt sich danach auf ca. 32°C, der Raum M1 auf 35°C.

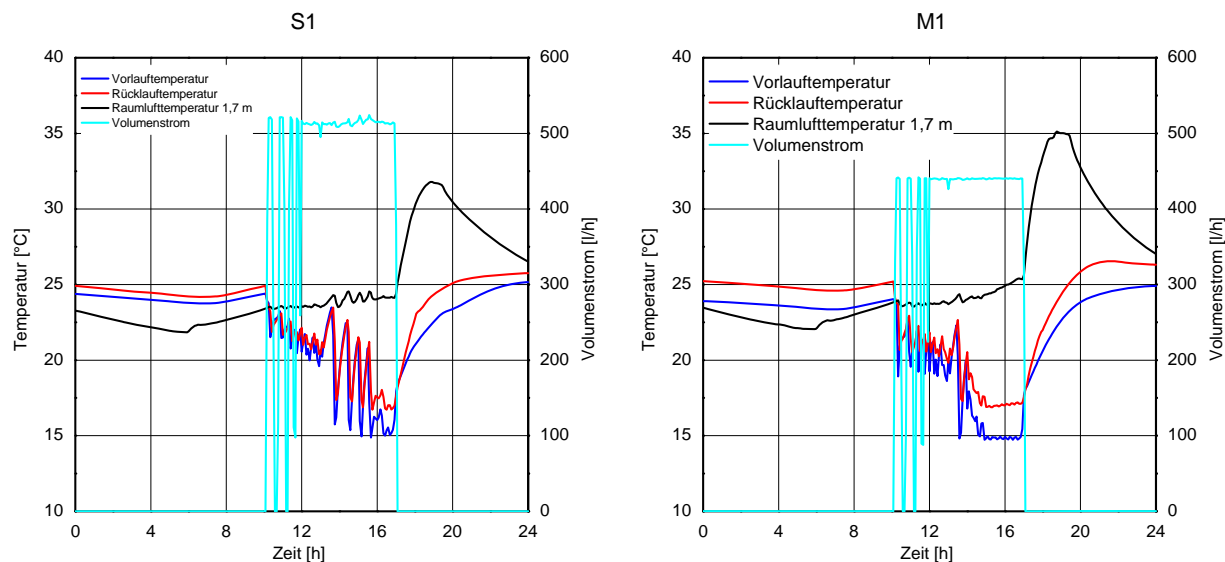


Bild 31: Vor- und Rücklauftemperatur, Raumlufttemperatur und Volumenstrom am 10.07.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

Temperaturverlauf in der Glasdoppelfassade:

Bild 32 zeigt den Verlauf der Lufttemperaturen in der Glasdoppelfassade in den drei verschiedenen Messhöhen sowie die Außenlufttemperatur für beide Versuchsräume. Es werden Temperaturspitzen bis 40°C beim Raum S1 und 50°C beim Raum M1 erreicht. Es ist zu beachten, dass die Lüftungsklappen der Doppelfassade ab April 2008 geöffnet waren, während sie von Januar bis März 2008 geschlossen waren. So erklärt sich, dass an dem betrachteten Wintertag (19.02.2008) im Fassadenzwischenraum M1 Lufttemperaturen über 50°C erreicht werden, die höher liegen als an dem betrachteten Sommertag, mit maximal 50°C im Fassadenzwischenraum M1.

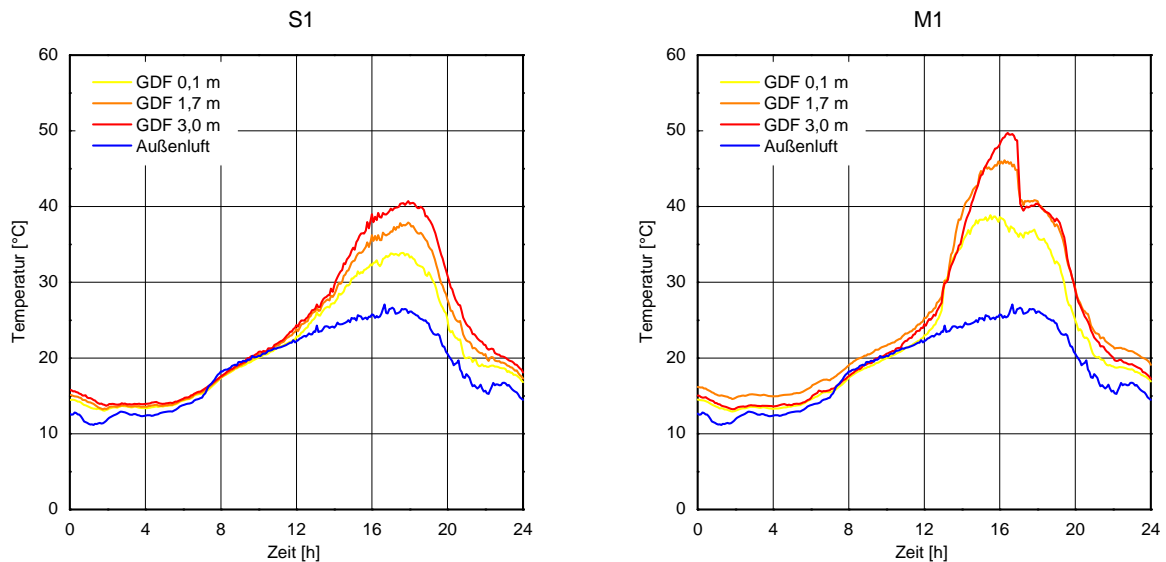


Bild 32: Lufttemperaturen in der Glasdoppelfassade sowie Außenlufttemperatur am 10.07.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

Raumklima:

Bild 33 zeigt die Raumlufttemperaturen in unterschiedlichen Höhen über Fußbodenniveau, die operative Raumtemperatur (1,10 m über Fußboden) sowie die relative Luftfeuchte (1,10 m über Fußboden) für die beiden Versuchsräume S1 (linke Grafik) und M1 (rechte Grafik). In der Nacht liegen alle Temperaturverläufe eng beieinander, während tagsüber die Raumlufttemperatur in Bodennähe (0,1 m) ca. 1-2 K niedriger als die übrigen Lufttemperaturen verläuft. Die Kühlung endet um 18.00 Uhr (17.00 Uhr gemäß MEZ), zur gleichen Zeit wird der Sonnenschutz vorgabegemäß hochgefahren. Der Raum S1 erwärmt sich anschließend auf eine Lufttemperatur von ca. 32°C, der Raum M1 auf ca. 35°C. Die mit dem Globe-Thermometer gemessene Operativtemperatur, erreicht beim Raum S1 Werte über 35°C und beim Raum M1 ca. 44°C nach Ende der Betriebszeit. Es zeigt sich, dass unter den vorliegenden Randbedingungen bei Westorientierung mit direkter Sonneneinstrahlung bis fast zum Sonnenuntergang die Aktivierung des Sonnenschutzes und bei Bedarf die Raumkühlung zweckmäßig sind, um auch zu dieser Zeit angenehme raumklimatische Verhältnisse zu gewährleisten.

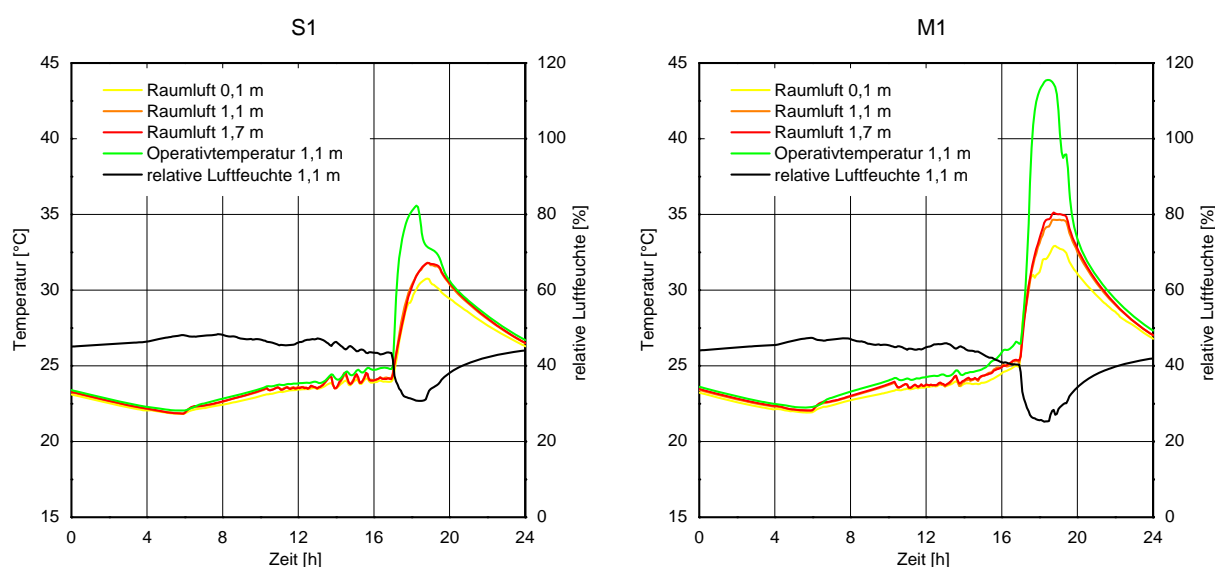


Bild 33: Raumklimawerte am 10.07.2008 im Versuchsraum S1 (linke Grafik) sowie M1 (rechte Grafik).

4.1.2 Monatsmittelwerte der Lufttemperatur im Raum, in der Glasdoppelfassade und außen

Die gemessenen Monatsmittelwerte der Lufttemperaturen im Raum, in der Glasdoppelfassade und außen sind in Bild 34 für beide Versuchsräume dargestellt. In den Monaten November und Dezember 2007 sowie von April bis Juli 2008 waren die Lüftungsklappen der Doppelfassaden geöffnet, während diese in den Wintermonaten Januar bis März 2008 geschlossen waren (grau hinterlegter Bereich). Der Unterschied zwischen offenem und geschlossenem System zeigt sich bei Betrachtung der Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum der Doppelfassade. Bei geschlossener Doppelfassade und damit maximal möglicher Erwärmung der Luft im Fassadenzwischenraum beträgt der Temperaturhub beim Versuchsraum S1 gegenüber der Außenluft ca. 8K. Beim Versuchsraum M1 fällt der Temperaturhub etwas niedriger aus, hier dürfte der hohe Wärmedurchgang nach außen - insbesondere in der Nacht - durch die äußere Einfachverglasung gegenüber der Zweifachverglasung beim Raum S1 ausschlaggebend sein.

Bei geöffnetem System beträgt der Temperaturhub zwischen Außenluft und Doppelfassade beim Versuchsraum S1 ca. 2-3 K, beim Versuchsraum M1 werden bis ca. 5 K erreicht. Die äußere Verglasung der Doppelfassade beim Versuchsraum M1 weist eine höhere solare Transparenz als die des Versuchsraums S1 auf, so dass mehr Solarstrahlung in den Fassadenzwischenraum gelangt. Zudem befindet sich der Sonnenschutz beim Versuchsraum M1 im Fassadenzwischenraum und nicht in der äußeren Verglasungsebene (Versuchsraum S1). Durch Absorption der solaren Einstrahlung wird der Behang (in geschlossenem Zustand) sowie die im Fassadenzwischenraum aufsteigende Luft stärker erwärmt als beim Fassadenzwischenraum S1.

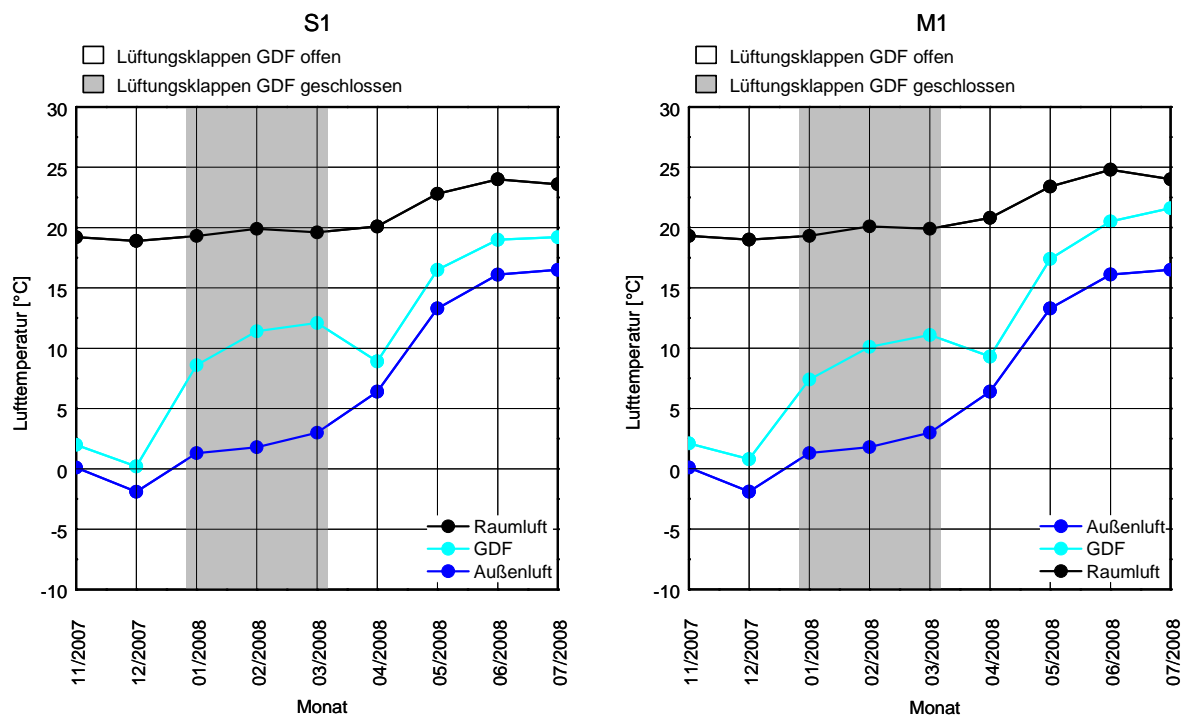


Bild 34: Monatsmittelwerte der Lufttemperaturen im Raum, in der Glasdoppelfassade und außen für die Monate November 2007 bis Juli 2008 für den Versuchsraum S1 (links) und M1 (rechts).

4.2 Instationäre Variantenrechnungen

Mit Hilfe der instationären Variantenrechnungen wurden wesentliche von unwesentlichen Parametern im Hinblick auf die Berechnung einer Glasdoppelfassade getrennt. Da die neu zu entwickelnde Berechnungsmethodik an der bestehenden Berechnungsmethode anknüpft, stellt diese die Ausgangslage der nachfolgenden Arbeitsschritte dar. Die bestehende Berechnungsmethode wird deshalb zunächst erläutert.

4.2.1 Bestehender Bewertungsansatz für Glasdoppelfassaden

Bei der gesamtenergetischen Bewertung von Gebäuden können mit der DIN V 18 599 auch Fassadensysteme mit Doppelfassade bewertet werden. Das vorgesehene Bewertungsverfahren betrachtet dabei Doppelfassaden als unbeheizte Glasvorbauten. Zur Bewertung des energetischen Einflusses der Glas-Doppelfassaden werden einerseits die direkten solaren Wärmeinträge über die Doppelfassade errechnet und zum anderen die Temperatur in dem unbeheizten Glasvorbau, die sich aufgrund der solaren Einträge in die Doppelfassade bzw. aus den Verlusten über die Verglasung der Doppelfassade ergibt.

Ein weiterer wesentlicher temperaturbestimmender Faktor ist dabei die angesetzte Außenluftwechselrate in der Doppelfassade. Im bisherigen vereinfachten Bewertungsverfahren wird die Luftwechselrate konstant auf 10 h^{-1} festgesetzt. Bild 35 zeigt eine schematische Darstellung der für Glasvorbauten bzw. Doppelfassaden zu berücksichtigen Größen.

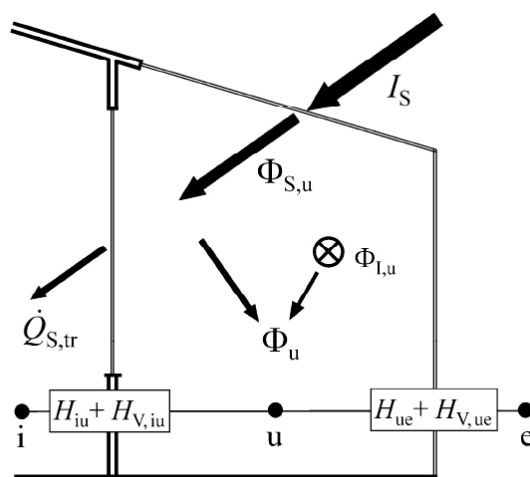


Bild 35: Schematische Darstellung der für Glasvorbauten bzw. Glasdoppelfassaden zu berücksichtigenden Größen [1].

Die direkten solaren Wärmeeinträge in die Gebäudezone $\dot{Q}_{S,tr}$ errechnen sich unter Berücksichtigung der zusätzlichen Verglasung der Doppelfassade gemäß Gleichung 1.

$$\dot{Q}_{S,tr} = \phi_{S,tr} = F_{F,iu} A_{iu} g_{eff,iu} F_{F,ue} \tau_{e,ue} I_S \quad \text{Gleichung 1}$$

Dabei ist:

$F_{F,iu}$	Der Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil der inneren Verglasung (Anteil der transparenten Fläche zur Gesamtfläche A_{iu}); sofern keine genaueren Werte bekannt sind, wird $F_{F,iu} = 0,7$ gesetzt
A_{iu}	Die Fläche des Bauteils der Trennfläche zwischen der betrachteten Gebäudezone und dem unbeheizten Glasvorbau (anzusetzen sind die lichten Rohbaumaße)
$g_{eff,iu}$	Der effektive Gesamtenergiedurchlassgrad des transparenten Anteils des Bauteils unter Einbezug <ul style="list-style-type: none"> – des Gesamtenergiedurchlassgrades g_{tot} der inneren Verglasung mit Sonnenschutzvorrichtungen – der Aktivierung von Sonnenschutzvorrichtungen – der Verschattung durch Umgebung und Gebäudeteile – des nicht senkrechten Strahlungseinfall – der Verschmutzung der Verglasung
$F_{F,ue}$	Der Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil der äußeren Verglasung (Anteil der transparenten Fläche zur Gesamtfläche): sofern keine genaueren Werte bekannt sind, ist $F_{F,ue} = 0,9$ zu setzen
$\tau_{e,ue}$	Der Transmissionsgrad der äußeren Verglasung
I_S	Die globale Sonneneinstrahlung für die Orientierung der Trennfläche nach DIN V 18 599-10.

Um die Temperatur im unbeheizten und ungekühlten Glasvorbau zu ermitteln, ist zunächst der Wärmestrom in diesen Glasvorbau zu berechnen. Dieser ermittelt sich gemäß Gleichung 2.

$$\phi_u = \sum \phi_{s,u} - \sum \phi_{s,tr} + \sum \phi_{i,u} \quad \text{Gleichung 2}$$

Dabei ist:

$\sum \phi_{s,u}$	Die solare Einstrahlung in den Wintergarten, summiert über die transparenten Außenbauteile des Glasvorbaus
$\sum \phi_{s,tr}$	Die solare Einstrahlung durch den Glasvorbau in die angrenzende Gebäudezone, summiert über die transparenten Bauteile der Trennfläche zwischen der betrachteten Gebäudezone und dem unbeheizten Glasvorbau
$\sum \phi_{i,u}$	Die Summe der internen Wärmequellen innerhalb des Glasvorbaus (in der Regel zu null zu setzen).

Die solare Einstrahlung in den Vorbau ist nach Gleichung 3 zu ermitteln.

$$\phi_{s,u} = F_{F,ue} A_{ue} g_{eff,ue} I_s \quad \text{Gleichung 3}$$

Dabei ist:

$F_{F,ue}$	Der Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil der äußeren Verglasung (Anteil der transparenten Fläche zur Gesamtfläche); sofern keine genaueren Werte bekannt sind, ist $F_{F,ue} = 0,9$ zu setzen
A_{ue}	Die Fläche der Außenbauteile des Vorbaus einer Orientierung
$g_{eff,ue}$	Der effektive Gesamtenergiedurchlassgrad des transparenten Anteils der äußeren Verglasung unter Einbezug <ul style="list-style-type: none"> – der Verschattung, – des wirksamen Gesamtenergiedurchlassgrades der inneren Verglasung unter Berücksichtigung von Sonnenschutzvorrichtungen und deren Aktivierung, – des nicht senkrechten Strahlungseinfall, – der Verschmutzung der Verglasung;
I_s	Die globale Sonneneinstrahlung für die Orientierung der Trennfläche nach DIN V 18 599-10.

Die mittlere Temperatur in der Glas-Doppelfassade ist entsprechend DIN EN ISO 13789 [25] nach Gleichung 4 zu berechnen.

$$\vartheta_u = \frac{\Phi_u + \vartheta_i (H_{T,iu} + H_{V,iu}) + \vartheta_e (H_{T,ue} + H_{V,ue})}{H_{T,iu} + H_{V,iu} + H_{T,ue} + H_{V,ue}} \quad \text{Gleichung 4}$$

Dabei ist:

ϑ_u	mittlere Temperatur in der Glas-Doppelfassade
ϑ_i	mittlere Temperatur der beheizten Zone
ϑ_e	mittlere Außenlufttemperatur
Φ_u	Der Wärmestrom (Wärmequellen), der in die unbeheizte oder ungekühlte Gebäudezone gelangt (z.B. durch solare Wärmeeinwirkung oder interne Wärmequellen). Falls Wärmesenken, z.B. nach DIN EN ISO 13370 berechnete Wärmeströme über erdreichberührte Bauteile vorhanden sein sollten, sind diese vorzeichenrichtig ebenfalls zu berücksichtigen
$H_{T,iu}$	Der Wärmetransferkoeffizient für Transmission der Bauteile zwischen der betrachteten Gebäudezone und der benachbarten unbeheizten oder ungekühlten Gebäudezone
$H_{T,ue}$	Der Wärmetransferkoeffizient für Transmission der Bauteile der unbeheizten oder ungekühlten Gebäudezone nach außen
$H_{V,iu}$	Der Lüftungswärmetransferkoeffizient zwischen der betrachteten Gebäudezone und der benachbarten unbeheizten oder ungekühlten Gebäudezone (in der Regel ist $H_{V,iu}$ auf 0 zu setzen)
$H_{V,ue}$	Der Lüftungswärmetransferkoeffizient der unbeheizten oder ungekühlten Gebäudezone nach Außen nach Gleichung 5.

Hierbei ist der Luftwechsel der Doppelfassade nach außen zu berücksichtigen. Für diesen Lüftungswärmetransferkoeffizienten der Doppelfassade gilt:

$$H_{V,ue} = c_{p,a} \rho_a n_{ue} V_u \quad \text{Gleichung 5}$$

Dabei ist:

n_{ue}	Die Luftwechselrate zwischen der angrenzenden unbeheizten oder ungekühlten Gebäudezone und Außen
V_u	das Nettoraumvolumen der unbeheizten oder ungekühlten Gebäudezone
$c_{p,a}$	die spezifische Wärmekapazität von Luft
ρ_a	die Dichte von Luft
$c_{p,a} \rho_a$	ist zu $0,34 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K})$ zu setzen.

Im ersten vereinfachten Bewertungsansatz der DIN V 18 599-2:2007-02 ist die Außenluftwechselrate in der Doppelfassade n_{ue} konstant mit 10 h^{-1} festgesetzt. Verschiedene Messergebnisse (z.B. EnEff06-Forschungsvorhaben [22]) haben gezeigt, dass dieser Ansatz das praxisübliche Verhalten einer Doppelfassade nicht thermisch-energetisch korrekt abbilden kann.

Es ist daher das Hauptziel des Forschungsvorhabens, die Außenluftwechselrate in der Doppelfassade n_{ue} in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften genauer bestimmen zu können, um damit die Voraussetzung für eine genauere Berechnung der Temperatur in der Doppelfassade ϑ_u zu schaffen, die für die weiterführenden energetischen Berechnungen maßgeblich ist.

4.2.2 Parameteranalyse

Durch Umformen der Gleichung 4 lässt sich folgende Bestimmungsgleichung für den Luftwechsel n_{ue} ableiten:

$$n_{ue} = \frac{\Phi_u + \vartheta_i (H_{T,ju} + H_{V,ju}) + \vartheta_e H_{T,ue} - \vartheta_u H_{T,ju} - \vartheta_u H_{V,ju} - \vartheta_u H_{T,ue}}{(\vartheta_u - \vartheta_e) c_{p,a} \rho_a V_u} \quad \text{Gleichung 6}$$

Für ϑ_u wird im Folgenden der Monatsmittelwert der simulierten oder gemessenen Temperatur in der Doppelfassade eingesetzt (alle anderen Größen sind bekannt oder lassen sich anhand der Randbedingungen berechnen). Damit lässt sich der Einfluss der einzelnen Parameter auf den Luftwechsel in der Doppelfassade bestimmen.

Da die Berechnungsmethode der energetischen Bewertung dienen soll, wurden der Nutzenergiebedarf für die Beheizung und Kühlung herangezogen, um ein Kriterium zu erhalten, welcher Parameter weiterverfolgt werden sollte und welcher Parameter für eine vereinfachte Berechnungsmethode auf Basis von Monatsmittelwerten vernachlässigbar erscheint. Die Simulationsrechnungen ergaben, dass der Heizwärmebedarf und der Kühlbedarf des Raumes M1 in funktionalem Zusammenhang zur Luftwechselrate in der Doppelfassade stehen. Die Nutzenergie für Heizung bzw. Kühlung wurde dazu mit TRNSYS durch stufenweise Steigerung eines fest vorgegebenen Luftwechsels in der Doppelfassade von 0 h^{-1} bis 500 h^{-1} bestimmt und eine entsprechende Regressionsfunktion durch die Einzelpunkte gelegt (siehe Bild 36 und Bild 37). Für die Grundvariante, d. h. bei den Versuchsrandbedingungen des Raumes M1 ergibt sich bei durchgängig geöffneten Lüftungsklappen ein über das Jahr gemittelter Luftwechsel von $34,3 \text{ h}^{-1}$. Hieraus errechnet sich für den angrenzenden Versuchsraum ein Heizwärmebedarf von $93,3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ sowie ein Kühlbedarf von $4,8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.

Das neue Berechnungsmodell soll bereits in der frühen Planungsphase bei Kenntnis weniger wesentlicher Parameter anwendbar sein. Bei einer großen Zahl an Parametern würde das neue Berechnungsmodell so aufgebläht und umfangreich, dass der zeitliche Vorteil gegenüber einer instationären Berechnung aufgehoben würde. Daher wurde festgelegt, dass nur Parameter weiterverfolgt werden, die den Energiebedarf der Grundvariante signifikant verändern, während die übrigen Parameter nicht weiterverfolgt werden.

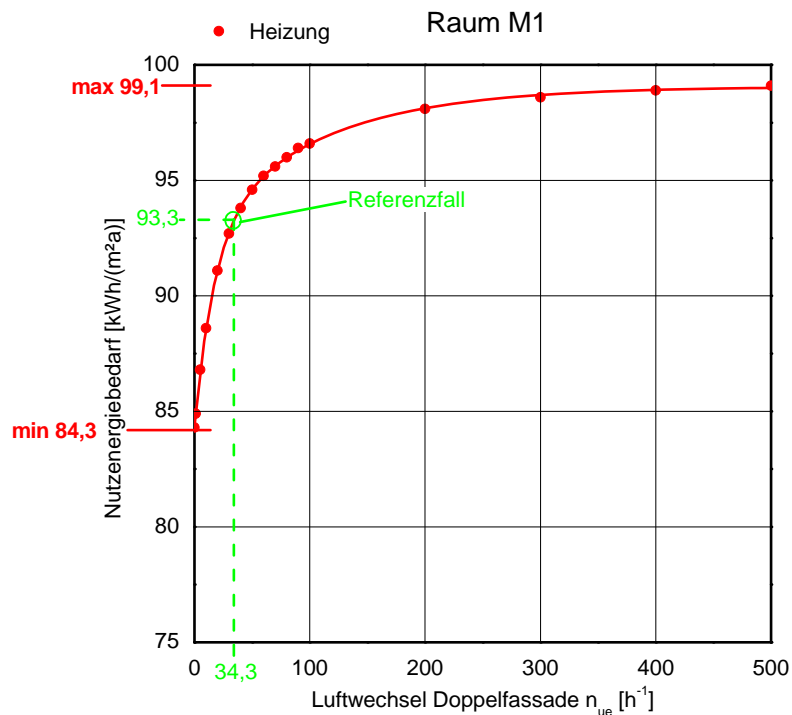


Bild 36: Mit TRNSYS berechneter Nutzenergiebedarf Heizung in Abhängigkeit des Luftwechsels in der Doppelfassade.

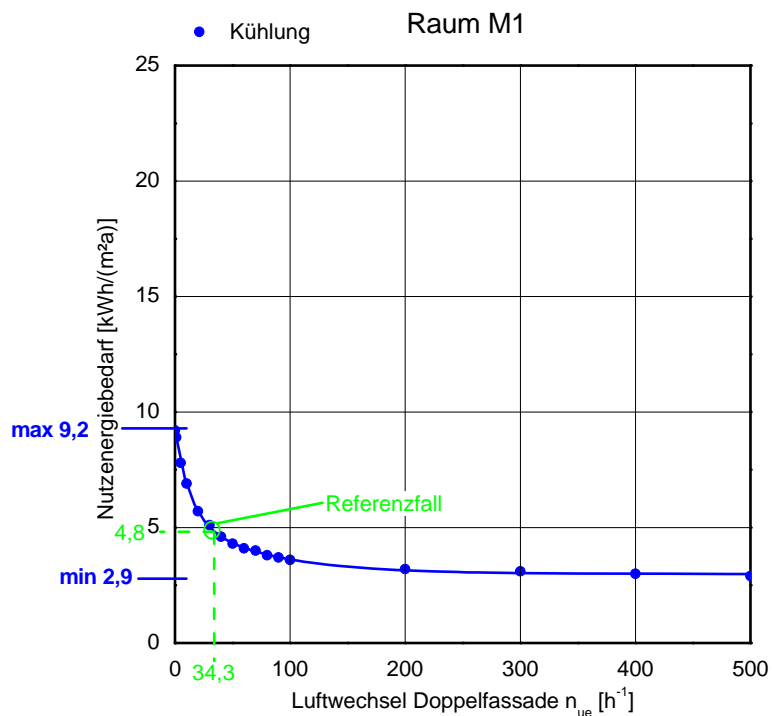


Bild 37: Mit TRNSYS berechneter Nutzenergiebedarf Kühlung in Abhängigkeit des Luftwechsels in der Doppelfassade.

Im Einzelnen zeigten sich die nachfolgenden Ergebnisse bei den verschiedenen Parametern.

Öffnungsfläche der Doppelfassade (Zu-/ Abluftöffnungen):

Bild 38 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit der Öffnungsfläche der Doppelfassade. Je nach Öffnungsfläche der Doppelfassade im Simulationsmodell werden Luftwechsel nahe Null bei geschlossenem System bzw. bis zu $122,8 \text{ h}^{-1}$ bei einer Zu- und Abluftfläche von jeweils $0,75 \text{ m}^2$ (untere / obere Lüftungsöffnungen der Doppelfassade) je Laufmeter erreicht. Bei geschlossenem System bedeutet dies eine Verringerung des Heizwärmebedarfs um $8,9 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ während bei der größten Öffnung der Doppelfassade ein Mehrverbrauch an Heizwärme von $3,8 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ zu verzeichnen ist (Tabelle 9). Bei der Kühlenergie verhält es sich umgekehrt, die geschlossene Doppelfassade bewirkt eine Erhöhung des Kühlenergiebedarfs um $4,4 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, die maximal geöffnete Doppelfassade eine Verringerung um $1,4 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ gegenüber dem Referenzfall (Grundvariante).

Da dieser Parameter einen deutlichen Einfluss auf das energetische Verhalten des Systems hat wird er für das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate berücksichtigt.

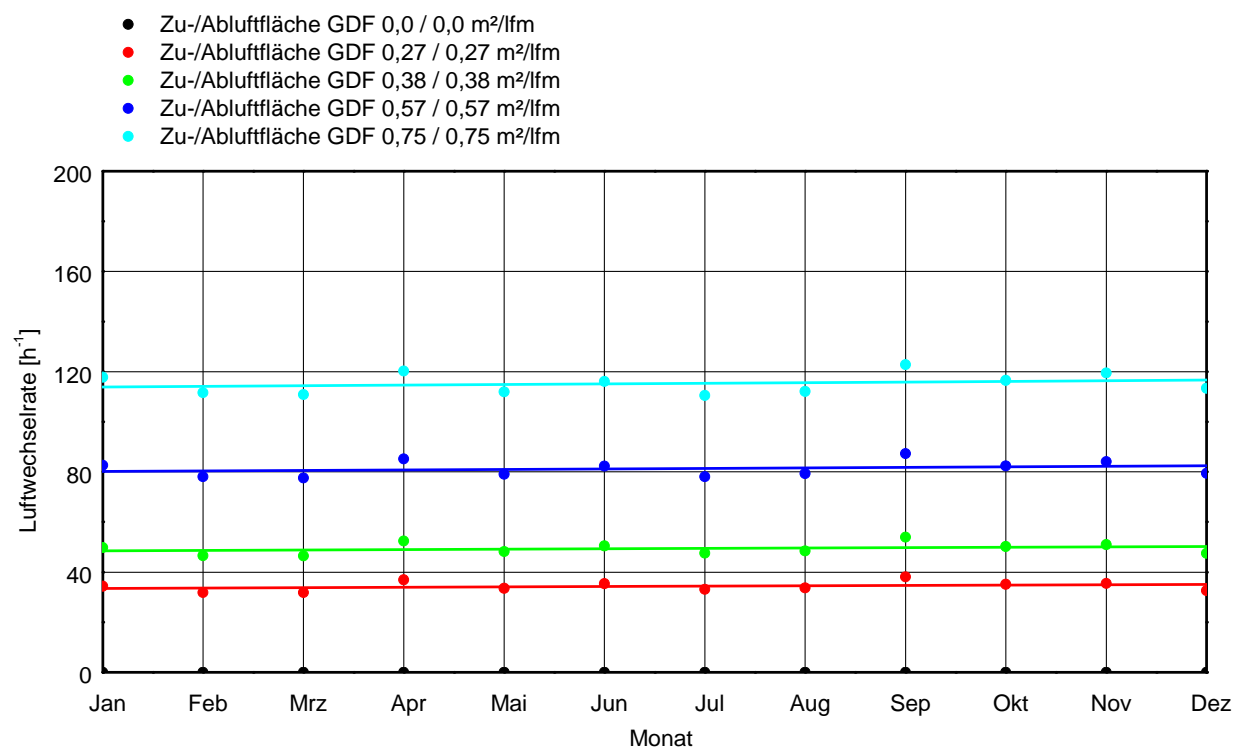


Bild 38: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung der Öffnungsfläche

Tabelle 9: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung der Öffnungsfläche.

Zu-/Abluftfläche GDF	$n_{ref} [\text{h}^{-1}]$	$n_{max} [\text{h}^{-1}]$	$n_{min} [\text{h}^{-1}]$
	34,3	122,8	0,0
	Veränderung		
Nutzenergiebedarf Heizung [$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$]	93,3	3,8	-8,9
Nutzenergiebedarf Kühlung [$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$]	4,8	-1,4	4,4

Tiefe des Fassadenzwischenraums:

Bild 39 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit der Tiefe des Fassadenzwischenraums. Je nach Tiefe der Doppelfassade im Simulationsmodell werden Luftwechsel von $6,4 \text{ h}^{-1}$ bei einer Tiefe von $1,5 \text{ m}$ und bis zu $63,9 \text{ h}^{-1}$ bei einer Tiefe von $0,5 \text{ m}$ erreicht. Auch bei diesem Parameter treten relevante Veränderung des Energiebedarfs von bis zu $6,0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ gegenüber dem Referenzfall (Grundvariante) auf (Tabelle 10).

Da dieser Parameter einen deutlichen Einfluss auf das energetische Verhalten des Systems hat wird er für das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate berücksichtigt.

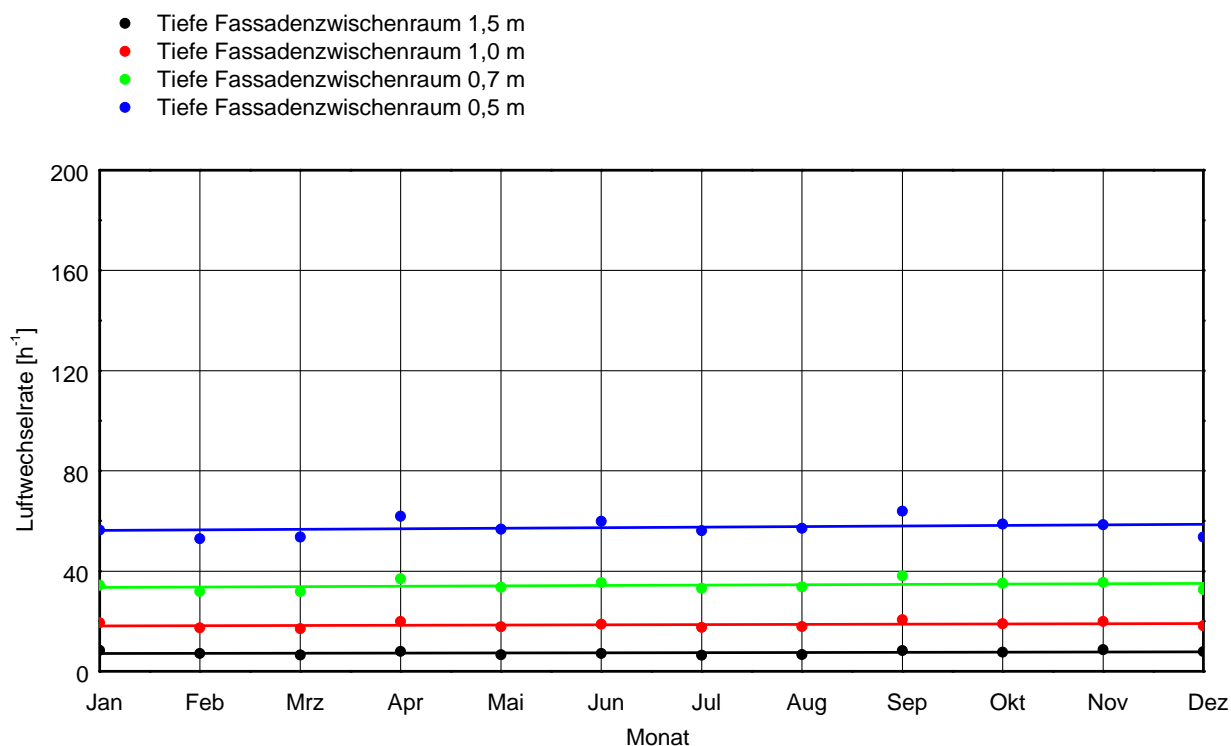


Bild 39: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung der Tiefe des Fassadenzwischenraums

Tabelle 10: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung der Tiefe des Fassadenzwischenraums.

Tiefe Fassadenzwischenraum	$n_{ref} [\text{h}^{-1}]$	$n_{max} [\text{h}^{-1}]$	$n_{min} [\text{h}^{-1}]$
		34,3	63,9
		Veränderung	
Nutzenergiebedarf Heizung [$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$]	93,3	2,1	-6,0
Nutzenergiebedarf Kühlung [$\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$]	4,8	-0,8	2,7

Rahmenanteil der äußeren Verglasungsebene:

Bild 40 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit des Rahmenanteils der äußeren Verglasungsebene. Dieser Parameter ruft nur eine geringe Schwankungsbreite des Luftwechsels sowie geringe Veränderungen der Heiz- und Kühlenergie hervor (Tabelle 11) und wird daher für das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate nicht berücksichtigt.

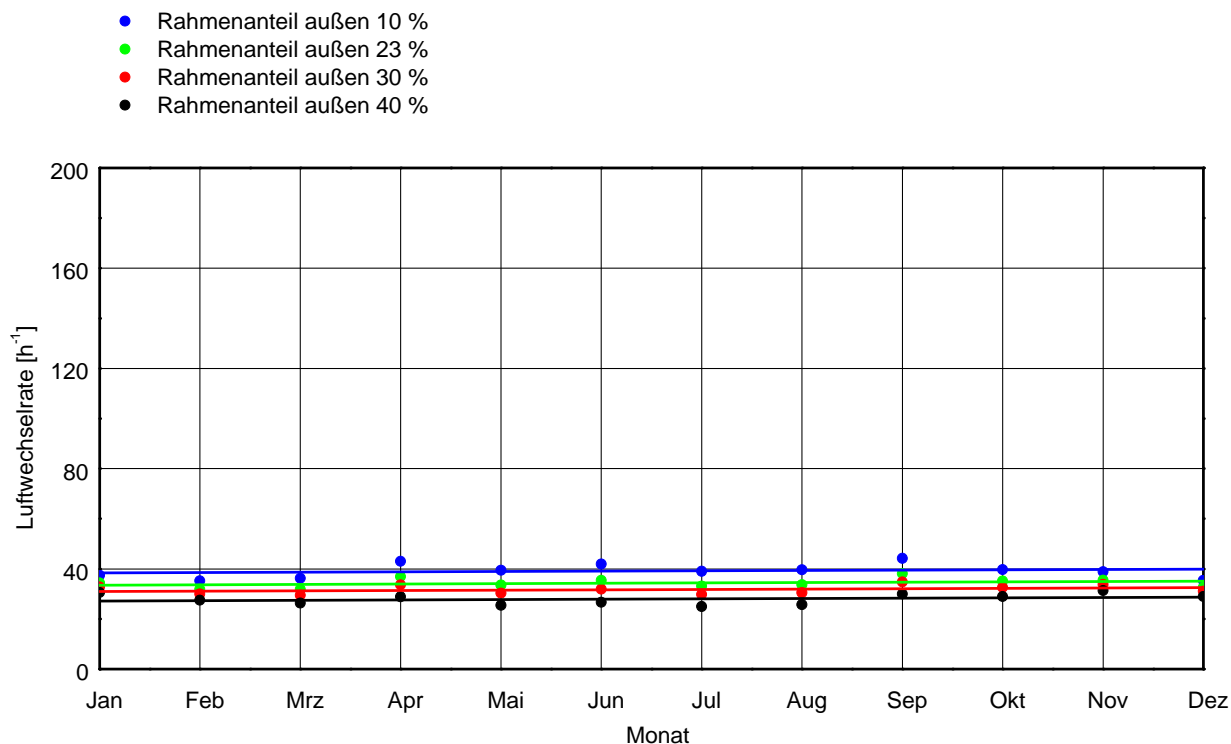


Bild 40: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung des äußeren Rahmenanteils.

Tabelle 11: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung des äußeren Rahmenanteils.

Rahmenanteil außen	n_{ref} [h ⁻¹]	n_{max} [h ⁻¹]	n_{min} [h ⁻¹]
		34,3	44,2
	Veränderung		
Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)]	93,3	0,9	-1,2
Nutzenergiebedarf Kühlung [kWh/(m ² a)]	4,8	-0,3	0,5

Typ der äußeren Verglasung:

Bild 41 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit des Typs der äußeren Verglasung. Die äußere Einfachverglasung stellt die Grundvariante dar. Die übrigen Fälle mit außenliegender Zweifachverglasung liegen eng beieinander, jedoch ist ein relativ großer Unterschied gegenüber der äußeren Einfachverglasung festzustellen. Es wird daher unterschieden, ob in der äußeren Verglasungsebene eine Einfach- oder Zweifachverglasung vorliegt.

- Einfachverglasung außen ($U=5,5$; $g=0,90$)
- Isolierverglasung außen ($U=2,8$; $g=0,76$)
- Sonnenschutzverglasung außen ($U=1,0$; $g = 0,26$)
- Sonnenschutzverglasung außen ($U=1,1$; $g = 0,39$)

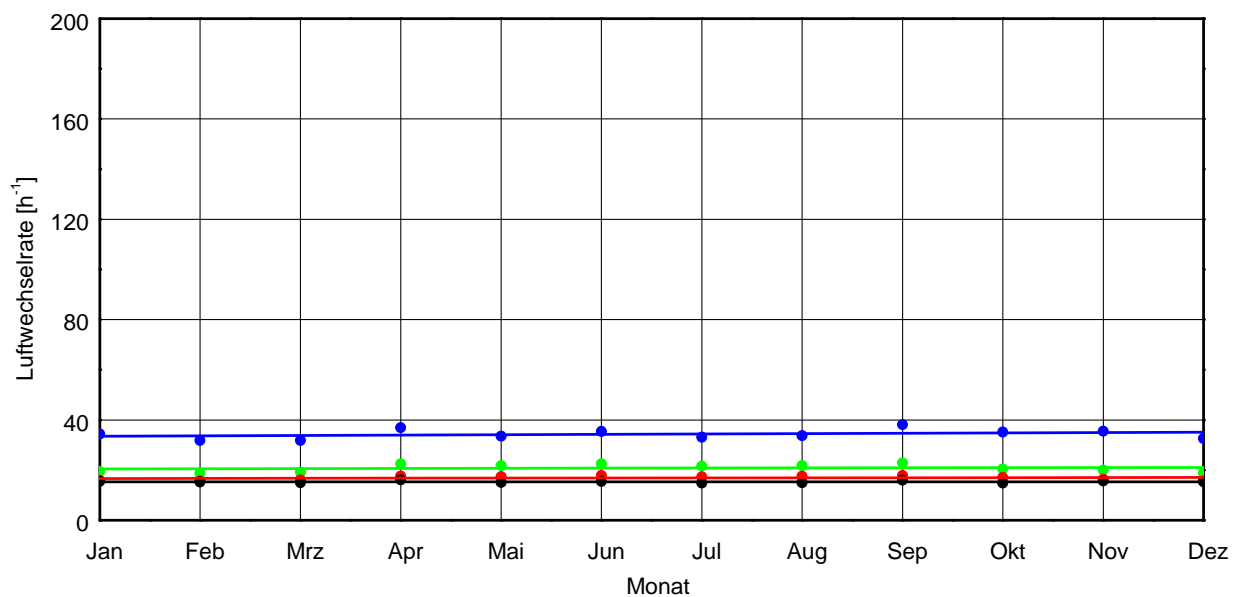


Bild 41: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung des äußeren Verglasungstyps.

Tabelle 12: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung des äußeren Verglasungstyps.

Verglasung außen	n_{ref} [h^{-1}]	n_{max} [h^{-1}]	n_{min} [h^{-1}]
		34,3	38,1
		Veränderung	
Nutzenergiebedarf Heizung [$kWh/(m^2a)$]	93,3	0,4	-3,3
Nutzenergiebedarf Kühlung [$kWh/(m^2a)$]	4,8	-0,1	1,4

Position und Typ des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum:

Bild 42 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit der Position und Art des Sonnenschutzes. Hier zeigt sich kein aussagekräftiges Bild. Dieser Parameter ruft nur eine geringe Schwankungsbreite des Luftwechsels sowie geringe Veränderungen der Heiz- und Kühlenergie hervor (Tabelle 13) und wird daher für das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate nicht berücksichtigt.

- lichtundurchlässiger Sonnenschutz (Farbe weißaluminium) an innerer Verglasung
- mittellichtdurchlässiger Sonnenschutz (pastellfarben) an innerer Verglasung
- lichtundurchlässiger Sonnenschutz (Farbe weißaluminium) an äußerer Verglasung
- mittellichtdurchlässiger Sonnenschutz (pastellfarben) an äußerer Verglasung

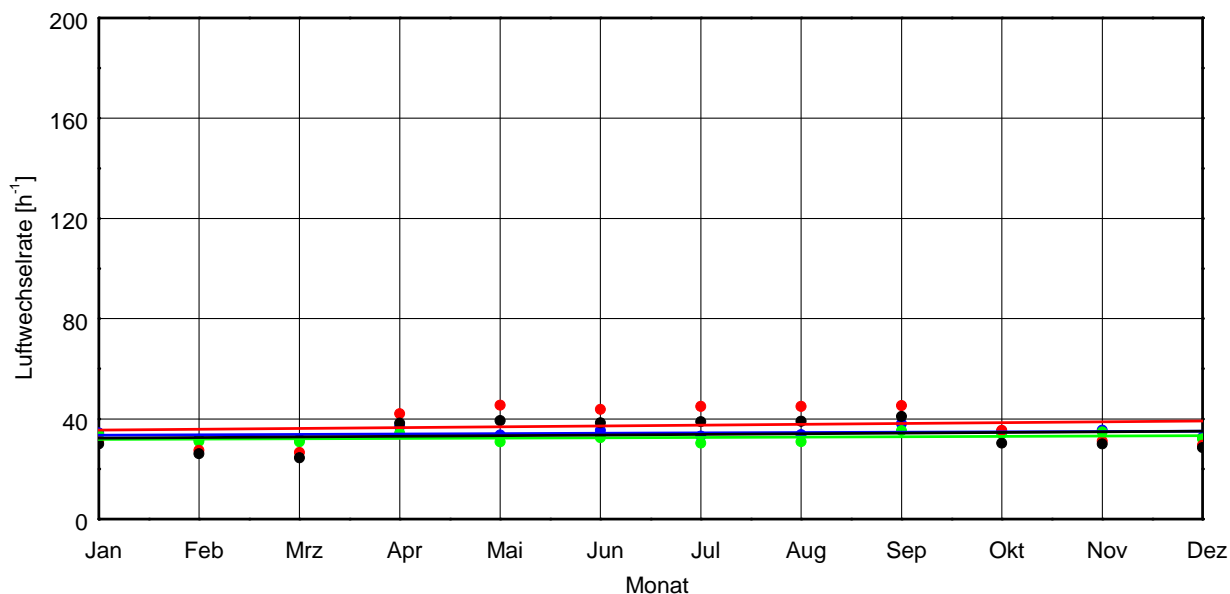


Bild 42: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung von Position und Typ des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum.

Tabelle 13: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung von Position und Typ des Sonnenschutzes im Fassadenzwischenraum.

Position und Kenngrößen Sonnenschutz	n_{ref} [h ⁻¹]	n_{max} [h ⁻¹]	n_{min} [h ⁻¹]
		34,3	38,1
		Veränderung	
Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)]	93,3	0,4	-1,3
Nutzenergiebedarf Kühlung [kWh/(m ² a)]	4,8	-0,1	0,5

Farbe des Sonnenschutzes:

Bild 43 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit der Farbe des Sonnenschutzes. Dieser Parameter ruft nur eine geringe Schwankungsbreite des Luftwechsels sowie geringe Veränderungen der Heiz- und Kühlenergie (Tabelle 14) hervor und wird daher für das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate nicht berücksichtigt.

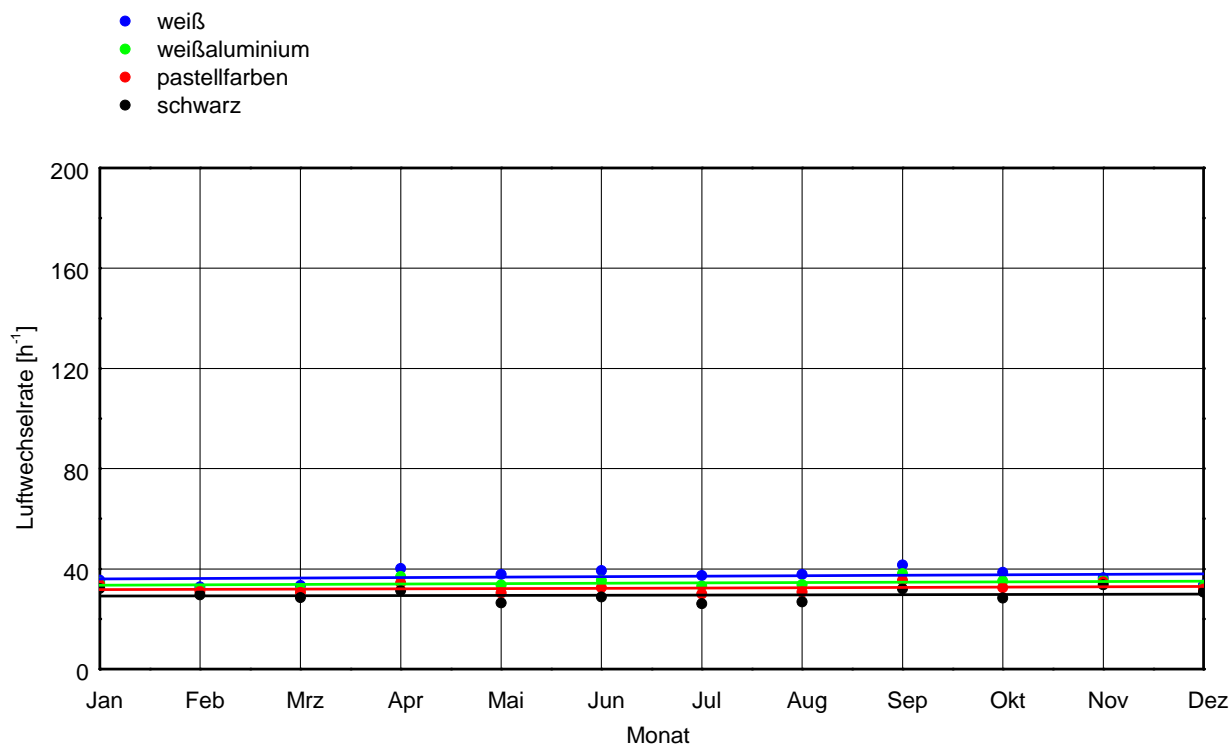


Bild 43: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung der Farbe des Sonnenschutzes.

Tabelle 14: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung der Farbe des Sonnenschutzes.

Reflexionsgrad Sonnenschutz	n_{ref} [h ⁻¹]	n_{max} [h ⁻¹]	n_{min} [h ⁻¹]
		34,3	41,6
	Veränderung		
Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)]	93,3	0,7	-1,1
Nutzenergiebedarf Kühlung [kWh/(m ² a)]	4,8	-0,3	0,4

Fensterflächenanteil der inneren Verglasungsebene:

Bild 44 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit des inneren Fensterflächenanteils. Dieser Parameter ruft bei praxisüblichen Systemen (i. d. R. 75-100 % innerer Fensterflächenanteil) eine geringe Schwankungsbreite des Luftwechsels hervor und wird daher für das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate nicht berücksichtigt. Sonderfälle mit 25-50 % innerem Fensterflächenanteil müssen durch ingenieurmäßige Auslegung mit Hilfe instationärer Simulation bewertet werden.

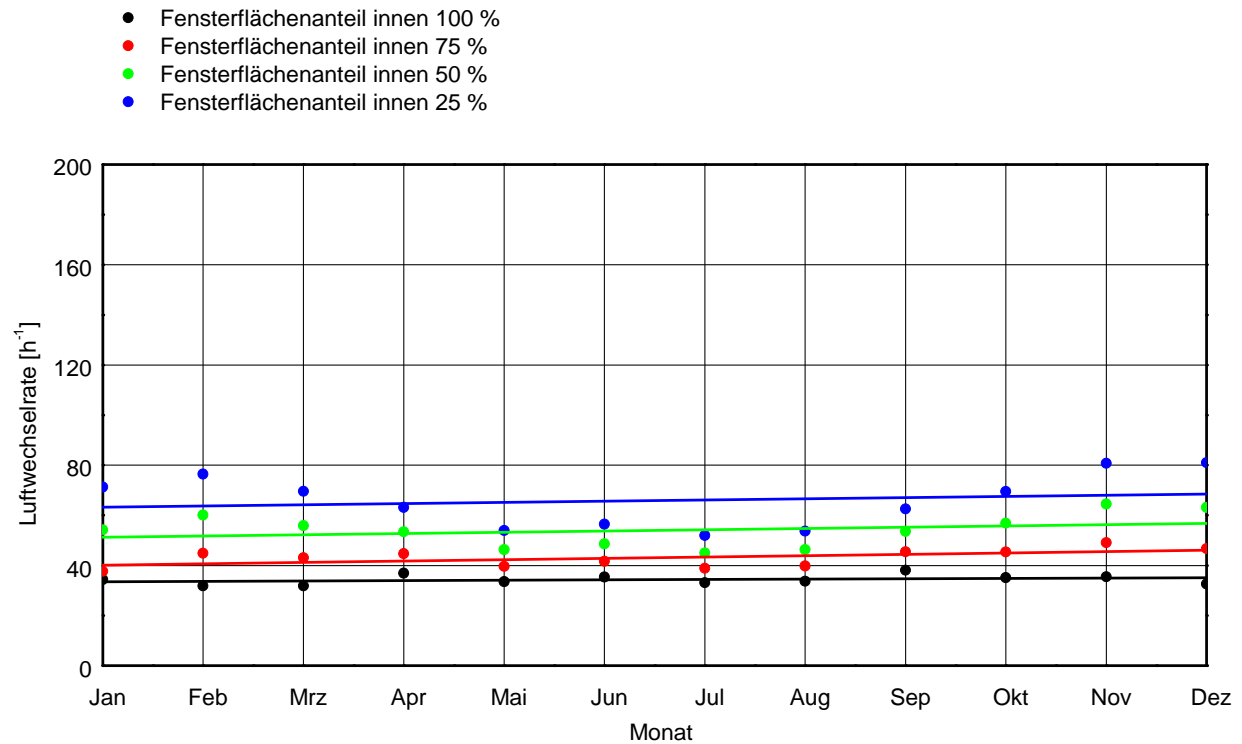


Bild 44: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung des inneren Fensterflächenanteils.

Tabelle 15: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung des inneren Fensterflächenanteils.

Fensterflächenanteil innen	n_{ref} [h ⁻¹]	n_{max} [h ⁻¹]	n_{min} [h ⁻¹]
		34,3	81,0
		Veränderung	
Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)]	93,3	2,8	0,4
Nutzenergiebedarf Kühlung [kWh/(m ² a)]	4,8	-1,0	-0,1

Typ der inneren Verglasung:

Bild 45 zeigt den nach oben beschriebener Methodik monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit des Typs der inneren Verglasung. Die innere Verglasung hat wie zu erwarten keinen relevanten Einfluss auf den Luftwechsel und den Energiebedarf (Tabelle 16) und fließt daher nicht in das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate ein.

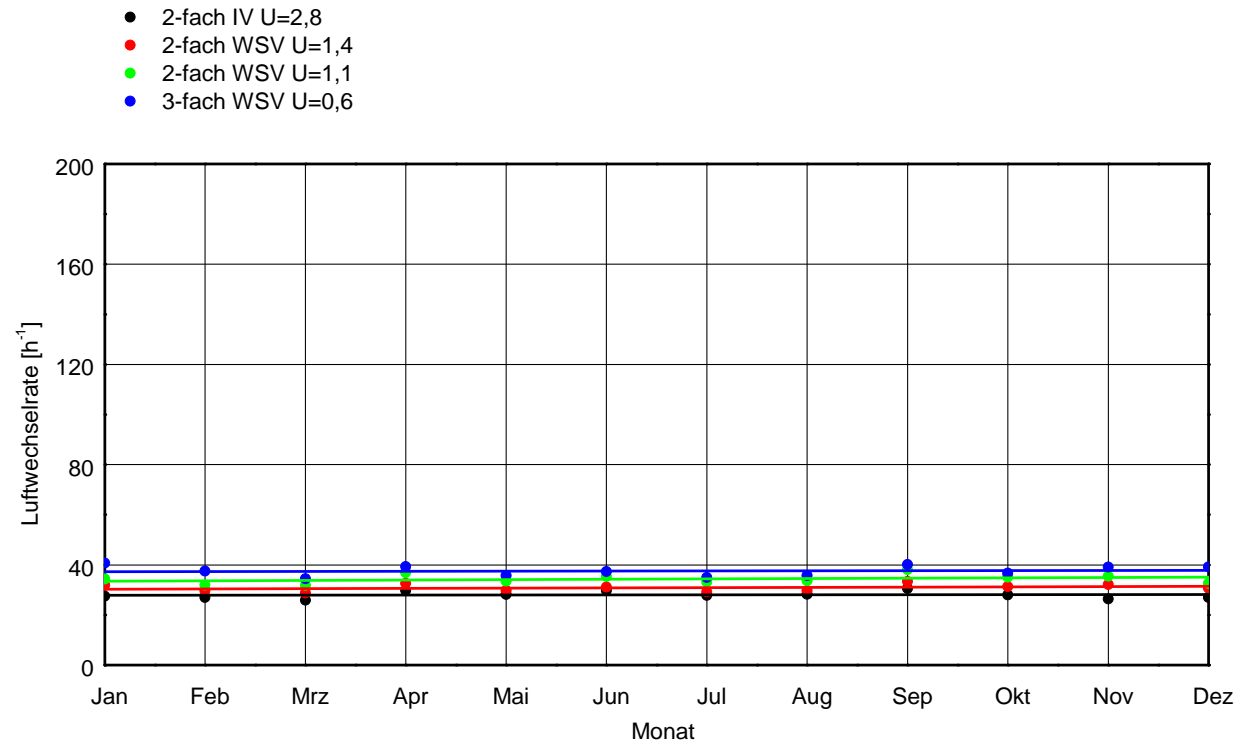


Bild 45: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung des inneren Verglasungstyps.

Tabelle 16: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung des inneren Verglasungstyps.

Verglasung innen	n_{ref} [h ⁻¹]	n_{max} [h ⁻¹]	n_{min} [h ⁻¹]
		34,3	40,7
	Veränderung		
Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)]	93,3	0,6	-1,1
Nutzenergiebedarf Kühlung [kWh/(m ² a)]	4,8	-0,2	0,4

Orientierung der Doppelfassade:

Bild 46 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit der Orientierung der Doppelfassade. Die Orientierung hat offenbar keinen maßgeblichen Einfluss auf den Luftwechsel und den Energiebedarf (Tabelle 17) und fließt daher nicht in das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate ein.

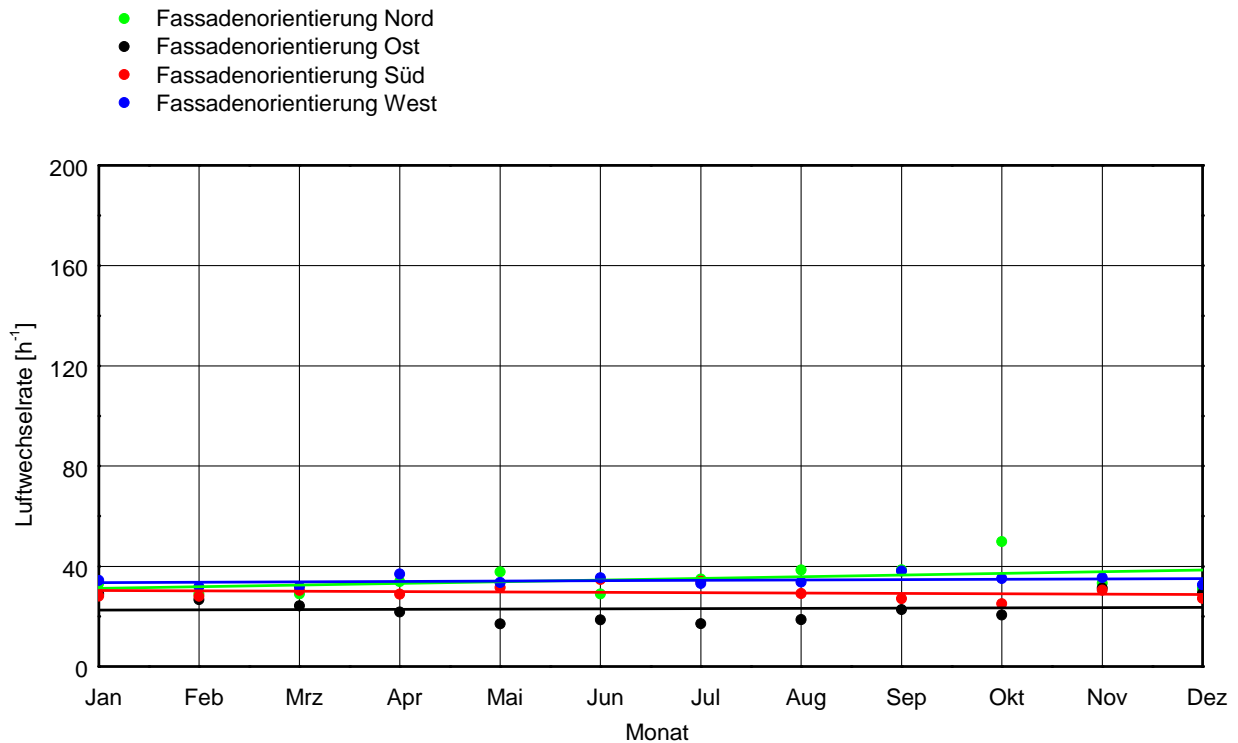


Bild 46: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung der Orientierung der Doppelfassade.

Tabelle 17: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung der Orientierung der Doppelfassade.

Orientierung	n_{ref} [h ⁻¹]	n_{max} [h ⁻¹]	n_{min} [h ⁻¹]
		34,3	49,9
	Veränderung		
Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)]	93,3	1,3	-1,2
Nutzenergiebedarf Kühlung [kWh/(m ² a)]	4,8	-0,5	0,5

Durchflussbeiwert der Lüftungsöffnungen:

Bild 47 zeigt den monatsweise ermittelten mittleren Luftwechsel in der Doppelfassade in Abhängigkeit des Durchflussbeiwerts der Lüftungsöffnungen. Je nach Durchflussbeiwert im Simulationsmodell werden Luftwechsel bis zu 141 h^{-1} bei einem Durchflussbeiwert von 0,75 erreicht. Der Heizwärmebedarf steigt gegenüber dem Referenzfall um bis $4,1 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, der Kühlenergiebedarf reduziert sich um bis zu $1,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Tabelle 18).

Da dieser Parameter einen deutlichen Einfluss auf das energetische Verhalten des Systems hat wird er für das neue Berechnungsmodell zur Ermittlung der Luftwechselrate berücksichtigt.

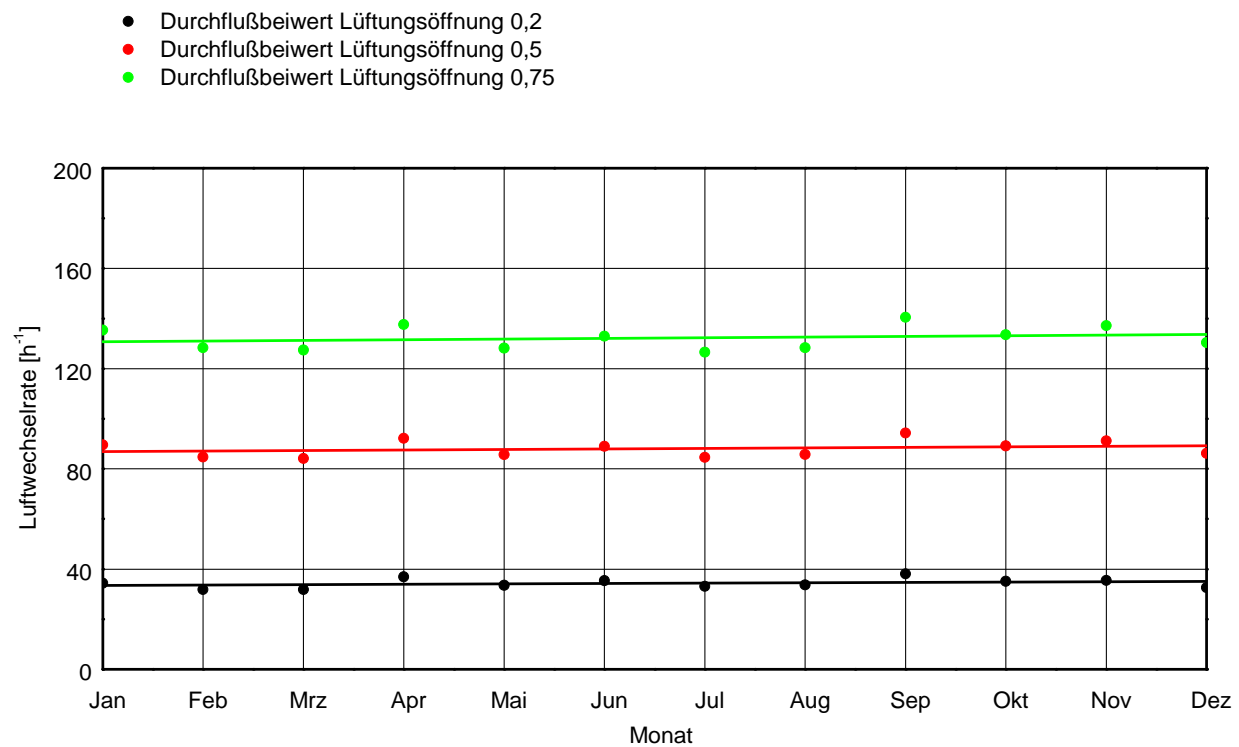


Bild 47: Berechneter, monatlicher Luftwechsel in der Doppelfassade bei Veränderung des Durchflussbeiwerts der Lüftungsöffnungen.

Tabelle 18: Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung in Bezug zur Grundvariante (= Versuchsraum M1, Referenzfall) bei Veränderung des Durchflussbeiwerts der Lüftungsöffnungen.

Durchflussbeiwert Lüftungsöffnung	n_{ref} [h ⁻¹]	n_{max} [h ⁻¹]	n_{min} [h ⁻¹]
		34,3	140,5
		Veränderung	
Nutzenergiebedarf Heizung [kWh/(m ² a)]	93,3	4,1	-0,3
Nutzenergiebedarf Kühlung [kWh/(m ² a)]	4,8	-1,5	0,1

4.2.3 Vereinfachtes Berechnungsmodell für die Normung

Mit Hilfe der vorangegangenen Parameteranalyse werden vier grundlegende Systemeigenschaften identifiziert, die den Luftwechsel innerhalb einer natürlich durchströmten Doppelfassade maßgeblich beeinflussen. Für das neue Berechnungsmodell werden diese Parameter berücksichtigt:

- Art der äußeren Verglasung
- Tiefe des Fassadenzwischenraums
- Öffnungsfläche der Lüftungsöffnungen
- Durchflußbeiwert der Lüftungsöffnungen

Eine Glasdoppelfassade wird zunächst hinsichtlich des Verglasungstyps in der äußeren Ebene unterschieden. In der Praxis kommen hier Einfach- oder Zweifachfachverglasungen vor. Danach ist die Tiefe des Fassadenzwischenraums anzugeben. Diese liegt bei üblichen Doppelfassadenkonstruktionen zwischen 0,5 m und 1,5 m. Für jede der Kombinationen aus äußerer Verglasung und Tiefe des Fassadenzwischenraums kann dann anhand der nachfolgend angegebenen Kennlinien eine Abschätzung des Luftwechsels innerhalb der Doppelfassade bei Kenntnis der Größe und Art der Lüftungsöffnungen erfolgen.

Für die Berechnung der entsprechenden Kennlinien werden zusätzliche instationäre Variantenrechnungen anhand des validierten Berechnungsmodells durchgeführt. Mit Hilfe der hierbei ermittelten Temperaturen in der Doppelfassade werden die entsprechenden Luftwechselraten gemäß Gleichung 6 berechnet. Die Steuer- und Regelungsgrößen am Modell werden entsprechend den Randbedingungen in Kapitel 3.2.1 eingestellt und als Wetterdatensatz TRY13 im Sinne der DIN V 18599 verwendet.

5 Beschreibung des neuen Berechnungsmodells

5.1 Anwendungshinweise

Das neue Berechnungsmodell dient dazu, Gebäude mit Glasdoppelfassaden im Rahmen der Energieeinsparverordnung und der damit verbundenen Rechenvorschrift DIN V 18599 auf einfache, im Planungsprozess handhabbare Weise energetisch nach dem Monatsbilanzverfahren bewerten zu können. Hierbei ist es erforderlich, die Anzahl der Randbedingungen und Parameter, die bei Glasdoppelfassaden eine Rolle spielen, zu beschränken.

Aufgrund dieses Ansatzes können nur bestimmte Typen von Glasdoppelfassaden bewertet werden. Hierzu zählen natürlich belüftete, geschossweise getrennte Glasdoppelfassaden. Die Belüftung der an die Doppelfassade angrenzenden konditionierten Räume erfolgt mechanisch. Die äußere Verglasung kann aus Ein- oder Zweischeibenverglasung bestehen, die Tiefe des Fassadenzwischenraums bis 1,5 m betragen. Weitere Bedingungen betreffen die Geometrie und Ausgestaltung der Zu- und Abluftöffnungen der Glasdoppelfassade. Hierauf wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

Weicht das zu betrachtende Doppelfassadensystem von den genannten Vorgaben ab, so muss dieses mit Hilfe instationärer Gebäudesimulation oder messtechnisch bewertet werden.

5.2 Berechnungsmodell

Das neue Berechnungsmodell basiert auf Kennlinien zur Ermittlung der Luftwechselrate im Fassadenzwischenraum einer Glasdoppelfassade. Es werden acht verschiedene Kennlinien ermittelt, die die Art der äußeren Verglasung, den Scheibenabstand zwischen äußerer und innerer Verglasung und die Größe und Art der Lüftungsöffnungen der äußeren Glasfassade mit Hilfe der aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche berücksichtigen.

Die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der äußeren Glasfassade $A_{\text{GDF,aero}}$ bestimmt sich aus der kleineren (=repräsentative) der Ansichtsflächen der Zu- bzw. Abluftöffnung (A_{GDF}) und dem Durchflussbeiwert $c_{\text{v,GDF}}$ der Öffnung.

$$A_{\text{GDF,aero}} = A_{\text{GDF}} \cdot c_{\text{v,GDF}} \quad \text{Gleichung 7}$$

Die ermittelten Kennlinien stellen jeweils einen linearen Zusammenhang zwischen der Luftwechselrate n_{ue} und der aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche für die verschiedenen Doppelfassadentypen her.

$$n_{\text{ue}} = z_{\text{GDF}} \cdot A_{\text{GDF,aero}} \quad \text{Gleichung 8}$$

n_{ue}	Die Luftwechselrate zwischen der angrenzenden unbeheizten oder ungekühlten Gebäudezone und Außen in h^{-1}
z_{GDF}	Abstandsabhängiger Luftwechselbeiwert (abhängig vom Scheibenabstand der Glasdoppelfassade)
$A_{\text{GDF,aero}}$	Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der äußeren Glasfassade in m^2/lfdm

Die auf diese Weise ermittelte Luftwechselrate n_{ue} wird zur Berechnung des Lüftungswärmetransferkoeffizienten gemäß DIN V 18599 verwendet.

5.3 Kennlinien Einfachverglasung außen

Bild 48 zeigt die Kennlinien zur Ermittlung der Luftwechselrate n_{ue} bei einer Glasdoppelfassade mit Einfachverglasung und Scheibenabständen von 0,5 / 0,7 / 1,0 und 1,5 m. Der entsprechende abstandsabhängige Luftwechselbeiwert kann Tabelle 19 entnommen werden.

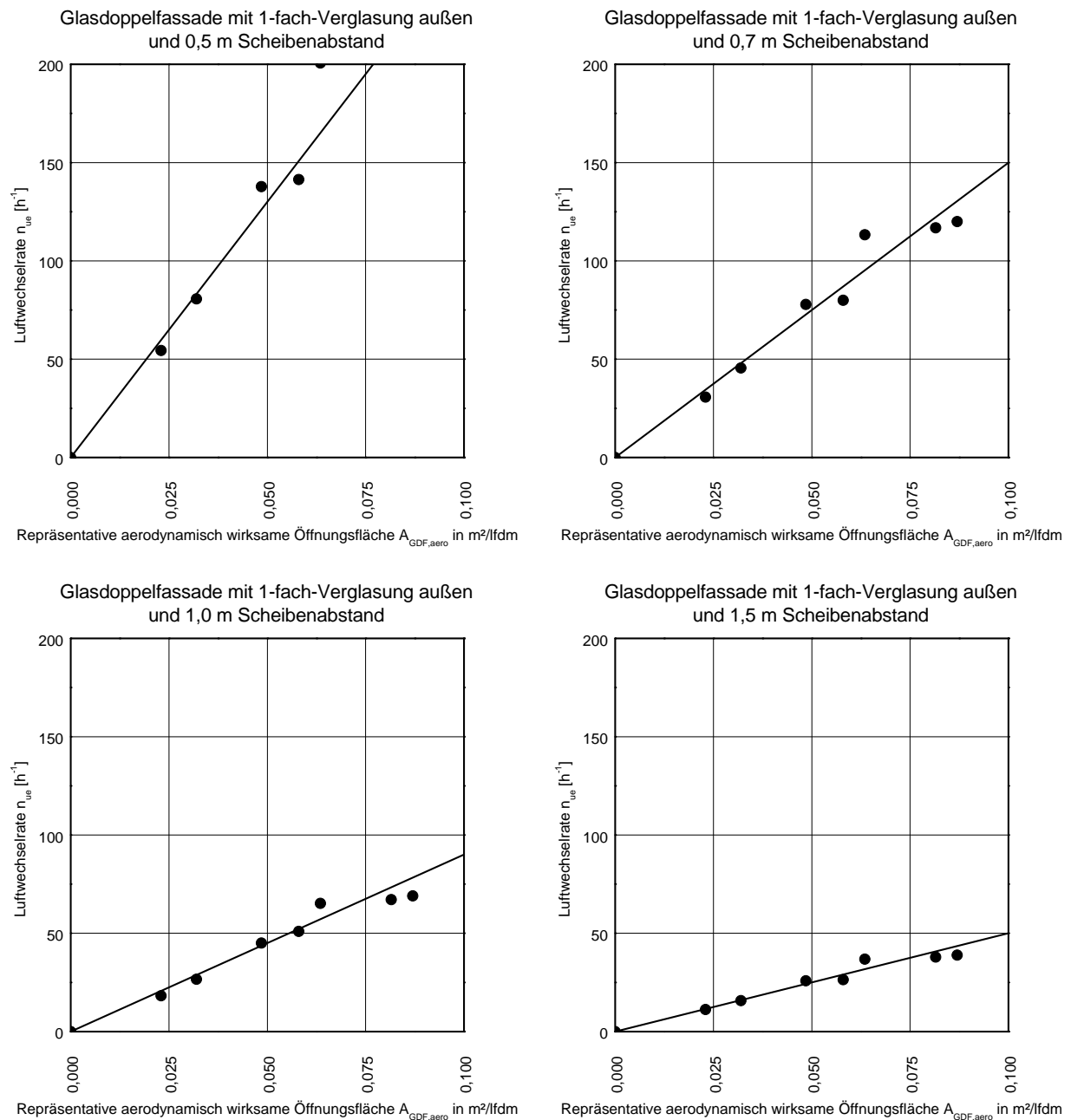


Bild 48: Kennlinien zur Ermittlung des Luftwechsels n_{ue} in der Doppelfassade bei außenliegender Einfachverglasung und Scheibenabstand von 0,5 bis 1,5 m.

Tabelle 19: Abstandsabhängige Luftwechselbeiwerte z_{GDF} bei einer Glasdoppelfassade mit Einfachverglasung außen.

Einfachverglasung außen	Scheibenabstand [m]			
	0,5	0,7	1,0	1,5
z_{GDF} [-]	2600	1500	900	500

5.4 Kennlinien Zweifachverglasung außen

Bild 49 zeigt die Kennlinien zur Ermittlung der Luftwechselrate n_{ue} bei einer Glasdoppelfassade mit Zweifachverglasung und Scheibenabständen von 0,5 / 0,7 / 1,0 und 1,5 m. Der entsprechende abstandsabhängige Luftwechselbeiwert kann Tabelle 20 entnommen werden.

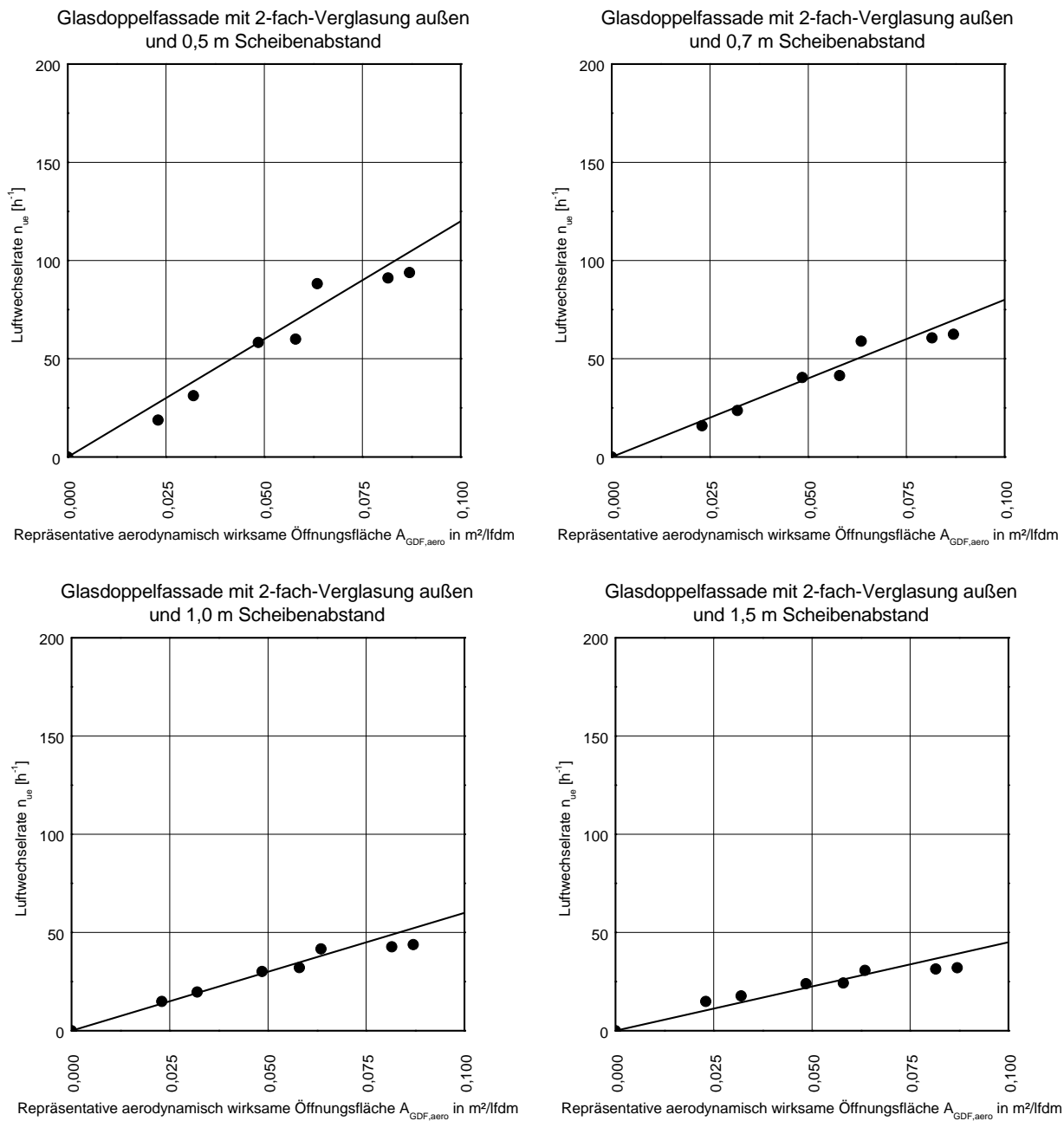


Bild 49: Kennlinien zur Ermittlung des Luftwechsels n_{ue} in der Doppelfassade bei außenliegender Einfachverglasung und Scheibenabstand von 0,5 bis 1,5 m.

Tabelle 20: Abstandsabhängige Luftwechselbeiwerte z_{GDF} bei einer Glasdoppelfassade mit Zweifachverglasung außen.

Zweifachverglasung außen	Scheibenabstand [m]			
	0,5	0,7	1,0	1,5
$z_{\text{GDF}} [-]$	1200	800	600	450

5.5 Veranschaulichung anhand der Versuchsrandbedingungen

Bei den Versuchsräumen am VERU betrug die Bruttoöffnungsfläche der Zu-/ Abluftöffnungen jeweils ca. 1 m². Bei einer Fassadenbreite von ca. 3,7 m ermittelt sich damit die repräsentative Anichtsfläche der Öffnung (A_{GDF}) zu 0,27 m²/lfm. Dies entspricht knapp 7 % in Bezug auf die gesamte Fassadenfläche von ca. 14,4 m² (Verglasung und Lüftungsöffnungen). Der Durchflußbeiwert $c_{\text{v,GDF}}$ des Wetterschutzgitters in Kombination mit der geöffneten Klappe beträgt etwa 0,09, so dass sich eine aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche von ca. 0,023 m²/lfm ergibt. Mit Hilfe der Kennlinie in Bild 48 für eine Glasdoppelfassade mit Einfachverglasung außen und einem Scheibenabstand von 0,7 m bzw. dem zugehörigen abstandsabhängigen Luftwechselbeiwert z_{GDF} gemäß Tabelle 19 lässt sich eine Luftwechselrate n_{ue} von $1500 \times 0,023 = 35 \text{ h}^{-1}$ ableiten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die energetische Bewertung von Gebäuden, die geschossweise unterteilte, natürlich durchströmten Glasdoppelfassaden (GDF) als Hüllflächen nutzen, erfordert aufwendige, dynamische Simulationsrechnungen, um die komplexen bauphysikalischen Vorgänge im Fassadenzwischenraum näherungsweise abbilden zu können. Hierbei besteht ein erhebliches Fehlerpotential hinsichtlich der modellhaften Abbildung der realen Verhältnisse, da viele Parameter nur empirisch erarbeitet oder abgeschätzt werden können, zum anderen sind diese Arbeiten i. d. R. zeit- und kostenintensiv.

Um die Fassadentechnologie Doppelfassade bereits im frühen Planungsstadium mit geringem Aufwand bewertbar zu machen und auch bei Bestandsgebäuden vereinfacht energetisch abbilden zu können, wird deshalb im Rahmen des Forschungsvorhabens „Bewertungsmethode GDF“ ein vereinfachtes Berechnungsmodell entwickelt, das sich der Herausforderung stellt, die komplexen bauphysikalischen Vorgänge innerhalb von Doppelfassaden mit Hilfe des in der DIN V 18599 zugrunde gelegten Monatsbilanzverfahren auf möglichst einfache, handhabbare Weise mit den wesentlichen bauphysikalischen Kennwerten abzubilden.

Hierzu werden an der Freilandversuchsstelle Holzkirchen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik messtechnische Untersuchungen an zwei unterschiedlichen Doppelfassaden durchgeführt. Diese dienen einerseits dazu, die Potentiale der beiden hinsichtlich des Aufheizverhaltens eher als Extreme anzusehenden Doppelfassaden darzustellen, andererseits werden anhand der Messergebnisse instationäre Simulationsmodelle validiert. Mit Hilfe der Simulationsrechnungen können nun weitere Doppelfassadeneigenschaften hinsichtlich ihrer energetischen Relevanz analysiert und schließlich die maßgeblichen Parameter zur Erarbeitung eines neuen Bewertungsmodells abgeleitet werden. Da sich das neue Rechenverfahren in die bisherige Berechnungsmethodik der DIN V 18599, die als Rechenvorschrift für die Nachweise im Rahmen der Energieeinsparverordnung integriert werden soll, integrieren lassen soll, wird die dort enthaltene Berechnungsmethode fortgeschrieben. Als zentrale Größe bei der Berechnung der mittleren monatlichen Temperatur in der Doppelfassade und damit für die energetische Bilanzierung dient hierbei der Luftwechsel im Fassadenzwischenraum n_{ue} . Mit Hilfe der Simulationsrechnungen können für unterschiedliche bauliche Randbedingungen der Doppelfassade Kennlinien zur Ermittlung dieses Luftwechsels erstellt werden. Diese sollen zukünftig den im bisherigen Modell pauschal angesetzten Luftwechsel von 10 h^{-1} ersetzen.

Die Praxiserfahrungen mit der neuen Rechenmethode werden zeigen, inwieweit sich das Modell bewährt und ob ggf. noch Anpassungen erforderlich werden. Hierzu sollte das Modell bei realen Objekten angewandt werden, von denen gleichzeitig entsprechende Messdaten vorliegen.

7 Literatur

- [1] DIN V 18599 Teil 1-10:2007-02
Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.
- [2] Erhorn, H. et al.: A simple calculation method for the energy performance of double skin facades
- [3] Streicher, W. et al.: BESTFACADE WP1 Report „State of the Art“, 2005
- [4] Erhorn, H. et al.: BESTFACADE WP4 Report „Simple calculation method“, 2007
- [5] Faist, A.P.: Double Skin Walls, Institut de technique du batiment, Departement d'Architecture, École Polytechnique Fédéral de Lausanne (EPFL), 1998
- [6] Hauser, G.: Energetische Wirkung einer durchströmten Glasfassade. TAB 20 (1989), H. 4, S. 329-338
- [7] Kalyanova, O. et al.: Literature Review of Double Skin Facades Modelling Approaches, Report for the IEA ANNEX 43 Task 34, November 2005, Aalborg University, Dänemark
- [8] Meyer, S.: Wirkung eines hybriden Doppelfassadensystems auf die Energiebilanz und das Raumklima der dahinter liegenden Räume, Dissertation, Eisenhüttenstadt 2001
- [9] Müller, H. et al.: Experimentelle Untersuchungen an Doppelfassaden. Arbeitspapier, 2003, Universität Dortmund
- [10] Oesterle et al.: Doppelschalige Fassaden – Ganzheitliche Planung, Callwey Verlag München, 1999
- [11] Pasquay, T.: Energetisches Verhalten von Doppelfassaden – Auswertung von drei gemessenen Beispielen, Dissertation, Universität Dortmund, 2002
- [12] Platzer, W.: Vorschlag für ein Bewertungsverfahren für Doppelfassaden, DIN Arbeitspapier, 2004, Fraunhofer ISE
- [13] Poirazis, H.: Single and Double Skin Glazed Office Buildings – Analyses of Energy Use and Indoor Climate, Dissertation Lund University, Schweden, 2008
- [14] Poirazis, H.: Double Skin Facades for Office Buildings, Literature Review, Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund Institute of Technology, Lund University, 2004

- [15] TRNSYS Version 16 Documentation, University of Wisconsin, USA (2007)
- [16] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV) Vom 24. Juli 2007, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 34, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2007
- [17] Weier, H.: Der Einfluss natürlich durchströmter Doppelfassaden auf die Strahlungsbelastung, Bauphysik 29 (2007), Heft 6
- [18] Ziller, C.: Modellversuche und Berechnungen zur Optimierung der natürlichen Lüftung durch Doppelfassaden. Dissertation, 1999, RWTH Aachen
- [19] NEN 2916: 2004, Basisdocument bepalingmethode energieprestatie utiliteitsgebouwen;
- [20] Flamant, G. et al.: Ventilated double facades, Determination of the energy performances of ventilated double facades by the use of simulation integrating the control aspects – Modelling aspects and assessment of the applicability of several simulation software, Belgian Building Research Institute (BBRI), 2004
- [21] Streicher, W.: Untersuchungen Schule Baden (Österreich), Institut für Wärmetechnik, TU Graz
- [22] Sinnesbichler, H. et al.: Weiterentwicklung und Evaluierung von Technologien und von Bewertungsmethoden zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EnEff06), IBP-Bericht WTB-02-2007
- [23] Christoffer, J.; Deutschländer, T.; Webs, M. 2004 Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse TRY, Selbstverlag Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- [24] DIN EN ISO 6946:2003-10, Bauteile, Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Berechnungsverfahren.
- [25] DIN EN ISO 13789:1999-10, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Spezifischer Transmissionswärmeverlustkoeffizient, Berechnungsverfahren
- [26] Zürcher, Ch.; Frank, Th.: Bauphysik – Bau und Energie, Leitfaden für Planung und Praxis, Hochschulverlag an der ETH Zürich, 1998