

IBP Bericht ESB-005/2014 K HOKI

Messtechnische Überprüfung und Weiterentwicklung der vereinfachten Berechnungsmethode für Glasdoppelfassaden (GDF) nach DIN V 18599 anhand realer Gebäude (Monitoring GDF)

Abschlussbericht

Durchgeführt im Auftrag
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

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

Abteilungsleiter



Tekn. Dr. Dietrich Schmidt

Bearbeiter



Dr.-Ing. Ingo Heusler



Dipl.-Ing. Herbert Sinnesbichler

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht ESB-005/2014 K HOKI

Messtechnische Überprüfung und Weiterentwicklung der vereinfachten Berechnungsmethode für Glasdoppelfassaden (GDF) nach DIN V 18599 anhand realer Gebäude (Monitoring GDF)

Abschlussbericht

Durchgeführt im Auftrag
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Der Bericht umfasst
99 Seiten Text
55 Tabellen
31 Abbildungen

Dr.-Ing. Ingo Heusler
Dipl.-Ing. Herbert Sinnesbichler

Holzkirchen, 30. April 2014

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) unter dem Aktenzeichen SF-10.08.18.7-11.37 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Industriepartner war die:

- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft Aktiengesellschaft in München (im Folgenden „Munich Re“)

Externe Berater waren:

- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anton Maas (Universität Kassel)
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder (Technische Universität München)

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

Der Münchener Rück AG sowie der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. danken wir für die Bereitstellung der Untersuchungsgebäude.

Inhalt

1	Einleitung und Aufgabenstellung	5
2	Untersuchungsgebäude und Messtechnik	6
2.1	Fraunhofer Haus	7
2.2	Gedonstraße	12
2.3	Mandlstraße	16
2.4	Münchner Tor	20
3	Rechengrundlagen zur Vorhersage der Temperatur im Fassadenzwischenraum	24
3.1	Bilanzgleichung	24
3.2	Wärmestrom in die Glasdoppelfassade durch Solarstrahlung oder interne Wärmequellen	25
3.3	Innentemperatur der Gebäudezone	26
3.4	Wärmetransfer durch Transmission zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade	26
3.5	Wärmetransfer durch Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade	27
3.6	Außentemperatur	27
3.7	Wärmetransfer durch Transmission zwischen Glasdoppelfassade und außen	27
3.8	Wärmetransfer durch Luftaustausch zwischen Glasdoppelfassade und außen	28
4	Auswertung	30
4.1	Fraunhofer Haus	30
4.1.1	Messung	30
4.1.2	Vergleich Messung – Rechnung	34
4.1.2.1	Basisvariante	34
4.1.2.2	Variante 1 - Berücksichtigung Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade	39
4.1.2.3	Variante 2 – Berücksichtigung des gemessenen effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades	45
4.1.2.4	Variante 3: Bisheriger Ansatz pauschaler Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$	47
4.2	Gedonstraße	49
4.2.1	Messung	49
4.2.2	Vergleich Messung – Rechnung	53
4.2.2.1	Basisvariante BV	53

4.2.2.2	Variante 1 – Berücksichtigung Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade	57
4.2.2.3	Variante 2 – Berücksichtigung des gemessenen effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades	62
4.2.2.4	Variante 3 – Bisheriger Ansatz pauschaler Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$	64
4.3	Mandlstraße	66
4.3.1	Messung	66
4.3.2	Vergleich Messung – Rechnung	70
4.3.2.1	Basisvariante	70
4.3.2.2	Variante 1 - Berücksichtigung Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade	73
4.3.2.3	Variante 3: Bisheriger Ansatz pauschaler Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$	74
4.4	Münchner Tor	76
4.4.1	Messung	76
4.4.2	Vergleich Messung – Rechnung	79
4.4.2.1	Basisvariante	79
4.4.2.2	Variante 1 - Berücksichtigung Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade	82
4.4.2.3	Variante 2 – Berücksichtigung des gemessenen effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades	84
4.4.2.4	Variante 3: Bisheriger Ansatz pauschaler Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$	85
4.5	Einfluß der Genauigkeit der Temperatur im Fassadenzwischenraum auf den Nutzenergiebedarf	87
5	Diskussion und normative Relevanz der Ergebnisse	92
6	Zusammenfassung und Ausblick	96
7	Literaturverzeichnis	98

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die für die DIN V 18599 [2] modifizierte, vereinfachte Berechnungsmethode zur energetischen Bewertung von Glasdoppelfassaden wurde anhand eines messtechnisch validierten Simulationsmodells entwickelt [8]. Es wird das komplexe, instationäre Verhalten unterschiedlicher, marktüblicher, natürlich belüfteter Glasdoppelfassaden anhand weniger maßgeblicher Parameter beschrieben. Dadurch ist es möglich, Glasdoppelfassaden mit einem statischen Verfahren anhand von Monatsmittelwerten energetisch zu bewerten. Bei der Aufstellung des vereinfachten Rechenverfahrens wurden bestimmte Annahmen und Annäherungen getroffen, die aufgrund der damals verfügbaren Datenlage plausibel und gerechtfertigt waren. Es ist jedoch notwendig, zu überprüfen, ob die Rechenmethode mit ausreichender Genauigkeit reale Glasdoppelfassaden unterschiedlicher Bauart und Lage abbilden kann. Da die Rechenmethode mittlerweile in DIN V 18599-2 [3] verankert und zur Berechnung im Rahmen der Nachweise nach Energieeinsparverordnung [14] regelmäßig angewendet wird, ist eine messtechnische Validierung an realen Gebäuden mit Glasdoppelfassade angebracht. Mit Hilfe der hierbei gewonnenen Messdaten kann das Rechenmodell überprüft und gegebenenfalls bei Bedarf weiterentwickelt werden, so dass die Rechenmethode eine breitere Grundlage erhält.

2 Untersuchungsgebäude und Messtechnik

Für die messtechnischen Untersuchungen werden geeignete Gebäude mit natürlich belüfteten Glasdoppelfassaden gewählt, deren wesentliche bauphysikalische Kenngrößen bekannt sind (z. B. Kennwerte von Fenstern und opaken Fassadenbauteilen, Betriebsweise des Sonnenschutzes etc.). Für die Untersuchungen stehen folgende Gebäude in München zur Verfügung:

- Fraunhofer Zentralverwaltung der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. („Fraunhofer Haus“)
- Munich Re – Geschäftsgebäude Süd 1, Gedonstraße
- Munich Re – Geschäftsgebäude Nord 4, Mandlstraße
- Munich Re – Geschäftsgebäude am Münchner Tor, Am Münchner Tor 1

Für jedes Gebäude wird ein geeignetes Messwerterfassungs- und Übertragungssystem aufgebaut, das die vorhandenen baulichen Gegebenheiten, die vorhandene messtechnische Infrastruktur sowie eventuell vorhandene Schnittstellen zur Gebäudeleittechnik berücksichtigt. Sämtliche Messdaten werden am Standort Holzkirchen des Fraunhofer-Institut für Bauphysik zentral über das am Institut entwickelte, webbasierte Messsystem Imedas™ aufgezeichnet und für die Auswertungen zur Verfügung gestellt. Die Messdaten werden einheitlich mit dem Zeitstempel der Mitteleuropäischen Zeit (MEZ = UTC+1) abgelegt.

Je Gebäude werden 6 Messräume (Mandlstraße 5 Messräume) mit je 2 unterschiedlich orientierten Glasdoppelfassaden in 3 unterschiedlichen Gebäudehöhen (unterer Bereich, mittlerer Bereich, oberer Bereich) gewählt, um den Einfluß unterschiedlicher Orientierungen und Höhenlagen der Glasdoppelfassade auf die Temperatur im Fassadenzwischenraum zu erfassen. Die solare Einstrahlung je gewählter Fassadenorientierung wird jeweils am Dach der Untersuchungsgebäude erfasst. Die Außenlufttemperatur wird nach Möglichkeit ebenfalls am Dach des Gebäudes gemessen (Fraunhofer Haus, Gedonstraße). Bei den Gebäuden Münchner Tor und Mandlstraße war die entsprechende Sensormontage nicht möglich, so dass für das Münchner Tor die Außenlufttemperatur vom Fraunhofer Haus bzw. Wetterdaten vom Deutschen Wetterdienst der Station München Museumsinsel und für die Mandlstraße die Außenlufttemperatur des nahe gelegenen Gebäudes in der Gedonstraße verwendet wird. Teilweise können noch weitere meteorologische Größen (z. B. Windgeschwindigkeit) der entsprechenden Gebäudeleittechnik (GLT) für die Auswertungen genutzt werden. Die im Einzelnen je Gebäude für die Auswertungen nutzbaren Messgrößen werden in den folgenden Kapiteln aufgeführt.

2.1 Fraunhofer Haus

Das Gebäude befindet sich in München-Sendling in unmittelbarer Nähe zum Mittleren Ring. Es umfasst einen Hochhausbereich mit 18 Stockwerken und einen anschließenden Nordflügel, der ohne Glasdoppelfassade ausführt ist (Bild 1).



Bild 1: Hochhausbereich des Fraunhofer Hauses (linkes Foto: zu erkennen sind die geöffneten, je Etage unten und oben versetzt angeordneten Lüftungsklappen) und Nordflügel (rechtes Foto).

Die Glasdoppelfassade am Fraunhofer Haus zeichnet sich durch folgende Merkmale aus (siehe Bild 2):

- Tiefe des Fassadenzwischenraums ca. 65 cm
- Lamellenraffstore im Fassadenzwischenraum
- Natürlich durchlüftet über versetzt angeordnete, motorisch betriebene Lüftungsklappen im Brüstungs-/Sturzbereich
- Zonenweise Steuerung der Lüftungsklappen
- Geschossweise Unterteilung des Fassadenzwischenraums



Bild 2: Blick in den Fassadenzwischenraum der Glasdoppelfassade, Foto oben links: gerader Blick in den Fassadenzwischenraum; Foto oben rechts: Blick nach unten mit ausgesetzter Lüftungsklappe; Foto unten: Blick nach oben mit ausgesetzter Lüftungsklappe und Lamellenraffstore.

Im Hochhausteil mit Glasdoppelfassade befinden sich die südwest- und südost-orientierten Messräume

2. OG: 2.04 und 2.06

8. OG: 8.06 und 8.08

15. OG : 15.06 und 15.08


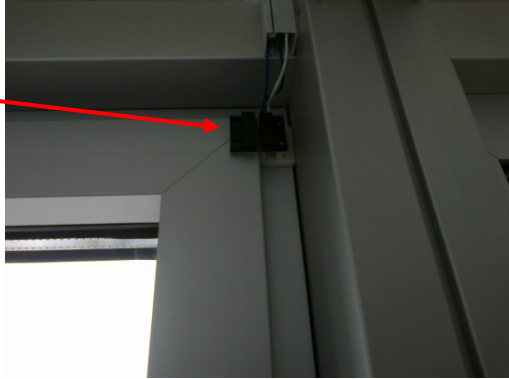
sowie die Wetterstation.

Der Schließzustand des Sonnenschutz-Raffstores im Fassadenzwischenraum wird über eine Differenzmessung zweier Beleuchtungsstärkesensoren vor und hinter dem Sonnenschutz ermittelt. Der Öffnungszustand der Fenster in den Messräumen wird über in Reihe geschaltete Fensterkontakte erfasst. Der Öff-

nungszustand der motorisch gesteuerten Lüftungskappen der Glasdoppelfassade wird von der Gebäudeleittechnik über eine entsprechende Schnittstelle an die Datenerfassung übergeben. Zudem kann auf die Außenlufttemperatur sowie weitere meteorologische Daten am Standort über die Gebäudeleittechnik zurückgegriffen werden. Die Messdaten wurden vom 1.11.2012 bis 1.11.2013 mit einer Abtastrate von 5 min aufgezeichnet.

Zusammenfassend stehen am Fraunhofer Haus die Messgrößen gemäß Tabelle 1 zur Verfügung:

Tabelle 1: Messgrößen Fraunhofer Haus.

Messgröße	Foto Sensorik
Raum	
Raumlufttemperatur (Strahlungsgeschützter PT-100-Sensor)	
Öffnungszustand der Fenster (Magnetischer Fensterkontakt)	

Messgröße	Foto Sensorik
Glasdoppelfassade	
Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum (Strahlungsgeschützter PT-100-Sensor, Strahlungsschutz auf Foto noch nicht montiert)	
Öffnungszustand Sonnenschutz (Differenzmessung Beleuchtungsstärke)	
Öffnungszustand Lüftungsklappen	Stellwert von 0 – 100 % aus der Gebäudeleittechnik; 0 % bedeutet Lüftungsklappe geschlossen, 100 % entspricht in etwa einem Öffnungswinkel von 45°
Wetter	
Außenlufttemperatur	Vorhandene Wetterstation am Dach des Hochhauses, Erfassung über Gebäudeleittechnik.
Gesamtstrahlung auf Fassade (Pyranometer Kipp + Zonen CMP11, Foto vom Gebäude Mandlstraße)	
Windgeschwindigkeit	Vorhandene Wetterstation am Dach des Hochhauses,

Messgröße	Foto Sensorik
	Erfassung über Gebäudeleittechnik.
Windrichtung	Vorhandene Wetterstation am Dach des Hochhauses, Erfassung über Gebäudeleittechnik.

Weitere Angaben zur Messtechnik können [6] entnommen werden.

2.2 Gedonstraße

Das Gebäude mit 5 Etagen (EG bis 4. OG) befindet sich in München-Schwabing (siehe Bild 3) in unmittelbarer Nähe zum Englischen Garten.



Bild 3: Fotografische Ansicht des Untersuchungsgebäudes Gedonstraße.

Die Glasdoppelfassade am vorliegenden Untersuchungsgebäude zeichnet sich durch folgende Merkmale aus (siehe Bild 4):

- Tiefe des Fassadenzwischenraums zwischen 50 und 65 cm (geschuppte Ausführung der außenliegenden Fassade)
- Textil-Rollo im Fassadenzwischenraum
- Natürlich durchlüftet (geschuppte Ausführung der äußeren Fassade, dadurch alle 1,875 m vertikaler Lüftungsspalt, lichte Öffnungsbreite 8,5 cm, außerdem ca. 1-2 cm breiter Spalt an der inneren Fassaden-ebene, so dass eine gewisse vertikale Durchströmung des Fassadenzwischenraums möglich ist)
- Geschossweise Unterteilung des Fassadenzwischenraums



Bild 4: Blick in den Fassadenzwischenraum der Glasdoppelfassade, oberes Foto: Blick auf den Boden; unteres Foto links: Blick nach oben zum Textilrollo; .unteres Foto rechts: Blick geradeaus in den Fassadenzwischenraum.

Bei den Messräumen handelt es sich um Büroräume an der Süd- bzw. Nordfassade:

EG: 0.202 und 0.280

2. OG: 2.200 und 2.280



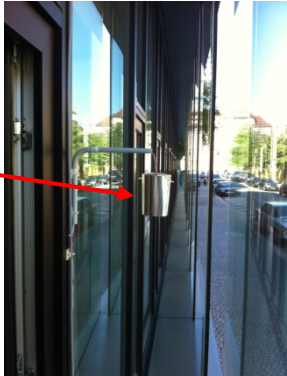
4. OG : 4.200 und 4.280


Die Stellwerte der Behanglänge des Sonnenschutz-Textilrollos im Fassadenzwischenraum werden von der GLT übergeben. Die zur Verfügung gestellten Daten sind jedoch sehr lückenhaft, so dass für die Auswertungen nur die Monate November 2012 sowie Mai bis Juli 2013 herangezogen werden konnten (vgl. Kapitel 4.2.2.3). Der Öffnungszustand der Fenster in den Messräumen wird über in Reihe geschaltete Fensterkontakte bestimmt. Für die Aufzeichnung der Wetterdaten wurde eine Wetterstation auf dem Dach des Gebäudes installiert.

Die Messdaten liegen zwischen 27.08.2012 und 1.11.2013 mit einer Abtastrate von einer bzw. 5 min vor.

Zusammenfassend werden am Gebäude Gedonstraße die Messgrößen gemäß Tabelle 2 ermittelt.

Tabelle 2: Messgrößen Gedonstraße.

Messgröße	Foto Sensorik
Raum	
Raumlufttemperatur (Strahlungsgeschützter PT-100-Sensor)	
Öffnungszustand der Fenster (Magnetischer Fensterkontakt)	
Glasdoppelfassade	
Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum (Strahlungsgeschützter PT-100-Sensor)	

Messgröße	Foto Sensorik
Öffnungszustand Sonnenschutz	GLT-Daten
Wetter	
Außenlufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung	Vaisala-Wetterstation (Montage am selben Mast wie Pyranometer); Datenerfassung ab 24.10.2012, davor Verwendung von Wetterdaten des DWD
Gesamtstrahlung auf Fassade (Pyranometer Kipp + Zonen CMP11)	 <p>The photograph shows a vertical metal mast on a rooftop. At the top, there is a weather station with a wind direction sensor. Below it, a red arrow points to a smaller sensor, likely the pyranometer mentioned in the text. The background shows a cityscape with red-tiled roofs under a clear blue sky.</p>

2.3 Mandlstraße

Das Gebäude mit 3 Stockwerken befindet sich in München-Schwabing (siehe Bild 5) in unmittelbarer Nähe zum Englischen Garten.



Bild 5: Fotografische Ansicht des Untersuchungsgebäudes Mandlstraße.

Die Glasdoppelfassade am vorliegenden Untersuchungsgebäude zeichnet sich durch folgende Merkmale aus (siehe Bild 6):

- Tiefe des Fassadenzwischenraums 110 cm
- Textil-Rollo im Fassadenzwischenraum
- Natürlich durchlüftet (umlaufende Lüftungsöffnung an äußerer Fassadenebene)
- Geschossweise Unterteilung des Fassadenzwischenraums



Bild 6: Blick in den Fassadenzwischenraum der Glasdoppelfassade, oberes Foto: Blick nach oben mit Textilrollo; unteres Foto links: Blick auf die GDF von außen; unteres Foto rechts: gerader Blick in den Fassadenzwischenraum.

Bei den Messräumen handelt es sich um Großraum-Büroräume an der Südwest- bzw. Südostfassade:

EG:	0.148
1. OG:	1.148 und 1.130
2. OG :	2.148 und 2.130



Die Stellwerte der Behanglänge des Textilrollos im Fassadenzwischenraum können im vorliegenden Fall nicht über die GLT zur Verfügung gestellt werden. Eine Erfassung der Fensteröffnungszeiten wird aufgrund der Großraumbürosituation nicht umgesetzt: es ist keine eindeutige Zuordnung von Fenstern zu Büroräumen möglich. Hinsichtlich der Außenlufttemperatur und Windgeschwindigkeit wird auf die IBP-Wetterstation am nahegelegenen Untersuchungsgebäude in der Gedonstraße zurückgegriffen. Die Strahlungsdaten je Untersuchungsfas-

sade werden wiederum am Dach des Untersuchungsgebäudes messtechnisch bestimmt. Die Messdatenerfassung startet am 24.11.2012 mit einer Abtastrate von 5 min.

Zusammenfassend stehen am Gebäude Mandlstraße die Messgrößen gemäß Tabelle 3 zur Verfügung.

Tabelle 3: Messgrößen Mandlstraße.

Messgröße	Foto Sensorik
<p>Raum</p> <p>Raumlufttemperatur (Strahlungsgeschützter PT-100-Sensor)</p>	

Messgröße	Foto Sensorik
Glasdoppelfassade	
Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum (Strahlungsgeschützter PT-100-Sensor)	
Wetter	
Außenlufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung	IBP-Wetterstation Gedonstraße
Gesamtstrahlung auf Fassade (Pyranometer Kipp + Zonen CMP11)	

2.4 Münchner Tor

Das Gebäude befindet sich in München-Schwabing (siehe Bild 7) in unmittelbarer Nähe zum Mittleren Ring.



Bild 7: Fotografische Ansicht des Untersuchungsgebäudes Münchner Tor.

Die Glasdoppelfassade am vorliegenden Untersuchungsgebäude zeichnet sich durch folgende Merkmale aus (siehe Bild 8):

- Tiefe des Fassadenzwischenraums 28 cm
- Lamellenraffstore im Fassadenzwischenraum
- Fassadenzwischenraum natürlich durchlüftet (Feststehende Lüftungs-klappen)
- Geschossweise und vertikale Gliederung des Fassadenzwischenraums





Bild 8: Blick in den Fassadenzwischenraum der Glasdoppelfassade, linkes Foto: Blick nach oben mit Lamellenraffstore; rechtes Foto: Blick auf die Brüstung.


Bei den Messräumen handelt es sich um einen leerstehenden Büroraum (Nordwestfassade 4.172), einen Besprechungsraum (Nordwest-/Südwestfassade 18.108), einen Aktenraum (Nordwestfassade 11.154) sowie Kopierräume (Südostfassade 4.248, 11.242, 18.244).

Die Stellwerte der Behanglänge und des Lamellenwinkels des Sonnenschutz-Raffstores im Fassadenzwischenraum werden über die GLT in regelmäßigen Abständen als Datenpakete zur Verfügung gestellt. Auf die GLT-Messdaten der Außenlufttemperatur sowie weitere meteorologische Daten am Standort kann nicht zurückgegriffen werden. Für die Außenlufttemperatur und Windgeschwindigkeit werden die Daten vom Fraunhofer Haus bzw. Daten des Deutschen Wetterdienstes „München Museumsinsel“ verwendet. Die Strahlungsdaten werden vor Ort am Dach über Pyranometer gemessen. Die Messdaten werden seit 2.08.2012 mit einer Abtastrate von 5 min und in lokaler Zeit abgespeichert.

Zusammenfassend werden am Gebäude Münchner Tor die Messgrößen gemäß Tabelle 4 genutzt.

Tabelle 4: Messgrößen Münchner Tor.

Messgröße	Foto Sensorik
Raum	
Raumlufthtemperatur (Strahlungsgeschützter PT-100-Sensor)	
Glasdoppelfassade	
Lufttemperatur im Fasadenzwischenraum (Strahlungsgeschützter PT-100-Sensor)	
Öffnungszustand Sonnenschutz	GLT-Daten
Wetter	
Außenlufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung	Wetterstation Fraunhofer Haus und DWD München Museumsinsel

Messgröße	Foto Sensorik
Gesamtstrahlung auf Fassade (Pyranometer Kipp + Zonen CMP11)	 A photograph showing a pyranometer sensor mounted on a rooftop. The sensor is a white dome-shaped device on a vertical pole. A red arrow points from the right side of the image towards the base of the sensor pole where it is secured to the roof structure. The background shows a cityscape under a cloudy sky.

3 Rechengrundlagen zur Vorhersage der Temperatur im Fassadenzwischenraum

Bei der Vorhersage der Temperatur im Fassadenzwischenraum von natürlich belüfteten Glasdoppelfassaden spielt der sich einstellende Luftwechsel zur Außenumgebung n_{ue} eine maßgebliche Rolle. Die Höhe des Luftwechsels wird von den Druckverhältnissen aufgrund des thermischen Auftriebs und des Windeinflusses an der Fassade bestimmt. Die Ausgestaltung einer Glasdoppelfassade und deren Fassadengeometrie beeinflussen diese dynamischen Prozesse.

In [8] wurde anhand von dynamischen Simulationsrechnungen in Kombination mit Messungen an typischen Glasdoppelfassaden unter Freilandbedingungen ein Modell entwickelt, das anhand weniger Parameter der Glasdoppelfassade den Luftwechsel im Fassadenzwischenraum abschätzt und damit einen wichtigen Kennwert zur Berechnung der Temperatur im Fassadenzwischenraum liefert. In DIN V 18599-2 [3], Kapitel 6.4.3.4 ist das Verfahren implementiert.

Im Folgenden werden die einzelnen Rechenschritte zur Bestimmung der Temperatur im Fassadenzwischenraum erläutert.

3.1 Bilanzgleichung

Die Temperatur im Fassadenzwischenraum θ_u ergibt sich aus der Wärmebilanz im unbeheizten Vorbau (Bild 9) unter stationären Bedingungen nach Gleichung (1).

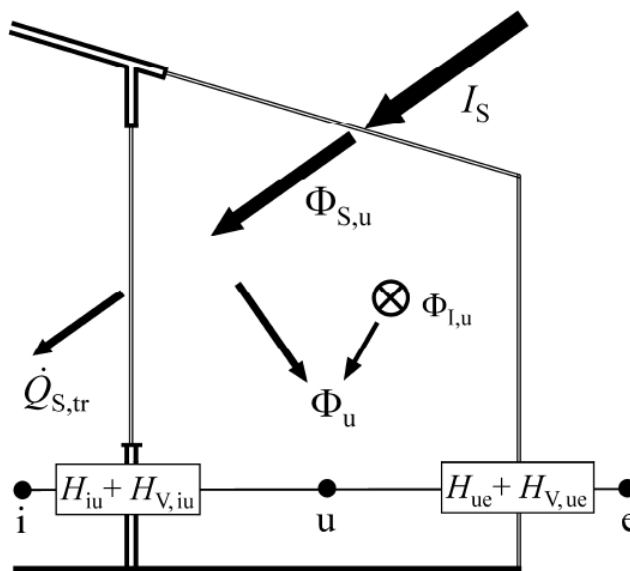


Bild 9: Schematische Darstellung der für Glasdoppelfassaden zu berücksichtigenden Größen [3].

$$\theta_u = \frac{\Phi_u + \theta_i(H_{T,iu} + H_{V,iu}) + \theta_e(H_{T,ue} + H_{V,ue})}{H_{T,iu} + H_{V,iu} + H_{T,ue} + H_{V,ue}} [^\circ\text{C}] \quad (1)$$

3.2 Wärmestrom in die Glasdoppelfassade durch Solarstrahlung oder interne Wärmequellen

Der Wärmestrom Φ_u , der aufgrund solarer Wärmeeinwirkung oder interner Wärmequellen in die Glasdoppelfassade gelangt ermittelt sich gemäß Gleichung (2):

$$\Phi_u = \sum \Phi_{S,u} - \frac{\sum Q_{S,tr}}{t} + \sum \Phi_{i,u} [\text{W}] \quad (2)$$

Der Anteil $\sum \Phi_{S,u}$ summiert die solare Einstrahlung in die Glasdoppelfassade, die dort zur Erwärmung beiträgt. Davon abzuziehen ist der Anteil der solaren Einstrahlung, der direkt in die dahinterliegende Zone gelangt ($\sum Q_{S,tr}/t$). Hierbei werden die unterschiedlichen Schaltzustände eines möglichen Sonnenschutzes und damit die unterschiedlichen Solareinträge zeitlich gewichtet. Schließlich können noch interne Wärmequellen $\sum \Phi_{i,u}$ im Fassadenzwischenraum zu dessen Erwärmung beitragen. Bei den vorliegenden Untersuchungsgebäuden befinden sich keine internen Wärmequellen innerhalb der Glasdoppelfassaden. Der erste Term der Gleichung (2) berechnet sich wie folgt:

$$\Phi_{S,u} = F_{F,ue} A_{ue} g_{eff,ue} I_S [\text{W}] \quad (3)$$

$F_{F,ue}$	Anteil transparente Fläche zu Gesamtfläche äußere Fassade [-]
A_{ue}	Fläche der äußeren Fassade [m^2]
$g_{eff,ue}$	effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad der äußeren Verglasung [-]
I_S	Mittlere, monatliche Strahlungsintensität auf Fassade [W/m^2] (aus Messung)

Die äußere Fassadenebene ist bei allen Untersuchungsgebäuden ohne Sonnenschutzvorrichtung ausgeführt, der effektive Gesamtenergiedurchlassgrad berechnet sich daher in allen Fällen wie folgt:

$$g_{eff,ue} = F_S F_W F_V g_{\perp} [-] \quad (4)$$

F_S	Abminderungsfaktor für Verschattung [-]
F_W	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls [-]
F_V	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung [-]
g_{\perp}	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung [-]

Der zweite Term der Gleichung (2) berechnet sich je Zeitabschnitt t mit bestimmter Sonnenschutzstellung wie folgt:

$$Q_{S,tr} = F_{F,iu} A_{iu} g_{eff,iu} F_{F,ue} \tau_{e,ue} I_S t [\text{Wh}] \quad (5)$$

$F_{F,iu}$	Anteil transparente Fläche zu Gesamtfläche innere Fassade [-]
A_{iu}	Fläche der inneren Fassade [m ²]
$g_{eff,iu}$	effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad der inneren Verglasung im Zeitintervall t [-]
$F_{F,ue}$	Anteil transparente Fläche zu Gesamtfläche äußere Fassade [-]
$\tau_{e,ue}$	Transmissionsgrad der äußeren Verglasung [-]
t	Zeitintervall mit bestimmtem Schaltzustand des Sonnenschutzes oder ohne aktivierten Sonnenschutz [h]

Die DIN V 18599 geht bei der Ermittlung des effektiven Gesamtenergiedurchlassgrads von folgenden baulichen Möglichkeiten aus:

- Variabler Sonnenschutz an der Fassade
In diesem Fall ist nicht zusätzlich bauliche Verschattung zu erwarten (bei ausreichender baulicher Verschattung muss planerisch kein zusätzlicher Sonnenschutz vorgesehen werden).
- Kein Ansatz eines Sonnenschutzes bei ausreichender baulicher Verschattung

Es wird angenommen, dass sich o.g. Fälle grundsätzlich nicht überlagern. Der effektive Gesamtenergiedurchlassgrad ergibt sich entsprechend aus dem kleineren der beiden ermittelten Werte:

$$g_{eff,iu} = F_W F_V \min \left\{ a g_{tot} + (1 - a) g_{\perp}, F_S g_{\perp} \right\} \quad (6)$$

a	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen Sonnenschutzvorrichtungen [-]
g_{tot}	Gesamtenergiedurchlassgrad der inneren Verglasung einschließlich Sonnenschutzvorrichtung [-]

3.3 Innentemperatur der Gebäudezone

Die (Bilanz-) Innentemperatur θ_i der an den betrachteten Glasdoppelfassadenabschnitt angrenzenden Gebäudezone wird messtechnisch bestimmt (vgl. Kapitel 2).

3.4 Wärmetransfer durch Transmission zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade

Der Wärmetransferkoeffizient für Transmission $H_{T,iu}$ zwischen der betrachteten Gebäudezone und der benachbarten (unbeheizten oder ungekühlten) Glasdoppelfassade wird nach Gleichung (7) bestimmt:

$$H_{T,iu} = \sum(U_j A_j) + \Delta U_{WB} \sum A_j \text{ [W/K]} \quad (7)$$

U_j	Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils j der Gebäudehülle [W/(m ² K)]
A_j	Fläche eines Bauteils j, das die Gebäudezone zur Glasdoppelfassade hin begrenzt [m ²]
ΔU_{WB}	pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag [W/(m ² K)]

3.5 Wärmehmettransfer durch Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade

Der Lüftungswärmehmettransferkoeffizient $H_{V,iu}$ zwischen der betrachteten Gebäudezone und der benachbarten (unbeheizten oder ungekühlten) Glasdoppelfassade wird nach Gleichung (8) bestimmt:

$$H_{V,iu} = n_{iu} V c_{p,a} \rho_a \text{ [W/K]} \quad (8)$$

n_{iu}	Luftwechselrate zwischen der betrachteten Gebäudezone und der benachbarten (unbeheizten oder ungekühlten) Glasdoppelfassade [h ⁻¹]
V	Nettoraumvolumen der betrachteten Gebäudezone [m ³]
$c_{p,a}$	spezifische Wärmehmetkapazität von Luft [Wh/(kgK)]
ρ_a	Dichte von Luft [kg/m ³]

Nach DIN V 18599-2, Kapitel 6.1.4.5 ist $H_{V,iu}$ in der Regel zu Null zu setzen. Bei den vorliegenden Untersuchungsgebäuden können jedoch die Fenster zur Glasdoppelfassade geöffnet werden, so dass diese Größe unter Umständen zu berücksichtigen ist. In Kapitel 4 wird hierauf eingegangen.

3.6 Außentemperatur

Die durchschnittliche Außentemperatur θ_e des Monats wird am Dach der Untersuchungsgebäude Gedonstraße und Fraunhofer Haus messtechnisch erfasst (vgl. Kapitel 2). Des Weiteren stehen Daten der DWD-Wetterstation München Museumsinsel zur Verfügung.

3.7 Wärmehmettransfer durch Transmission zwischen Glasdoppelfassade und außen

Der Wärmehmettransferkoeffizient für Transmission $H_{T,ue}$ der Bauteile der Glasdoppelfassade nach außen wird nach Gleichung (9) bestimmt:

$$H_{T,ue} = \sum(U_j A_j) + \Delta U_{WB} \sum A_j \text{ [W/K]} \quad (9)$$

U_j	Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils j der äußeren Ebene der Glasdoppelfassade [W/(m ² K)]
A_j	Fläche eines Bauteils j , das die Glasdoppelfassade nach außen abgrenzt [m ²]
ΔU_{WB}	pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag [W/(m ² K)]

3.8 Wärmehmettransfer durch Luftaustausch zwischen Glasdoppelfassade und außen

Der Lüftungswärmehmettransferkoeffizient $H_{V,ue}$ der Glasdoppelfassade nach außen wird nach Gleichung (10) bestimmt:

$$H_{V,ue} = n_{ue} V_u c_{p,a} \rho_a \text{ [W/K]} \quad (10)$$

n_{ue}	Luftwechselrate zwischen der angrenzenden Glasdoppelfassade und außen [h ⁻¹]
V_u	Nettoraumvolumen des betrachteten Glasdoppelfassadenabschnitts [m ³]
$c_{p,a}$	spezifische Wärmehkapazität von Luft [Wh/(kgK)]
ρ_a	Dichte von Luft [kg/m ³]

Die Luftwechselrate zwischen der Glasdoppelfassade und außen wird nach DIN V 18599-2, Kapitel 6.4.3.4 berechnet:

$$n_{ue} = z_{GDF} * A_{GDF,aero} \text{ [h}^{-1}\text{]} \quad (11)$$

z_{GDF}	Luftwechselbeiwert in Abhängigkeit vom Abstand der beiden Fassaden und der Verglasung der sekundären (außenliegenden) Fassade anhand von Kennlinien nach [8], Standardwert = 1500 nach DIN V 18599-2, Kapitel 6.4.3.4 [lfdm./(h m ²)]
$A_{GDF,aero}$	aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der äußeren Glasfassade [m ² /lfdm.]

Der Berechnungsansatz (Kennlinienmodell) nach Gleichung (11) und die nachfolgenden Ausgestaltung wurde in einem vorangegangenen Forschungsvorhaben [8] entwickelt (vgl. auch Kapitel 1) und soll im vorliegenden Untersuchungsrahmen überprüft und ggf. weiterentwickelt werden. Die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der äußeren Glasfassade ermittelt sich nach Gleichung (12):

$$A_{GDF,aero} = A_{GDF} * c_{v,GDF} \text{ [m}^2\text{/lfdm.]} \quad (12)$$

A_{GDF}	kleinere der Ansichtsflächen der Zu- bzw. Abluftöffnung im betrachteten Glasdoppelfassadenbereich [m ² /lfdm.]
$c_{v,GDF}$	Durchflussbeiwert der Lüftungsöffnung [-]

Bei regeltechnisch eingestellten Öffnungszeiten von verschließbaren Klappen müssen die entsprechenden monatsweisen Öffnungszeiten bei der Berechnung von $A_{\text{GDF,aero}}$ sowie ggf. die zugehörige Veränderung von $C_{\text{v,GDF}}$ berücksichtigt werden.

4 Auswertung

4.1 Fraunhofer Haus

4.1.1 Messung

Die Messdatenerfassung am Fraunhofer Haus startet am 1.11.2012, die Messwerte werden als 5 min-Mittelwerte in der Datenbank abgespeichert. Die Auswertung erstreckt sich über den Zeitraum von einem Jahr, d.h. bis zum 31.10.2013. Aufgrund technischer Probleme der Gebäudeleittechnik konnten von Februar bis Mai 2013 keine Messdaten erfasst werden.

Bild 10 zeigt für alle Versuchsräume die messtechnisch erfassten Monatsmittelwerte der Temperaturkette von innen (Gebäudezone) über die Glasdoppelfassade nach außen. Die Raumlufttemperaturen bewegen sich auf einem relativ hohen Niveau von etwa 24 bis 25 °C. Lediglich der Raum 2.06 ist in den Monaten November 2012 bis Januar 2013 mit durchschnittlich 22 bis 23 °C etwas moderater temperiert (siehe Tabelle 5). Die Temperaturdifferenz zur Außenlufttemperatur beträgt in den Wintermonaten minimal ca. 13 K im Oktober 2013 und maximal etwa 23 K im Januar 2013. Die Pufferwirkung der Glasdoppelfassade sorgt für eine Anhebung Temperatur im Fassadenzwischenraum gegenüber der Außenlufttemperatur (siehe Tabelle 6), so dass der Temperaturgradient zur Raumluft im Oktober 2013 nur mehr ca. 7 K und im Januar 2013 ca. 16 K beträgt. Im Sommer kann der Temperaturhub über die Glasdoppelfassade durch das gezielte Öffnen von Lüftungsklappen und die entsprechende erhöhte Durchlüftung des Fassadenzwischenraums etwas zurückgenommen werden. Im Juli 2013 beträgt der mittlere Temperaturhub gegenüber der Außenluft etwa 2 – 3 K, so dass sich die mittlere Temperatur innerhalb der Glasdoppelfassade der Raumlufttemperatur annähert.

Entsprechend ist im Sommer mit erhöhten Kühllasten aufgrund der Glasdoppelfassade zu rechnen.

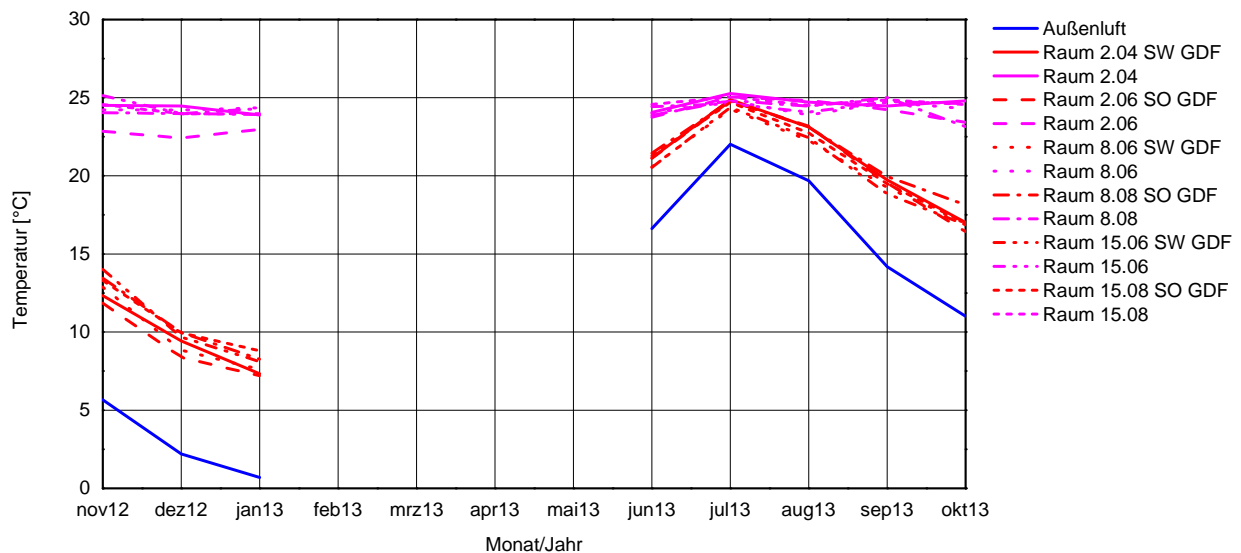


Bild 10: Monatsmittelwerte (Messung) der Außenlufttemperatur, Raumlufthtemperatur und Temperatur in der Glasdoppelfassade für alle Versuchsräume.

Tabelle 5: Tabellarische Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufthtemperaturen und der zugehörigen Temperaturen im Fassadenzwischenraum (Messung) für alle Versuchsräume.

Monat	Raum 2.04		Raum 2.06		Raum 8.06		Raum 8.08		Raum 15.06		Raum 15.08	
	SW		SO		SW		SO		SW		SO	
	GDF °C	Raum °C	GDF °C	Raum °C	GDF °C	Raum °C	GDF °C	Raum °C	GDF °C	Raum °C	GDF °C	Raum °C
Nov12	12,3	24,5	11,8	22,8	12,9	24,2	13,4	24,0	14,0	25,1	13,3	24,6
Dez12	9,4	24,5	8,4	22,4	8,8	24,2	10,0	24,0	9,7	24,0	9,9	24,0
Jan13	7,3	23,9	7,2	23,0	7,6	24,3	8,3	23,9	8,1	24,3	8,8	24,0
Jun13	21,1	24,1	21,1	23,7	20,6	24,0	21,4	23,9	20,5	24,4	21,3	24,6
Jul13	24,9	25,3	24,8	25,0	24,3	24,8	24,8	24,8	24,4	24,6	24,7	25,0
Aug13	23,1	24,7	23,2	24,8	22,3	23,9	23,1	24,5	22,4	24,1	22,7	24,5
Sep13	19,7	24,5	19,5	24,2	19,2	24,7	20,0	25,0	18,8	24,7	19,5	24,9
Okt13	17,0	24,8	16,4	23,4	16,9	24,3	18,1	23,1	16,9	24,6	17,0	24,6

Die Monatsmittelwerte der solaren Einstrahlung auf die betrachteten Fassadenorientierungen sowie die Windgeschwindigkeit am Dach des Fraunhofer Hauses sind in Bild 11 und Bild 12 wiedergegeben. Die Südost- und Südwest-

strahlungswerte zeigen eine ähnliche Größenordnung, die mittlere Windgeschwindigkeit liegt etwa zwischen 2 und 4 m/s. In Tabelle 6 sind zur Übersicht die erfassten Monatsmittelwerte der Wetterdaten in Zahlenwerten aufgeführt.

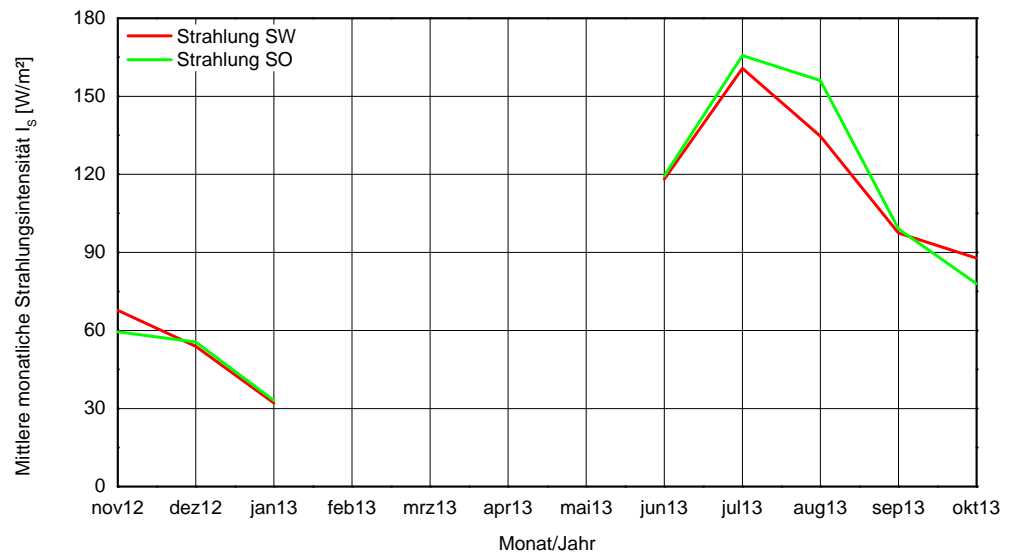


Bild 11: Monatsmittelwerte (Messung) der vertikalen Südwest- und Südoststrahlung.

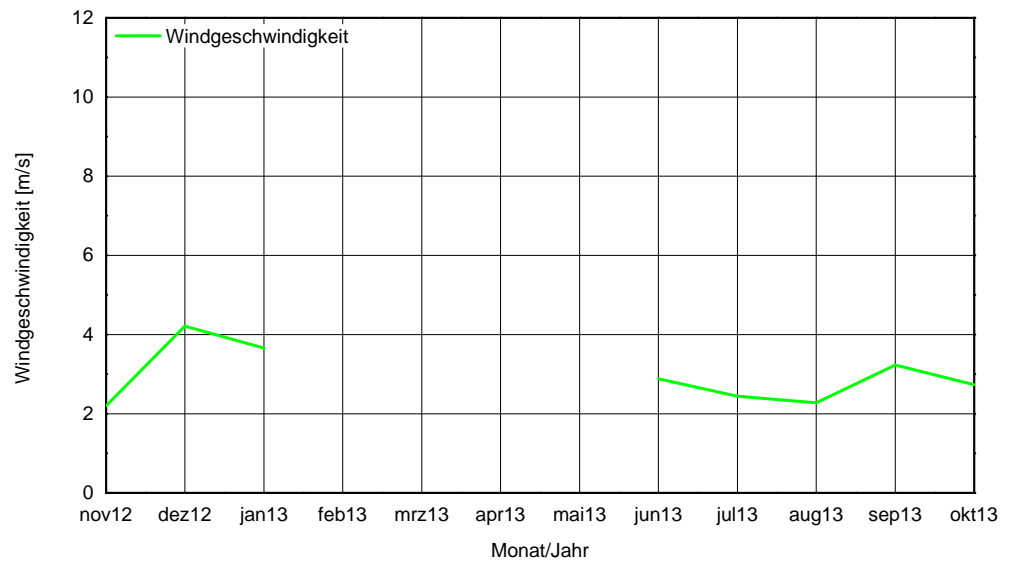


Bild 12: Monatsmittelwerte (Messung) der Windgeschwindigkeit.

Tabelle 6: Tabellarische Zusammenstellung der Monatsmittelwerte (Messung) wesentlicher Wetterdaten.

Monat	Außenlufttemperatur [°C]	Südweststrahlung [W/m ²]	Südoststrahlung [W/m ²]	Windgeschwindigkeit [m/s]
Nov12	5,7	68	60	2,2
Dez12	2,2	54	56	4,2
Jan13	0,7	32	33	3,7
Jun13	16,6	118	119	2,9
Jul13	22,0	161	166	2,4
Aug13	19,7	135	156	2,3
Sep13	14,2	98	99	3,2
Okt13	11,0	88	78	2,7

In Bild 13 sind die durchschnittlichen Fensteröffnungszeiten je Monat dargestellt. Diese fließen in die Berechnungen der Lüftungswärmeverluste zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade ein (vgl. Kapitel 4.1.2.2).

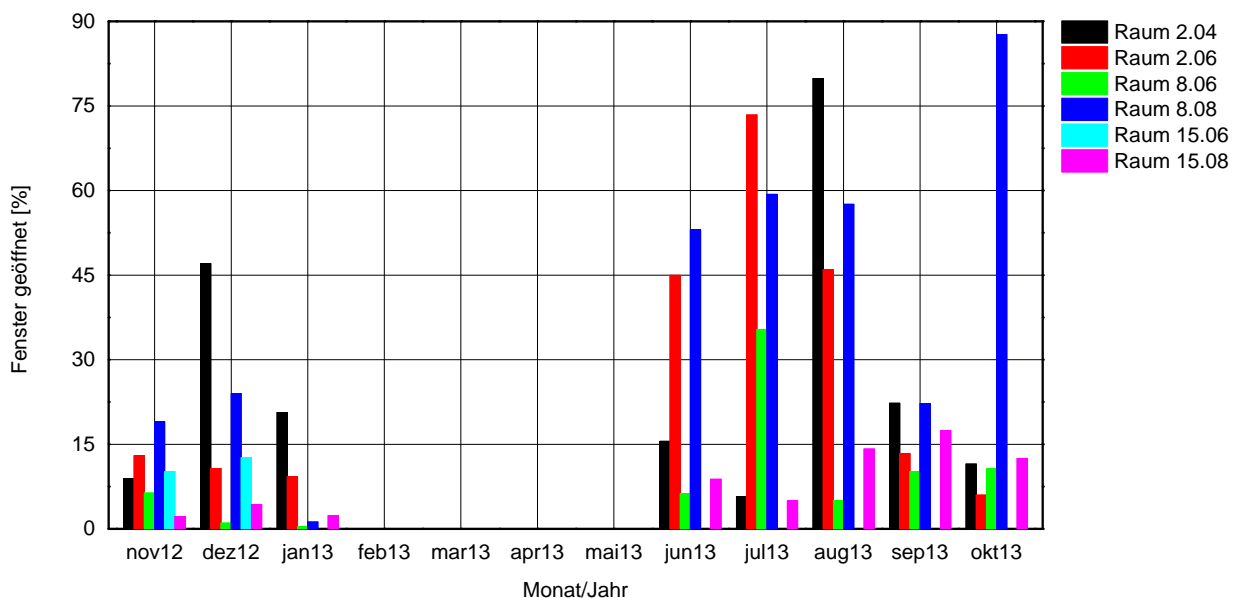


Bild 13: Durchschnittliche Fensteröffnungszeiten je Monat und Raum.

4.1.2 Vergleich Messung – Rechnung

Die Berechnung der mittleren monatlichen Temperatur im Fassadenzwischenraum θ_u erfolgt gemäß der Bilanzgleichungen in Kapitel 3. Diese werden den messtechnisch erfassten Monatsmittelwerten gegenübergestellt.

Es wird zunächst eine Basisvariante aufgestellt, deren Parameter im Kapitel 4.1.2.1 dokumentiert sind. Der Luftwechsel im Fassadenzwischenraum wird nach der im vorangegangenen Forschungsvorhaben aufgestellten Berechnungsmethode gemäß Gleichung (11) angesetzt, wobei der abstandsabhängige Luftwechselbeiwert z_{GDF} detailliert nach [7] bzw. [8] bestimmt wird.

In einer Variante 1 werden die Parameter der Basisvariante beibehalten, jedoch zusätzlich der Wärmetransfer durch den Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade abgeschätzt. Hierbei wird auf „Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern“ [5] zurückgegriffen.

Die Variante 2 basiert auf Variante 1 und untersucht zusätzlich den Einfluss des gemessenen effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades der inneren Verglasung anhand des realen Schaltverhaltens des Sonnenschutzes gegenüber dem Standardwert nach DIN V 18599.

Abschließend wird in einer Variante 3 (basierend auf der Basisvariante) die Temperatur θ_u anhand des bisherigen pauschalen Ansatzes einer konstanten Luftwechselrate n_{ue} im Fassadenzwischenraum von 10 h^{-1} gemäß DIN V 18599-2:2007-02 [2], Kapitel 6.4.3.3 berechnet.

4.1.2.1 Basisvariante

Die wesentlichen Berechnungsparameter der Basisvariante sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Tabellarische Zusammenstellung wesentlicher Berechnungsparameter der Basisvariante.

Parameter	Wert / Einheit	Beschreibung	Quelle
$F_{S,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor für Verschattung für übliche Anwendungsfälle	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{W,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{V,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung	DIN V 18599-10 Kapitel 6
$g_{L,ue}$	0,65	Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach DIN EN 410	[9]
$F_{S,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor für Verschattung für übliche Anwendungsfälle	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{W,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{V,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung	DIN V 18599-10 Kapitel 6
$a_{iu,Winter}$	0,71	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen, strahlungsabhängig geregelten Sonnenschutzvorrichtungen	DIN V 18599-2 Tabelle A.5, SO/SW-Ausrichtung
$a_{iu,Sommer}$	0,77	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen, strahlungsabhängig geregelten Sonnenschutzvorrichtungen	DIN V 18599-2 Tabelle A.5, SO/SW-Ausrichtung
$g_{L,iu}$	0,60	Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach DIN EN 410	[9]
$F_{c,iu}$	0,25	Abminderungsfaktor der Sonnenschutzvorrichtung	[1], Tabelle 7, Zeile 3.2.1
$\tau_{e,ue}$	0,73	Transmissionsgrad für Solarstrahlung	[9]
$U_{g,iu}$	1,40 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	[9]
$U_{f,iu}$	1,80 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen	[9]
$U_{Panel,iu}$	1,40 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Paneel	[9]
$\Delta U_{WB,iu}$	0,05 W/(m ² K)	Pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	DIN V 18599-2, Kapitel 6.2.1.2
$U_{g,ue}$	5,40 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	[9]
$\Delta U_{WB,ue}$	0,05 W/(m ² K)	Pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	DIN V 18599-2, Kapitel 6.2.1.2
$c_{p,a} \rho_a$	0,34 Wh/(m ³ K)	Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte von Luft	DIN V 18599-2 Kapitel 6.3.1.1
Z_{GDF}	1775	Einfachverglasung außen, Scheibenabstand 0,65 m	[8]
A_{GDF}	0,39 m ² /lfdm.	Die rechteckigen Zu- und Abluftöffnungen sind jeweils 38,5 cm breit und 110 cm lang	[3] und [8]
$C_{v,GDF}$	0,125	Durchflußbeiwert im geöffneten Zustand der verschließbaren Klappe (hier: Öffnungswinkel ca. 45 °)	[3]

Mit den Angaben aus Tabelle 7 ergeben sich je Monat unterschiedliche Luftwechselraten in den einzelnen Versuchsräumen (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Monatsmittelwerte der Luftwechselrate n_{ue} für die verschiedenen Räume.

Monat	Luftwechselrate n_{ue} [h^{-1}]					
	Raum 2.04	Raum 2.06	Raum 8.06	Raum 8.08	Raum 15.06	Raum 15.08
	SW	SO	SW	SO	SW	SO
Nov12	4,8	4,6	6,2	4,5	5,4	4,6
Dez12	3,0	2,7	3,4	3,0	3,4	3,0
Jan13	2,0	2,2	2,4	2,2	2,1	2,1
Jun13	36,8	35,8	36,9	36,3	37,1	36,8
Jul13	74,3	73,9	73,6	73,4	74,3	75,1
Aug13	62,9	64,2	62,9	63,6	63,7	65,4
Sep13	18,6	19,9	19,9	19,9	20,0	20,6
Okt13	7,3	7,6	9,6	8,4	9,9	7,9

Vergleicht man die monatsweise ermittelten Luftwechselraten n_{ue} mit dem bisherigen pauschalen Ansatz von $10 h^{-1}$ so zeigen sich insbesondere in den Sommermonaten deutliche Unterschiede (Bild 14). Die maximale Luftwechselrate im Juli 2013 beträgt ca. $75 h^{-1}$. Auf die Ergebnisse mit dem pauschalen Ansatz wird in Kapitel 4.1.2.4 eingegangen.

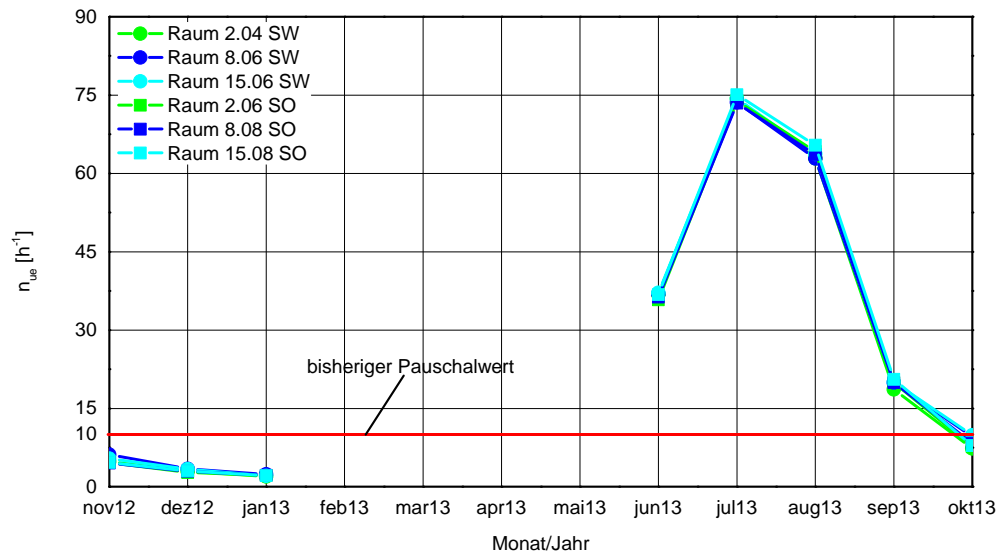


Bild 14: Monatsmittelwerte der nach Gleichung (11) berechneten Luftwechselrate n_{ue} im Vergleich zum bisherigen Pauschalwert $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$.

Die berechneten Temperaturen im Fassadenzwischenraum für die Basisvariante im Vergleich mit den Messwerten sowie in Bezug zur Außen- und Raumlufttemperatur sind in den Grafiken im Bild 15 zusammengetragen. Es zeigt sich, dass der Jahresgang der Temperaturen im Fassadenzwischenraum rechnerisch bei allen Versuchsräumen gut nachvollzogen werden kann. Es sind jedoch je nach Monat und Raum moderate Abweichungen festzustellen. Diese betragen maximal 2,1 K im Betrachtungsmonat Oktober 2013 beim Raum 8.08 (Tabelle 9). Ein systematischer Unterschied im Hinblick auf die Rechengenauigkeit in Abhängigkeit der Fassadenorientierung (Südwest / Südost) oder der Geschosshöhe (2. / 8. / 15. Geschoss) kann nicht festgestellt werden.

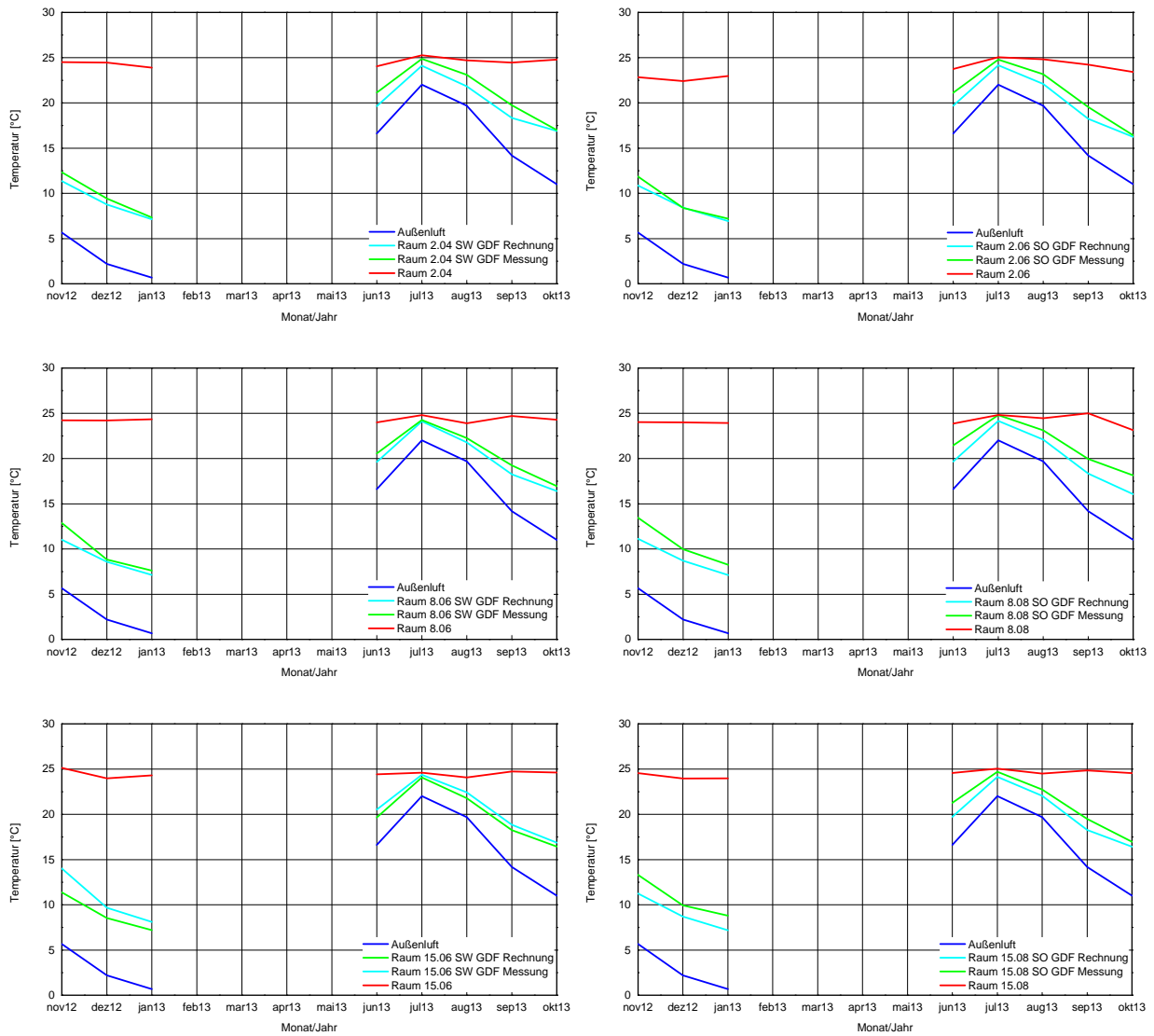


Bild 15: Vergleich der Monatsmittelwerte der gemessenen (grüne Linie) und berechneten (türkise Linie) Temperatur im Fassadenzwischenraum zusammen mit der gemessenen Außenluft- und Raumlufttemperatur für die Versuchsräume im 2. OG (obere beide Grafiken), im 8. OG (mittlere beide Grafiken) und im 15. OG (untere beide Grafiken).

Tabelle 9: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Differenz Messung – Rechnung [K]						
Monat / Jahr	Raum 2.04 SW	Raum 2.06 SO	Raum 8.06 SW	Raum 8.08 SO	Raum 15.06 SW	Raum 15.08 SO
Nov 12	-0,1	0,1	0,8	1,4	1,6	1,1
Dez 12	-0,2	-0,9	-0,6	0,4	0,3	0,4
Jan 13	-0,4	-0,3	-0,1	0,6	0,4	1,1
Feb 13	Datenausfall					
Mrz 13						
Apr 13						
Mai 13						
Jun 13						
Jul 13	0,8	0,6	0,2	0,6	0,3	0,6
Aug 13	1,3	1,1	0,5	1,0	0,7	0,7
Sep 13	1,4	1,3	1,0	1,6	0,6	1,2
Okt 13	0,1	0,2	0,5	2,1	0,4	0,5

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (8 auswertbare Monate) ist in Tabelle 10 angegeben. Je geringer diese globale Abweichung ausfällt, desto genauer kann ein Gebäude mit Glasdoppelfassade im Hinblick auf den Jahresnutzenergiebedarf bewertet werden. Die Auswirkung einer fehlerhaft abgeschätzten Temperatur im Fassadenzwischenraum auf den Nutzenergiebedarf eines exemplarischen Büroraums wird im Kapitel 4.5 behandelt.

Tabelle 10: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 2.04 SW	Raum 2.06 SO	Raum 8.06 SW	Raum 8.08 SO	Raum 15.06 SW	Raum 15.08 SO
0,7	0,7	0,6	1,2	0,6	0,9

4.1.2.2 Variante 1 - Berücksichtigung Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade

Der Luftwechsel über geöffnete oder gekippte Fenster zwischen der konditionierten Zone (Büroraum) und der Glasdoppelfassade wird in DIN V 18599 standardmäßig nicht erfasst, da es hierfür keine allgemeingültigen Berechnungsan-

sätze gibt. Vereinfachend wird der Lüftungswärmetransferkoeffizient $H_{v,ii}$ daher zu Null gesetzt (Basisvariante).

In der Realität öffnen die Nutzer jedoch bei allen untersuchten Gebäuden die Fenster zum Fassadenzwischenraum, so dass ein natürlicher Luftwechsel zwischen Büroraum und Fassadenzwischenraum entsteht. Zur rechnerischen Vorhersage der Temperatur im Fassadenzwischenraum beim Vergleich mit den Messdaten kann dieser Luftwechsel bzw. Lüftungswärmetransport daher in Ansatz gebracht werden.

In der Literatur finden sich Näherungsverfahren zur Berechnung des thermisch induzierten Luftwechsels über Fenster (Der Luftwechsel über Winddruck kann aufgrund der vorgeschalteten zweiten Fassade vernachlässigt werden [5]). Für die Untersuchungsgebäude ergeben stichprobenhafte Nutzerbefragungen, dass die Fenster überwiegend gekippt werden. Zur Berechnung des Zuluftvolumenstroms wird daher der Modellansatz nach [5] bzw. [13] angewendet:

$$\dot{V}_{zu} = 3600 * C_d * A_{eff} * \left(2 * g * H * Z * \frac{\Delta T}{T_i} \right)^n \quad [m^3/h] \quad (13)$$

C_d	Discharge-Koeffizient (Durchflusskoeffizient) [-]
A_{eff}	Effektive Öffnungsfläche des gekippten Fensters [m^2]
g	Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$) [m/s^2]
H	Fensterhöhe (lichtes Öffnungsmaß, $1,38 \text{ m}$) [m]
Z	Faktor zur Bestimmung der neutralen Höhe [-]
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenraum (hier: zwischen Büroraum und Fassadenzwischenraum) [K]
T_i	Innenraumtemperatur [K]
n	Strömungsexponent ($0,5$) [-]

Dabei werden folgende Vereinfachungen angenommen:

- Je Büroraum können ein oder zwei Fenster gekippt sein. Dies kann nicht unterschieden werden, da die Fensterkontakte in Reihe geschaltet sind und daher nur Auskunft geben, ob prinzipiell Fenster geöffnet sind. Es wird von einem gekippten Fenster ausgegangen.
- Für das Modell wird die Temperaturdifferenz zwischen Büroraum und Fassadenzwischenraum benötigt. Die Temperatur im Fassadenzwischenraum ist aber die gesuchte unbekannte Größe. Vereinfachend wird die gemessene Temperatur im Fassadenzwischenraum genutzt. Die DIN V 18599 müsste hier eine Anfangstemperatur annehmen und diese durch Iteration so lange anpassen, bis eine zufriedenstellende (zu definierende) Übereinstimmung mit der gesuchten Temperatur im Fassadenzwischenraum vorliegt.

Discharge-Koeffizient

Die C_d -Werte hängen von folgenden Faktoren ab:

- Kippweite s des Fensters (hier: $s = 9$ cm)
- Fenster mit oder ohne Laibung (hier: mit Laibung, Laibungstiefe $l = 7$ cm)
- Fenster mit oder ohne Heizung im Bereich der Fensterbrüstung (hier: mit Heizung im Winter, ohne Heizung im Sommer)

Nach [5] - Gleichungen (40) und (41) ist C_d mit oben genannten Randbedingungen wie folgt zu ermitteln:

Wintermonate (Okt-Mrz):

$$C_d = 0,378 + 0,878 * s = 0,46$$

Sommermonate (Apr-Sep):

$$C_d = 0,345 + 2,757 * s = 0,59$$

Effektive Öffnungsfläche des gekippten Fensters

Die Laibungstiefe $l = 7$ cm ist kleiner als die Kippweite $s = 9$ cm des Fensters. Die effektive Öffnungsfläche ist daher gemäß [5] – Fall 2 zu ermitteln:

$$A_s = [B * a + p * (s - l) + 2 * m * q + 2 * x * y] * \frac{A_{max}}{A_{ges}} \quad [m^2] \quad (14)$$

Fensterbreite $B = 1,10$ m (lichtes Öffnungsmaß)

Abstand a zwischen Kippflügel und Laibungssturz (Laibungstiefe im Sturzbereich = 4 cm, Abstand zwischen Blendrahmen und Laibungssturz j ca. 2 cm):

$$a = \sqrt{(s - l)^2 + j^2} = \sqrt{(0,09 - 0,04)^2 + 0,02^2} = 0,05 \text{ m}$$

Reduzierte Fensterhöhe h (Rahmentiefe $d = 8$ cm):

$$h = H * \left(1 + \frac{d}{s}\right)^{-1} = 1,38 * \left(1 + \frac{0,08}{0,09}\right)^{-1} = 0,73 \text{ m}$$

Höhe p , die von der Laibung nicht überdeckt wird:

$$p = \frac{(s - l)}{s} * h = \frac{(0,09 - 0,07)}{0,09} * 0,73 = 0,16 \text{ m}$$

Abstand m zwischen Rahmen und seitlicher Laibung ca. 2 cm.

Höhe q zwischen Kipprahmen und seitlicher Laibung:

$$q = h - p = 0,73 - 0,16 = 0,57 \text{ m}$$

Länge x des Spaltes:

$$x = H - h = 1,38 - 0,73 = 0,65 \text{ m}$$

Abstand y der beiden Rahmenteile ca. 1 cm.

Gesamte Öffnungsfläche A_{ges} des Kippfensters:

$$A_{\text{ges}} = s * (B + h) + 2 * x * y = 0,09 * (1,10 + 0,73) + 2 * 0,65 * 0,01 \\ = 0,18 \text{ m}^2$$

Faktor Z des Kippfensters:

$$Z = \sqrt{\frac{B - s}{H}} = \sqrt{\frac{1,10 - 0,09}{1,38}} = 0,86$$

Maximale Fläche A_{max} für den Zuluftvolumenstrom eines Kippfensters ohne Laibung:

$$A_{\text{max}} = s * Z * [h - H * (1 - Z)] + 2 * x * y \\ = 0,09 * 0,86 * [0,73 - 1,38 * (1 - 0,86)] + 2 * 0,65 * 0,01 \\ = 0,05 \text{ m}^2$$

$$A_S = A_{\text{eff}} \\ = [1,10 * 0,05 + 0,16 * (0,09 - 0,07) + 2 * 0,02 * 0,57 + 2 \\ * 0,65 * 0,01] * \frac{0,05}{0,18} = 0,026 \text{ m}^2$$

Mit den vorliegenden Werten lässt sich der Luftaustausch zwischen Büroraum und Fassadenzwischenraum und damit der Lüftungswärmetransferkoeffizient in Abhängigkeit der messtechnisch ermittelten Fensteröffnungszeiten für den Winter- und den Sommerfall abschätzen:

$$n_{\text{iu}} = \frac{\dot{V}_{\text{zu}}}{V_{\text{Raum}}}$$

$$H_{\text{V,iu}} = c_{p,a} * \rho_a * n_{\text{iu}} * V_{\text{Raum}} \text{ [W/K]}$$

Die nach o.g. Modell ermittelten Luftwechsel liegen zwischen 0,0 und 0,9 h^{-1} (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Monatsmittelwerte der Luftwechsel n_{iu} für die verschiedenen Räume.

Luftwechsel n_{iu} [h^{-1}]						
	Raum 2.04	Raum 2.06	Raum 8.06	Raum 8.08	Raum 15.06	Raum 15.08
Monat	SW	SO	SW	SO	SW	SO
Nov12	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0
Dez12	0,7	0,1	0,0	0,4	0,2	0,1
Jan13	0,3	0,1	0,0	0,0	*	0,0
Jun13	0,1	0,2	0,1	0,4	*	0,1
Jul13	0,0	0,1	0,1	0,0	*	0,0
Aug13	0,4	0,2	0,0	0,3	*	0,1
Sep13	0,2	0,1	0,1	0,2	*	0,1
Okt13	0,1	0,1	0,1	0,9	*	0,1

* Daten der Fensterkontakte nicht plausibel

Bei der Variante 1 betragen die Abweichungen maximal 2,2 K im Betrachtungsmonat Dezember 2012 beim Raum 2.04 (Tabelle 12). Die Veränderungen gegenüber der Basisvariante fallen sehr gering aus. Es kann weder eine systematische Verbesserung noch eine systematische Verschlechterung der Rechnergebnisse festgestellt werden. Es ist zu beachten, dass die Vorhersage des Luftwechsels zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade aufgrund der folgenden Randbedingungen nur eine sehr grobe Abschätzung darstellen kann:

- Fensterkontakt erfasst nur alle Fenster gemeinsam
- Fensterkontakt gibt keine Rückschlüsse über Öffnungsweite des geöffneten Fensters
- Genauigkeit des Rechenmodells

Tabelle 12: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat (Variante 1).

Differenz Messung – Rechnung [K]						
Monat / Jahr	Raum 2.04 SW	Raum 2.06 SO	Raum 8.06 SW	Raum 8.08 SO	Raum 15.06 SW	Raum 15.08 SO
Nov 12	-0,4	-0,2	0,6	0,8	1,3	1,1
Dez 12	-2,2	-1,2	-0,7	-0,7	-0,3	0,2
Jan 13	-1,5	-0,6	-0,1	0,5	*	1,0
Feb 13	Datenausfall					
Mrz 13						
Apr 13						
Mai 13						
Jun 13						
Jul 13	0,8	0,6	0,2	0,6	*	0,5
Aug 13	1,2	1,0	0,5	1,0	*	0,7
Sep 13	1,2	1,2	0,9	1,5	*	1,1
Okt 13	-0,1	0,1	0,4	1,2	*	0,4

* kein Daten zum Schaltzustand des Behangs vorhanden

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (8 auswertbare Monate) ist in Tabelle 13 angegeben. Beim Raum 2.04 ergibt sich eine um 0,4 K höhere Abweichung, beim Raum 8.08 eine um 0,2 K niedrigere Abweichung gegenüber der Basisvariante. Der Verzicht auf die aufwendige Berechnung von n_{iu} und damit die Vernachlässigung des Lüftungswärmetransferkoeffizient $H_{v,iu}$ zwischen der betrachteten Gebäudezone und der benachbarten (unbeheizten oder ungekühlten) Glasdoppelfassade gemäß DIN V 18599 erscheint gerechtfertigt.

Tabelle 13: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum (Variante 1).

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 2.04 SW	Raum 2.06 SO	Raum 8.06 SW	Raum 8.08 SO	Raum 15.06 SW	Raum 15.08 SO
1,1	0,8	0,5	1,0	*	0,8

* Daten der Fensterkontakte nicht plausibel

4.1.2.3 Variante 2 – Berücksichtigung des gemessenen effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades

Eine zusätzliche Verbesserung zu Variante 1 bei der rechnerisch ermittelten Temperatur im Fassadenzwischenraum kann sich ergeben, wenn man das tatsächliche Schaltverhalten des Sonnenschutz berücksichtigt. Das Vorgehen wird im Folgenden erläutert.

Bei der Berechnung des effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades g_{eff} von beweglichen Sonnenschutzvorrichtungen wird deren Aktivierung über den Parameter a berücksichtigt. Durch den Parameter a werden die Zeitanteile mit aktivierten und ohne aktivierten Sonnenschutz gewichtet und hieraus der wirksame Gesamtenergiedurchlassgrad g_{eff} errechnet. Dieser Parameter wurde im Rahmen der Normungsarbeiten zur DIN V 18 599 mit Hilfe von instationären Simulationsrechnungen für die beiden Steuerungsszenarien manuell betätigt oder zeitgesteuert, sowie automatisch betriebene Sonnenschutzvorrichtung ermittelt. Dies erfolgte abhängig von der Neigung des transparenten Bauteils, sowie von dessen Orientierung. Hierbei wurde zwischen fünf unterschiedlichen Orientierungen, Nord, Nordost/Nordwest, Ost/West, Südost/Südwest und Süd unterschieden. Ferner wurde zwischen Winter- und Sommerperiode unterteilt, wobei die Winterperiode von Oktober bis Ende März und die Sommerperiode von April bis Ende September definiert wurde. Für die untersuchten Messräume ergibt sich a hierbei für den Winterfall zu 0,71 und für den Sommerfall zu 0,77 (vgl. Kapitel 4.1.2.1).

Zum Vergleich mit den Normwerten für $g_{\text{eff},\text{iu}}$ kann aus den messtechnisch erfassten Schaltzuständen unter Berücksichtigung der jeweils an der Fassade einfallenden Gesamtstrahlung der wirksame Gesamtenergiedurchlassgrad errechnet werden. Es wird dabei der mittlere Gesamtenergiedurchlassgrad für den Lamellenraffstore $g_{\text{tot}} = g_{\perp} * F_c$ gemäß Basisvariante angesetzt und mit den jeweiligen Strahlungsanteilen bei aktiviertem Sonnenschutz multipliziert. Für die Zeiträume mit geöffnetem Behang wird analog verfahren, wobei hier die eingestrahelte Energie mit dem Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung multipliziert wird. Diese beiden Bilanzanteile (Sonnenschutzsystem aktiviert und Sonnenschutz nicht aktiviert) werden addiert und durch die gesamte auf die Fassade eingestrahelte solare Energie dividiert. Multipliziert mit dem Abminderungsfaktor für den nicht senkrechten Strahlungseinfall, sowie dem Abminderungsfaktor für die Verschmutzung errechnet sich hieraus der wirksame Energiedurchlassgrad $g_{\text{eff},\text{iu}}$:

$$g_{\text{eff},\text{iu}} = \frac{F_W F_V (\sum I_{S,i} g_{\text{tot},j} \Delta t + \sum I_{S,i} I_{\perp} \Delta t)}{\sum I_{S,i} \Delta t} \quad (15)$$

$I_{S,i}$	mittlere solare Einstrahlung im Zeitintervall Δt
$g_{\text{tot},j}$	mittlerer Gesamtenergiedurchlassgrad einschließlich Sonnenschutz für die einzelnen Lamelleneinstellungen
Δt	Zeitintervall

In Tabelle 14 sind die messtechnisch ermittelten effektiven Gesamtenergiedurchlassgrade $g_{\text{eff,iu}}$ für jeden Messraum aufgeführt. Je nach Monat und Messraum schwanken die Werte zwischen $g_{\text{eff,iu}} = 0,18$ (Raum 15.08, Südostfassade, November 2012) und $g_{\text{eff,iu}} = 0,33$ (Raum 15.06, Südwestfassade, Juni 2012). Die Mittelwerte über alle Messräume liegen in den Wintermonaten bei 0,25 und in den Sommermonaten bei 0,24. Die Normwerte nach DIN V 18599 betragen 0,23 bzw. 0,21.

Tabelle 14: Messtechnisch ermittelter effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{\text{eff,iu}}$ der Variante 2 im Vergleich zum jeweiligen Normwert DIN V 18599 (Basisvariante).

Effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{\text{eff,iu}}$ [-]								
Monat	Basisvariante	Variante 2						
		Messraum						
	Normwert DIN V 18599	Mittelwert aller Räume	2.04 (SW)	2.06 (SO)	8.06 (SW)	8.08 (SO)	15.06 (SW)	15.08 (SO)
Nov12	0,23	0,25	0,24	0,25	0,32	0,21	0,31	0,18
Dez12	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,23	0,21	0,22
Jan13	0,23	0,31	0,32	0,32	0,31	0,32	0,30	0,31
Jun13	0,21	0,28	0,26	0,27	0,29	0,23	0,33	0,30
Jul13	0,21	0,24	0,23	0,24	0,26	0,21	0,27	0,24
Aug13	0,21	0,21	0,21	0,23	0,21	0,20	0,22	0,20
Sep13	0,21	0,24	0,24	0,25	0,22	0,24	0,24	0,22
Okt13	0,23	0,22	0,22	0,23	0,21	0,23	0,21	0,23

Aufgrund der relativ geringen Abweichungen zwischen messtechnisch ermitteltem effektiven Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{\text{eff,iu}}$ und Normwert ist keine signifikante Auswirkungen der Variante 2 auf die Berechnung der Temperatur im Fassadenzwischenraum zu erkennen.

Bei der Variante 2 betragen die Abweichungen ebenfalls maximal 2,2 K im Betrachtungsmonat Dezember 2012 beim Raum 2.04 (Tabelle 15). Die Veränderungen gegenüber der Variante 1 fallen wie zu erwarten gering aus. In den Wintermonaten tragen die messtechnisch erfassten Gesamtenergiedurchlassgrade $g_{\text{eff,iu}}$ tendenziell zu einer verbesserten Prognose der Temperatur im Fassadenzwischenraum bei, in den Sommermonaten verschlechtert sich die Prognose etwas.

Tabelle 15: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Differenz Messung – Rechnung [K]						
Monat / Jahr	Raum 2.04	Raum 2.06	Raum 8.06	Raum 8.08	Raum 15.06	Raum 15.08
	SW	SO	SW	SO	SW	SO
Nov 12	-0,3	-0,1	1,0	0,7	1,6	0,9
Dez 12	-2,2	-1,2	-0,6	-0,6	-0,3	0,2
Jan 13	-1,3	-0,4	0,1	0,7	*	1,2
Feb 13	Datenausfall					
Mrz 13						
Apr 13						
Mai 13						
Jun 13						
Jul 13	0,8	0,7	0,3	0,6	*	0,6
Aug 13	1,2	1,1	0,5	1,0	*	0,7
Sep 13	1,4	1,4	1,0	1,6	*	1,2
Okt 13	-0,1	0,1	0,3	1,2	*	0,4

* keine Daten zum Schaltzustand des Behangs vorhanden

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (8 auswertbare Monate) ist in Tabelle 15 angegeben. Gegenüber der Variante 1 sind praktisch keine Veränderungen über den Gesamtzeitraum festzustellen (Verschlechterung der Vorhersage von θ_u um jeweils 0,1 K bei Raum 8.06 und 15.08). Der Normansatz zur Ermittlung des effektiven Gesamtenergiedurchlassgrads $g_{\text{eff},iu}$ liefert zuverlässige Wert. Dies haben bereits vorangegangene Untersuchungen gezeigt [4].

Tabelle 16: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 2.04	Raum 2.06	Raum 8.06	Raum 8.08	Raum 15.06	Raum 15.08
SW	SO	SW	SO	SW	SO
1,1	0,8	0,6	1,0	*	0,9

* keine Daten zum Schaltzustand des Behangs vorhanden

4.1.2.4 Variante 3: Bisheriger Ansatz pauschaler Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$

Um beurteilen zu können, inwieweit das neu entwickelte Kennlinienmodell zur Ermittlung des Luftwechsel im Fassadenzwischenraum (vgl. Kapitel 3.8) Vorteile gegenüber dem bis dato angesetzten pauschalen Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$ bringt, wird aufbauend auf der Basisvariante eine Variante 3 gerechnet, bei der

ein pauschaler Luftwechsel von 10 h^{-1} angesetzt wird, um den Lüftungswärmetransferkoeffizienten des Fassadenzwischenraums nach außen zu berechnen. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung zeigt Tabelle 17.

Tabelle 17: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Differenz Messung – Rechnung [K]					
	Raum 2.04 SW	Raum 2.06 SO	Raum 8.06 SW	Raum 8.08 SO	Raum 15.06 SW	Raum 15.08 SO
Nov 12	1,0	1,0	1,6	2,4	2,5	2,2
Dez 12	1,3	0,6	0,8	1,9	1,7	1,9
Jan 13	1,3	1,3	1,5	2,2	2,0	2,7
Feb 13	Datenausfall					
Mrz 13						
Apr 13						
Mai 13						
Jun 13	-0,9	-0,9	-1,4	-0,6	-1,6	-0,9
Jul 13	-3,2	-3,4	-3,8	-3,4	-3,6	-3,5
Aug 13	-2,1	-2,8	-2,8	-2,8	-2,7	-3,2
Sep 13	0,3	0,1	-0,2	0,4	-0,6	0,0
Okt 13	0,6	0,5	0,6	2,3	0,5	0,9

Bis auf einzelne Ausnahmen liegen die Abweichungen deutlich über denen der Basisvariante mit der Kennlinienmethode. Die maximale Abweichung beträgt $-3,8 \text{ K}$ für den Raum 8.06 im Monat Juli, d. h. es werden hier zu hohe Temperaturen im Fassadenzwischenraum berechnet, die Luftwechselrate n_{ue} ist mit 10 h^{-1} zu niedrig angesetzt (zum Vergleich: $n_{ue} = 74 \text{ h}^{-1}$ in der Basisvariante, Abweichung $+0,2 \text{ K}$).

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (8 auswertbare Monate) ist in Tabelle 18 angegeben. Gegenüber der Basisvariante sind durchweg höhere Abweichungen vorhanden (zwischen $0,6$ und $1,3 \text{ K}$ höhere Abweichung je nach Raum). Eine differenzierte Abschätzung der Luftwechselrate in Abhängigkeit des Doppelfassadentyps erhöht im vorliegenden Fall die Rechengenauigkeit.

Tabelle 18: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 2.04 SW	Raum 2.06 SO	Raum 8.06 SW	Raum 8.08 SO	Raum 15.06 SW	Raum 15.08 SO
1,3	1,3	1,6	2,0	1,9	1,9

4.2 Gedonstraße

4.2.1 Messung

Die Messungen am Gebäude in der Gedonstraße wurden am 29.8.2012 gestartet und die Messdaten als Minutenmittelwerte in der Datenbank abgelegt. Für die Auswertungen werden 5 min-Mittelwerte herangezogen. Die Auswertung erfolgt bis zum 31.10.2013. Im Januar 2013 gab es zwischen 1.1.2013; 5:30:00 Uhr und 8.1.2013; 9:00:00 Uhr einen Messdatenausfall. Die Außenlufttemperatur konnte erst im Laufe des Oktober 2012 vor Ort aufgezeichnet werden, so dass für die Monate September und Oktober 2012 auf die Daten des Deutschen Wetterdienstes, Station München Museumsinsel zurückgegriffen wird.

Bild 16 zeigt für alle Versuchsräume die messtechnisch erfassten Monatsmittelwerte der Temperaturkette von innen (Gebäudezone) über die Glasdoppelfassade nach außen. Die Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen bewegen sich zwischen 20,4 und 24,6 °C. Die Temperaturdifferenz zur Außenlufttemperatur beträgt in den Wintermonaten minimal etwa 10 K im Oktober 2013 und maximal etwa 23 K im Februar 2013. Die Pufferwirkung der Glasdoppelfassade ist im vorliegenden Fall aufgrund der großen Lüftungsöffnungen relativ gering ausgeprägt. Die Anhebung der Außenlufttemperatur beträgt z. B. im Raum 4.200 im Februar 2013 2,3 K, so dass sich der Temperaturgradient zur Raumluft auf 20 K reduziert. Die Lüftungsöffnungen sind starr, so dass im Sommer keine erhöhte Warmluftabfuhr durch Erweitern von Lüftungsquerschnitten realisiert werden kann. Im Juli 2013 beträgt der mittlere Temperaturhub gegenüber der Außenluft etwa 2 – 3 K, so dass sich die mittlere Temperatur innerhalb der Glasdoppelfassade der Raumlufttemperatur annähert.

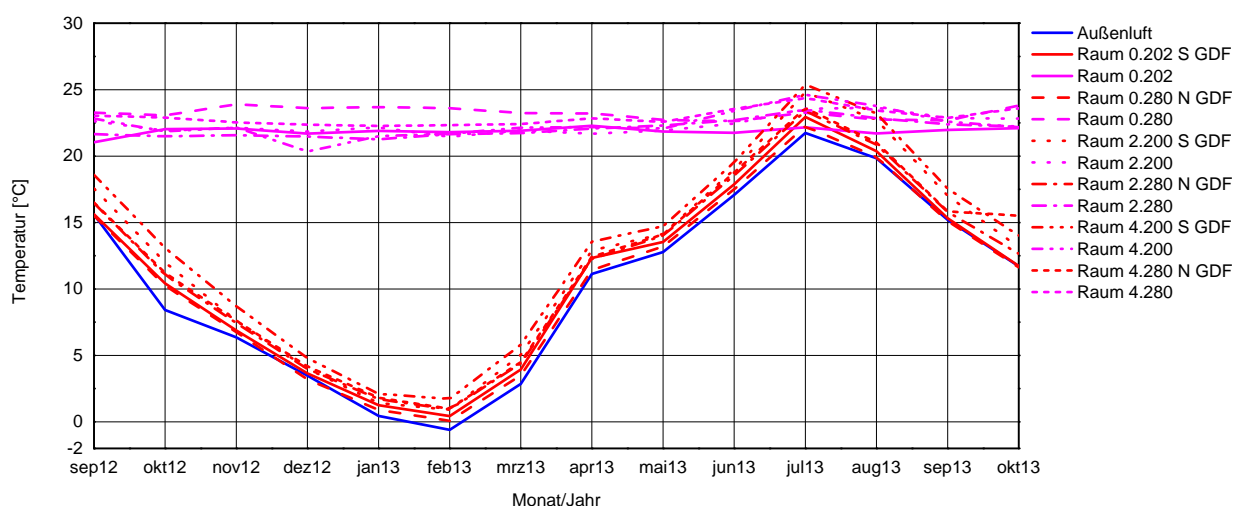


Bild 16: Monatsmittelwerte (Messung) der Außenlufttemperatur, Raumlufttemperatur und Temperatur in der Glasdoppelfassade für alle Versuchsräume.

Im Sommer ist mit erhöhten Kühllasten aufgrund der Glasdoppelfassade zu rechnen.

Tabelle 19: Tabellarische Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen und der zugehörigen Temperaturen im Fassadenzwischenraum (Messung) für alle Versuchsräume.

Monat	Raum 0.202		Raum 0.280		Raum 2.200		Raum 2.280		Raum 4.200		Raum 4.280	
	S		N		S		N		S		N	
	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Sep12	15,6	21,0	15,5	23,3	17,6	22,6	16,5	21,7	18,6	22,8	16,5	23,0
Okt12	10,4	22,0	10,3	23,1	12,0	21,9	11,1	21,5	13,1	21,9	11,2	22,9
Nov12	6,9	22,1	6,8	23,9	7,6	22,1	7,4	21,6	8,7	22,2	7,6	22,5
Dez12	3,7	21,7	3,2	23,6	4,0	21,9	4,0	21,5	4,8	20,4	4,2	22,4
Jan13	1,2	21,9	0,9	23,7	1,4	22,2	1,7	21,3	2,1	21,5	1,8	22,3
Feb13	0,4	21,8	0,1	23,6	0,9	21,5	0,9	21,7	1,7	21,7	1,0	22,3
Mrz13	3,9	21,9	3,5	23,2	5,1	21,9	4,4	21,7	5,8	22,1	4,5	22,4
Apr13	12,3	22,3	11,4	23,2	12,9	21,7	12,3	22,1	13,6	22,2	12,4	22,8
Mai13	13,5	21,9	13,2	22,7	14,1	21,9	14,0	22,3	14,7	22,1	14,1	22,6
Jun13	17,9	21,8	17,5	22,6	19,0	22,4	18,6	22,7	19,5	23,4	18,8	23,6
Jul13	22,9	22,2	22,2	23,3	24,8	23,6	23,4	23,5	25,4	24,6	23,6	24,4
Aug13	20,4	21,7	19,9	22,7	22,7	23,6	20,9	22,9	23,2	23,8	21,0	23,4
Sep13	15,3	22,0	15,1	22,7	17,0	22,9	15,8	22,4	17,5	22,6	15,8	22,9
Okt13	11,7	22,1	11,6	23,8	13,1	22,8	12,7	22,2	14,0	22,2	15,5	23,6

Die Monatsmittelwerte der solaren Einstrahlung auf die betrachteten Fassadenorientierungen sowie die Windgeschwindigkeit sind in Bild 11 und Bild 12 wiedergegeben. Die Strahlung auf die nördlich orientierte Fassade ist erwartungsgemäß deutlich geringer als auf die südliche orientierte Fassade, die mittlere Windgeschwindigkeit liegt etwa zwischen 1,9 und 3,3 m/s. In Tabelle 6 sind zur Übersicht die erfassten Monatsmittelwerte der Wetterdaten in Zahlenwerten aufgeführt.

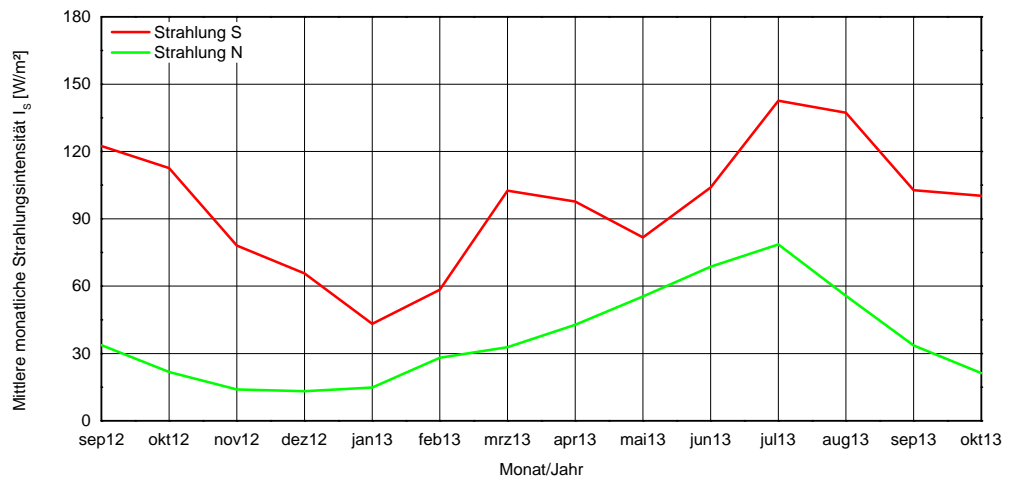


Bild 17: Monatsmittelwerte (Messung) der vertikalen Süd- und Nordstrahlung.

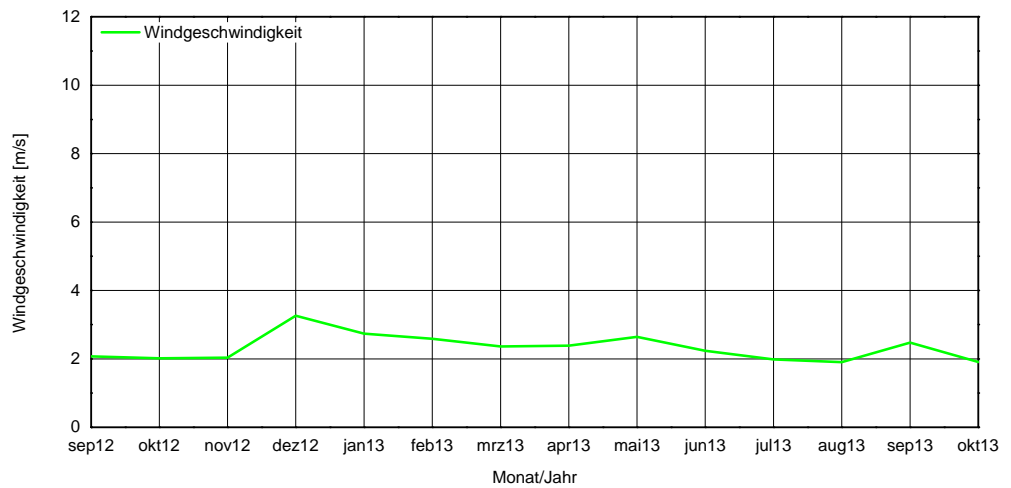


Bild 18: Monatsmittelwerte (Messung) der Windgeschwindigkeit.

Tabelle 20: Tabellarische Zusammenstellung der Monatsmittelwerte (Messung) wesentlicher Wetterdaten.

Monat	Außenluft- temperatur [°C]	Süd- strahlung [W/m²]	Nord- strahlung [W/m²]	Wind- geschwindig- keit [m/s]
Sep12	15,6	122,5	33,7	2,1
Okt12	8,4	112,6	21,7	2,0
Nov12	6,4	78,1	14,0	2,0
Dez12	3,5	65,7	13,2	3,3
Jan13	0,5	43,2	14,8	2,7
Feb13	-0,6	58,4	28,0	2,6
Mrz13	2,9	102,5	32,8	2,4
Apr13	11,1	97,7	42,8	2,4
Mai13	12,8	81,7	55,4	2,6
Jun13	17,1	103,9	68,7	2,2
Jul13	21,7	142,6	78,6	2,0
Aug13	19,8	137,3	55,7	1,9
Sep13	15,2	102,7	33,6	2,5
Okt13	11,7	100,2	21,2	1,9

In Bild 19 sind die durchschnittlichen Fensteröffnungszeiten je Monat dargestellt. Diese fließen in die Berechnungen der Lüftungswärmeverluste zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade ein (vgl. Kapitel 4.2.2.2).

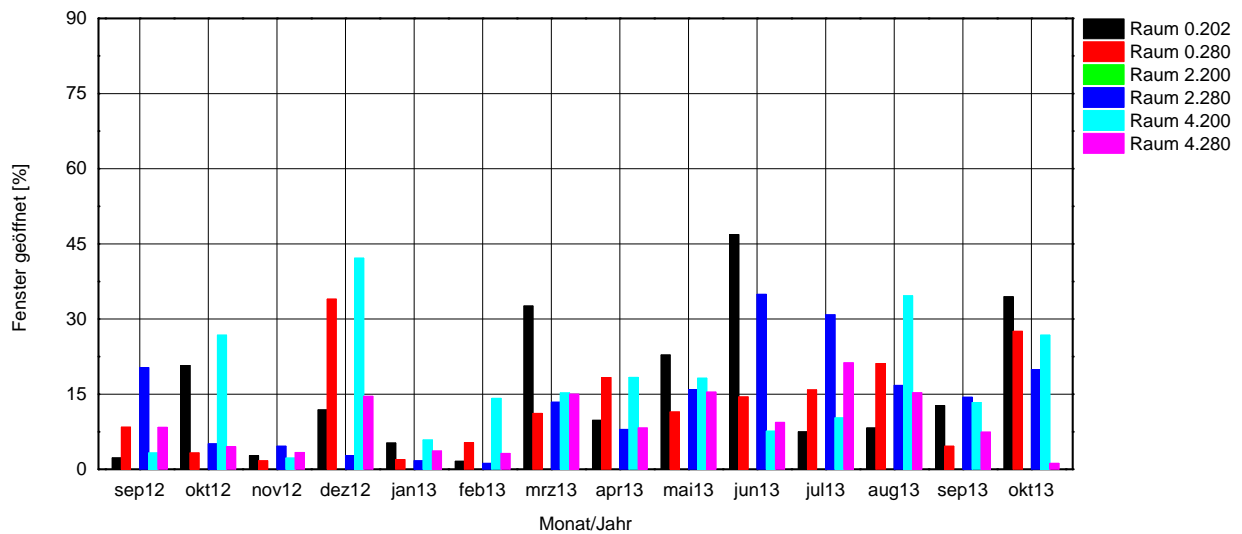


Bild 19: Durchschnittliche Fensteröffnungszeiten je Monat und Raum (defekter Fensterkontakt im Raum 2.200).

4.2.2 Vergleich Messung – Rechnung

Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung erfolgt analog dem Vorgehen in Kapitel 4.1.2.

4.2.2.1 Basisvariante BV

Die wesentlichen Berechnungsparameter der Basisvariante sind in Tabelle 21 aufgeführt.

Tabelle 21: Tabellarische Zusammenstellung wesentlicher Berechnungsparameter der Basisvarian-
te.

Parameter	Wert / Einheit	Beschreibung	Quelle
$F_{S,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor für Verschattung für übliche Anwendungsfälle	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{W,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{V,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung	DIN V 18599-10 Kapitel 6
$g_{L,ue}$	0,59	Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach DIN EN 410	[10]
$F_{S,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor für Verschattung für übliche Anwendungsfälle	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{W,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{V,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung	DIN V 18599-10 Kapitel 6
$a_{iu,Winter}$	S	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen, strahlungsabhängig geregelten Sonnenschutzvorrichtungen	DIN V 18599-2 Tabelle A.5, S/N-Ausrichtung
	N		
$a_{iu,Sommer}$	S	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen, strahlungsabhängig geregelten Sonnenschutzvorrichtungen	DIN V 18599-2 Tabelle A.5, S/N-Ausrichtung
	N		
$g_{L,iu}$	0,50	Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach DIN EN 410	[10]
$F_{c,iu}$	0,25	Abminderungsfaktor der Sonnenschutzvorrichtung	[1], Tabelle 7, Zeile 3.3
$\tau_{e,ue}$	0,47	Transmissionsgrad für Solarstrahlung	[10]
$U_{g,iu}$	0,60 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	[10]
$U_{f,iu}$	1,20 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen	[10]
$U_{Panel,iu}$	0,30 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Paneel	[10]
$\Delta U_{WB,iu}$	0,05 W/(m ² K)	Pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	DIN V 18599-2, Kapitel 6.2.1.2
$U_{g,ue}$	5,10 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	[10]
$\Delta U_{WB,ue}$	0,05 W/(m ² K)	Pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	DIN V 18599-2, Kapitel 6.2.1.2
$c_{p,a} \rho_a$	0,34 Wh/(m ³ K)	Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte von Luft	DIN V 18599-2 Kapitel 6.3.1.1
Z_{GDF}	2190	Einfachverglasung außen, mittlerer Scheibenabstand 0,58 m	[8]
A_{GDF}	0,16 m ² /lfdm.	starrer Lüftungsquerschnitt über die gesamte Geschoßhöhe von ca. 9 cm Breite; lichte Höhe zwischen den Geschoßen 3,425 m; freier Lüftungsquerschnitt: 3,43 m * 0,09 m = 0,31 m ² ; senkrechter Luftspalt wiederholt	[3] und [8]

Parameter	Wert / Einheit	Beschreibung	Quelle
		sich alle 1,875 m entlang der Fassade; freier Lüftungsquerschnitt: $0,31/1,88 = 0,16 \text{ m}^2/\text{lfdm}$	
$C_{v,GDF}$	0,25	unverschließbare, übliche Konstruktionen	[3]
$A_{GDF,aero}$	0,04 m^2/lfdm .	$A_{GDF} * C_{v,GDF}$	[3] und [8]
n_{ue}	87,4 h^{-1}	$Z_{GDF} * A_{GDF,aero}$	[3] und [8]

Die berechneten Temperaturen im Fassadenzwischenraum für die Basisvariante im Vergleich mit den Messwerten sowie in Bezug zur Außen- und Raumlufttemperatur sind in den Grafiken im Bild 20 zusammengetragen. Es zeigt sich, dass der Jahresgang der Temperaturen im Fassadenzwischenraum rechnerisch bei allen Versuchsräumen gut nachvollzogen werden kann. Es sind jedoch je nach Monat und Raum moderate Abweichungen festzustellen. Diese betragen maximal 2,4 K im Betrachtungsmonat Oktober 2012 beim Raum 4.200 (Tabelle 22). Ein systematischer Unterschied im Hinblick auf die Rechengenauigkeit in Abhängigkeit der Fassadenorientierung (Süd / Nord) oder der Geschosshöhe (EG / 2. / 4. Geschoss) kann nicht festgestellt werden.

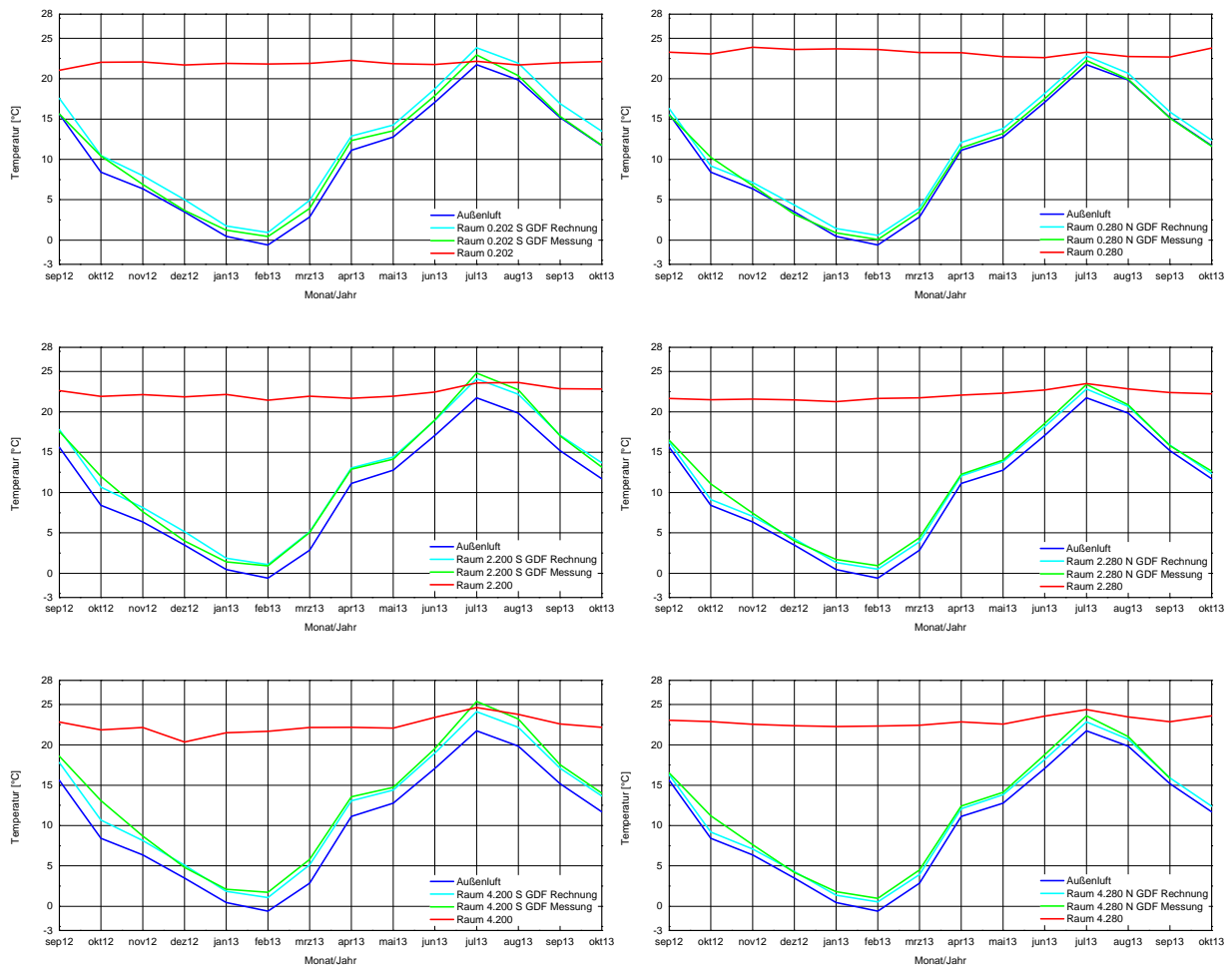


Bild 20: Vergleich der Monatsmittelwerte der gemessenen (grüne Linie) und berechneten (türkise Linie) Temperatur im Fassadenzwischenraum zusammen mit der gemessenen Außenluft- und Raumlufttemperatur für die Versuchsräume im EG (obere beide Grafiken), im 2. OG (mittlere beide Grafiken) und im 4. OG (untere beide Grafiken).

Tabelle 22: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Differenz Messung – Rechnung [K]					
	Raum 0.202 S	Raum 0.280 N	Raum 2.200 S	Raum 2.280 N	Raum 4.200 S	Raum 4.280 N
Sep 12	-1,9	-0,8	-0,2	0,2	0,8	0,2
Okt 12	-0,1	1,1	1,3	1,9	2,4	2,0
Nov 12	-1,1	-0,4	-0,5	0,4	0,6	0,5
Dez 12	-1,3	-1,1	-1,1	-0,3	-0,3	-0,1
Jan 13	-0,5	-0,6	-0,4	0,3	0,3	0,4
Feb 13	-0,5	-0,5	-0,2	0,4	0,6	0,4
Mrz 13	-1,0	-0,5	-0,1	0,5	0,7	0,6
Apr 13	-0,6	-0,7	-0,1	0,2	0,5	0,3
Mai 13	-0,7	-0,6	-0,3	0,2	0,3	0,3
Jun 13	-0,9	-0,7	0,1	0,4	0,6	0,6
Jul 13	-0,9	-0,6	0,7	0,6	1,3	0,8
Aug 13	-1,5	-0,7	0,6	0,2	1,0	0,3
Sep 13	-1,6	-0,8	-0,1	-0,1	0,4	-0,1
Okt 13	-1,7	-0,8	-0,5	0,3	0,4	*

* Temperatur Fassadenzwischenraum 4.280 (Messkanal OG4_Nord_4280_GDF_LT): seit 18.10.2013 unplausibel starker Temperaturanstieg, Wert wird daher nicht für die Auswertung herangezogen

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (13 Monate) ist in Tabelle 23 angegeben. Je geringer diese Gesamtabweichung ausfällt, desto genauer kann ein Gebäude mit Glasdoppelfassade im Hinblick auf den Jahresnutzenergiebedarf berechnet werden (vgl. auch Kapitel 4.5).

Tabelle 23: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 0.202 S	Raum 0.280 N	Raum 2.200 S	Raum 2.280 N	Raum 4.200 S	Raum 4.280 N
1,0	0,7	0,4	0,4	0,7	0,7

4.2.2.2 Variante 1 – Berücksichtigung Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade

In den Messräumen der Gedonstraße werden die Fensteröffnungszeiten ebenfalls über Fensterkontakte erfasst. Diese mussten aus praktischen Gründen jedoch im unteren Fensterbereich angeordnet werden (siehe Bild 21), so dass die-

se nur reagieren, wenn das Fenster durch Drehen geöffnet wird; ein Kippen wird nicht registriert, da sich hierfür die Kontakte nicht weit genug voneinander entfernen.



Bild 21: Fensterkontakt Gedonstraße.

Für die Berechnung des Luftwechsels zwischen Büro und Fassadenzwischenraum wird daher das angepasste Modell nach [13] verwendet:

$$\dot{V}_{zu} = 3600 \frac{1}{2} A_l \Theta \sqrt{(C_1 u^2 + C_2 H \Delta \vartheta + C_3)} \quad (16)$$

A_l	Fläche der lichten Fensteröffnung [m ²]
Θ	Durchflußverhältnis in Abhängigkeit der Fensterstellung [-]
C_1	Geschwindigkeitskoeffizient des Modellansatzes [-]
C_2	Temperaturkoeffizient des Modellansatzes [m/(s ² K)]
C_3	Turbulenzkoeffizient des Modellansatzes [m/(s ² K)]
u	Windgeschwindigkeit [m/s]
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz zwischen Büro- und Fassadenzwischenraum [K]

Da keine Messungen zur Öffnungsweite durchgeführt werden, wird eine mittlere Öffnungsweite $s = 15$ cm angenommen. Aufgrund der sekundären Fassade bleibt der Windeinfluss unberücksichtigt. Unter den genannten Bedingungen ergeben sich die folgenden Kennwerte:

- $A_l = A_{eq} (\alpha = 90^\circ) = B \times H = 0,42 \text{ m} \times 1,78 \text{ m} = 0,75 \text{ m}^2$
- $A_s = 2 \times 0,42 \times \sin 7,5^\circ \times (0,42 \times \cos 7,5^\circ + 1,78) = 0,24 \text{ m}^2$

- $A_{\text{eq}}(15^\circ) = (1/0,75^2 + 1/0,24^2)^{-0,5} = 0,23 \text{ m}^2$
- $\Theta = A_{\text{eq}}(15^\circ) / A_{\text{eq}}(\alpha = 90^\circ) = 0,31$ (zum Vergleich: $\Theta = 0,385$ experimentell bestimmt für $\alpha = 15^\circ$ und Fensterabmessungen gemäß [13])
- $C_2 = 0,0037 \text{ m}/(\text{s}^2\text{K})$
- $C_3 = 0,012 \text{ m}^2/\text{s}^2$

Setzt man die Zahlen in Gleichung (16) ein so ergibt sich folgende Berechnungsformel für den Zuluftvolumenstrom:

$$\dot{V}_{\text{zu}} = 3600 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,75 \cdot 0,31 \cdot \sqrt{(0,0037 \cdot 1,78 \cdot \Delta\vartheta + 0,012)}$$

Zur Ermittlung der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ werden hier die Messwerte der Raumluft- und Fassadenzwischenraumtemperatur eingesetzt (vgl. Kapitel 4.1.2.2). Der Term muss dann noch mit der jeweils vorhandenen Fensteröffnungszeit multipliziert werden.

Mit den vorliegenden Werten lässt sich der Luftaustausch zwischen Büroraum und Fassadenzwischenraum und damit der Lüftungswärmetransferkoeffizient in Abhängigkeit der messtechnisch ermittelten Fensteröffnungszeiten abschätzen:

$$n_{\text{iu}} = \frac{\dot{V}_{\text{zu}}}{V_{\text{Raum}}}$$

$$H_{\text{V,iu}} = c_{\text{p,a}} * \rho_{\text{a}} * n_{\text{iu}} * V_{\text{Raum}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]$$

Die nach o.g. Modell ermittelten Luftwechsel liegen zwischen 0,0 und 2,6 h⁻¹ (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24: Monatsmittelwerte der Luftwechsel n_{iu} für die verschiedenen Räume.

Luftwechsel n_{iu} [h^{-1}]						
Monat	Raum 0.202	Raum 0.280	Raum 2.200	Raum 2.280	Raum 4.200	Raum 4.280
	S	N	S	N	S	N
Sep12	0,1	0,2	0,0	0,3	0,1	0,1
Okt12	0,9	0,1	-	0,1	0,5	0,1
Nov12	0,1	0,0	-	0,1	0,1	0,1
Dez12	0,6	1,0	1,6	0,1	1,0	0,4
Jan13	0,3	0,1	0,8	0,1	0,2	0,1
Feb13	0,1	0,2	0,9	0,0	0,4	0,1
Mrz13	1,8	0,3	2,6	0,4	0,4	0,4
Apr13	0,4	0,4	0,0	0,2	0,4	0,2
Mai13	0,9	0,2	0,0	0,3	0,3	0,3
Jun13	1,4	0,2	-	0,5	0,1	0,1
Jul13	0,1	0,2	-	0,3	0,1	0,2
Aug13	0,2	0,3	-	0,2	0,3	0,2
Sep13	0,5	0,1	0,0	0,3	0,2	0,2
Okt13	1,5	0,6	0,0	0,4	0,5	0,0

Bei der Variante 1 betragen die Abweichungen maximal -2,8 K im Betrachtungsmonat Dezember 2012 beim Raum 2.200 (Tabelle 25). Die Veränderungen gegenüber der Basisvariante fallen sehr unterschiedlich aus. Bei der Annahme geöffneter Fenster ist die Bandbreite der berechneten Luftwechselraten hoch, so dass auch der Lüftungswärmetransferkoeffizient zwischen Büro und Glasdoppelfassade eine größere Bedeutung gewinnt. An dieser Variante zeigt sich, dass der Einfluss zeitweise gedreht geöffneter Fenster auf die Temperatur im Fassadenzwischenraum einen erheblichen Einfluss haben kann. Sofern nicht auszuschließen ist, dass Fensterflügel voll geöffnet werden, ist eine genauere Ermittlung des Lüftungswärmetransferkoeffizienten zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade notwendig.

Tabelle 25: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Differenz Messung – Rechnung [K]					
	Raum 0.202 S	Raum 0.280 N	Raum 2.200 S	Raum 2.280 N	Raum 4.200 S	Raum 4.280 N
Sep 12	-2,0	-0,9	-0,2	0,1	0,8	0,1
Okt 12	-0,7	1,0	Datenausfall Fensterk.	1,8	2,0	1,9
Nov 12	-1,2	-0,4	Datenausfall Fensterk.	0,3	0,5	0,4
Dez 12	-2,0	-2,3	-2,8	-0,4	-1,3	-0,6
Jan 13	-0,8	-0,6	-1,5	0,3	0,1	0,3
Feb 13	-0,6	-0,8	-1,3	0,4	0,1	0,3
Mrz 13	-2,7	-0,9	-2,6	0,1	0,2	0,1
Apr 13	-0,8	-1,0	-0,1	0,1	0,3	0,2
Mai 13	-1,1	-0,8	-0,3	0,0	0,2	0,1
Jun 13	-1,1	-0,7	Datenausfall Fensterk.	0,2	0,5	0,5
Jul 13	-0,9	-0,6	Datenausfall Fensterk.	0,6	1,3	0,7
Aug 13	-1,5	-0,8	Datenausfall Fensterk.	0,2	1,0	0,3
Sep 13	-1,7	-0,8	-0,1	-0,2	0,4	-0,1
Okt 13	-2,5	-1,2	-0,5	0,1	0,1	*

* Temperatur Fassadenzwischenraum 4.280 (Messkanal OG4_Nord_4280_GDF_LT): seit 18.10.2013 unplausibel starker Temperaturanstieg, Wert wird daher nicht für die Auswertung herangezogen

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (13 Monate) ist in Tabelle 13 angegeben. Bei den Räumen im EG ergeben sich höhere Abweichungen, bei den Räumen im 2. und 4. OG ergeben sich geringere Abweichungen gegenüber der Basisvariante. Sofern höhere Luftwechselraten zwischen Gebäudezone und Fassadenzwischenraum zu erwarten sind, sollten diese genauer bestimmt werden, da ein signifikanter Einfluss auf die Temperatur im Fassadenzwischenraum entsteht.

Tabelle 26: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 0.202 S	Raum 0.280 N	Raum 2.200 S	Raum 2.280 N	Raum 4.200 S	Raum 4.280 N
1,4	0,9	-	0,3	0,6	0,4

4.2.2.3 Variante 2 – Berücksichtigung des gemessenen effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades

Analog dem Vorgehen in Kapitel 4.1.2.3 wird der effektive Gesamtenergiedurchlassgrad anhand realer Messdaten bestimmt. Die Behangstellung in der Gedonstraße wird von der Gebäudeleittechnik erfasst. Aufgrund von Systemausfällen sind jedoch nur in folgenden Monaten vollständige GLT-Daten der Behangstellungen in den Messräumen vorhanden:

- November 2012
- Mai bis Juli 2013

In Tabelle 27 sind die messtechnisch ermittelten effektiven Gesamtenergiedurchlassgrade $g_{\text{eff,iu}}$ für jeden Messraum aufgeführt. Je nach Monat und Messraum schwanken die Werte zwischen $g_{\text{eff,iu}} = 0,14$ (Raum 2.200 bzw. 4.200, Südfassade, Juli 2013) und $g_{\text{eff,iu}} = 0,41$. Die Mittelwerte über alle Messräume liegen für die Südfassade zwischen 0,14 und 0,22 und für die Nordfassade zwischen 0,40 und 0,41. Die nach Norm berechneten Werte betragen 0,17 für die Südfassade bzw. 0,36 für die Nordfassade. Demnach ergeben sich nur moderate Abweichungen zwischen messtechnisch und rechnerisch ermittelten $g_{\text{eff,iu}}$ -Werten.

Tabelle 27: Messtechnisch ermittelter effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{\text{eff,iu}}$ der Variante 2 im Vergleich zum jeweiligen Normwert DIN V 18599 (Basisvariante).

Effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{\text{eff,iu}}$ [-]										
Monat	Basisvariante		Variante 2							
			Messraum							
	Normwert DIN V 18599		Mittelwert aller Messräume		0.202	0.280	2.200	2.280	4.200	4.280
	S	N	S	N	(S)	(N)	(S)	(N)	(S)	(N)
Nov12	0,17	0,36	0,22	0,40	0,24	0,41	0,24	0,40	0,17	0,39
Mai13	0,17	0,36	0,19	0,41	0,20	0,41	0,18	0,41	0,20	0,41
Jun13	0,17	0,36	0,17	0,41	0,17	0,41	0,16	0,41	0,17	0,41
Jul13	0,17	0,36	0,14	0,41	0,15	0,41	0,14	0,41	0,14	0,41

Die Abweichungen der berechneten von der gemessenen Temperatur im Fassadenzwischenraum betragen bei der vorliegenden Variante 2 maximal 1,2 K im Betrachtungsmonat Juli 2013 beim Raum 4.200 (Tabelle 28). Die Veränderungen gegenüber der Variante 1 fallen, wie zu erwarten, gering aus. Es ist

hierbei jedoch zu beachten, dass aufgrund der lückenhaften GLT-Datensätze nur vier Monate verglichen werden können. Die Veränderung der Abweichung zwischen Messung und Rechnung in den betrachteten vier Monaten beträgt maximal 0,1 K.

Tabelle 28: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Differenz Messung – Rechnung [K]						
Monat / Jahr	Raum 0.202 S	Raum 0.280 N	Raum 2.200 S	Raum 2.280 N	Raum 4.200 S	Raum 4.280 N
Sep 12	keine GLT-Daten Behangstellung verfügbar					
Okt 12						
Nov 12	-1,1	-0,4	*	0,3	0,5	0,5
Dez 12	keine GLT-Daten Behangstellung verfügbar					
Jan 13						
Feb 13						
Mrz 13						
Apr 13						
Mai 13	-1,1	-0,7	-0,2	0,1	0,2	0,1
Jun 13	-1,1	-0,7	*	0,3	0,5	0,6
Jul 13	-0,9	-0,5	*	0,6	1,2	0,8
Aug 13	keine GLT-Daten Behangstellung verfügbar					
Sep 13						
Okt 13						

* Datenausfall Fensterkontakt

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der 4 auswertbaren Monate ist in Tabelle 29 angegeben. Der Gesamtvergleich mit den Ergebnissen der Variante 1 ist aufgrund der unvollständigen GLT-Daten nicht möglich.

Tabelle 29: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum für die Monate Nov 12; Mai-Juli 13.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 2.04 S	Raum 2.06 N	Raum 8.06 S	Raum 8.08 N	Raum 15.06 S	Raum 15.08 N
1,1	0,6	*	0,3	0,6	0,5

* Datenausfall Fensterkontakt

4.2.2.4 Variante 3 – Bisheriger Ansatz pauschaler Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$

Um beurteilen zu können, inwieweit das neu entwickelte Kennlinienmodell zur Ermittlung des Luftwechsel im Fassadenzwischenraum (vgl. Kapitel 3.8) Vorteile gegenüber dem bis dato angesetzten pauschalen Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$ bringt, wird basierend auf der Basisvariante eine Variante 3 gerechnet, bei der ein pauschaler Luftwechsel von 10 h^{-1} angesetzt wird, um den Lüftungswärmetransferkoeffizienten des Fassadenzwischenraums nach außen zu berechnen. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung zeigt Tabelle 30.

Tabelle 30: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Differenz Messung – Rechnung [K]					
	Raum 0.202 S	Raum 0.280 N	Raum 2.200 S	Raum 2.280 N	Raum 4.200 S	Raum 4.280 N
Sep 12	-6,1	-2,1	-4,5	-1,0	-3,5	-1,1
Okt 12	-4,4	-0,4	-3,0	0,5	-1,9	0,5
Nov 12	-4,5	-1,9	-3,9	-0,9	-2,9	-0,9
Dez 12	-4,5	-2,8	-4,4	-1,8	-3,4	-1,7
Jan 13	-3,1	-2,5	-3,1	-1,4	-2,3	-1,5
Feb 13	-3,7	-2,8	-3,4	-1,7	-2,6	-1,7
Mrz 13	-5,4	-2,6	-4,5	-1,6	-3,7	-1,5
Apr 13	-4,3	-2,5	-3,9	-1,6	-3,3	-1,5
Mai 13	-3,8	-2,7	-3,4	-1,8	-2,8	-1,7
Jun 13	-4,4	-2,7	-3,5	-1,7	-3,1	-1,6
Jul 13	-5,3	-2,6	-3,8	-1,5	-3,3	-1,4
Aug 13	-5,9	-2,3	-3,9	-1,4	-3,5	-1,3
Sep 13	-5,2	-2,1	-3,8	-1,4	-3,2	-1,4
Okt 13	-5,5	-2,1	-4,3	-0,9	-3,4	*

* Temperatur Fassadenzwischenraum 4.280 (Messkanal OG4_Nord_4280_GDF_LT): seit 18.10.2013 unplausibel starker Temperaturanstieg, Wert wird daher nicht für die Auswertung herangezogen

Bis auf 4 einzelne Werte liegen die Abweichungen deutlich über denen der Basisvariante mit der Kennlinienmethode. Die maximale Abweichung beträgt -6,1 K für den Raum 0.202 im Monat September 12, d. h. es werden hier deutlich zu hohe Temperaturen im Fassadenzwischenraum berechnet, die Luftwechselrate n_{ue} ist mit 10 h^{-1} zu niedrig angesetzt (zum Vergleich: $n_{ue} = 87 \text{ h}^{-1}$ in der Basisvariante, Abweichung -1,9 K).

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (13 Monate) ist in Tabelle 31 angegeben. Gegenüber der Basisvariante sind durchweg deutlich höhere Abweichungen vorhanden (zwischen 0,6 und 3,7 K höhere Abweichung je nach Raum). Eine differenzierte Abschätzung der Luftwechselrate in Abhängigkeit des Doppelfassadentyps erhöht im vorliegenden Fall erheblich die Rechengenauigkeit.

Tabelle 31: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 0.202	Raum 0.280	Raum 2.200	Raum 2.280	Raum 4.200	Raum 4.280
S	N	S	N	S	N
4,7	2,3	3,8	1,4	3,1	1,3

4.3 Mandlstraße

4.3.1 Messung

Die Messdatenerfassung am Gebäude Mandlstraße startet am 20.11.2012, die Messwerte werden als 5 Minuten-Mittelwerte in der Datenbank abgespeichert. Die Auswertung erstreckt sich über den Zeitraum von einem Jahr, d.h. bis zum 31.10.2013.

Bild 10 zeigt für alle Versuchsräume die messtechnisch erfassten Monatsmittelwerte der Temperaturkette von innen (Gebäudezone) über die Glasdoppelfassade nach außen. Die Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen bewegen sich auf einem Niveau von 20,9 bis 26,3 °C, das Mittel über alle Räume und Monate beträgt 22,7 °C (siehe Tabelle 32). Die Temperaturdifferenz zur Außenlufttemperatur beträgt in den Wintermonaten minimal ca. 13 K im Oktober 2013 und maximal etwa 23 K im Februar 2013. Die Pufferwirkung der Glasdoppelfassade sorgt für eine moderate Anhebung des Außenlufttemperatur (siehe Tabelle 33) von etwa 2 K, so dass der Temperaturgradient zur Raumluft im Oktober 2013 nur mehr ca. 11 K und im Februar 2013 ca. 21 K beträgt. Im Sommer kann der Temperaturhub über die Glasdoppelfassade nicht beeinflusst werden, da keine regulierbaren Lüftungssysteme in der Glasdoppelfassade vorhanden sind. Im Juli 2013 beträgt der mittlere Temperaturhub gegenüber der Außenluft etwa 3 K (Bild 22).

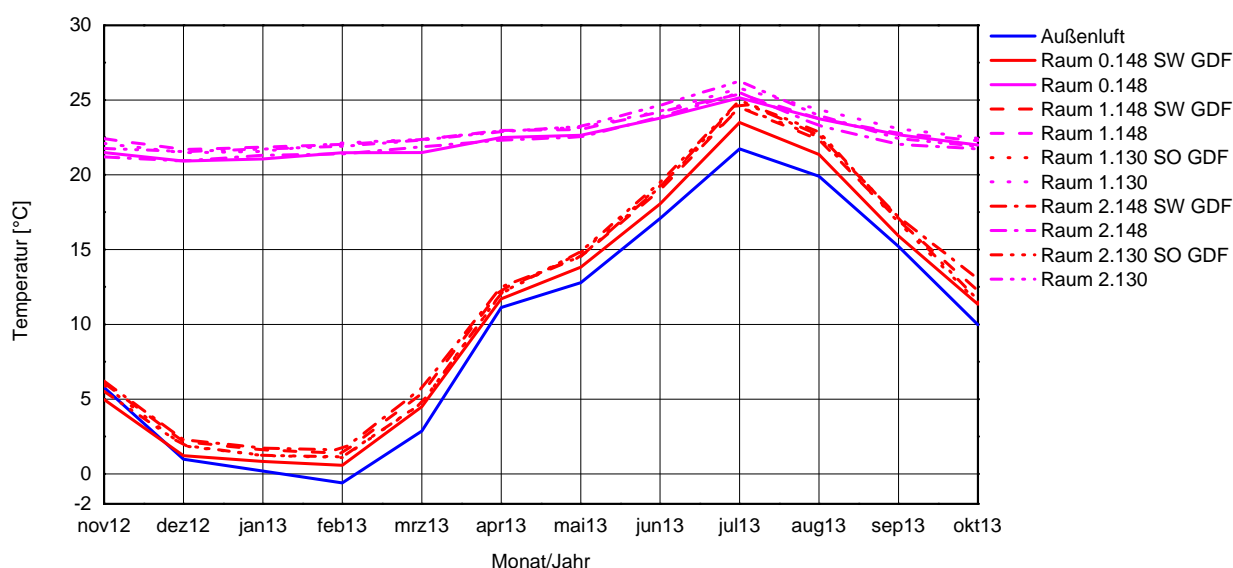


Bild 22: Monatsmittelwerte (Messung) der Außenlufttemperatur, Raumlufttemperatur und Temperatur in der Glasdoppelfassade für alle Versuchsräume.

Tabelle 32: Tabellarische Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen und der zugehörigen Temperaturen im Fassadenzwischenraum (Messung) für alle Versuchsräume.

Monat	Raum 0.148		Raum 1.148		Raum 1.130		Raum 2.148		Raum 2.130	
	SW		SW		SO		SW		SO	
	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Nov12	5,0	21,5	6,1	22,4	5,9	22,1	6,2	21,2	5,5	21,8
Dez12	1,2	20,9	2,2	21,7	1,9	21,5	2,3	20,9	1,9	21,6
Jan13	0,8	21,1	1,6	21,8	1,2	21,6	1,7	21,3	1,2	21,7
Feb13	0,6	21,5	1,4	22,0	1,1	22,1	1,6	21,4	1,1	21,9
Mrz13	4,5	21,5	5,4	22,4	4,7	22,4	5,7	21,9	4,8	22,3
Apr13	11,7	22,5	12,4	23,0	12,1	22,9	12,5	22,3	12,1	22,9
Mai13	13,8	22,6	14,5	23,0	14,8	23,2	14,5	22,5	14,9	23,2
Jun13	18,1	23,8	19,0	24,2	19,3	24,3	19,2	23,9	19,5	24,6
Jul13	23,5	25,1	24,5	25,4	24,5	25,8	24,9	25,5	25,0	26,3
Aug13	21,4	23,8	22,3	23,8	22,5	24,4	22,7	23,3	22,9	24,0
Sep13	15,9	22,7	17,0	22,8	16,8	23,1	17,2	22,0	17,1	22,4
Okt13	11,3	22,0	12,3	22,3	11,5	22,4	13,0	21,7	11,6	21,9

Die Monatsmittelwerte der solaren Einstrahlung auf die betrachteten Fassadenorientierungen sowie die Windgeschwindigkeit sind in Bild 23 und Bild 24 wiedergegeben. Die Südost- und Südweststrahlungswerte zeigen eine ähnliche Größenordnung, die mittlere Windgeschwindigkeit liegt zwischen 1,9 und 3 m/s. In Tabelle 33 sind zur Übersicht die erfassten Monatsmittelwerte der Wetterdaten in Zahlenwerten aufgeführt.

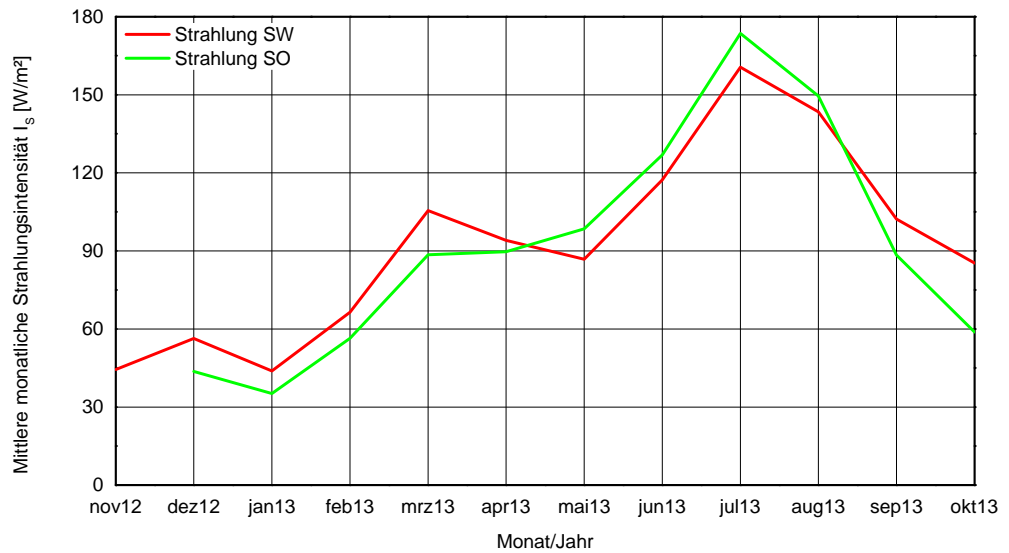


Bild 23: Monatsmittelwerte (Messung) der vertikalen Südwest- und Südoststrahlung.

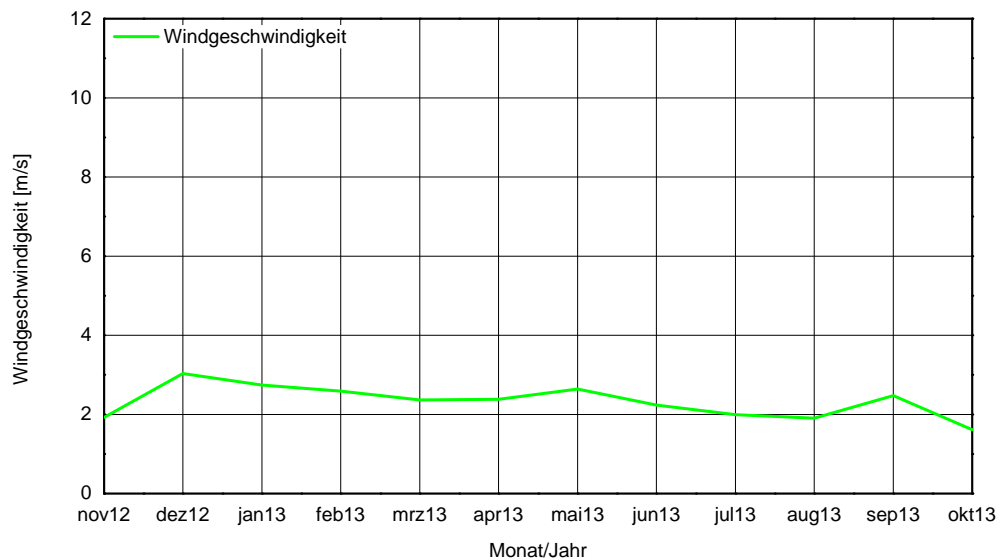


Bild 24: Monatsmittelwerte (Messung) der Windgeschwindigkeit.

Tabelle 33: Tabellarische Zusammenstellung der Monatsmittelwerte (Messung) wesentlicher Wetterdaten.

Monat	Außenlufttemperatur [°C]	Südweststrahlung [W/m ²]	Südoststrahlung [W/m ²]	Windgeschwindigkeit [m/s]
Nov12	5,8	44,4	-	1,9
Dez12	1,0	56,3	43,7	3,0
Jan13	0,2	43,9	35,2	2,7
Feb13	-0,6	66,4	56,4	2,6
Mrz13	2,9	105,4	88,5	2,4
Apr13	11,1	94,0	89,7	2,4
Mai13	12,8	86,8	98,5	2,6
Jun13	17,1	117,3	126,9	2,2
Jul13	21,7	160,6	173,6	2,0
Aug13	19,9	143,4	149,5	1,9
Sep13	15,2	102,2	88,4	2,5
Okt13	10,0	85,3	58,8	1,6

Beim Gebäude Mandlstraße wurden keine Fensterkontakte installiert, um die Fensteröffnungszeiten zu erfassen, da aufgrund der Großraumbürosituation keine klare Zuordnung von geöffneten Fenstern zu bestimmten Büros möglich ist. Für die Berechnungen der Lüftungswärmeverluste zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade wird daher ein pauschaler Ansatz verwendet (vgl. Kapitel 4.3.2.2).

4.3.2 Vergleich Messung – Rechnung

Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung erfolgt analog dem Vorgehen in Kapitel 4.1.2. Es fehlt jedoch die Variante 2 - Berücksichtigung des gemessenen effektiven Gesamtergiedurchlassgrades, da beim Gebäude Mandlstraße keine GLT-Daten zu den Behangstellungen des Sonnenschutzsystems zur Verfügung gestellt werden konnten.

4.3.2.1 Basisvariante

Die wesentlichen Berechnungsparameter der Basisvariante sind in Tabelle 34 aufgeführt.

Tabelle 34: Tabellarische Zusammenstellung wesentlicher Berechnungsparameter der Basisvariante.

Parameter	Wert / Einheit	Beschreibung	Quelle
$F_{S,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor für Verschattung für übliche Anwendungsfälle	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{W,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{V,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung	DIN V 18599-10 Kapitel 6
$g_{\perp,ue}$	0,59	Gesamtergiedurchlassgrad des Glases nach DIN EN 410	[11]
$F_{S,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor für Verschattung für übliche Anwendungsfälle	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{W,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1
$F_{V,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung	DIN V 18599-10 Kapitel 6
$a_{iu,Winter}$	0,71	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen, strahlungsabhängig geregelten Sonnenschutzvorrichtungen	DIN V 18599-2 Tabelle A.5, SO/SW- Ausrichtung
$a_{iu,Sommer}$	0,77	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen, strahlungsabhängig geregelten Sonnenschutzvorrichtungen	DIN V 18599-2 Tabelle A.5, SO/SW- Ausrichtung
$g_{\perp,iu}$	0,55	Gesamtergiedurchlassgrad des Glases nach DIN EN 410	[11]
$F_{c,iu}$	0,39	Abminderungsfaktor der Sonnenschutzvorrichtung	[11]
$\tau_{e,ue}$	0,50	Transmissionsgrad für Solarstrahlung	[11]
$U_{g,iu}$	1,10 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	[11]
$U_{f,iu}$	2,10 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen	[11]
$\Delta U_{WB,iu}$	0,05 W/(m ² K)	Pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	DIN V 18599-2, Kapitel 6.2.1.2
$U_{g,ue}$	5,40 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	[11]

Parameter	Wert / Einheit	Beschreibung	Quelle
$\Delta U_{WB,ue}$	0,05 W/(m ² K)	Pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	DIN V 18599-2, Kapitel 6.2.1.2
$c_{p,a} \rho_a$	0,34 Wh/(m ³ K)	Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte von Luft	DIN V 18599-2 Kapitel 6.3.1.1
Z_{GDF}	820	Einfachverglasung außen, Scheibenabstand 1,10 m	[8]
A_{GDF}	0,13 m ² /lfdm.	Ermittlung anhand Bild 25: $(3,18-3) / 2 * 1 + (7,5 - 7,45) / 2 * 3,18 / 2$	[3] und [8]
$c_{v,GDF}$	0,25	unverschließbare, übliche Konstruktionen	[3]
$A_{GDF,aero}$	0,03 m ² /lfdm.	$A_{GDF} * c_{v,GDF}$	[3] und [8]
n_{ue}	26,6 h ⁻¹	$Z_{GDF} * A_{GDF,aero}$	[3] und [8]



Bild 25: Maße zur Ermittlung der Lüftungsquerschnitts der Glasdoppelfassade (siehe Tabelle 34).

Die berechneten Temperaturen im Fassadenzwischenraum für die Basisvariante im Vergleich mit den Messwerten sowie in Bezug zur Außen- und Raumlufttemperatur sind in den Grafiken im Bild 26 zusammengetragen. Es zeigt sich, dass der Jahresgang der Temperaturen im Fassadenzwischenraum rechnerisch bei allen Versuchsräumen gut nachvollzogen werden kann. Es sind jedoch je nach Monat und Raum moderate Abweichungen festzustellen. Diese betragen maximal -2,8 K im Betrachtungsmonat November 2012 beim Raum 0.148 (Tabelle 35). Ein systematischer Unterschied im Hinblick auf die Rechengenauigkeit in Abhängigkeit der Fassadenorientierung (Südwest / Südost) oder der Geschosshöhe (2. / 8. / 15. Geschoss) kann nicht festgestellt werden.

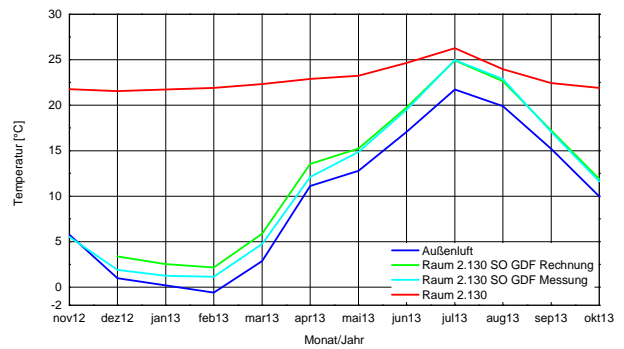
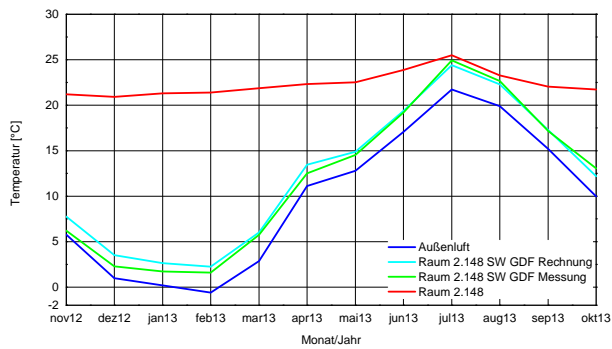
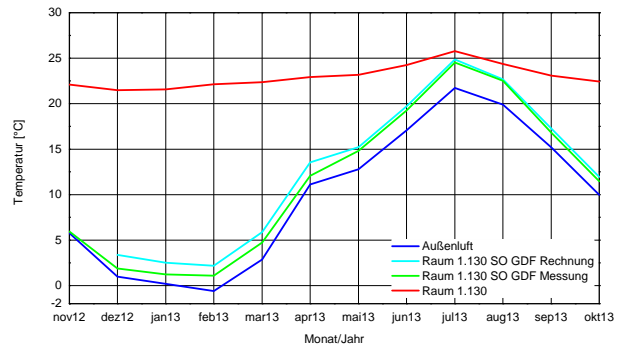
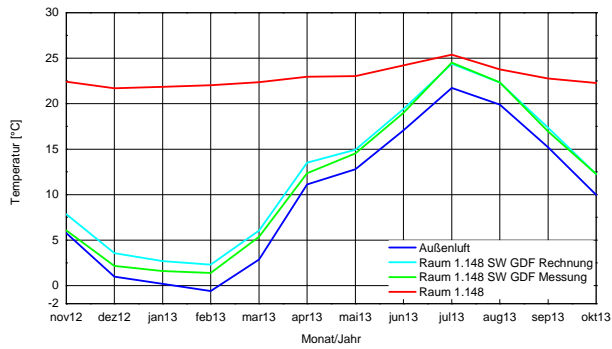
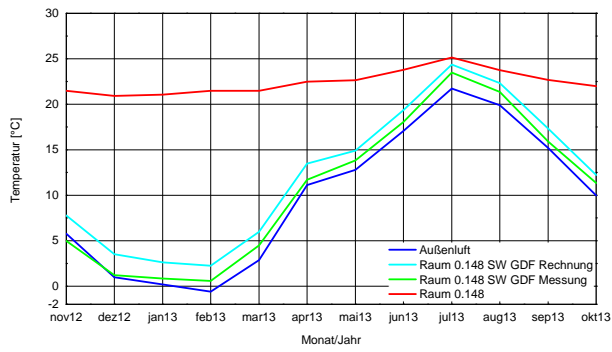


Bild 26: Vergleich der Monatsmittelwerte der gemessenen (grüne Linie) und berechneten (türkise Linie) Temperatur im Fassadenzwischenraum zusammen mit der gemessenen Außenluft- und Raumlufttemperatur für die Versuchsräume im EG (obere Grafik), im 1. OG (mittlere beide Grafiken) und im 2. OG (untere beide Grafiken).

Tabelle 35: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Raum 0.148 SW	Raum 1.148 SW	Raum 1.130 SO	Raum 2.148 SW	Raum 2.130 SO
Nov 12	-2,8	-1,8	*	-1,5	*
Dez 12	-2,3	-1,4	-1,5	-1,2	-1,5
Jan 13	-1,8	-1,1	-1,3	-0,9	-1,3
Feb 13	-1,7	-0,9	-1,1	-0,6	-1,0
Mrz 13	-1,5	-0,7	-1,2	-0,3	-1,1
Apr 13	-1,8	-1,2	-1,5	-1,0	-1,4
Mai 13	-1,1	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
Jun 13	-1,3	-0,4	-0,5	-0,2	-0,2
Jul 13	-0,9	0,1	-0,3	0,5	0,1
Aug 13	-1,0	0,0	-0,2	0,4	0,2
Sep 13	-1,4	-0,4	-0,4	-0,1	-0,1
Okt 13	-0,9	0,0	-0,5	0,8	-0,3

* fehlende Messdaten

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (12 Monate) ist in Tabelle 36 angegeben. Je geringer diese globale Abweichung ausfällt, desto genauer kann ein Gebäude mit Glasdoppelfassade im Hinblick auf den Jahresnutzenergiebedarf bewertet werden. Die Auswirkung einer fehlerhaft abgeschätzten Temperatur im Fassadenzwischenraum auf den Nutzenergiebedarf eines exemplarischen Büroraums wird im Kapitel 4.5 behandelt.

Tabelle 36: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]				
Raum 0.148 SW	Raum 1.148 SW	Raum 1.130 SO	Raum 2.148 SW	Raum 2.130 SO
1,5	0,7	0,8	0,7	0,7

4.3.2.2 Variante 1 - Berücksichtigung Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade

Da im Gebäude Mandlstraße keine Fensteröffnungszeiten erfasst werden (vgl. Erläuterungen in Kapitel 4.3.1) wird eine pauschale Luftwechselrate n_{iu} von $0,3 \text{ h}^{-1}$ für den Sommerfall und $0,1 \text{ h}^{-1}$ für den Winterfall angenommen.

Bei der Berechnung der Temperatur im Fassadenzwischenraum ergeben sich damit Abweichungen von maximal $-2,9 \text{ K}$ im Betrachtungsmonat November 2012 beim Raum 0.148 (Tabelle 37). Die Veränderungen gegenüber der Basis-

variante sind minimal. Tendenziell werden die Abweichungen größer, jedoch höchstens um 0,1K.

Tabelle 37: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Raum 0.148 SW	Raum 1.148 SW	Raum 1.130 SO	Raum 2.148 SW	Raum 2.130 SO
Nov 12	-2,9	-1,9	*	-1,6	*
Dez 12	-2,4	-1,6	-1,6	-1,4	-1,6
Jan 13	-1,9	-1,2	-1,4	-1,1	-1,4
Feb13	-1,8	-1,1	-1,2	-0,8	-1,2
Mrz13	-1,6	-0,8	-1,3	-0,4	-1,3
Apr13	-2,0	-1,4	-1,7	-1,2	-1,7
Mai13	-1,2	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6
Jun 13	-1,4	-0,5	-0,6	-0,3	-0,4
Jul 13	-0,9	0,1	-0,4	0,5	0,0
Aug 13	-1,0	0,0	-0,2	0,4	0,2
Sep 13	-1,5	-0,5	-0,6	-0,2	-0,3
Okt 13	-1,1	-0,2	-0,7	0,6	-0,5

* fehlende Messdaten

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (12 Monate) ist in Tabelle 38 angegeben. Beim Raum 0.148 ergibt sich eine um 0,2 K höhere Abweichung, ansonsten liegen die Veränderungen im Bereich von 0 bis 0,1 K. Die Vernachlässigung des Lüftungswärmetransferkoeffizient $H_{v,iu}$ zwischen der betrachteten Gebäudezone und der benachbarten ist unter diesen Randbedingungen vertretbar.

Tabelle 38: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]				
Raum 0.148 SW	Raum 1.148 SW	Raum 1.130 SO	Raum 2.148 SW	Raum 2.130 SO
1,7	0,8	0,9	0,7	0,8

4.3.2.3 Variante 3: Bisheriger Ansatz pauschaler Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$

Um beurteilen zu können, inwieweit das neu entwickelte Kennlinienmodell zur Ermittlung des Luftwechsel im Fassadenzwischenraum (vgl. Kapitel 3.8) Vorteile gegenüber dem bis dato angesetzten pauschalen Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$ bringt, wird basierend auf der Basisvariante eine Variante 3 gerechnet, bei der ein pauschaler Luftwechsel von 10 h^{-1} angesetzt wird, um den Lüftungswär-

metransferkoeffizienten des Fassadenzwischenraums nach außen zu berechnen. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung zeigt Tabelle 39.

Tabelle 39: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Raum 0.148 SW	Raum 1.148 SW	Raum 1.130 SO	Raum 2.148 SW	Raum 2.130 SO
Nov 12	-4,0	-3,0	*	-2,7	*
Dez 12	-3,8	-3,0	-2,9	-2,8	-2,9
Jan 13	-3,3	-2,6	-2,7	-2,4	-2,7
Feb13	-3,4	-2,7	-2,7	-2,4	-2,7
Mrz13	-3,4	-2,6	-3,0	-2,2	-2,9
Apr13	-3,2	-2,6	-2,9	-2,4	-2,9
Mai13	-2,4	-1,7	-1,9	-1,6	-1,8
Jun 13	-2,7	-1,8	-2,0	-1,6	-1,8
Jul 13	-2,5	-1,5	-2,2	-1,1	-1,8
Aug 13	-2,4	-1,5	-1,8	-1,1	-1,4
Sep 13	-2,7	-1,7	-1,7	-1,4	-1,4
Okt 13	-2,2	-1,4	-1,6	-0,5	-1,4

* fehlende Messdaten

Bis auf eine Ausnahme (Raum 2.148, Oktober 2013) liegen die Abweichungen deutlich über denen der Basisvariante mit der Kennlinienmethode. Die maximale Abweichung beträgt -4,0 K für den Raum 0.148 im Monat November 12, d. h. es werden hier zu hohe Temperaturen im Fassadenzwischenraum berechnet, die Luftwechselrate n_{ue} ist mit 10 h^{-1} zu niedrig angesetzt (zum Vergleich Raum 2.148, Oktober 2013: $n_{ue} = 27 \text{ h}^{-1}$ in der Basisvariante, Abweichung -2,8 K).

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (12 Monate) ist in Tabelle 40 angegeben. Gegenüber der Basisvariante sind durchweg deutlich höhere Abweichungen vorhanden (zwischen 1,1 und 1,5 K höhere Abweichung je nach Raum). Eine differenzierte Abschätzung der Luftwechselrate in Abhängigkeit des Doppelfassadentyps erhöht im vorliegenden Fall die Rechengenauigkeit.

Tabelle 40: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]				
Raum 0.148 SW	Raum 1.148 SW	Raum 1.130 SO	Raum 2.148 SW	Raum 2.130 SO
3,0	2,2	2,3	1,8	2,2

4.4 Münchner Tor

4.4.1 Messung

Die Messdatenerfassung in den Versuchsräumen am Münchner Tor startet bereits im August 2012, die Strahlungsdaten am Dach des Hochhauses werden jedoch erst seit 31.10.2012 erfasst, so dass die Auswertungen ab November 2012 durchgeführt werden. Die Messwerte werden als 5 Minuten-Mittelwerte in der Datenbank abgespeichert. Die Auswertung erstreckt sich über den Zeitraum von einem Jahr, d.h. bis zum 31.10.2013.

Bild 10 zeigt für alle Versuchsräume die messtechnisch erfassten Monatsmittelwerte der Temperaturkette von innen (Gebäudezone) über die Glasdoppelfassade nach außen. Die Monatsmittelwerte der Raumlufttemperaturen bewegen sich zwischen 20,7 und 25,0 °C. Der Raum 4.172 ist in den Monaten November 2012 bis Februar 2013 mit etwa 20,8 °C etwas kühler (siehe Tabelle 41), da dieser leer steht. Die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Außenlufttemperatur beträgt in den Wintermonaten minimal 10,6 K im Oktober 2013 und maximal etwa 21,5 K im Februar 2013. Die Pufferwirkung der Glasdoppelfassade sorgt für eine Anhebung der Temperatur im Fassadenzwischenraum gegenüber der Außenlufttemperatur (siehe Tabelle 42), so dass der Temperaturgradient zur Raumluft im Oktober 2013 nur mehr 9,5 K und im Februar 2013; 20,4 K beträgt. Im Sommer kann keine erhöhte Wärmeabfuhr aus dem Fassadenzwischenraum nach außen durch gezieltes Öffnen von Lüftungsöffnungen erfolgen. Im Juli 2013 beträgt der mittlere Temperaturhub gegenüber der Außenluft etwa 2 – 3 K, so dass sich die mittlere Temperatur innerhalb der Glasdoppelfassade der Raumlufttemperatur annähert bzw. diese zeitweise übersteigt (siehe Bild 27).

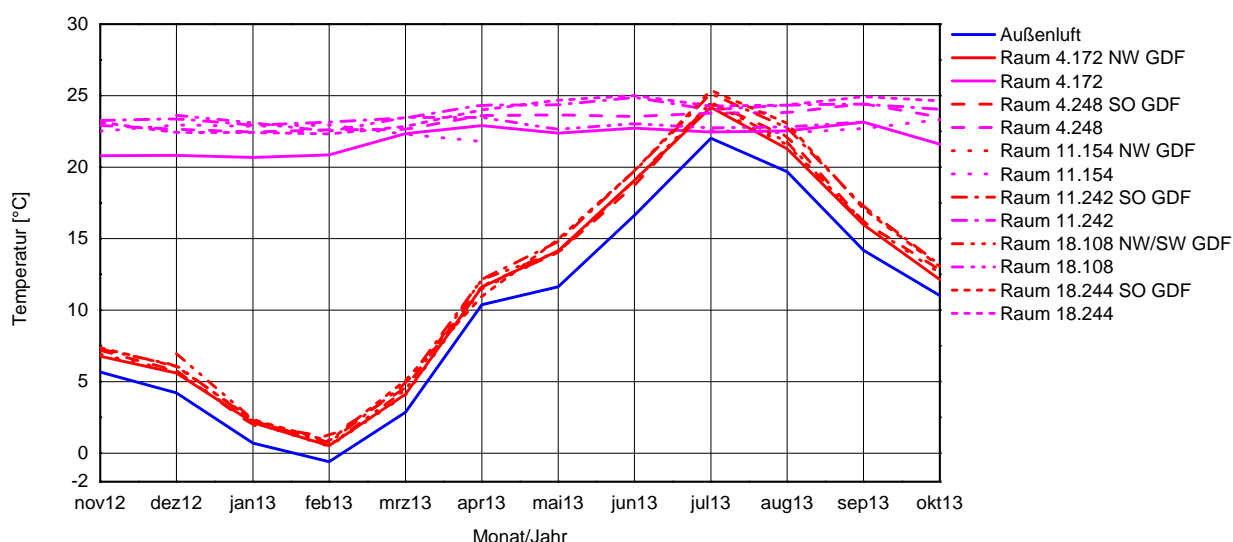


Bild 27: Monatsmittelwerte (Messung) der Außenlufttemperatur, Raumlufttemperatur und Temperatur in der Glasdoppelfassade für alle Versuchsräume.

Tabelle 41: Tabellarische Zusammenstellung der Monatsmittelwerte der Raumlufthtemperaturen und der zugehörigen Temperaturen im Fassadenzwischenraum (Messung) für alle Versuchsräume.

Monat	Raum 4.172		Raum 4.248		Raum 11.154		Raum 11.242		Raum 18.108		Raum 18.244	
	NW		SO		NW		SO		NW/SW		SO	
	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum	GDF	Raum
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Nov12	6,8	20,8	7,2	22,9	6,9	22,5	7,3	23,3	*	*	7,4	23,1
Dez12	5,6	20,8	5,8	22,7	5,7	23,0	6,1	23,4	7,0	23,6	6,1	22,4
Jan13	2,1	20,7	1,9	22,5	2,1	22,9	2,2	22,9	2,4	23,1	2,3	22,4
Feb13	0,5	20,9	1,1	22,6	0,5	23,0	0,7	23,2	0,5	22,5	0,8	22,3
Mrz13	4,1	22,3	4,6	22,6	4,1	22,3	4,9	23,4	4,4	23,5	5,1	22,9
Apr13	11,6	22,9	11,7	23,6	11,5	21,8	12,2	24,4	12,1	23,5	11,0	24,0
Mai13	14,2	22,4	14,0	23,7	14,1	*	14,8	24,4	14,1	22,7	15,0	24,7
Jun13	19,1	22,7	18,7	23,5	19,1	*	19,7	24,9	19,1	23,0	19,8	25,0
Jul13	24,2	22,5	24,5	23,8	24,2	22,6	25,1	24,0	24,5	22,7	25,4	24,3
Aug13	21,3	22,5	22,2	23,8	21,6	22,4	22,7	24,3	21,7	22,8	23,1	24,3
Sep13	16,0	23,1	16,2	24,4	16,2	22,7	17,2	24,4	16,0	23,2	17,1	24,9
Okt13	12,1	21,6	12,8	23,5	12,6	23,3	13,2	24,1	*	*	13,1	24,6

* fehlende Messdaten

Die Monatsmittelwerte der solaren Einstrahlung auf die betrachteten Fassadenorientierungen sowie die Windgeschwindigkeit sind in Bild 28 und Bild 29 wiedergegeben. Die Nordweststrahlung weist zwischen 8 und 58 W/m² geringere Werte auf als die Südoststrahlung. Für den Eckraum 18.108 mit Nordwest- und Südwestfassade wurde für die Strahlungswerte der Südwestorientierung auf den Südstrahlungsgeber der Gedonstraße zurückgegriffen, da die Südorientierung der Gedonstraße nur ca. 9° von der Südwestorientierung am Münchener Tor abweicht. Die einwirkende Strahlungsleistung auf den Eckraum ergibt sich als Mittelwert der beiden Strahlungsleistungen. Die mittlere Windgeschwindigkeit liegt zwischen 2,2 und 4,7 m/s. In Tabelle 42 sind zur Übersicht die erfassten Monatsmittelwerte der Wetterdaten in Zahlenwerten aufgeführt.

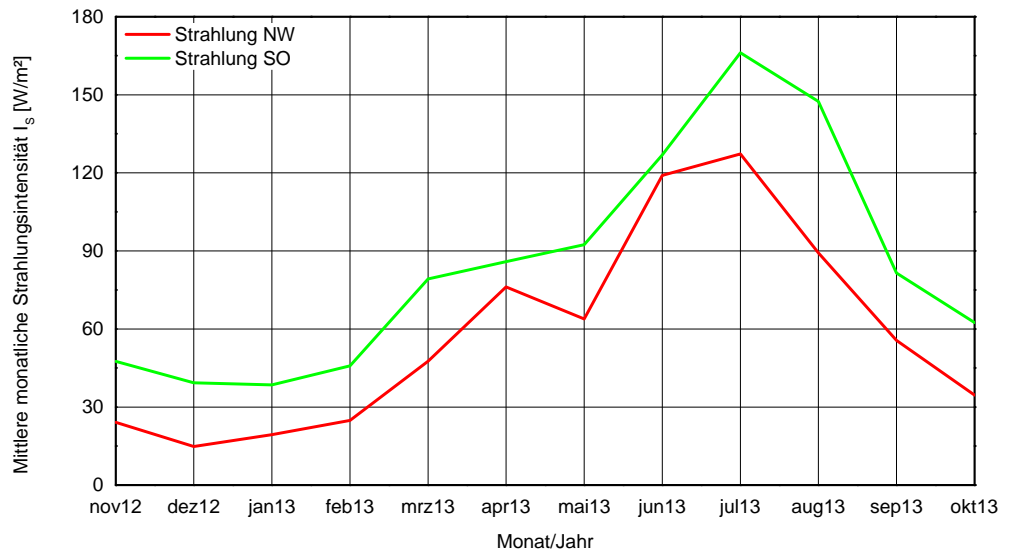


Bild 28: Monatsmittelwerte (Messung) der vertikalen Südwest- und Südoststrahlung.

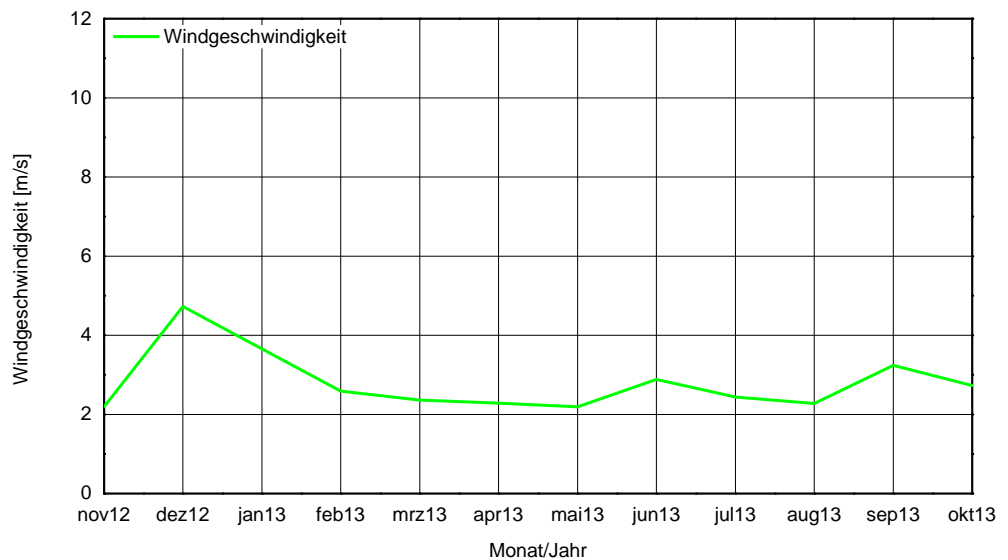


Bild 29: Monatsmittelwerte (Messung) der Windgeschwindigkeit.

Tabelle 42: Tabellarische Zusammenstellung der Monatsmittelwerte (Messung) wesentlicher Wetterdaten.

Monat	Außenlufttemperatur [°C]	Nordweststrahlung [W/m ²]	Südoststrahlung [W/m ²]	Windgeschwindigkeit [m/s]
Nov12	5,7	24,1	47,6	2,2
Dez12	4,2	14,8	39,3	4,7
Jan13	0,7	19,4	38,5	3,7
Feb13	-0,6	24,8	45,9	2,6
Mrz13	2,9	47,6	79,3	2,4
Apr13	10,4	76,1	85,8	2,3
Mai13	11,6	63,9	92,4	2,2
Jun13	16,6	119,0	126,9	2,9
Jul13	22,0	127,3	166,2	2,4
Aug13	19,7	89,3	147,4	2,3
Sep13	14,2	55,6	81,5	3,2
Okt13	11,0	34,5	62,4	2,7

Die Fensteröffnungszeiten konnten am Münchner Tor aus technischen Gründen nicht erfasst werden. Für die Berechnungen der Lüftungswärmeverluste zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade wird daher ein pauschaler Ansatz verwendet (vgl. Kapitel 4.4.2.2).

4.4.2 Vergleich Messung – Rechnung

Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung erfolgt analog dem Vorgehen in Kapitel 4.1.2.

4.4.2.1 Basisvariante

Die wesentlichen Berechnungsparameter der Basisvariante sind in Tabelle 43 aufgeführt.

Tabelle 43: Tabellarische Zusammenstellung wesentlicher Berechnungsparameter der Basisvariante.

Parameter	Wert / Einheit	Beschreibung	Quelle	
$F_{S,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor für Verschattung für übliche Anwendungsfälle	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1	
$F_{W,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1	
$F_{V,ue}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung	DIN V 18599-10 Kapitel 6	
$g_{\perp,ue}$	0,83	Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach DIN EN 410	[12]	
$F_{S,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor für Verschattung für übliche Anwendungsfälle	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1	
$F_{W,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge nicht senkrechten Strahlungseinfalls	DIN V 18599-2 Kapitel 6.4.1	
$F_{V,iu}$	0,90	Abminderungsfaktor infolge von Verschmutzung	DIN V 18599-10 Kapitel 6	
$a_{iu,Winter}$	NW	0,03	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen, strahlungsabhängig geregelten Sonnenschutzvorrichtungen	DIN V 18599-2 Tabelle A.5; NW/SW-Wert gewichtet
	SO	0,71		
	NW/SW	0,40		
$a_{iu,Sommer}$	NW	0,49	Parameter zur Bewertung der Aktivierung von beweglichen, strahlungsabhängig geregelten Sonnenschutzvorrichtungen	DIN V 18599-2 Tabelle A.5; NW/SW-Wert gewichtet
	SO	0,77		
	NW/SW	0,64		
$g_{\perp,iu}$	0,53	Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases nach DIN EN 410	[12]	
$F_{c,iu}$	0,25	Abminderungsfaktor der Sonnenschutzvorrichtung	[12] und [1]	
$\tau_{e,ue}$	0,85	Transmissionsgrad für Solarstrahlung	[12] und [3]	
$U_{g,iu}$	1,10 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	[12]	
$U_{f,iu}$	1,80 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen	[12]	
$\Delta U_{WB,iu}$	0,05 W/(m ² K)	Pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	DIN V 18599-2, Kapitel 6.2.1.2	
$U_{g,ue}$	5,80 W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient Verglasung	[12]	
$\Delta U_{WB,ue}$	0,05 W/(m ² K)	Pauschaler, außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	DIN V 18599-2, Kapitel 6.2.1.2	
$c_{p,a} \rho_a$	0,34 Wh/(m ³ K)	Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte von Luft	DIN V 18599-2 Kapitel 6.3.1.1	
Z_{GDF}	2600	Einfachverglasung außen, Scheibenabstand 0,28 m	[8]	
A_{GDF}	0,12 m ² /lfdm.	Anforderungskatalog für die Ausschreibung und Ausführung Fassade	[12]	
$c_{v,GDF}$	0,25	unverschließbare, übliche Konstruktionen	[3]	
$A_{GDF,aero}$	0,03 m ² /lfdm.	$A_{GDF} * c_{v,GDF}$	[3] und [8]	
n_{ue}	78 h ⁻¹	$Z_{GDF} * A_{GDF,aero}$	[3] und [8]	

Die berechneten Temperaturen im Fassadenzwischenraum für die Basisvariante im Vergleich mit den Messwerten sowie in Bezug zur Außen- und Raumlufttemperatur sind in den Grafiken im Bild 30 zusammengetragen. Es zeigt sich, dass der Jahresgang der Temperaturen im Fassadenzwischenraum rechnerisch bei allen Versuchsräumen gut nachvollzogen werden kann. Es sind jedoch je nach Monat und Raum moderate Abweichungen festzustellen. Diese betragen maximal -2,5 K im Betrachtungsmonat April 2013 beim Raum 18.244 (Tabelle 44). Ein systematischer Unterschied im Hinblick auf die Rechengenauigkeit in Abhängigkeit der Fassadenorientierung (Nordwest / Südost) oder der Geschosshöhe (4. / 11. / 18. Geschoss) kann nicht festgestellt werden.

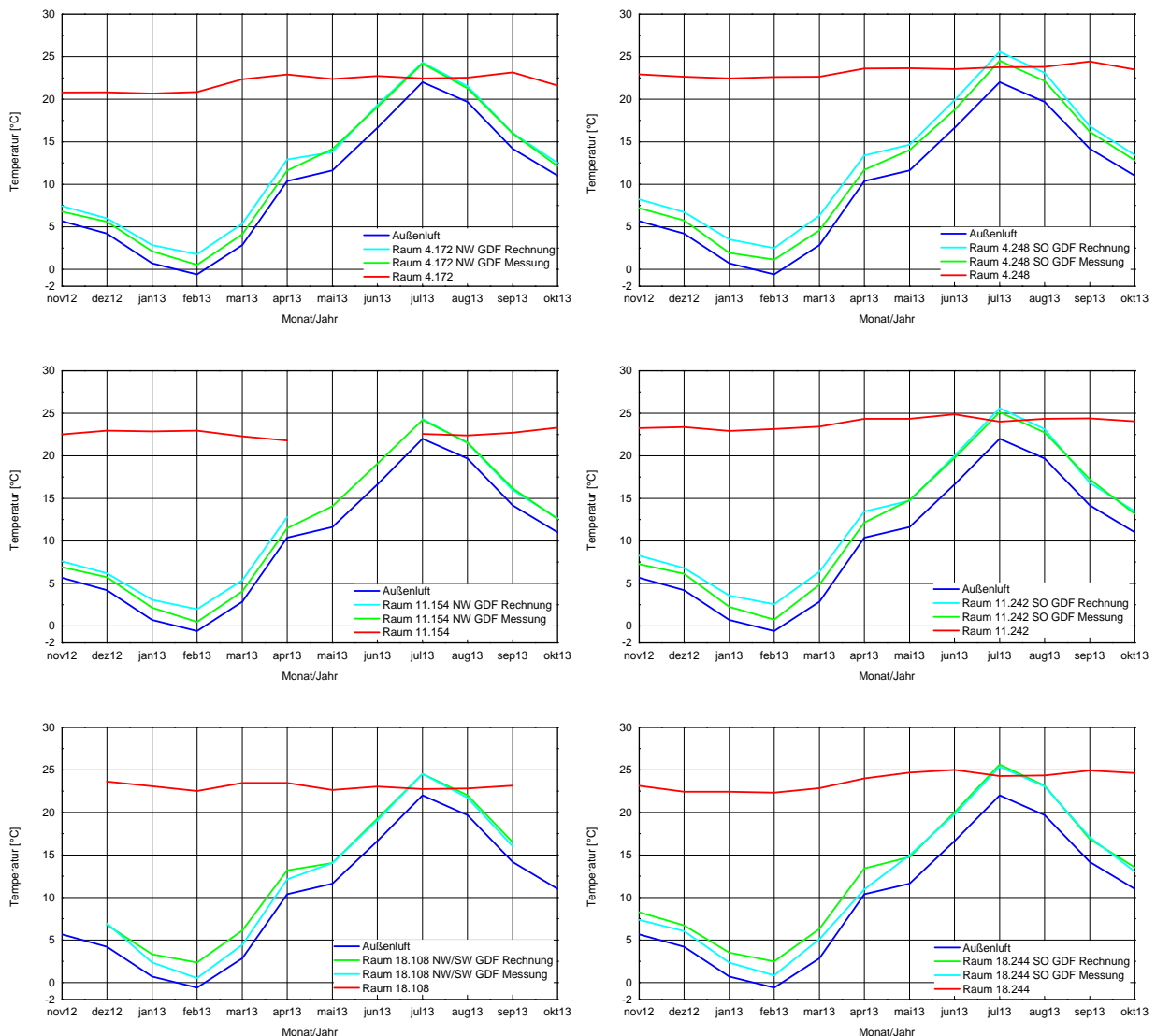


Bild 30: Vergleich der Monatsmittelwerte der gemessenen (grüne Linie) und berechneten (türkise Linie) Temperatur im Fassadenzwischenraum zusammen mit der gemessenen Außenluft- und Raumlufttemperatur für die Versuchsräume im 4. OG (obere beide Grafiken), im 11. OG (mittlere beide Grafiken) und im 18. OG (untere beide Grafiken). (teilweise Datenlücken vorhanden).

Tabelle 44: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Differenz Messung – Rechnung [K]					
	Raum 4.172 NW	Raum 4.248 SO	Raum 11.154 NW	Raum 11.242 SO	Raum 18.108 NW/SW	Raum 18.244 SO
Nov 12	-0,7	-1,0	-0,7	-1,0	*	-0,9
Dez 12	-0,4	-1,0	-0,5	-0,7	0,2	-0,7
Jan 13	-0,7	-1,6	-0,9	-1,3	-1,0	-1,2
Feb13	-1,3	-1,4	-1,5	-1,8	-1,8	-1,6
Mrz13	-1,3	-1,7	-1,3	-1,5	-1,7	-1,2
Apr13	-1,3	-1,7	-1,3	-1,3	-1,1	-2,5
Mai13	0,4	-0,7	*	0,1	0,0	0,2
Jun 13	-0,2	-1,1	*	-0,3	-0,2	-0,3
Jul 13	-0,1	-1,1	-0,1	-0,5	0,0	-0,3
Aug 13	-0,3	-0,9	0,0	-0,4	-0,3	-0,1
Sep 13	0,0	-0,7	0,2	0,4	-0,5	0,2
Okt 13	-0,4	-0,6	-0,1	-0,3	*	-0,5

* fehlende Messdaten

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (12 Monate) ist in Tabelle 45 angegeben. Je geringer diese globale Abweichung ausfällt, desto genauer kann ein Gebäude mit Glasdoppelfassade im Hinblick auf den Jahresnutzenergiebedarf bewertet werden. Die Auswirkung einer fehlerhaft abgeschätzten Temperatur im Fassadenzwischenraum auf den Nutzenergiebedarf eines exemplarischen Büroraums wird im Kapitel 4.5 behandelt.

Tabelle 45: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 4.172 NW	Raum 4.248 SO	Raum 11.154 NW	Raum 11.242 SO	Raum 18.108 NW/SW	Raum 18.244 SO
0,6	1,1	0,7	0,8	0,7	0,8

4.4.2.2 Variante 1 - Berücksichtigung Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade

Da im Gebäude Münchner Tor keine Fensteröffnungszeiten erfasst werden wird eine pauschale Luftwechselrate n_{lu} von $0,3 \text{ h}^{-1}$ für den Sommerfall und $0,1 \text{ h}^{-1}$ für den Winterfall angenommen.

Bei der Berechnung der Temperatur im Fassadenzwischenraum ergeben sich damit Abweichungen von maximal -2,9 K im Betrachtungsmonat April 2013 beim Raum 18.244 (Tabelle 46). Die Veränderungen gegenüber der Basisvariante sind höchstens 0,4 K. Tendenziell werden die Abweichungen größer.

Tabelle 46: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Differenz Messung – Rechnung [K]						
Monat / Jahr	Raum 4.172 NW	Raum 4.248 SO	Raum 11.154 NW	Raum 11.242 SO	Raum 18.108 NW/SW	Raum 18.244 SO
Nov 12	-0,8	-1,2	-0,9	-1,2	*	-1,1
Dez 12	-0,6	-1,2	-0,7	-0,9	0,1	-0,9
Jan 13	-1,0	-1,8	-1,2	-1,6	-1,1	-1,4
Feb 13	-1,5	-1,6	-1,8	-2,1	-2,0	-1,9
Mrz 13	-1,5	-1,9	-1,5	-1,7	-1,8	-1,4
Apr 13	-1,7	-2,1	-1,7	-1,7	-1,3	-2,9
Mai 13	0,0	-1,0	*	-0,3	-0,2	-0,2
Jun 13	-0,4	-1,3	*	-0,4	-0,3	-0,5
Jul 13	-0,1	-1,0	-0,1	-0,4	0,0	-0,2
Aug 13	-0,3	-1,0	0,0	-0,4	-0,3	-0,1
Sep 13	-0,3	-0,9	-0,1	0,1	-0,6	-0,1
Okt 13	-0,5	-0,7	-0,2	-0,5	*	-0,6

* fehlende Messdaten

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (12 Monate) ist in Tabelle 47 angegeben. Die Abweichungen nehmen zwischen 0,1 bis 0,2 K zu. Die Vernachlässigung des Lüftungswärmetransferkoeffizient $H_{v,iu}$ zwischen der betrachteten Gebäudezone und der benachbarten ist unter diesen Randbedingungen vertretbar.

Tabelle 47: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 4.172 NW	Raum 4.248 SO	Raum 11.154 NW	Raum 11.242 SO	Raum 18.108 NW/SW	Raum 18.244 SO
0,7	1,3	0,8	0,9	0,8	0,9

4.4.2.3 Variante 2 – Berücksichtigung des gemessenen effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades

Analog dem Vorgehen in Kapitel 4.1.2.3 wird der effektive Gesamtenergiedurchlassgrad anhand realer Messdaten bestimmt. Die Behangstellung am Münchner Tor wird von der Gebäudeleittechnik erfasst. Mit Ausnahme des November 2012 sind GLT-Daten der Sonnenschutzstellung vorhanden.

In Tabelle 48 sind die messtechnisch ermittelten effektiven Gesamtenergiedurchlassgrade $g_{\text{eff,iu}}$ für jeden Messraum aufgeführt. Die messtechnisch ermittelten Gesamtenergiedurchlassgrade liegen alle niedriger als nach Norm.

Tabelle 48: Messtechnisch ermittelter effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{\text{eff,iu}}$ der Variante 2 im Vergleich zum jeweiligen Normwert DIN V 18599 (Basisvariante).

Effektiver Gesamtenergiedurchlassgrad $g_{\text{eff,iu}}$ [-]										
Monat	Basisvariante		Variante 2							
			Messraum							
	Normwert DIN V 18599		Mittelwert aller Messräume		4.172 (NW)	4.248 (SO)	11.154 (NW)	11.242 (SO)	18.108 * (NW/SW)	18.244 (SO)
	NW	SO	NW	SO						
Dez12	0,39	0,20	0,26	0,18	0,25	0,18	0,26	0,18	0,17	0,18
Jan13	0,39	0,20	0,14	0,14	0,14	0,12	0,14	0,16	0,14	0,14
Feb13	0,39	0,20	0,15	0,13	0,14	0,13	0,15	0,14	0,14	0,11
Mrz13	0,39	0,20	0,15	0,14	0,14	0,12	0,15	0,17	0,15	0,13
Apr13	0,27	0,18	0,14	0,15	0,15	0,15	0,13	0,18	0,13	0,12
Mai13	0,27	0,18	0,12	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,16	0,15
Jun13	0,27	0,18	0,11	0,12	0,11	0,12	0,11	0,13	0,11	0,11
Jul13	0,27	0,18	0,13	0,13	0,14	0,12	0,11	0,15	0,11	0,11
Aug13	0,27	0,18	0,15	0,13	0,19	0,14	0,11	0,14	0,11	0,11
Sep13	0,27	0,18	0,13	0,13	0,14	0,14	0,11	0,14	0,11	0,11
Okt13	0,39	0,20	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11

* der Eckraum mit den zwei Fassadenorientierungen wird nicht berücksichtigt

Die Abweichungen der berechneten von der gemessenen Temperatur im Fassadenzwischenraum betragen bei der vorliegenden Variante 2 maximal -2,9 K im Betrachtungsmonat April 2013 beim Raum 18.244 (Tabelle 49). Die Veränderungen gegenüber der Variante 1 fallen gering aus, die Abweichungen erhöhen sich jedoch tendenziell.

Tabelle 49: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Monat / Jahr	Differenz Messung – Rechnung [K]					
	Raum 4.172 NW	Raum 4.248 SO	Raum 11.154 NW	Raum 11.242 SO	Raum 18.108 NW/SW	Raum 18.244 SO
Dez 12	-0,6	-1,2	-0,7	-0,9	-0,1	-0,9
Jan 13	-1,1	-1,9	-1,3	-1,6	-1,2	-1,5
Feb13	-1,7	-1,7	-2,0	-2,2	-2,2	-2,0
Mrz13	-1,8	-2,1	-1,9	-1,8	-2,1	-1,6
Apr13	-1,9	-2,2	-2,0	-1,7	-1,5	-3,0
Mai13	-0,2	-1,2	*	-0,5	-0,3	-0,2
Jun 13	-0,9	-1,5	*	-0,6	-0,7	-0,7
Jul 13	-0,6	-1,3	-0,7	-0,6	-0,4	-0,6
Aug 13	-0,5	-1,2	-0,4	-0,6	-0,7	-0,4
Sep 13	-0,5	-1,1	-0,3	0,0	-0,9	-0,3
Okt 13	-0,8	-0,9	-0,5	-0,6	*	-0,8

* fehlende Messdaten

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der 11 auswertbaren Monate ist in Tabelle 50 angegeben. Die Abweichungen erhöhen sich um 0,1 bis 0,3 K.

Tabelle 50: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum für die Monate Dezember 12 bis Oktober 13.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 4.172 NW	Raum 4.248 SO	Raum 11.154 NW	Raum 11.242 SO	Raum 18.108 NW/SW	Raum 18.244 SO
1,0	1,5	1,1	1,0	1,0	1,1

4.4.2.4 Variante 3: Bisheriger Ansatz pauschaler Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$

Um beurteilen zu können, inwieweit das neu entwickelte Kennlinienmodell zur Ermittlung des Luftwechsel im Fassadenzwischenraum (vgl. Kapitel 3.8) Vorteile gegenüber dem bis dato angesetzten pauschalen Luftwechsel $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$ bringt, wird basierend auf der Basisvariante eine Variante 3 gerechnet, bei der

ein pauschaler Luftwechsel von 10 h^{-1} angesetzt wird, um den Lüftungswärmetransferkoeffizienten des Fassadenzwischenraums nach außen zu berechnen. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung zeigt Tabelle 51.

Tabelle 51: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum je Monat.

Differenz Messung – Rechnung [K]						
Monat / Jahr	Raum 4.172 NW	Raum 4.248 SO	Raum 11.154 NW	Raum 11.242 SO	Raum 18.108 NW/SW	Raum 18.244 SO
Nov 12	-1,8	-2,8	-2,0	-2,7	*	-2,6
Dez 12	-1,6	-2,7	-1,8	-2,4	-1,4	-2,3
Jan 13	-2,2	-3,5	-2,5	-3,2	-2,5	-3,1
Feb13	-2,9	-3,4	-3,2	-3,9	-3,6	-3,7
Mrz13	-2,9	-4,0	-3,0	-3,9	-3,6	-3,5
Apr13	-3,0	-3,7	-2,9	-3,4	-2,7	-4,5
Mai13	-1,1	-2,7	*	-2,0	-1,5	-1,9
Jun 13	-2,0	-3,3	*	-2,5	-1,8	-2,5
Jul 13	-1,7	-3,5	-1,7	-2,9	-1,5	-2,7
Aug 13	-1,5	-3,2	-1,2	-2,7	-1,7	-2,4
Sep 13	-1,3	-2,4	-1,0	-1,3	-1,9	-1,6
Okt 13	-1,4	-2,2	-1,2	-2,0	*	-2,2

* fehlende Messdaten

Alle Abweichungen liegen deutlich über denen der Basisvariante mit der Kennlinienmethode. Die maximale Abweichung beträgt $-4,5 \text{ K}$ für den Raum 18.244 im Monat April 2013, d. h. es werden hier zu hohe Temperaturen im Fassadenzwischenraum berechnet, die Luftwechselrate n_{ue} ist mit 10 h^{-1} zu niedrig angesetzt (zum Vergleich: $n_{ue} = 78 \text{ h}^{-1}$ in der Basisvariante, Abweichung $-2,5 \text{ K}$ für den Raum 18.244 im Monat April 2013).

Die Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum während der gesamten Messperiode (12 Monate) ist in Tabelle 52 angegeben. Gegenüber der Basisvariante sind durchweg höhere Abweichungen vorhanden (zwischen $1,3$ und $2,0 \text{ K}$ höhere Abweichung je nach Raum). Eine differenzierte Abschätzung der Luftwechselrate in Abhängigkeit des Doppelfassadentyps erhöht im vorliegenden Fall die Rechengenauigkeit.

Tabelle 52: Differenz zwischen gemessener und berechneter Temperatur im Fassadenzwischenraum im gesamten Messzeitraum.

Differenz Messung – Rechnung (Mittelwert der Beträge der Abweichungen) [K]					
Raum 4.172 NW	Raum 4.248 SO	Raum 11.154 NW	Raum 11.242 SO	Raum 18.108 NW/SW	Raum 18.244 SO
1,9	3,1	2,0	2,8	2,2	2,7

4.5 Einfluß der Genauigkeit der Temperatur im Fassadenzwischenraum auf den Nutzenergiebedarf

Die Genauigkeit mit der die Temperatur im Fassadenzwischenraum im Jahresverlauf berechnet werden kann, wirkt sich auf die Genauigkeit des ermittelten Jahres-Nutzenergiebedarfs einer Gebäudezone aus. Die Relevanz von Abweichungen der berechneten von der tatsächlichen (messtechnisch ermittelten) Temperatur im Fassadenzwischenraum soll im Folgenden beurteilt werden. Als exemplarische Gebäudezone wird ein Versuchsraum an der Versuchseinrichtung für energetische und raumklimatische Untersuchungen (VERU, Raum EG-S1M1) am Standort des IBP in Holzkirchen gewählt, der bereits für Untersuchungen an Glasdoppelfassaden genutzt wurde [4].

Der Versuchsraum befindet sich im EG an der Westseite des VERU-Versuchsgebäudes. Bild 31 zeigt die Außenansicht der Fassade sowie einen Blick in den Innenraum. Die Fassade des Versuchsraums ist als Glasdoppelfassade ausgeführt. Die äußere Verglasungsebene besteht aus einer unbeschichteten Doppelverglasung. Die innenseitige Verglasung ist als Wärmeschutzverglasung ausgeführt. Als Sonnenschutz wird für die Berechnung ein automatisch betriebener Lamellenraffstore im Fassadenzwischenraum mit einem Abminderungsfaktor $F_c = 0,25$ gewählt. Der Raum wird mechanisch be- und entlüftet wobei ein Auslegungsvolumenstrom von $130 \text{ m}^3/\text{h}$ gemäß DIN V 18599 angesetzt wird. Der Rückwärmzahl der Lüftungsanlage beträgt 60 %. Der Raum wird direkt über stabförmige Leuchtstofflampen beleuchtet, die manuell geschaltet werden. Als Nutzungsprofil wird das Profil 2 der DIN V 18599 (Gruppenbüro) gewählt. In Tabelle 53 sind die wesentlichen Berechnungsparameter zusammengestellt.



Bild 31: Außen- und Innenansicht Versuchsraum EG-S1M1 mit Blick in die Doppelfassade.

Tabelle 53: Berechnungsparameter Musterzone VERU EG-S1M1 mit angrenzender Glasdoppelfassade.

Parameter	Beschreibung	Kennwert
Opake Außenfassade (Südfassade)	Aluminiumrahmenkonstruktion	$U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
Bodenplatte EG-S1M1		$U = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$
GDF Seitenwände-Boden-Deckel	Aluminiumrahmenkonstruktion	$U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$
Außenseitige Verglasung GDF	Doppelverglasung (ISOLAR Solarflex E)	$U_g = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g_L = 0,76$ $\tau_{D65} = 0,82$
	Rahmenanteil	0,77 $U_F = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$
	U-Wert Fenster inkl. Rahmen	$U_{win} = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
Innenseitige Verglasung GDF	Wärmedämmverglasung (Interpane Warmglas iplus S/SE)	$U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ $g_L = 0,51$ $\tau_{D65} = 0,72$
	Rahmenanteil	0,68 $U_F = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
	U-Wert Fenster inkl. Rahmen	$U_{win} = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
Sonnen-/Blendschutz	Lamellenraffstore im Fassadenzwischenraum $F_c = 0,25$	$g_{tot} = 0,13$
Lüftung	Mechanisch mit Wärmerückgewinnung	$V = 130 \text{ m}^3/\text{h}$ WRG 60%
Beleuchtung	Stabförmige Leuchtstofflampe	Vorschaltgerät: EVG Beleuchtungsart: Direkt manuell geschaltet
Nutzung	Gruppenbüro (2 Personen)	
Raumhöhe	Lichtes Maß	$h = 3,38 \text{ m}$
Raumtiefe	Lichtes Maß	$t = 4,2 \text{ m}$
Raumlänge	Lichtes Maß	$l = 7,7 \text{ m}$
Nettogrundfläche Raum		$A_{NGF} = 32,55 \text{ m}^2$
Nettovolumen Raum		110 m^3
Höhe GDF	Lichtes Maß	$h = 3,38 \text{ m}$
Tiefe GDF	Lichtes Maß	$h = 0,77 \text{ m}$
Länge GDF	Lichtes Maß	$l = 7,7 \text{ m}$
Nettogrundfläche GDF		$5,9 \text{ m}^2$
Nettovolumen GDF		$19,9 \text{ m}^3$

Zunächst wird als Bezugsvariante der Jahres-Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung gemäß DIN V 18599 mit den sich einstellenden Temperaturen im Fassadenzwischenraum ermittelt. Anschließend werden die Varianten 1 bis 4 gemäß Tabelle 54 berechnet. Die Berechnungen erfolgen mit Hilfe der Software IBP:18599 High End Version 4.1.50.351 der Firma Heilmann Software IT GmbH.

Tabelle 54: Variantenübersicht.

Variante	Beschreibung
Bezugsvariante	Berechnung des Nutzenergiebedarfs und der monatsweisen Temperatur im Fassadenzwischenraum nach DIN V 18599-2
Variante 1	Fiktive Abweichung der monatsweisen Temperatur im Fassadenzwischenraum um + 1 K
Variante 2	Fiktive Abweichung der monatsweisen Temperatur im Fassadenzwischenraum um + 3 K
Variante 3	Fiktive Abweichung der monatsweisen Temperatur im Fassadenzwischenraum um - 1 K
Variante 4	Fiktive Abweichung der monatsweisen Temperatur im Fassadenzwischenraum um - 3 K

In Tabelle 55 werden die errechneten Bedarfswerte der Variante 1 bis 4 der Bezugsvariante gegenübergestellt. Hierbei zeigt sich, dass eine Abweichung der Temperatur im Fassadenzwischenraum von + 1 K zu einer Verringerung des Heizwärmebedarfs von 6,6 % führt, der Nutzkältebedarf steigt entsprechend um 15,2 %. Ist die Abweichung negativ so entsteht der umgekehrte Effekt in etwas geänderter Größenordnung (+6,8 % Heizwärmebedarf, -17,3 % Nutzkältebedarf). Bei einer noch ungenaueren Vorhersage der Temperatur im Fassadenzwischenraum (Abweichung + 3 K bzw. -3 sind erhebliche Rechenfehler von bis zu 48,1 % zu verzeichnen (vgl. Variante 2, Kühlung). Die größte absolute Veränderung gegenüber der Bezugsvariante ergibt sich mit einem Plus von 18,8 kWh/m²a beim Heizwärmebedarf der Variante 4.

Tabelle 55: Gegenüberstellung des Nutzenergiebedarfs des Versuchsraumes EG-S1M1 für die unterschiedlichen Varianten.

Variante		Jahres-Nutzenergiebedarf nach Energieanteilen	
		[kWh/(m ² a)]	[%]
Bezugsvariante	Heizung	88,0	100
	Kühlung	24,3	100
Variante 1 (+ 1 K)	Heizung	82,2	-6,6
	Kühlung	28,0	+15,2
Variante 2 (+ 3 K)	Heizung	71,5	-18,7
	Kühlung	36,0	+48,1
Variante 3 (- 1 K)	Heizung	94,0	+6,8
	Kühlung	20,1	-17,3
Variante 4 (-3 K)	Heizung	106,8	+21,4
	Kühlung	13,8	-43,2

5 Diskussion und normative Relevanz der Ergebnisse

Bei den betrachteten Untersuchungsgebäuden mit Glasdoppelfassade werden die messtechnisch ermittelten Temperaturen im Fassadenzwischenraum den berechneten Temperaturen anhand der neu entwickelten Methode gemäß DIN V 18599-2 [3] in Verbindung mit [8] gegenübergestellt. Die Glasdoppelfassadenkonstruktionen sowie deren freie Luftdurchströmung unterscheiden sich bei jedem der Gebäude. Es werden die Glasdoppelfassadentemperaturen über den Zeitraum von etwa einem Jahr in unterschiedlichen Gebäudehöhen und Orientierungen betrachtet. Auf diese Weise werden verschiedene jahreszeitliche Einflüsse wie Außenlufttemperatur, Solarstrahlung, unterschiedliche Windanströmungen und unterschiedliche Randbedingungen hinsichtlich des thermischen Auftriebs in Abhängigkeit der Gebäudehöhe abgedeckt.

Die rechnerische Ermittlung der Temperatur im Fassadenzwischenraum erfolgt zunächst anhand der Standardvorgaben der DIN V 18599 (Basisvariante). Es handelt sich um eine Monatsbilanzverfahren, so dass immer Monatsmittelwerte betrachtet werden, ansonsten wird gesondert auf abweichende Betrachtungsweisen hingewiesen.

Objekt Fraunhofer Haus

Beim Fraunhofer Haus mit gesteuerten Lüftungskappen werden rechnerisch Luftwechselraten im Fassadenzwischenraum von $n_{ue} = 2$ bis 75 h^{-1} ermittelt. Die resultierenden Temperaturen im Fassadenzwischenraum schwanken je nach Monat und Raum zwischen $7,5$ und $24,2$ °C. Die messtechnisch ermittelten Temperaturen liegen zwischen $7,2$ und $24,9$ °C. Die Differenz zwischen Messung und Rechnung beträgt zwischen $-0,9$ und $2,1$ K. Das neue Modell mit angepassten Luftwechselraten in Abhängigkeit vom Doppelfassadentyp kann die Temperatur im Fassadenzwischenraum in den meisten Monaten und im Gesamtzeitraum genauer vorhersagen als der bisherige pauschale Luftwechselansatz von $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$ (vgl. Variante 3). Berücksichtigt man den Luftwechsel zwischen Gebäudezone und Fassadenzwischenraum, der nach den Standardvorgaben der DIN V 18599-2 zu Null gesetzt ist, in der Realität aber aufgrund von Fensterlüftung vorhanden ist, so schwanken die resultierenden Temperaturen im Fassadenzwischenraum zwischen $7,7$ und $24,2$ °C (Variante 1). Der Einfluss ist je nach abgeschätzter Luftwechselrate und Jahreszeit unterschiedlich hoch. Im Winter kann sich die Temperatur in Abhängigkeit der abgeschätzten Luftwechselrate durch diesen Effekt rechnerisch um bis zu $2,1$ K im Fassadenzwischenraum erhöhen, während im Sommer nur Temperaturerhöhungen von maximal $0,2$ K festzustellen sind. Über den gesamten Betrachtungszeitraum verbleiben die Veränderungen der Abweichungen je nach Raum moderat.

Die Vorhersage der Temperatur im Fassadenzwischenraum verbessert sich durch die Berücksichtigung des Luftwechsels durch Fensterlüftung nicht durchgängig; hierfür sind die Unsicherheiten bei der Ermittlung des tatsächlich auftretenden Luftwechsels zu groß. Zunächst erscheint deshalb die Vernachlässi-

gung des exakten Wärmetransports gerechtfertigt, wenn man demgegenüber den zeitlichen Aufwand und die umfangreiche Datenbeschaffung bei der Ermittlung des Lüftungswärmetransferkoeffizienten zwischen Raum und GDF sieht. Solange keine einfach anzuwendenden, abgesicherten Berechnungsmethoden zur Ermittlung des Luftwechsels zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade vorliegen, könnte in der Norm ein pauschaler Wert zwischen $n_{iu} = 0,1$ und $n_{iu} = 0,3 \text{ h}^{-1}$ bei anzunehmender Kipplüftung zum Fassadenzwischenraum als Näherung in Ansatz gebracht werden (vgl. Tabelle 11).

Berücksichtigt man weiterhin das reale Schaltverhalten des automatisch gesteuerten Sonnenschutzes und ermittelt damit die „realen“ effektiven Gesamtenergiedurchlassgrade, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den normativen effektiven Gesamtenergiedurchlassgraden (Variante 2). Dadurch ergeben sich nur marginale Unterschiede bei der Vorhersage der Temperatur im Fassadenzwischenraum und unter den vorliegenden Randbedingungen für dieses Objekt sind keine Anpassungen der Norm zu diskutieren.

Objekt Gedonstraße

Beim Gebäude Gedonstraße liefert die Standardberechnung der Basisvariante Temperaturen in Glasdoppelfassade zwischen $0,5$ und $24,1 \text{ °C}$, die Messwerte bewegen sich zwischen $0,1$ und $25,4 \text{ °C}$. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung fallen moderat aus, es gibt nur wenige Einzelwerte bei denen die Abweichungen mehr als 1 K betragen, eine Abweichung von mehr als 2 K wird nur zweimal erreicht. Die ermittelte Luftwechselrate im Fassadenzwischenraum liegt bei etwa 87 h^{-1} und damit deutlich über dem bisherigen Pauschalwert von 10 h^{-1} (Variante 3). Entsprechend liegen bei Variante 3 hohe Abweichungen zwischen Messung und Rechnung von bis zu $6,1 \text{ K}$ vor. Auch im Fall Gedonstraße zeigt die neue Methode zur Ermittlung des Luftwechsels Vorteile gegenüber dem bisherigen pauschalen Ansatz.

Unter näherungsweise Berücksichtigung des Luftwechsel zwischen Gebäudezone und Fassadenzwischenraum schwanken die Temperaturen im Fassadenzwischenraum zwischen $0,6$ und $24,1 \text{ °C}$ (Variante 1). Dies ist vergleichbar mit der Basisvariante, jedoch sind bei den Einzelwerten teilweise größere Veränderungen festzustellen, die aber wiederum nicht grundsätzlich hin zu geringeren Abweichungen führen. Es zeigt sich, dass an dieser Stelle noch weitere Untersuchungen notwendig sind, um den Lüftungswärmetransport zwischen konditionierter Zone und Glasdoppelfassade hinreichend genau mit vereinfachten Annahmen bewerten zu können.

Berechnet man die Temperaturen im Fassadenzwischenraum basierend auf den messtechnisch ermittelten effektiven Gesamtenergiedurchlassgraden (Variante 2), so sind lediglich Veränderungen der Temperaturprognose von $\pm 0,1 \text{ K}$ festzustellen, d.h. die Normansätze zum Einfluss des Sonnenschutzes spiegeln die reale Situation zuverlässig wider.

Objekt Mandlstraße

Das Gebäude Mandlstraße weist als Besonderheit eine Großraumbürosituation auf. Die rechnerisch ermittelten Temperaturen im Fassadenzwischenraum reichen von 2,2 bis 24,9 °C, die Messung liefert 0,6 bis 25,0 °C. Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung bewegen sich in den meisten Fällen (Monat/Raum) unter 1 K, jedoch sind auch einzelne Abweichungen von mehr als 2 K vorhanden. Die rechnerisch abgeschätzte Luftwechselrate im Fassadenzwischenraum beträgt ca. 27 h⁻¹. Die Berechnung mit dem bisherigen pauschalen Luftwechsel von 10 h⁻¹ (Variante 3) führt zu deutlich höheren Abweichungen von bis zu 4 K.

Auch bei diesem Gebäude und der Charakteristik der Glasdoppelfassade führt die spezifische Ermittlung des Luftwechsels im Fassadenzwischenraum nach Außen zu einer Verbesserung der Genauigkeit. Die Berücksichtigung eines pauschal angesetzten Luftaustauschs zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade (die Fensteröffnungszeiten konnten messtechnisch nicht ermittelt werden) verändert die Ergebnisse der Basisvariante nur geringfügig, so dass auch hier die abschätzende Annahme (vgl. Aussagen vom Fraunhofer Haus und der Gedonstraße) gerechtfertigt erscheint.

Objekt Münchner Tor

Beim Gebäude Münchner Tor werden rechnerisch Temperaturen im Fassadenzwischenraum zwischen 1,8 und 25,6 °C ermittelt. Die Messdaten liefern Werte zwischen 0,5 und 24,4 °C. Die Abweichungen in der Basisvariante bewegen sich zwischen 0 und 2,5 K je nach Monat und Raum. Gegenüber dem bisherigen pauschalen Ansatz mit $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$ liegen die anhand des Kennlinienmodells ermittelten Werte deutlich näher an den gemessenen Werten. Wird ein pauschaler Luftwechsel durch Fensteröffnung zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade hinzugerechnet (Variante 1), so zeigt sich, wie bereits bei den anderen Gebäuden, keine einheitliche Tendenz.

Der messtechnisch ermittelte, effektive Gesamtenergiedurchlassgrad weicht bei diesem Gebäude relativ stark von den normativen Werten ab. Entsprechend resultieren Veränderungen bei der berechneten Temperatur im Fassadenzwischenraum, die je nach Raum und Monat positiv oder negativ ausschlagen. Möglicherweise weicht hier das reale Schaltverhalten des Sonnenschutzes stärker von den normativen Ansätzen ab als bei den anderen Gebäuden.

Anhand der Untersuchungen konnte im Wesentlichen eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Temperaturen in den Glasdoppelfassaden und den Rechenwerten festgestellt werden. Zur Beurteilung des Einflusses der verbleibenden Abweichungen auf den Nutzenergiebedarf zur Beheizung und Kühlung wird folgende Betrachtung durchgeführt. Es wird eine Temperaturabweichung von $\pm 1 \text{ K}$ bzw. $\pm 3 \text{ K}$ im Fas-

sadenzwischenraum eines exemplarischen Büroraum mit Glasdoppelfassade angenommen und der Nutzenergiebedarf für Heizen bzw. Kühlen mit der Berechnung ohne Abweichung verglichen. Hierbei zeigt sich, dass unter den gewählten Randbedingungen bei einer Abweichung von 1 K (Differenz berechnete Temperatur im Fassadenzwischenraum zu tatsächlicher Temperatur) die Auswirkungen auf den Nutzwärmebedarf bis zu 7 % und auf den Nutzkältebedarf bis zu 17 % betragen. Bei einer Abweichung von 3 K liegt der Fehler bereits bei 21 % (Nutzwärme) bzw. 48 % (Nutzkälte).

Fazit aus den Messungen an den vier Untersuchungsgebäuden

Insgesamt zeigt sich, dass die neue Rechenmethode zur Ermittlung des Luftwechsels in der Glasdoppelfassade vor dem Hintergrund, dass zahlreiche Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden und es sich um ein Monatsbilanzverfahren handelt, eine gute Näherung an die Messwerte liefert. Hierdurch kann die Rechengenauigkeit des Nutzenergiebedarfs für Heizung und Kühlung gegenüber dem bisherigen pauschalen Luftwechselansatz verbessert werden. Die Variantenrechnungen zeigen, dass eine weitere Annäherung an die Messdaten sehr schwierig ist und eine sehr umfangreiche bauliche Datengrundlage erfordert. Außerdem zielen nicht alle Verbesserungen in die gleiche Richtung sondern verändern die Temperatur in der Glasdoppelfassade je nach Raum und Monat unterschiedlich. Man muss weiterhin klar differenzieren zwischen der vorliegenden Annäherung im Monatsbilanzverfahren und dynamischen Simulationsmethoden, die deutlich detaillierter modellieren und rechnen und damit genauere Rechenergebnisse liefern können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen einer Messkampagne von Herbst 2012 bis Herbst 2013 werden vier unterschiedliche Verwaltungsgebäude mit Glasdoppelfassade im Stadtgebiet München (Fraunhofer Zentralverwaltung Hansastraße, Gebäude der Munich Re in der Gedonstraße, Mandlstraße und am Münchner Tor) im Hinblick auf das Temperaturverhalten im Fassadenzwischenraum untersucht. Dabei werden die Temperaturen an unterschiedlichen Stellen der Glasdoppelfassaden (Orientierung, Geschosshöhe) als Referenzwerte mit hoher Genauigkeit messtechnisch erfasst. Anhand zusätzlicher messtechnischer Parameter (Außenlufttemperaturen, Raumlufttemperaturen, Solarstrahlung, Fensteröffnungszeiten, Sonnenschutzstellungen) und baulicher sowie bauphysikalischer Kennwerte werden parallel Rechenwerte für die Temperatur im Fassadenzwischenraum anhand eines neu aufgestellten Rechenmodells der DIN V 18599 zur Bestimmung des Luftwechsels im Fassadenzwischenraum [3][7][8] ermittelt, um die Güte und Stabilität der weiterentwickelten Methode zu überprüfen sowie gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge aufzuzeigen.

Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung zeigt, dass der Jahresgang der Temperaturen im Fassadenzwischenraum gut nachvollzogen werden kann und dass sich die Abweichungen unter Berücksichtigung der Vereinfachungen in einem statischen Monatsbilanzverfahren in akzeptablen Grenzen halten (Abweichungen in der Regel kleiner als 1 K). Die Methode, die den Luftwechsel im Fassadenzwischenraum in Abhängigkeit von spezifischen Eigenschaften der Glasdoppelfassade (Lüftungsöffnungen, Luftraumtiefe, Verglasung etc.) bestimmt, zeigt bei den exemplarischen betrachteten Gebäuden gegenüber dem bisherigen pauschalen Ansatz des Luftwechsels $n_{ue} = 10 \text{ h}^{-1}$ (unabhängig von den Eigenschaften der Glasdoppelfassade) im Allgemeinen eine deutlich verbesserte Abschätzung der Temperatur im Fassadenzwischenraum und damit auch eine erhöhte Genauigkeit bei der Berechnung des Energiebedarfs für Heizen und Kühlen.

Anhand von Variantenrechnungen wird gezeigt, dass die in der Norm angewendete Methode zur Bestimmung des effektiven Gesamtenergiedurchlassgrades zuverlässige Werte liefert und keine Ursache für größere Temperaturabweichungen zwischen Messung und Rechnung darstellt.

Der Lüftungswärmetransfer zwischen konditionierter Gebäudezone und Glasdoppelfassade bleibt in der DIN V 18599 derzeit unberücksichtigt. In der Realität findet jedoch bei allen Untersuchungsgebäuden ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Luftaustausch zwischen Gebäudezone und Fassadenzwischenraum durch das nutzerbedingte Öffnen (Kippen/Drehen) von Fenstern statt. Die Quantifizierung dieses Luftaustauschs gestaltet sich jedoch schwierig. Es existieren verschiedene Rechenmodelle, die aber die Kenntnis zahlreicher Parameter erfordern welche häufig in der Praxis nicht zur Verfügung stehen. Insbesondere die Fensteröffnungszeiten können meist nur abgeschätzt werden und liegen nicht als Messdaten vor (vgl. Mandlstraße und Münchner Tor). In

den Messungen hat sich gezeigt, dass die Luftwechselrate zwischen Gebäudezone und Fassadenzwischenraum je nach Raum und Jahreszeit stark schwanken kann und dann einen entsprechend geringen oder größeren Einfluss auf die Temperatur des angrenzenden Fassadenzwischenraums ausübt. Für die Verbesserung der Vorhersage der Temperatur in der Glasdoppelfassade kann man an dieser Stelle ansetzen und durch entsprechende Forschungsvorhaben das komplexe Zusammenspiel des Lüftungswärmetransports zwischen Gebäudezone und Glasdoppelfassade vereinfachend für das Monatsbilanzverfahren der DIN V 18599 aufbereiten.

Eine weitere maßgebende Größe stellt die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der Glasdoppelfassade dar. Momentan stellt das Modell der DIN V 18599 nur grobe Anhaltswerte der Durchflussbeiwerte und relativ wenige Stützstellen des abstandsabhängigen Luftwechselbeiwerts zur Verfügung.

7 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [2] 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.
- [3] DIN V 18599-2:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- [4] Erhorn, H.; Sinnesbichler, H.; Lindauer, E; Haag, G; Nimtsch, A.; Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.): Weiterentwicklung und Evaluierung von Technologien und Bewertungsmethoden zur Steigerung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EnEff06). IBP-Bericht WTB-02-2007.
- [5] Hall, M.: Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern, Dissertation an der Universität Kassel, 2004.
- [6] Herrmann, F.: Sensitivitätsstudie zum Einfluss bauphysikalischer Parameter von Glasdoppelfassaden auf den thermischen Zustand im Fassadenzwischenraum und den Nutzenergiebedarf einer angrenzenden Gebäudezone, Bachelorthesis an der Hochschule Rosenheim, Abgabedatum 14.01.2014.
- [7] Heusler, I.: Bestimmung des thermisch-energetischen Verhaltens von Glasdoppelfassaden und temporärer Wärmeschutzmaßnahmen zur Verwendung in einem Monatsbilanzverfahren. Dissertation Technische Universität München, 2011; Fraunhofer-Verlag Stuttgart, Forschungsergebnisse aus der Bauphysik, Band 9, 2012.
- [8] Heusler, I.; Sinnesbichler, H.; Erhorn, H.; Nimtsch, A.; Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.): Erarbeitung einer vereinfachten Berechnungsmethode für Glas-Doppelfassaden für die Integration in die deutsche EPBD-Energieeffizienzbewertungsmethode DIN V 18599 (Bewertungsmethode GDF). IBP-Bericht ESB-002/2009 HOKI.
- [9] Kenndaten Fraunhofer Haus, e-mail mit Excel-Tabelle vom 14.01.2013, Fraunhofer ISE.
- [10] Kenndaten Gebäude Gedonstraße übergeben durch Munich Re bei der 3. Projektbesprechung am 06.06.2013.

- [11] Kenndaten Gebäude Mandlstraße übergeben durch Munich Re bei der 3. Projektbesprechung am 06.06.2013.
- [12] Kenndaten Gebäude Münchner Tor übergeben durch Munich Re bei der 3. Projektbesprechung am 06.06.2013.
- [13] Maas, A.: Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung, Dissertation Universität Kassel, 1995.
- [14] Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung: in der Fassung vom 29. April 2009 (Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 23 S. 954).