

EnOB: Bypass-Doppelfassade

Doppelfassadensystem mit optional getrennter natürlicher Belüftung des Innenraums und des Fassadenzwischenraums

Abschlussbericht

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Frank Wellershoff

Bearbeiter: Matthias Friedrich, M.Sc.
Klaus Schweers, M.Eng.

Förderkennzeichen: 03ET1262A

Projektlaufzeit: 01.10.2014 – 31.05.2018

Datum: Hamburg, 15.02.2019

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



EnOB

Forschung für
Energieoptimiertes Bauen



Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Abstract

By steadily increasing energy prices, there is a demand for energy-saving and adaptive building envelopes. Double skin façades are primarily used for commercial buildings in cities because of their improved noise protection compared with single layer facades. The bypass double skin façade is a further development of the conventional double skin façade. The outdoor air will be carried through the bypass channel during the summer to avoid an additional energy load in the cavity. This additional load will be used to reduce the energy demand for heating during the winter so the advantages of a double façade can be optimized.

At present, there are no binding design criteria and standards for this type of façade, which sometimes leads to bad planning and losses in building comfort. In this research project, design recommendations for bypass double skin facades are developed. Nomograms can be used for quantifying the risk of overheating as well as for estimating the energy demand for heating.

Acoustic long-term measurements proved an average noise reduction of 10 dB during natural ventilation though the bypasses only. This is equal to halving the loudness. Measurements were done with real external noise at the built test façade in a period of more than two years.

In the same period, comprehensive climate and comfort measurements are done in the bypass double skin façade as well as in the office room behind. The data are primarily used to verify a building thermal simulation model created in EnergyPlus software. In total, 9,720 different sets of parameters are analyzed with the verified model. The location within Germany, orientation, the amount of internal gains (people, lights, electric equipment), depth of the cavity and proportion of window surfaces are considered. The results of the parameter study are the base for the design nomograms.

The above-mentioned EnergyPlus model is integrated into the façade control software. Based on the weather forecast, the room behavior of the future is analyzed. Based on actual sensor data and forecast data, the best control commands for the different window types are derived.

Kurzfassung

Durch stetig steigende Energiepreise wird die Forderung nach energiesparenden und intelligenten Gebäudehüllen laut. Für Nichtwohngebäude im Innenstadtbereich kommen aufgrund des verbesserten Schallschutzes im Vergleich zu konventionellen einschaligen Fassaden vermehrt Doppelfassaden zum Einsatz. Eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Doppelfassade ist die Bypass-Doppelfassade. Mit Hilfe einer geschickten Luftführung wird die Außenluft im Sommer durch Bypass-Kanäle an dem warmen Fassadenluftraum vorbeigeführt und das Überhitzungsrisiko minimiert. Im Winter wird die Außenluft durch den Fassadenzwischenraum geführt, wo sie durch die solare Einstrahlung eine Vorwärmung erfährt.

Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine verbindlichen Planungskriterien für Doppelfassaden, was mitunter zu Fehlplanungen und Einbußen im Gebäudekomfort führt. In diesem Projekt werden Planungsempfehlungen für Bypass-Doppelfassaden zur Abschätzung der Übertemperaturstunden sowie des zu erwartenden Heizwärmebedarfs in Form von Nomogrammen erstellt, die bereits ab dem ersten Entwurf eine Dimensionierung der Doppelfassade ermöglichen.

Der Schallschutz bei gleichzeitiger natürlicher Lüftung durch Bypass-Kanäle ist mit Hilfe von Langzeitmessungen an einer gebauten Testfassade untersucht worden. Unter tatsächlichen Außenlärmbedingungen wird im Mittel eine Pegelminderung von 10 dB erzielt, was einer Halbierung der Lautstärke entspricht.

Über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren sind umfangreiche Messungen an einer gebauten Bypass-Doppelfassade vor einem real genutzten Büroraum durchgeführt worden. Neben Komfortauswertungen werden die Daten dazu genutzt, ein thermisches Gebäudemodell zu erstellen und zu validieren. Mit diesem Modell sind in einer Parameterstudie insgesamt 9.720 Parameterkombinationen untersucht worden. Berücksichtigt wurden der Standort innerhalb Deutschlands, die Orientierung, die Raumbreite, die Größe der internen Lasten (Personenbelegung, Beleuchtung und elektrische Geräte), die Tiefe des Fassadenzwischenraumes sowie die Fensterflächenanteile je Fenstergruppe (Bypass, Innenfenster, Außenfenster). Diese Datengrundlage dient als Basis für die entwickelten Nomogramme.

Das thermische Raummodell ist in die Fassadensteuerung des Testraumes integriert. Auf Grundlage der Wettervorhersage wird eine Raumprognose erstellt. Basierend auf den aktuellen Messdaten sowie den Prognosedaten werden die idealen Steuerbefehle für die unterschiedlichen Fenstergruppen abgeleitet.

Inhaltsverzeichnis

1	ZIELSETZUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	3
3	VERSUCHSAUFBAU	7
3.1	BESCHREIBUNG DER TESTFASSADE.....	7
3.2	FUNKTIONEN DER BYPASS-DOPPELFASSADE	9
3.3	MESSTECHNIK UND DATENAUFZEICHNUNG	10
3.4	FASSADENSTEUERUNG.....	25
4	SCHALLSCHUTZ DER BYPASS-DOPPELFASSADE	42
4.1	STAND DER TECHNIK	42
4.2	ENTWICKLUNG DES BYPASS-KANALS.....	44
4.3	AUSWERTUNG DER LANGZEITMESSUNGEN	49
4.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	52
5	THERMISCHES VERHALTEN UND ENERGIEEFFIZIENZ DES TESTRAUMES	53
5.1	ANALYSE DER KLIMADATEN	53
5.2	KOMFORTAUSWERTUNGEN	54
5.3	ZWISCHENRAUMTEMPERATUREN.....	58
5.4	HEIZENERGIEBILANZ UND INTERNE WÄRMELASTEN.....	61
5.5	LUFTFEUCHTIGKEIT	63
5.6	CO ₂ -KONZENTRATION IM BÜRORAUM	64
6	MODELLIERUNG DER BYPASS-DOPPELFASSADE	66
6.1	ALLGEMEINE MODELLBESCHREIBUNG	66
6.2	MODELLVALIDIERUNG ANHAND VON MESSDATEN	76
6.3	BILANZIERUNG EINER WÄRMERÜCKGEWINNUNG.....	85
7	PARAMETERSTUDIE	88
7.1	ZIELFESTLEGUNG UND ABGRENZUNG.....	88
7.2	AUSWAHL UND BESCHREIBUNG DER PARAMETER	88
7.3	DATENAUSWERTUNG	96
8	PLANUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR BYPASS-DOPPELFASSADEN	97
8.1	ALLGEMEINE EMPFEHLUNGEN.....	97
8.2	ANWENDUNGSGRENZEN DER NOMOGRAMME	97
8.3	NOMOGRAMME ZUR BESTIMMUNG DER ÜBERTEMPERATURSTUNDEN	98
8.4	NOMOGRAMME ZUR BESTIMMUNG DES HEIZWÄRMEBEDARFS	101
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	102
10	DANKSAGUNG	104

1 Zielsetzung

Die energiepolitischen Ziele der Europäischen Union sowie der Bundesregierung lassen sich nur durch eine massive Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudesektor erfüllen. Der Energiebedarfskennwert für Heizen/Lüften/Kühlen sowie Trinkwarmwassererwärmung für Bestandsimmobilien (Büronutzung) liegt in Deutschland bei 174,1 kWh/(m²a). Durch die Einführung der Energieeinsparverordnungen ab dem Jahre 2002 konnte dieser im Durchschnitt auf 112,5 kWh/(m²a) reduziert werden [1].

Ein spürbarer Anteil des Primärenergiebedarfs entfällt auf die Belüftung und ggf. Kühlung von Büroimmobilien. Natürliche Lüftung kann vor allem in dem gemäßigten Klima Deutschlands zu signifikanten Energieeinsparungen führen. Die Planung eines bedarfsgerechten Lüftungskonzepts mit natürlicher Lüftung ist aufgrund der schwankenden klimatischen Randbedingungen eine große Herausforderung. Doppelfassaden erschweren die Planung aufgrund des Fassadenzwischenraumes, welcher bei Sonnenschein einer starken Erwärmung unterliegt. Für den Innenraum besteht eine große Überhitzungsgefahr, wenn die vorgewärmte Zuluft in den Raum gelangt und diesen weiter erwärmt. Um das Überhitzungsrisiko von Räumen hinter Doppelfassaden zu berücksichtigen, sind generell drei Lösungsmöglichkeiten denkbar:

- Kapselung des Fassadenzwischenraums:
Dieses Konzept wird in sogenannten Closed-Cavity-Facades (CCF) eingesetzt. Bei dieser Art von Fassade ist die Option der Belüftung durch den Zwischenraum blockiert, was den potenziellen Vorteil verschenkt, bei Bedarf Wärmeenergie innerhalb des Zwischenraums zu gewinnen sowie auch die natürliche und energieeffiziente Belüftung durch die Doppelfassade mit mittlerem Außenschallschutz zur selben Zeit.
- Alternativer natürlicher Lüftungspfad, getrennt von dem Doppelfassaden-Zwischenraum:
Die Idee der „Bypass-Doppelfassade“ beruht auf einer variablen Luftführung durch den Fassadenzwischenraum. Je nach Bedarf kann im Winter die Zuluft durch den Fassadenzwischenraum geführt werden, wo sie passiv vorgewärmt wird. In Zeiten mit potentieller Überhitzung wird die Zuluft durch Bypass-Kanäle an dem Fassadenzwischenraum vorbeigeführt. Dieser Doppelfassadentyp nutzt die positiven Aspekte von Doppelfassaden aber kontrolliert das Überhitzungsrisiko. Die Verschattung ist im Zwischenraum vor höheren Windlasten geschützt. Die Wärmeenergie im Zwischenraum kann aber auf Wunsch durch zusätzliche Öffnungen nach innen geleitet werden. Wenn eine mögliche Überhitzung in Betracht gezogen werden muss, ist der Zwischenraum zum Innenraum hin geschlossen und die natürliche Belüftung wird durch Bypass-Kanäle geleitet, die Schallabsorber enthalten.
- Planungsrichtlinien für Doppelfassaden:
Diese Richtlinien ermöglichen das Abschätzen von relevanten Parametern in frühen Planungsphasen zur Reduzierung des Überhitzungsrisikos. Im Folgeprojekt wird ab November 2018 ein Leitfaden für gängige Doppelfassaden-Typen ohne Bypass erarbeitet.

Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Entwicklung von Planungsempfehlungen für natürlich belüftete Bypass-Doppelfassaden. Im Fokus stehen dabei der sommerliche Wärmeschutz sowie die Reduzierung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden mit Doppelfassaden. Für die Maximierung des thermischen Komforts sowie zur Sicherstellung der Lufthygiene ist eine bedarfsgerechte Fenstersteuerung erforderlich. Nur eine kontrollierte natürliche Lüftung kann durch eine intelligente Fassadesteuerung den Raumkomfort wahren und gleichzeitig die Energieeffizienz optimieren. Über Modellversuche und Langzeitmessungen an der Bypass-Doppelfassade werden darüber hinaus Bewertungen des Schallschutzes bei gleichzeitiger natürlicher Lüftung durch die Bypass-Kanäle durchgeführt.

2 Stand der Technik

Doppelfassaden haben in den 1990er Jahren eine Hochzeit erlebt. Angetrieben von den technischen Entwicklungen und gestalterischen Möglichkeiten und motiviert durch die vielen Vorteile sind zunehmend Verwaltungsneu- und Umbauten mit Doppelfassaden bestückt worden. Ein verbesserter Schallschutz und ein stark reduzierter Heizwärmebedarf sind zwei Argumente, die maßgeblich für den Bau von Doppelfassaden sprechen. Durch eine geschickte Belüftung des Fassadenzwischenraumes soll der Energiebedarf zum Kühlen vergleichbar sein mit konventionellen einschaligen Fassaden. Die Planung von Doppelfassaden ist jedoch noch nicht ausreichend erforscht und erfordert viele Annahmen. Umfangreiche Monitoring-Projekte zur Validierung der getroffenen Annahmen wurden durchgeführt [2] [3] [4] .

Es bleibt nicht aus, dass neue Trends auch mit **negativen Erfahrungen** verbunden sind. Ein sehr detailliert dokumentiertes Gebäude mit Doppelfassade ist das Haus der Wirtschaftsförderung in Duisburg [2]. Eine wesentliche Planungsvorgabe dieses Projektes war die passive Nutzung der Solarenergie. Die solaren Wärmegewinne über die Doppelfassade sollen im Winter die Transmissionswärmeverluste übersteigen. Das Gebäude ist vollverglast, klimatisiert und maschinell belüftet. Die Doppelfassade ist als Abluftfassade der unteren Geschosse konzipiert, wodurch im Winter eine passive Erwärmung erzielt werden soll und im Sommer die überschüssige Wärme abtransportiert werden soll. Die Primärfassade ist eine Zweifachisolierverglasung mit Argonfüllung, der Fassadenzwischenraum ist 20 cm tief. Die U-Werte werden mit $U_g = 0,91 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $U_w = 1,00 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angegeben. Die Ertüchtigung der Isolierverglasung zu einer Doppelfassade brachte bezogen auf die U-Werte der alleinigen Zweifachverglasung/Fassade eine günstige Verringerung von ca. $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Diese Verbesserung kann aufgrund der Undichtigkeit des Fassadenzwischenraums sowie der Luftzirkulation nicht das Niveau einer Dreifachisolierverglasung erreichen. Aus Schallschutzgründen ist die Primärfassade des Gebäudes geschlossen. Die Autoren nennen folgende Nutzenergiekennwerte:

- Heizen: $189,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
- Kühlen: $80,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
- Strom: $115 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

Das Gebäude erfüllt alle Anforderungen der damals geltenden Wärmeschutzverordnung (WSchV 82). Trotz des Einsatzes einer Doppelfassade hat dieses Gebäude einen Heizwärmebedarf von $189,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der hohe Energieverbrauch ist jedoch nicht eindeutig auf die Fassade zurückzuführen.

Negative Erfahrungen in punkto Energieeffizienz und Nutzerkomfort führen zu kontroversen Diskussionen über den Mehrwert von Doppelfassaden und erhöhen den Bedarf an **verlässlichen Planungswerkzeugen für Doppelfassaden**. Im Rahmen von zwei Forschungsprojekten ist eine Berechnungsmethode für Doppelfassaden zur Integration in das Monatsbilanzverfahren der

DIN V 18599 entwickelt [5] und überprüft [6] worden. Diese Ansätze beschränken sich jedoch auf geschlossene Primärfassaden und maschinell belüftete Innenräume.

Natürliche Lüftung ist in der Planungs- und Auslegungsphase deutlich komplexer als maschinelle Lösungen. Die sich einstellenden Luftströmungen sind in ihrer Größe und Richtung abhängig von den Druckdifferenzen infolge Wind und von Temperaturunterschieden. Diese wiederum schwanken aufgrund der meteorologischen Randbedingungen. Systematische Messungen zur natürlichen Lüftung durch Doppelfassaden wurden von Ziller [7] analysiert. Mit Hilfe von Tracergas sind Messungen zum natürlichen Luftwechsel an maßstäblichen Fassadenmodellen durchgeführt worden. Die Ergebnisse werden in einem Ansatz zusammengeführt, mit dem der Luftwechsel durch einige Doppelfassadenvarianten abgeschätzt werden kann. Ziller beschränkt die erzielten Ergebnisse jedoch insofern, dass „*ein allgemeines Verfahren zur Beurteilung der Sommerlüftung (...) nicht gefunden werden*“ konnte.

Besonders bei natürlicher Belüftung des Innenraumes ist die **potentielle Überhitzung in den Sommermonaten** ein wichtiger Aspekt, der zwingend in der Planung bedacht werden muss. Zur Abschätzung der solaren Energiegewinne bei einschaligen Fassaden kann der g-Wert herangezogen werden. Der g-Wert umfasst die direkte Strahlungstransmission nach innen sowie den Anteil an absorbierte Strahlung, der durch langwellige Wärmestrahlung und Konvektion in den Innenraum angegeben wird. Bei einer Doppelfassade wird die absorbierte Wärme nicht direkt in den Innenraum abgegeben, sondern sie gelangt in den Fassadenzwischenraum. Bei belüfteten Zwischenräumen schwankt der tatsächliche g-Wert in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten. Temperaturprofile, die sich aufgrund solarer Einstrahlung bilden, sorgen für Unterschiede in den g-Werten innerhalb der Fassade [8]. Der Wärmeübergang durch Konvektion wird maßgeblich durch die Oberflächentemperaturen angetrieben. Bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten im Fassadenzwischenraum steigen die Luft- und Oberflächentemperaturen an. Die erhöhten Temperaturdifferenzen führen zu höheren Antriebskräften der natürlichen Lüftung und auch die Konvektionsströmung nimmt aufgrund steigender Oberflächentemperaturen zu. Beides führt zu einem steigenden Wärmetransport, wodurch die Temperaturdifferenzen wieder sinken. Saelens [9] nennt einen Doppelfassadenzwischenraum aufgrund dieser Eigenschaften „selbst regulierend“. Es ist anzumerken, dass die Zwischenraumtemperatur trotz dieses Phänomens deutlich über die Außenlufttemperatur ansteigen kann. Larsen hat in [8] die Lufttemperaturen in dem Fassadenzwischenraum eines Versuchsstands in verschiedenen Betriebszuständen aufgezeichnet. Bei einer geschlossenen Innenfassade und einer geöffneten äußeren Hülle liegt die über das Luftvolumen gemittelte Zwischenraumtemperatur bei geringer solarer Einstrahlung bis zu 10 K über der Außenlufttemperatur. Wird der Zwischenraum zur Erwärmung der Zuluft genutzt (untere Außenfenster und obere Innenfenster geöffnet), beträgt die Übertemperatur bis zu 15 K. Bei einem vollständig geschlossenen Zwischenraum steigt die Zwischenraumtemperatur auf bis zu 40°C bei einer gemessenen Außenlufttemperatur von 12°C. Andere Untersuchungen zeigen, dass bei unbelüfteten Zwischenräumen auch Lufttemperaturen über 60°C erreicht werden können [10] [11].

Die Erwärmung der Luft im Fassadenzwischenraum kann im Winter gezielt genutzt werden, um den **Heizwärmebedarf zu reduzieren**. Neben dem verbesserten Schallschutz ist dieses der häufigste Grund für den Einsatz von Doppelfassaden. Bei geschlossener Primärfassade bildet sich eine warme Pufferschicht aus, welche die Transmissionswärmeverluste reduziert. Bei natürlicher Lüftung kann die Zuluft ohne den Einsatz von zusätzlicher Energie in dem Zwischenraum erwärmt werden und zum Aufheizen des Raumes genutzt werden. Pasquay hat in [4] drei Gebäude mit Doppelfassaden mit Langzeitmessungen begleitet. Alle Gebäude besitzen Öffnungen in der Sekundärfassade, die in Hinblick auf die sommerliche Wärmeabfuhr permanent geöffnet sind. In den Wintermonaten November bis Februar sind die Erwärmungen des Zwischenraumes gegenüber dem Außentemperaturniveau sowie die eingesparte Heizenergie dokumentiert. Tabelle 1 fasst die von Pasquay dokumentierten Daten zusammen.

Tabelle 1: Winterliche Performance von drei gemessenen Doppelfassaden nach [4]

Nr.	Ausrichtung	Öffnungsanteil und -art außen	Erwärmung gegenüber außen	Einsparung Heizenergie
1	Süd-West	6,4% permanent geöffnet	bis zu 10 K	9,2%
2	Süd	2,9% permanent geöffnet	bis zu 30 K	13%
	Nord		im Mittel 5K	11%
3	Ost	4,1% permanent geöffnet	im Mittel 3K	10,4% ¹

Das Gebäude Nr. 1 weist den höchsten Öffnungsanteil in der Außenfassade auf. Spitzenwerte der Lufttemperatur im Zwischenraum liegen bis zu 10 K über dem Außentemperaturniveau. Eine Heizenergieeinsparung von 9,2% wurde festgestellt. Gebäude Nr. 2 hat den geringsten Öffnungsanteil. Infolge dessen erreicht die Temperatur im Fassadenzwischenraum zeitweise 37°C, was 30 K oberhalb der Außenlufttemperatur liegt. Dies hat kurzzeitige Einsätze der Kühldecke im Winter zur Folge. Auch auf der Nordfassade werden Erwärmungen von 5 K dokumentiert. Die Einsparung der Heizenergie liegt bei 13% in den südlich orientierten Räumen respektive 11% im Norden. Für das Gebäude Nr. 3 ist eine Reduktion der Transmissionswärmeverluste von 10,4% festgehalten.

Gelingen die Reduzierung des Heizwärmebedarfes und die Begrenzung der erforderlichen Heizlast in der Planungsphase nachweislich, kann auf ein herkömmliches Heizsystem sowie auf die erforderliche Anlagentechnik und Rohrleitungen verzichtet werden. Bei einem geringen Heizwärmebedarf kann dieser an Spitzenbedarfstagen beispielsweise durch elektrische Heizsysteme gedeckt werden.

Der Stand der Technik zeigt also, dass gut geplante und umgesetzte Doppelfassaden großes Potential besitzen, die Heizkosten eines Gebäudes nachhaltig zu reduzieren. Es besteht jedoch immer die

¹ Für dieses Projekt ist die Reduzierung der Transmissionswärmeverluste anstelle der Heizenergieeinsparung dokumentiert

Gefahr, dass nicht berücksichtigte Planungsparameter dazu führen, dass eine Überhitzung im Sommer erhebliche Komforteinbußen oder massiv einen steigenden Energiebedarf für die Gebäudekühlung nach sich zieht.

3 Versuchsaufbau

3.1 Beschreibung der Testfassade

An der Südfassade der HafenCity Universität Hamburg ist die Bypass-Doppelfassade (BxH = 6,30 m x 3,25 m) vor einem real genutzten Büroraum im 3. Obergeschoss installiert. Die Räume an der Südfassade sind mit einem umlaufenden Balkon ausgestattet, der etwa 1,20 m auskragt. Um die nutzbare Fläche des Fassadenzwischenraumes als Loggia zu maximieren, wird die zweite Fassadenebene an der Außenkante des Balkons direkt hinter dem Geländer montiert (Abstand der Glasebenen 1,125 m). Der ursprüngliche außenliegende Sonnenschutz des Universitätsgebäudes wird beibehalten. Dieser Raffstore befindet sich jetzt windgeschützt im Fassadenzwischenraum. Zusätzlich verfügt der Büroraum über ein innenliegendes Rolllö mit Blendschutzfunktion.



Abbildung 1: Süd-Ost Ansicht des Gebäudes der HafenCity Universität Hamburg



Abbildung 2: Außenansicht der Bypass-Doppelfassade

Als *Bypass* werden zwei Luftkanäle bezeichnet, die durch den Fassadenzwischenraum hindurchführen. Dadurch ergibt sich eine direkte Belüftung des Raumes mit Außenluft, ohne eine möglicherweise ungewollte Erwärmung der Luft um Zwischenraum zu erfahren. Ein Bypass-Kanal befindet sich in Bodennähe. Dieser dient in der Regel als Zuluft-Kanal. Der zweite Kanal befindet sich in dem oberen Fassadenbereich, damit eine möglichst große Höhendifferenz ($\Delta H = 3,13$ m zwischen den Bypass-Mittelpunkten) den thermischen Auftrieb begünstigt. Die beiden Kanäle sind in horizontaler Richtung in maximaler Distanz angeordnet, um eine bestmögliche Verteilung der Frischluft im Raum zu erzeugen.

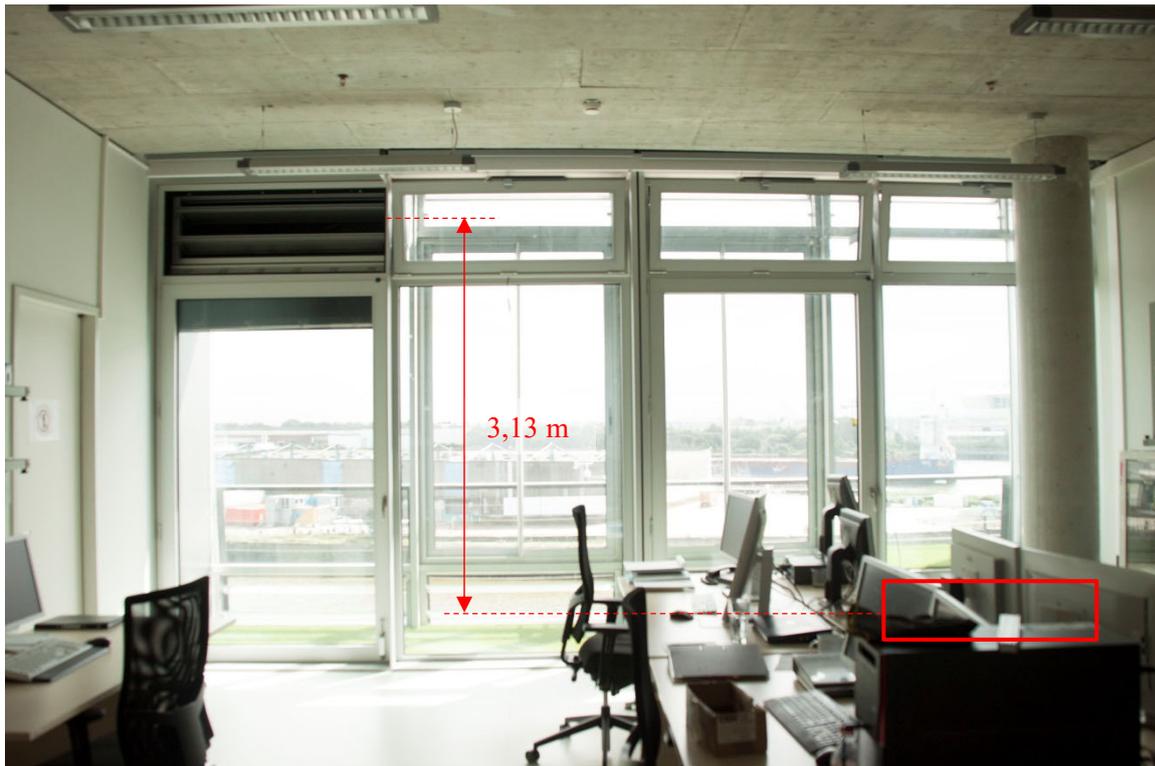


Abbildung 3: Innenansicht des Büroraumes

Zu Forschungszwecken wird die Fassade vor einem einzigen Büroraum installiert. Um jedoch abbilden zu können, dass ein gesamtes Gebäude mit der Bypass-Doppelfassade eingedeckt ist, müssen einige Anpassungen vorgenommen werden:

- Die Seitenflächen sowie das Dach und der Boden werden opak ausgebildet. Dadurch verliert die Testfassade zwar etwas Tageslicht, jedoch entspricht die Einstrahlungsfläche der Sonne genau der Fassadenfläche des Raumes. Würden die Seiten zu Gunsten des Tageslichtes ebenfalls verglast werden, so würde auch die solare Einstrahlung spürbar ansteigen.
- Das Balkongitter der HCU dient nicht nur der Sicherheit und der Optik, sondern es ist gleichzeitig ein fest installierter Sonnenschutz bei hochstehender Sommersonne. Dieser positive Einfluss soll bewusst nicht berücksichtigt werden, damit die Forschungsergebnisse auf andere Gebäude übertragbar sind. Die hellen Gitter sind im Bereich der Doppelfassade entfernt, wodurch die markante Optik der Doppelfassade entsteht.

Die Montage der Sekundärfassade erfolgte im Dezember 2015. Die abschließenden Rohbau- und Abdichtungsarbeiten sowie die darauffolgende Installation der Messtechnik fanden witterungsbedingt erst im Frühjahr 2016 statt.

3.2 Funktionen der Bypass-Doppelfassade

3.2.1 Lüftungsstrategie

Die Lufttemperatur in Fassadenzwischenräumen von Doppelfassaden kann insbesondere bei der Verwendung von Sonnenschutzsystemen erheblich gegenüber der Außenlufttemperatur ansteigen. Die Temperaturlaufzeichnungen in der Bypass-Doppelfassade ergeben sowohl für kalte Wintertage als auch für heiße Sommertage Übertemperaturen von bis zu 30 K über der Außenlufttemperatur, sofern der Zwischenraum nicht mit Außenluft durchspült wird. Selbst bei geöffneten Außenlamellen werden Lufttemperaturen über 45°C gemessen (eine detaillierte Analyse der Lufttemperaturen im Zwischenraum ist in Kapitel 0 gegeben). Dies deckt sich mit den Messwerten von Poirazis [10], welche Lufttemperaturen bei unbelüfteten Zwischenräumen von 64°C aufzeigen.

Im Winter können durch einen warmen Temperaturpuffer die Transmissionswärmeverluste deutlich gesenkt werden. Das Öffnen der Innenfenster zum Zwischenraum hin hat mitunter zur Folge, dass sich der Innenraum ohne den Einsatz von Heizenergie passiv erwärmt.

Im Sommer hingegen führt ein erwärmter Zwischenraum zu ungewollten Energieeinträgen, sofern zur Belüftung des Innenraumes die Fenster geöffnet werden. In Klimafällen mit potentieller Überhitzung des Raumes soll der Energieeintrag über die Fassade minimiert werden. Über die Bypässe, zwei Lüftungskanäle durch den Zwischenraum hindurch, kann dem Innenraum die Außenluft direkt zugeführt werden, ohne dass sich diese im Fassadenzwischenraum weiter erwärmt.

Die variablen Luftführungen sollen zusammen mit einer hierauf abgestimmten Fassadensteuerungssoftware ein Maximum an solarer Energiegewinnung ermöglichen, sofern dies zur Raumwärmung gewünscht ist. In Klimafällen mit potentieller Überhitzung des Raumes soll der Energieeintrag über die Fassade minimiert werden und eine effiziente nächtliche Auskühlung durch natürliche Lüftung erfolgen.

3.2.2 Winterlüftung / Wärmerückgewinnung

Eine Bypass-Doppelfassade über mehrere Geschosse hinweg kann so konzipiert werden, dass die Abluft aus dem oberen Bypass mit der Zuluft des darüber liegenden Geschosses gekreuzt wird. Über dezentrale Wärmetauscher kann dadurch auch bei natürlicher Lüftung ein Großteil der Lüftungswärmeverluste vermieden werden. Ein kleiner Ventilator wäre notwendig, um die Druckdifferenz durch einen Wärmetauscher zu überwinden. Dieser Steuerungsfall ist nur dann sinnvoll, wenn die passive Erwärmung des Zwischenraumes aufgrund der Solarstrahlung eine geringere Zulufttemperatur erzeugt als die Zuluft aus einem dezentralen Wärmetauscher. Abbildung 4 zeigt eine

konzeptionelle Skizze dieses Prinzips aus der Antragsphase. Die Bypass-Doppelfassade ist aus Kostengründen nur vor einem einzigen Büroraum und daher ohne Systeme zur Wärmerückgewinnung realisiert.

An dem validierten Gebäudemodell wird in Kapitel 6.3 eine Abschätzung der Effizienz einer Wärmerückgewinnung durchgeführt. Es wird die potentielle Ersparnis an Heizenergie mit der erforderlichen Antriebsenergie eines Ventilators gegenübergestellt.

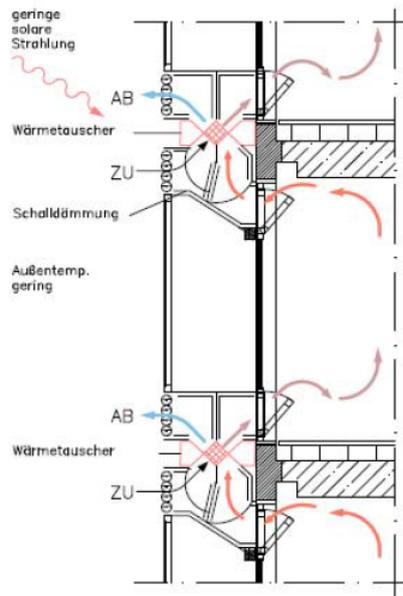


Abbildung 4: Konzeptdarstellung der Wärmerückgewinnung

3.2.3 Schallschutz

Ein entscheidender Vorteil von Doppelfassaden gegenüber konventionellen einschaligen Fassaden ist der verbesserte Schutz vor Außenlärm. Bei geöffneten Fenstern reduziert sich jedoch das Schalldämmmaß einer (Doppel)fassade erheblich. Die Bypass-Kanäle werden daher mit Schalldämmung ausgekleidet, um bei natürlicher Lüftung dennoch ein hohes Schalldämmmaß zu erreichen.

Eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung, Variantenbildungen und Messungen am Modell sowie die Auswertung der Messdaten ist in Kapitel 4.2 zu finden.

3.3 Messtechnik und Datenaufzeichnung

3.3.1 Allgemeines

Alle Sensoren und Aktoren sind in ein KNX Bussystem integriert und an einen OPC Server angeschlossen. Über dieses Bussystem werden sowohl die Messdaten ausgelesen als auch auf Grundlage der Messdaten Steuerbefehle für die Fenster und den Sonnenschutz gegeben (die Fassadensteuerung ist in Kapitel 3.4 dokumentiert). Alle Sensoren werden in 30-Sekunden-Intervallen ausgelesen. Von den Fenstermotoren wird alle 30 Sekunden eine Rückmeldung über die Position abgefragt und von

den SMI-Motoren für Sonnen- und Blendschutz werden ebenfalls die Position und der Lamellenwinkel ausgelesen. Gespeichert werden die Daten als 5-Minuten-Mittelwerte (jeweils die Mittelwerte aus zehn aufeinanderfolgenden Messdaten).

Die folgenden Abbildungen zeigen den Grundriss und zugehörige Schnitte des Testraumes mit den Positionen der montierten Sensoren. Im Folgenden wird die verwendete Messtechnik näher beschrieben.

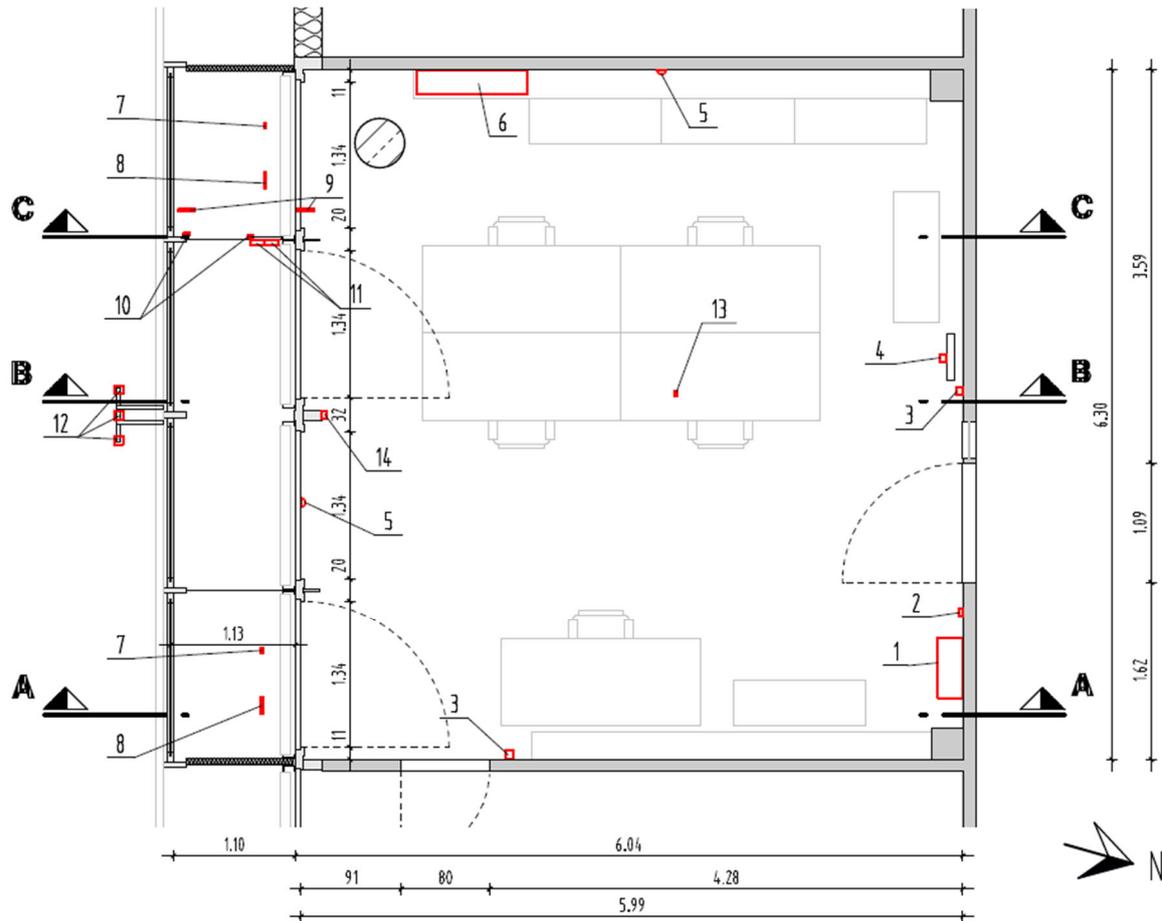


Abbildung 5: Grundriss des Testraumes mit Lokalisation der Sensoren

Tabelle 2: Übersicht der Sensoren im Büroraum

Nr.	Messgrößen	Anmerkung
1	Gesamtstromverbrauch	Unterverteilung Gebäudeanschluss, Wirkenergiezähler Beleuchtung, Energieverbrauchszähler
	Beleuchtungsenergie	
2	Lufttemperatur, CO ₂ , rel. Feuchte	Jeweils in den Höhen 0,25 m / 1,40 m / 3,00 m über dem Fußboden
	Oberflächentemperatur	Direkt neben dem Kombisensor in 1,40 m Höhe
3	Beleuchtungsstärke	Höhe 95 cm im Rauminnen Höhe 85 cm neben einem der Arbeitsplätze
4	Heizleistung	Wärmemengenzähler am Heizkörper
	Personenzähler	Zur Zählung von bis zu 8 Personen im Raum
5	Oberflächentemperatur	Ohne Fremdeinflüsse auf einer Gipskartonwand hinter ei- ner Schrankwand Glastemperatur, Höhe 2,75 m, gleicher Abstand zu beiden Seiten
6	-	KNX-Schaltschrank
7	Lufttemperatur Bypass	Jeweils ein Sensor im oberen/unteren Bypass lokale Messung
8	Strömungsgeschwindig- keit im Bypass	
9	Schalldruckpegel	Schalltransmitter mit Mikrophon vor und hinter dem unte- ren Bypass
10	Lufttemperaturen Zwischenraum, diverse	Messung eines Temperaturprofils mit sieben strahlungsgeschützten Sensoren und einem zusätzlichen Kombisensor (vgl. Tabelle 4)
11	Druckdifferenz	Außen – Zwischenraum Zwischenraum - Innen
12	Außenlufttemperatur Luftfeuchte Windgeschwindigkeit Windrichtung	Lokale Wetterstation im Abstand von 75 cm vor der äuße- ren Verglasungsebene
13	Betonkerntemperatur	Tiefe 5 cm
14	Lufttemperatur, CO ₂ , rel. Feuchte	Höhe 1,40 m über dem Fußboden

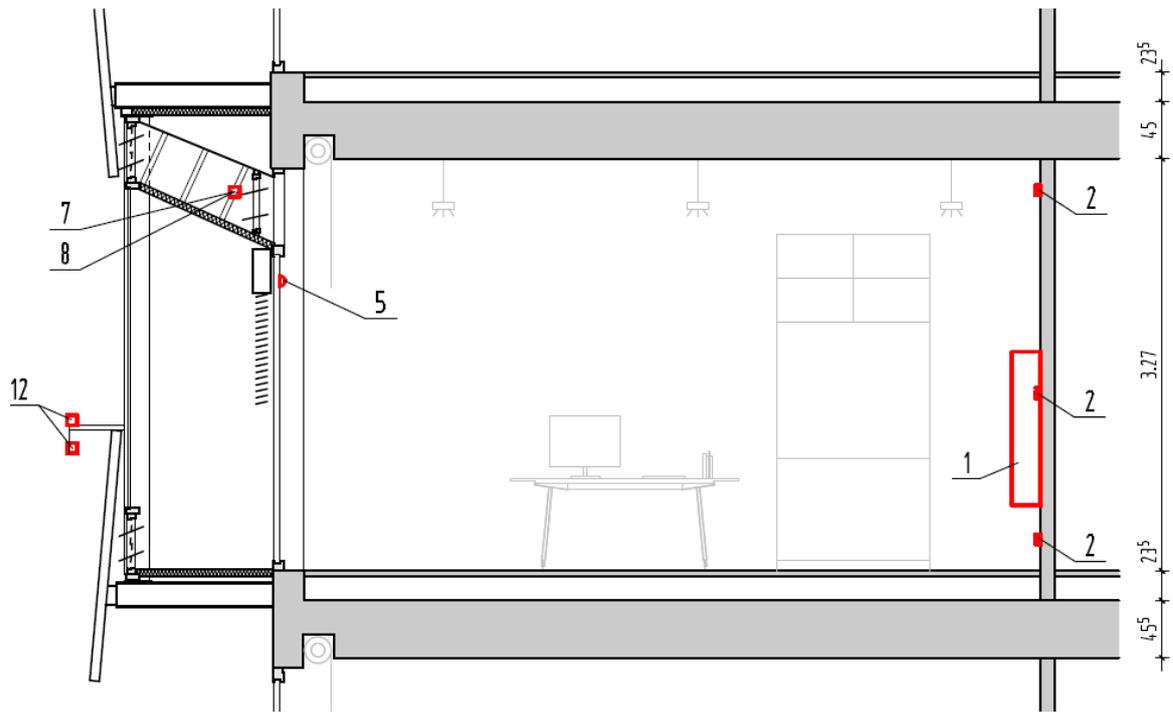


Abbildung 6: Schnitt A-A mit Lokalisation der Sensoren

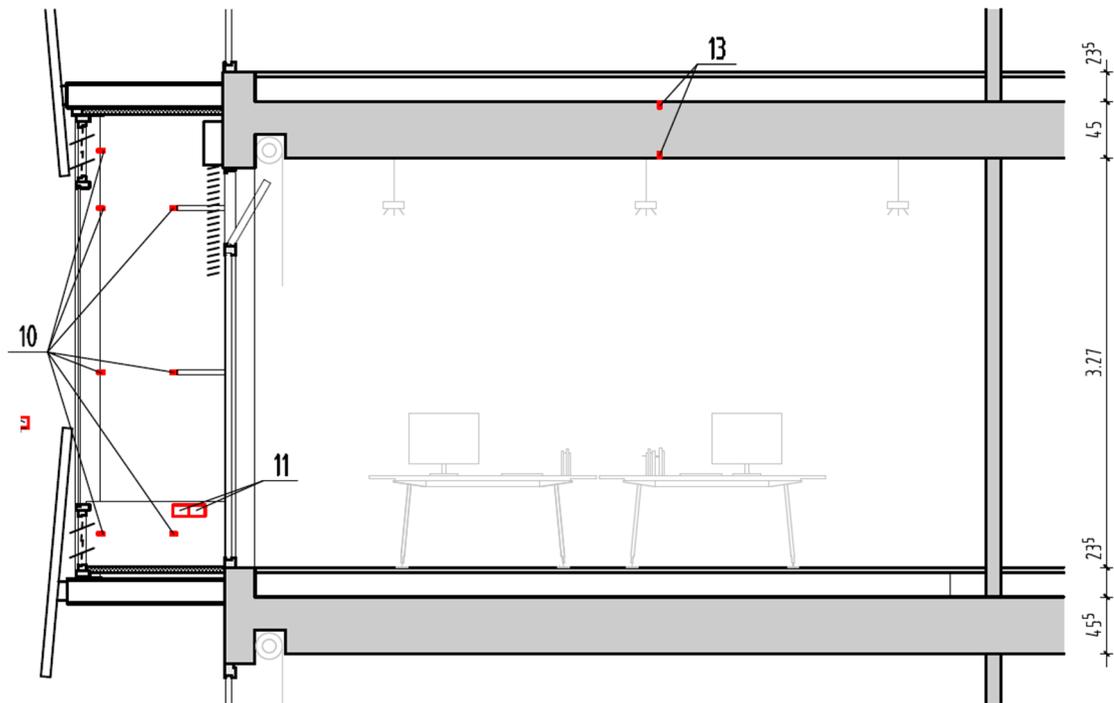


Abbildung 7: Schnitt B-B mit Lokalisation der Sensoren

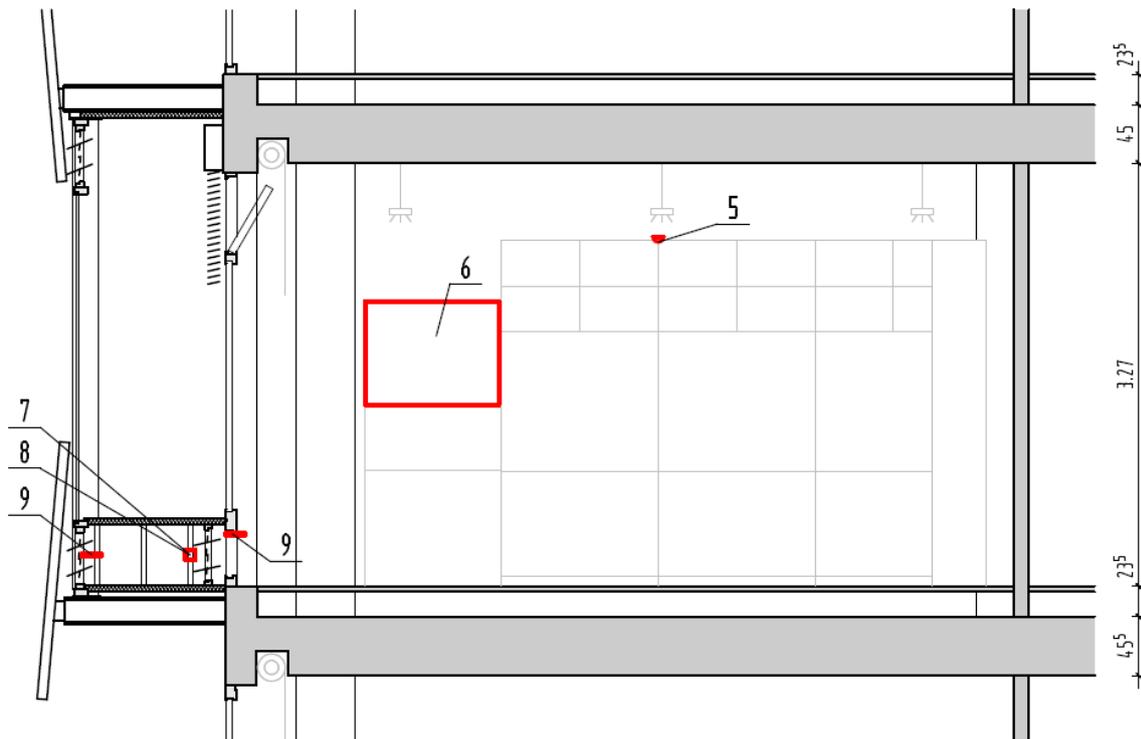


Abbildung 8: Schnitt C-C mit Lokalisation der Sensoren

3.3.2 Komfortmessung im Testraum

Über vier Kombinationssensoren Typ WET 112 werden die Raumlufttemperatur, der CO₂-Gehalt und die relative Luftfeuchtigkeit erfasst. Drei davon befinden sich an der inneren Wand des Raumes (Position 2 nach Abbildung 5), damit keine Störeinflüsse wie beispielsweise direkte Solarstrahlung oder einströmende Frischluft die Messwerte beeinflussen. Diese Sensoren sind in drei unterschiedlichen Höhen (0,25 m bodennah / 1,40 m in Kopfhöhe eines sitzenden Menschen / 3,00 m deckennah) angebracht. Direkt neben dem mittleren Sensor ist ein Oberflächentemperaturfühler (Pt1000) angebracht, um lokal eine Aussage über die operative Raumtemperatur treffen zu können. Ein weiterer Kombinationssensor ist, ebenfalls in 1,40 m Höhe, an dem mittleren Fassadenpfosten montiert (Position 14 nach Abbildung 5), da der hohe Glasanteil der Fassade einen deutlich spürbaren und messbaren Einfluss auf die Temperaturen hat. An Position 5 befindet sich darüber hinaus ein Oberflächentempersensor (Pt1000) an der Glasscheibe, um auch in Fassadennähe die operative Temperatur zu erfassen. Dieser Oberflächentempersensor ist mit einer reflektierenden Aluminiumfolie geschützt, um den Einfluss der direkten Solarstrahlung zu minimieren.

Tabelle 3: Messbereiche und Genauigkeiten der Kombinationssensoren WET112 sowie des Temperaturfühlers Pt1000

Messwert	Messbereich	Genauigkeit
Oberflächentemperatur	-35 – 105°C	1/3 DIN (0,1 + 0,0017 T) ± 0,13°C bei 20°C
Lufttemperatur	0 – 40°C	± 1°C
CO ₂	300 – 1000 ppm	± 120 ppm
	1000 – 2000 ppm	± 250 ppm
	2000 – 5000 ppm	± 300 ppm
	5000 – 9999 ppm	ohne Angabe
rel. Luftfeuchtigkeit	1 – 100%	± 5%



Abbildung 9: links: Kombinationssensor WET 112 mit einem Oberflächentemperaturfühler Pt1000, rechts: mit reflektierender Folie geschützter Glas-Oberflächentempersensor

3.3.3 Temperaturmessungen im Fassadenzwischenraum

Die Bypass-Doppelfassade ist nahezu südlich orientiert (164° von Nord) und daher im Tagesverlauf über einen langen Zeitraum hoher Solarstrahlung ausgesetzt. Dies führt zu einer starken Erwärmung der Luft im Fassadenzwischenraum. Durch den thermischen Auftrieb stellt sich eine Temperaturschichtung ein. Damit diese messtechnisch erfasst werden kann, sind insgesamt sieben Temperatursensoren Typ LTF 02 sowie ein zusätzlicher Kombisensor WET 112 im Zwischenraum installiert. Die Positionen sind in Abbildung 10 dargestellt, Tabelle 4 fasst die Art und Funktion der Sensoren zusammen. Die Messungen finden in der Nähe der Sekundärfassade (Glasabstand 20 cm) sowie in der Nähe der Primärfassade (Glasabstand 45 cm, Abstand zu den Sonnenschutzlamellen im geschlossenen Zustand 30 cm) statt (siehe Abbildung 10).

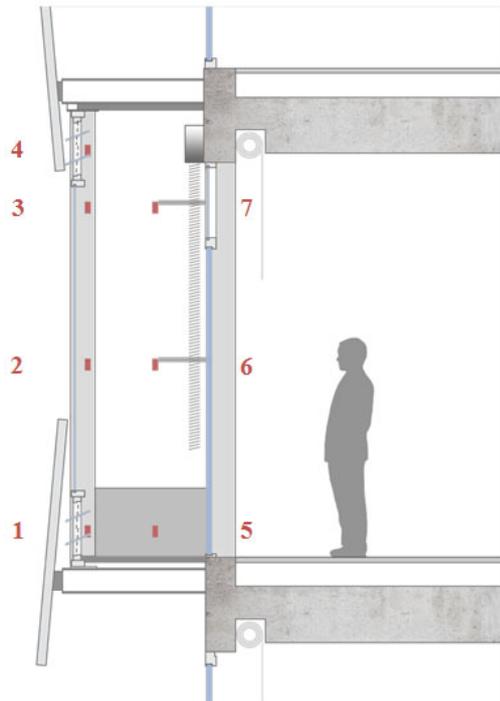


Abbildung 10: Schnitt durch den Fassadenzwischenraum mit eingezeichneten Temperaturmessstellen

Tabelle 4: Übersicht der Temperaturmessstellen im Fassadenzwischenraum

Nr.	Sensor	Höhe	Funktion
1	LTF 02	0,26 m	Zulufttemperatur durch untere Lamellen
2	LTF 02	1,55 m	Erfassung eines Temperaturprofils
3	LTF 02	2,86 m	Erfassung eines Temperaturprofils
4	LTF 02	3,50 m	Ablufttemperatur durch obere Lamellen
5	LTF 02	0,26 m	Erfassung eines Temperaturprofils
6	LTF 02	1,55 m	Erfassung eines Temperaturprofils
	WET 112	1,55 m	Kontrollmessung zur Bestimmung des abschirmenden Einflusses durch den Strahlungsschutz
7	LTF 02	2,86 m	Zulufttemperatur für den Raum durch Kippfenster

Tabelle 5: Messbereich und Genauigkeit der Leitungstemperaturfühler LTF 02

Messwert	Messbereich	Genauigkeit
Lufttemperatur	-55 – 125°C	± 0,5 K

Alle Temperatursensoren im Fassadenzwischenraum sind mit einem selbst entwickelten Strahlungsschutz versehen, um die Lufttemperaturen ohne Einfluss der solaren Strahlung zu messen. In dem ersten Entwicklungsschritt ist der Fühler durch ein reflektierendes Rohr verschattet gewesen.

Dieses Rohr absorbiert einen Teil der Solarstrahlung, jedoch erhitzt sich durch die langwellige Wärmestrahlung der Sensor im Inneren des Rohres. Zur Vermeidung der sekundären Wärmeabgabe wird das Rohr durch einen lamellenförmigen Verschattungsring geschützt. Die Lamellenform gewährleistet eine möglichst hohe Ventilation. Die durch den verschatteten Sensor gemessene Lufttemperatur liegt bei Sonnenschein jedoch auch nach dem zweiten Entwicklungsschritt oberhalb der gemessenen Referenztemperatur. Hitzestau innerhalb des Rohres ist die Ursache. Final wurde daher ein kleiner Ventilator auf dem inneren Rohr installiert, welcher dauerhaft für eine Luftdurchströmung des Rohres sorgt. Diese Konstruktion wird in einem 3D-Drucker hergestellt und kann in beliebigen Längen zusammengesteckt werden. Der fertige Strahlungsschutz ist in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Lufttemperaturfühler im Fassadenzwischenraum mit Strahlungsschutz

3.3.4 Betonkerntemperaturen

In der Betondecke über dem Büroraum (über 3. OG) sind zwei Temperaturfühler Typ LTF 02 eingebohrt (siehe Tabelle 5). Da es sich um eine Hohlkörperdecke handelt, sind die Bohrtiefen technisch begrenzt. Diese betragen jeweils 5 cm von unten und von oben. Die Hohlkörperdecke hat insgesamt eine Stärke von 45 cm. Ein dritter Betonkernsensor ist in der Decke oberhalb des 4. Geschosses installiert.

3.3.5 Erfassung der internen Lasten

Für die spätere Modellvalidierung ist es wichtig, dass die internen Lasten (Geräte, Beleuchtung, Personen) sowie die Heizwärme bekannt sind. Die Heizleistung wird über einen Wärmemengenzähler erfasst. Der gesamte Stromverbrauch innerhalb des Testraumes wird über einen separaten Drehstromzähler erfasst. Ein zusätzlicher Wechselstromzähler misst den Stromverbrauch für die Beleuchtung. Da beide Zähler synchron im 30-Sekunden-Takt durch das Bussystem ausgelesen werden, kann aus der Differenz beider Werte auf den Stromverbrauch für elektrische Geräte geschlossen werden.

Die Wärmeabgabe durch Personen kann nicht direkt messtechnisch erfasst werden. Es ist jedoch möglich die Anzahl der anwesenden Personen zu zählen und mit einem geschätzten Wert des mittleren Energieumsatzes zu multiplizieren. Die Wärmeerzeugung durch Personen wird nach DIN EN 13779 [12] mit einer Gesamtwärme (metabolische Rate) von 125 Watt pro Person bei sitzender Bürotätigkeit berücksichtigt. In Kapitel 6.2.2 wird detailliert auf die Modellierung der Wärmeabgabe durch Personen eingegangen.

Ein entscheidendes Kriterium für die Durchführung einer permanenten Personenzählung ist die Anonymität der gesammelten Daten. Es soll festgehalten werden, wie viele Personen sich wann in dem Raum aufhalten. Es sollen jedoch keine personenbezogenen Informationen gewonnen werden. Dadurch ist es nicht möglich, ein „automatisiertes Check-In“ beispielsweise über die RFID Technologie umzusetzen und auch eine Auswertung der Computerbetriebszeiten oder infrarotbasierte Sensoren zur Personenzählung können nicht genutzt werden. Ein für diesen Zweck entwickelter Personenzähler ist in Abbildung 12 zu sehen. Auf einem dünnen Holzbrett sind acht Reed-Kontakte nebeneinander angebracht. Angeschlossen an einen Binäreingang senden die Reed-Kontakte ein Binärsignal an das Bussystem. Wird der Stromkreis über einen Magneten geschlossen, erhält das System eine positive Rückmeldung. Die Magnete sind an den unteren Enden von Holzstäben befestigt. Beim Betreten und Verlassen des Raumes ist jeder Mitarbeiter dazu angehalten, einen beliebigen Holzstab in die *anwesend-* bzw. *abwesend-Position* zu stecken. Mit geringem technischen Aufwand ist es so möglich, die Anzahl der im Raum anwesenden Personen permanent aufzuzeichnen. Dieses System setzt voraus, dass die Nutzer in die Art der Personenzählung eingewiesen sind und diese auch konsequent umsetzen. Kleine Ungenauigkeiten durch nicht eingewiesene Personen (Reinigungspersonal, Besucher, etc.) oder durch das Vergessen einen Holzstab umzusetzen können nicht ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse der Modellvalidierung (Kapitel 6.2) zeigen jedoch, dass die Personenzählung ausreichend genau ist.



Abbildung 12: Selbst entwickelter Personenzähler (hier: Eine Person ist anwesend)

Tabelle 6: Übersicht der verwendeten Geräte zur Erfassung der internen Lasten

Messwert	Gerät
Heizwärme	zelsius C5-CMF Wärmemengenzähler
Leistungsaufnahme Beleuchtung	ALD 1 KNX Wechselstromzähler
Leistungsaufnahme Gesamt	ABB A43 313-100 Drehstromzähler
Personenanzahl	Eigenkonstruktion auf 8 Reed-Kontakten und Magneten

3.3.6 Messungen im Bypass

In beiden Bypässen werden jeweils die lokale Strömungsgeschwindigkeit mit einem omnidirektionalen Sensor (TSI 8475-300-1) sowie die Lufttemperatur erfasst.

Tabelle 7: Messbereiche und Genauigkeiten der Sensoren im Bypass

Messwert	Messbereich	Genauigkeit
Strömungsgeschwindigkeit	0,05 – 2,54 m/s	± 3% des Messwertes 1% des Messbereiches
Lufttemperatur	-55 – 125°C	± 0,5 K

3.3.7 Akustikmessungen

Mit zwei busfähigen Akustiksensoren werden die A-bewerteten Schalldruckpegel direkt vor und hinter dem Bypass aufgezeichnet (siehe Abbildung 13). Die Sensoren haben folgende Spezifikationen:

- Bezeichnung: SLT-TRM
- Messbereich: 30 – 130 dB(A)
- Frequenzbereich: 31,5 Hz bis 8 kHz
- Genauigkeitsklasse 2 nach IEC 61672
- Die analoge Ausgabe erfolgt jeweils über einen A-bewerteten Schalldruckpegel. Eine Auflösung der einzelnen Frequenzbereiche steht nicht zur Verfügung.

Detaillierte Versuchsaufbauten und Messergebnisse zum Schallschutz sind in Kapitel 4 beschrieben.



Abbildung 13: Akustiksensordirekt hinter dem unteren Bypass

3.3.8 Differenzdrucksensoren

Zwei Differenzdrucksensoren Typ DKP900-A sind im Fassadenzwischenraum installiert. Die externen Eingänge sind über einen pneumatischen Anschluss mit dem Innenraum bzw. mit dem Außenbereich verbunden, sodass zwei Differenzdrücke gemessen werden.

- Druckdifferenz zwischen außen und dem Fassadenzwischenraum
- Druckdifferenz zwischen dem Fassadenzwischenraum und dem Büroraum.

Tabelle 8: Messbereich und Genauigkeit der Differenzdrucksensoren DKP900-A

Messwert	Messbereich	Genauigkeit
Differenzdruck	$\pm 100 \text{ Pa}$	$\pm 0,5\%$ vom max. Messbereich (0,5 Pa)

3.3.9 Helligkeitssensoren

Praxisnahe Helligkeitsmessungen in Büroräumen erfordern eine Messung möglichst dicht am Arbeitsplatz der Personen in entsprechender Höhe. Eine Installation direkt auf dem Schreibtisch wäre von dieser Sichtweise her ideal, ist jedoch kaum praktikabel. Da der Büroraum aufgrund von großen Schrankinstallationen über wenig freie Wandfläche verfügt, sind die möglichen Standorte für Helligkeitssensoren sehr begrenzt. Es sind zwei Helligkeitssensoren Typ theben LUNA 133 9 200 installiert (Positionsnummer 3 gemäß Abbildung 5). Ein Sensor befindet sich direkt neben einem Arbeitsplatz auf 85 cm Höhe an der Bürotrennwand 1,87 m hinter der Primärfassade. Bei unverschatteter Nachmittagssonne kann es vorkommen, dass dieser Sensor direktem Sonnenlicht ausgesetzt ist. Der zweite Sensor befindet sich neben der Raumeingangstür in maximaler Raumtiefe 95 cm über dem Fußboden. Bei tiefstehender Wintersonne kann dieser Sensor direktem Tageslicht ausgesetzt sein, jedoch wird dies meist durch den Einsatz von Sonnen- oder Blendschutz verhindert.

Tabelle 9: Messbereich und Genauigkeit der Helligkeitssensoren theben LUNA 133 9 200

Messwert	Messbereich	Genauigkeit
Beleuchtungsstärke	1 – 100.000 Lux	± 20% bzw. ± 5 Lux

3.3.10 Erfassung der Öffnungszustände (Raum und Fassade)

Es sind drei verschiedene Arten von Öffnungszuständen zu unterscheiden:

- Innere Kippfenster, äußere Lamellen, Bypass-Lamellen:
Die Kippfenster zum Innenraum werden mit Kettenantrieben der Firma WindowMaster angetrieben (Typ WMX 823). Für die Lamellen werden Lamellenantriebe (Typ WML 860) eingesetzt. Diese Motoren sind speziell für den Betrieb über das KNX-Bussystem ausgelegt. Sie lassen sich direkt steuern über manuelle Tasterbefehle oder über einen Steuerbefehl aus der Fassadensteuerung. Die Motoren geben dem Bussystem automatisch eine Rückmeldung über die tatsächlich angesteuerte Fensterposition (Öffnungsgrad in % der maximalen Öffnungsweite).
- Sonnenschutz und Blendschutz:
Der im Fassadenzwischenraum installierte Sonnenschutz (Lamellen Raffstore) sowie der innenliegende Blendschutz (Stoffrollo) werden über SMI-fähige Motoren betrieben (SMI = Standard Motor Interface). Über einen speziellen Aktor können Daten zwischen den SMI-Motoren und dem KNX Bussystem ausgetauscht werden. Steuerbefehle (vertikale Position der Behänge, Lamellenwinkel) können gesendet werden und die Motoren senden automatisch eine Rückmeldung über die entsprechenden Daten. Dadurch ist sichergestellt, dass alle relevanten Daten permanent aufgezeichnet werden können.
- Türen zum Flur, Nachbarräum, Balkontüren, äußere Schiebefenster:
Diese Türen sind nicht motorbetrieben. Sie werden bei Bedarf von Hand geöffnet. Eine automatisierte Rückmeldung über die genaue Position ist daher nicht möglich. Aus diesem Grund sind diese Türen jeweils mit einem Reed-Kontakt versehen. Dieser gibt eine Rückmeldung, ob die Tür geöffnet ist, jedoch nicht wie weit. Es kann jedoch nutzungsbedingt davon ausgegangen werden, dass die Türen im Regelfall vollständig geöffnet oder geschlossen sind.

3.3.11 Wetterstation auf dem Gebäudedach

Auf dem Dach über dem 5. OG des Nordflügels des Universitätsgebäudes ist eine Wetterstation installiert. Diese dient primär für den Gebäudebetrieb. Die Wetterstation ist 1,00 m oberhalb einer Technikeinhausung montiert.

Die Außenlufttemperatur wird mit einem Außentemperaturfühler (Typ NTC 12k) gemessen. Ein Anemometer (Three-Cup-Rotor) und eine Windfahne liefern Daten zu der Windgeschwindigkeit

und Windrichtung. Beide sind mit einem Heizdraht ausgerüstet und können so bis zu einer Außenlufttemperatur von -20°C eingesetzt werden. So niedrige Temperaturen sind während des Messzeitraumes nicht aufgetreten. Drei Helligkeitssensoren liefern Daten über die Außenbeleuchtungsstärke in den Himmelsrichtungen Ost, Süd und West. Diese Daten werden für den Gebäudebetrieb verwendet, sind aber für das Forschungsprojekt nicht relevant. Der Regensensor arbeitet nach der Leitwertmessung. Für den Winterbetrieb ist er mit einer beheizten Sensorfläche ausgestattet. An der Bypass-Doppelfassade wird bei Regen der Öffnungswinkel der äußeren Lamellen begrenzt, um das Eindringen von Wasser in den Fassadenzwischenraum zu vermeiden (Details zur Fassadensteuerung sind in Kapitel 3.4 zu finden). Eine Zusammenfassung der Instrumente und deren Spezifikationen ist in Tabelle 10 zu finden.



Abbildung 14: Wetterstation auf dem Gebäudedach

Auf dem südlichen Gebäudeflügel sind zwei Pyranometer (Typ SKL 2655) installiert. Beide sind 0,82 m oberhalb der Technikeinhausung installiert und ragen somit 2,78 m über das Gebäudedach hinaus. Ungewollte Verschattungen gibt es in dieser Lage keine. Diese Strahlungssensoren sind speziell für den Einsatz unter freiem Himmel entwickelt und erfassen ein Strahlungsspektrum von 350 – 1100 nm. Ein Pyranometer wird für die Messung der Globalstrahlung verwendet. Ein zweites Pyranometer ist mit einem Schattenring (CM 121) verschattet, sodass der direkte Strahlungsanteil nicht auf die Photozelle im Sensorkopf trifft (siehe Abbildung 15). Der Schattenring ist so ausgerichtet, dass der Sensorkopf im Tagesverlauf vollständig vor direktem Strahlungseinfall geschützt ist. Je nach Sonnenstand ist eine manuelle Nachstellung der Gleitschienen erforderlich, um den Schattenring an den Sonnenstand anzupassen. Der Schattenring schirmt jedoch nicht nur die Globalstrahlung vollständig ab, sondern auch einen Teil der diffusen Strahlung entsprechend des Winkels V (siehe Abbildung 15). Um die Diffusstrahlung zu erhalten, die aus einem Winkel von 2π auf

den horizontalen Sensor fällt, muss der Messwert mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden. Die Korrekturfunktion hat einen sinusförmigen Verlauf mit dem Maximalwert von 14,09% zur Sommersonnenwende und einem Minimum von 1,38% zur Wintersonnenwende für den Standort Hamburg (Breitengrad 53,5° N).



Abbildung 15: Verschatteter Strahlungssensor zur Messung der Diffusstrahlung

Tabelle 10: Komponenten der Wetterstation auf dem Gebäudedach

Messwert	Messbereich	Genauigkeit
Beleuchtungsstärke (je Ost/Süd/West)	1 – 100 000 lux	± 20% bzw. ± 5 lux
Lufttemperatur (Dach) (unverschattet)	-40 – 70°C	± 1,2°C bei 25°C
Windgeschwindigkeit	0 – 75 m/s	± 0,3 m/s (unter 3 m/s) ± 1% (über 3 m/s)
Windrichtung	0 – 359°	± 2°
Regen	ja / nein	entfällt
Solarstrahlung (global)	0 – 1400 W/m ²	< 0,2% linear
Solarstrahlung (diffus)	350 – 1100 nm	< 3-5% Kalibrierfehler
Lufttemperatur (Fassade)	-30 – 70°C	± 0,5 K
Außenluftfeuchte (Fassade)	0 – 100%	± 3% zwischen 35-70% r.F.

3.3.12 Wetterstation vor der Doppelfassade

Mittig vor der Doppelfassade ist eine Wetterstation auf Höhe des Fußbodens montiert. Der Abstand zur Sekundärfassade beträgt 75 cm. Hier wird der Einfluss der Gebäudeabschirmung auf die Windgeschwindigkeit und -richtung erfasst. Es wird ein baugleiches Anemometer und eine baugleiche Windfahne genutzt, wie sie auch auf dem Dach der Universität montiert sind. Darüber hinaus wird die Lufttemperatur lokal erfasst. Hier kommt ein Temperatur- und Feuchtesensor (Typ FTA 54 AA)

zum Einsatz mit einer selbst entwickelten Verschattungskonstruktion zur Vermeidung von Störeinflüssen durch die Solarstrahlung. Die Luft vor der Fassade erwärmt sich bei Sonnenschein stärker als die frei umströmte Luft auf dem Dach, da zum einen die Windgeschwindigkeit vor dem Gebäude beeinflusst wird und zum anderen Reflektionen an der Gebäudehülle für zusätzliche Erwärmung sorgt.

Tabelle 11: Komponenten der Wetterstation vor der Doppelfassade

Messwert	Messbereich	Genauigkeit
Lufttemperatur (verschattet)	-20 bis +80°C	± 0,5 K
Luftfeuchtigkeit	0 bis 100 % rel. Feuchte	± 2%

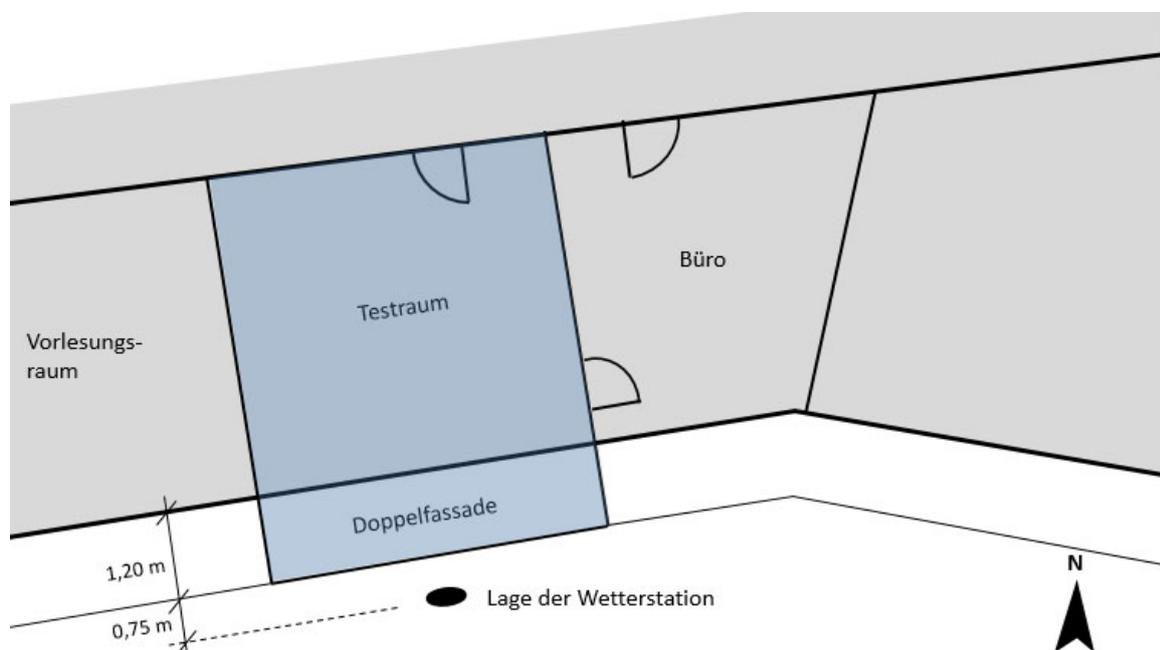


Abbildung 16: Lage der Wetterstation im Grundriss

3.3.13 Messungen in Nachbarräumen

Oberhalb des Testraumes befinden sich Büroräume. Diese waren ursprünglich als Referenzraum angedacht, um die Messwerte aus dem Büroraum mit Bypass-Doppelfassade den Messwerten eines Raumes mit einschaliger Fassade gegenüberstellen zu können und so den Einfluss der Bypass-Doppelfassade quantifizieren zu können. Diese Räume waren jedoch während der Projektlaufzeit einen längeren Zeitraum ungenutzt. Aufgrund der relevanten Nutzungsabweichung im Vergleich zu dem Testraum stehen keine Referenzmessungen zur Verfügung.

Die Messdaten aus den Nachbarräumen dienen zusätzlich der Bestimmung der Transmissionswärmeströme in benachbarte Zonen. Dies ist für die Validierungsphase des thermischen Gebäudemodells eine wichtige Kenngröße. In den folgenden Räumen ist jeweils ein Kombinationssensor WET 112 (Messbereiche und Genauigkeiten siehe Tabelle 3) installiert:

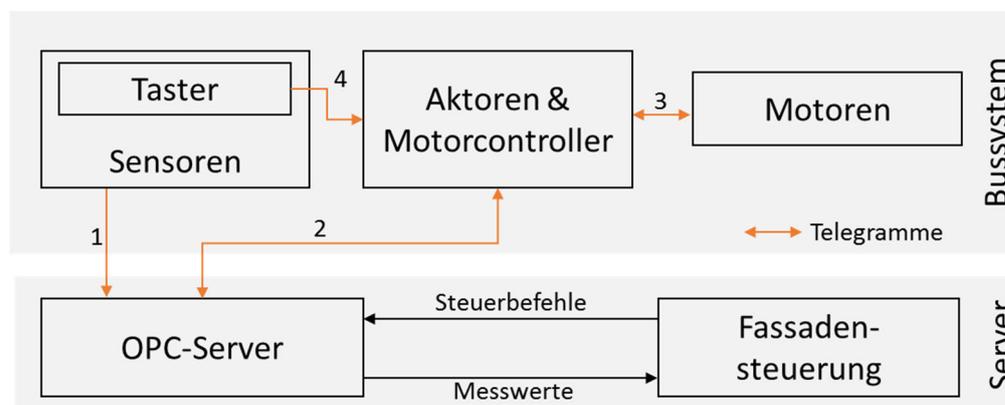
- Büroraum 4. OG oberhalb des Testraumes
- Vorlesungsraum 3. OG westlich neben dem Testraum
- Büroraum 3. OG östlich neben dem Testraum
- Flur 3. OG nördlich hinter dem Testraum.

Für den Vorlesungsraum im 2. OG unterhalb des Büroraumes werden die Messdaten aus dem Vorlesungsraum aus dem 3. OG angenommen.

3.4 Fassadensteuerung

3.4.1 Allgemeine Steuerungsalgorithmen

Der allgemeine Kommunikationsablauf zwischen Bussystem, OPC-Server und Fassadensteuerung ist in Abbildung 17 dargestellt. Alle Sensoren und Aktoren sind in ein KNX Bussystem integriert und an einen OPC-Server angeschlossen. Alle Informationen der Sensoren und Aktoren werden in einem 30 Sekunden Intervall an den OPC-Server gesendet. Von dort werden die Messwerte der Sensoren von der Fassadensteuerung ausgelesen. Die Steuerbefehle werden von der Fassadensteuerung an den OPC-Server zentral übergeben und von dort aus als Telegramme an die Aktoren gesendet. Lediglich die Taster für die jeweiligen Fenstergruppen (Bypässe, Außenlamellen und Kippfenster) sowie die Taster des Sonnenschutzes können ebenso Telegramme an die Aktoren senden und überschreiben die Steuerbefehle der Fassadensteuerung für 30 Minuten, um einen Eingriff des Nutzers jederzeit zu ermöglichen und zu priorisieren.



1. Messwerte an den OPC-Server
2. Öffnungszustände an den OPC-Server bzw. Steuerbefehle an die Aktoren/Motorcontroller
3. Steuerbefehle an die Motoren
4. Überschreiben der Steuerbefehle durch Nutzereingriff

Abbildung 17: Kommunikationsablauf Bypass-Doppelfassade

3.4.2 Auswahl der Programmiersprache

Einfache Steuerungen können in einem KNX-System über die *Engineering Tool Software* (ETS) direkt mit Aktoren umgesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist ein Aktor für den Sonnenschutz. Dem Aktor wird ein Sensor zugeordnet und beim Überschreiten eines Grenzwertes der Solarstrahlung

fährt der Sonnenschutz herunter. Eine komplexe Fassadensteuerung lässt sich über die Aktoren alleine nur bedingt abbilden. Daher wird, wie bei Gebäuden mit Gebäudeleittechnik üblich, ein *OLE for Process Control-Server* (OPC-Server) auf einem Rechner betrieben. Hiermit ist es möglich über Windows-Applikationen auf das Bussystem zuzugreifen und Daten zu lesen und zu schreiben.

Dieser Weg wird von der Fassadensteuerung genutzt, um das Raumklima zu regeln. Als Programmiersprache fiel die Wahl auf MATLAB. Diese bietet den Vorteil, dass sie, basierend auf Java, für das Rechnen und Visualisieren optimiert ist. Zudem gibt es eine Vielzahl von Add-Ons sowie Apps. So sind mit dem Add-On „*OPC Toolbox*“ bereits auf vorgefertigte Befehle und Logiken zum Kommunizieren mit dem OPC-Server vorhanden, die in die Fassadensteuerung implementiert werden.

3.4.3 Stand der Technik von Fassadensteuerungen

Die Steuerung von Fenstern sowie das Zusammenspiel mit der Gebäudetechnik wird in der Forschung oft analysiert. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung dargestellt.

In [13] wird das Potenzial und die Planung von natürlich belüfteten Gebäuden ohne Doppelfassaden beschrieben. Es werden einige Beispiele zur CO₂-Hysteresesteuerung sowie einfache und komplexe Steuerstrategien für Gebäude genannt.

Die Umsetzung einer Steuerung für den Neubau eines natürlich quergelüfteten Hochhauses und der Einfluss des Nutzers auf die Gebäudeperformance werden in [14] untersucht. Neben Steuerungsgrundsätzen zur Querlüftung (unterschiedliche Bedingungen für Luv und Lee) sind auch allgemeingültige Ansätze zur nächtlichen Auskühlung angegeben. So wird beim Überschreiten der durchschnittlichen Innenlufttemperatur zwischen 11:00 und 16:00 Uhr von 24°C die Nachtlüftung aktiviert. Sie wird um 7:00 Uhr wieder deaktiviert, sofern die Decke nicht vorher eine Temperatur von 19°C unterschreitet.

In [15] wird der Einfluss einer ganzheitlich geplanten Glasfassade mit „intelligenter“ Steuerung untersucht. Es wird ein Steueralgorithmus für ein hybrides Lüftungskonzept dargestellt und übertragbare Ansätze für die nächtliche Auskühlung, CO₂-Steuerung sowie die Steuerung des Sonnenschutzes angegeben. So wird z.B. bei einer durchschnittlichen Außentemperatur über 18°C in der Zeit zwischen 12:00 und 17:00 Uhr die Nachtlüftung aktiviert und kühlt die Innenluft auf maximal 14°C herunter. Die Gegenüberstellung mit einem vergleichbaren Gebäude ohne diese Steuerungsansätze zeigt eine Reduktion des Primärenergiebedarfes um 60%.

Sehr umfangreich wird die Forschung sowohl an der Steuerung der natürlichen als auch der hybriden Lüftung in [16] dargestellt. Es werden Beispiele und Hinweise zu Steuerungsalgorithmen aufgezeigt, diese in Kategorien eingeteilt und Vorteile der unterschiedlichen Umsetzungsvarianten angegeben. Hier wird für die nächtliche Auskühlung durch natürliche Lüftung der Mittelwert der Außenlufttemperatur des Vortages zwischen 14:00 und 18:00 Uhr als Grenzwert festgelegt. Wenn der

Mittelwert einen für jeden Raum eigens definierten Schwellenwert überschreitet, wird die Nachtlüftung ermöglicht. Die Raumluft darf zwischen 21:00 und 8:00 Uhr auf bis zu 16°C abkühlen. Bei der hybriden Lüftung wird eine Wettervorhersage genutzt.

3.4.4 Eigene Ansätze zur Fassadensteuerung

Bereits im Forschungsantrag zu diesem Projekt wurden Ideen zur **Steuerung anhand von definierten Klimafällen** entwickelt. Je nach Außen- und Innenlufttemperatur sowie der zur Verfügung stehenden Solarstrahlung soll ein anderer Steuerfall der natürlichen Lüftung genutzt werden.

Tabelle 12: Definition von Klimafällen im Forschungsantrag

Klimafall	Ziele der Fassadensteuerung
(1) Winter und geringe Solarstrahlung	Beschränkung des Luftwechsels auf das hygienische Minimum zur Reduzierung der Wärmeverluste. Erfassung des CO ₂ -Gehaltes der Raumluft. Verwendung eines Wärmetauschers.
(2) Winter und hohe Solarstrahlung	Die durch den Wärmetauscher vorgewärmte Frischluft kann sich im Fassadenzwischenraum durch die solare Einstrahlung weiter erwärmen, bevor sie in den Innenraum geführt wird.
(3) Sommer und hohe Solarstrahlung	Beschränkung des Luftwechsels auf das hygienische Minimum zur Reduzierung ungewollter Wärmegewinne. Die Zuluft erfolgt über den Bypass direkt von außen und sie erfährt keine weitere Erwärmung im Fassadenzwischenraum.
(4) Sommer, Auskühlphase nachts	Maximales Lüften zur Wärmeabfuhr

Bereits in einer frühen Phase der Projektlaufzeit wurde festgestellt, dass mehrere Klimafälle innerhalb eines Tages auftreten können. Insbesondere ist die Entscheidung, ob die Luft im Zwischenraum erwärmt werden soll oder nicht, von hoher Bedeutung für das Innenraumklima. So kann im zuvor definierten Klimafall 2 (siehe Tabelle 12) auch bei sehr geringen Außenlufttemperaturen und hoher solarer Strahlung schnell eine Übererwärmung des Innenraums resultieren (siehe Abbildung 21). Somit ist eine einfache Steuerung ausschließlich anhand des Außenklimas nicht zielführend. Daher werden im Folgenden komplexere Steuerungsalgorithmen entwickelt.

Es wurde im ersten Schritt eine **Basisfassadensteuerung** umgesetzt, die anhand weniger Messgrößen (Raumlufttemperatur, Oberflächentemperatur, Zwischenraumtemperatur, Außenlufttemperatur und Regensensor) die Fenstersteuerung zur Raumregelung nutzt. Einen wesentlichen Punkt bei der Steuerung stellt die nächtliche Auskühlung dar. Die Schwierigkeit liegt in der Abgrenzung zu definierten Klimafällen und schließt die folgenden Fragen ein:

- *Wann soll nächtliche Auskühlung erfolgen?*
- *Wann ist „Winter“ und wann ist „Sommer“?*

Das Definieren fester Temperaturgrenzen zur Beantwortung dieser Fragen führt zu Komforteinbußen und zu jahreszeitlich bedingten Problemen. Ein Ansatz, um diese Probleme möglichst flexibel anzugehen, wurde mit einem Zähler der Übertemperatur umgesetzt. Immer, wenn die gemessene operative Raumlufttemperatur T_{op} den oberen Toleranzbereich des Komfortmodells überschreitet, wird der Zähler eine Zeiteinheit höher gesetzt. Wenn der Zähler der Übertemperatur einen Schwellenwert übersteigt, wird in der folgenden Nacht automatisch die Auskühlung bis auf den unteren zulässigen Toleranzbereich der Raumkomforttemperatur eingeschaltet. Der Schwellenwert ändert sich je nach Jahreszeit und liegt zwischen 1 h und 5 h. Jeden Morgen um 9:00 Uhr wurde der Zähler zurückgesetzt.

$$T_{op} = 0,5 (T_{Luft} + T_{Strahlung}) \quad (3.1)$$

Mit

T_{Luft} Lufttemperatur des betrachteten Raumes

$T_{Strahlung}$ Mittlere Oberflächentemperatur der raumumschließenden Bauteile

Für die Definition des komfortablen Temperaturbereiches wird das adaptive Komfortmodell nach dem nationalen Anhang der DIN EN 15251:2012-12 [17] (siehe Abbildung 18) verwendet.

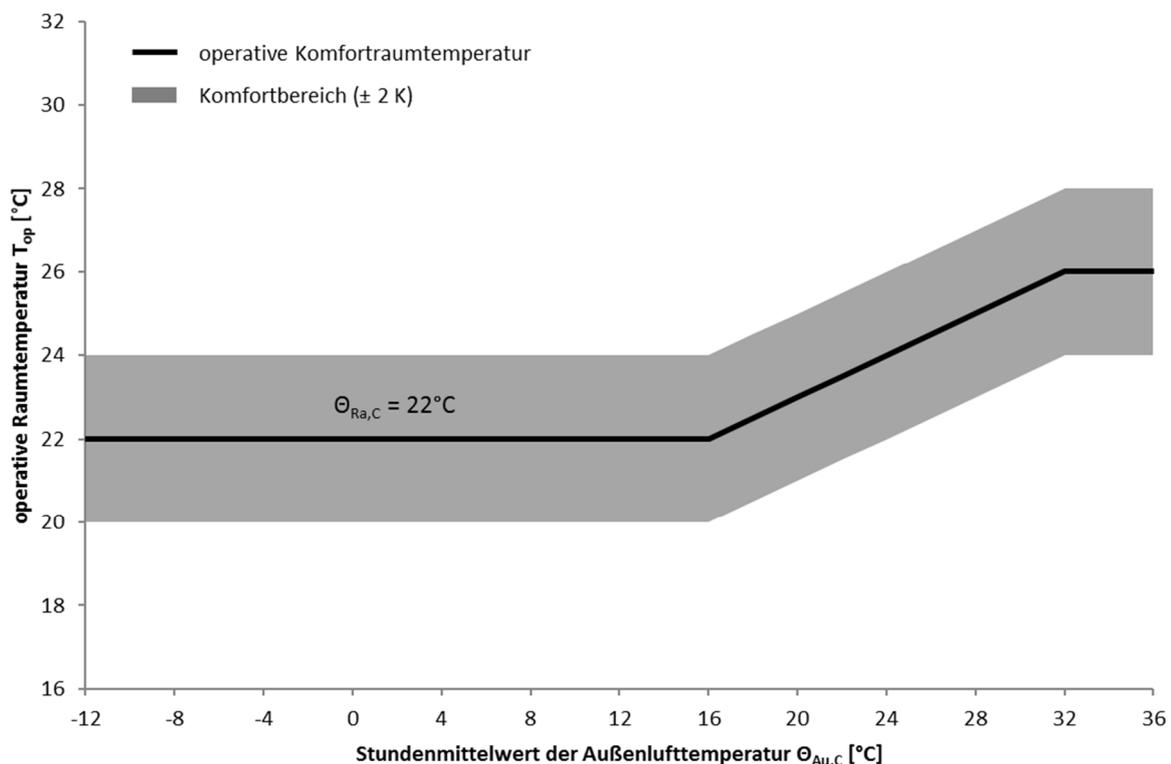


Abbildung 18: Komfortmodell des nationalen Anhangs der DIN EN 15251

Durch die Abhängigkeit der Komfortraumtemperatur von dem Stundenmittelwert der Außenlufttemperatur wird bei Temperaturschwankungen ein schnelles Gegensteuern notwendig. Dies wirkt der Effizienz natürlicher Lüftung aufgrund der Trägheit des Raumes sowie der Leistungsgrenze der

natürlichen Lüftung entgegen. Der Nachteil bei dieser und vielen anderen Methoden zur Aktivierung der nächtlichen Auskühlung ist, dass der Raum erst einmal zu warm werden muss, bevor es zu einer Aktivierung kommt (reagierende Steuerung). Zudem wird die Leistungsfähigkeit der nächtlichen Auskühlung durch untere Grenztemperaturen begrenzt.

Im zweiten Schritt wurde daher eine agierende Steuerung zur optimalen nächtlichen Auskühlung auf Grundlage einer Raumprognose entwickelt. Diese beinhaltet keine statischen Grenzen zum Aktivieren der nächtlichen Auskühlung sowie keine unteren Grenztemperaturen für das Deaktivieren. Die Raumprognose basiert auf der Wettervorhersage sowie einer thermischen Gebäudesimulation mit EnergyPlus (siehe Abbildung 19). Dies ermöglicht den Raum schon für die Zukunft optimal zu steuern solange der Raumkomfort in der Nutzungszeit dies zulässt. Die folgenden Kapitel enthalten eine detaillierte Beschreibung dieser Steuerungsvariante.

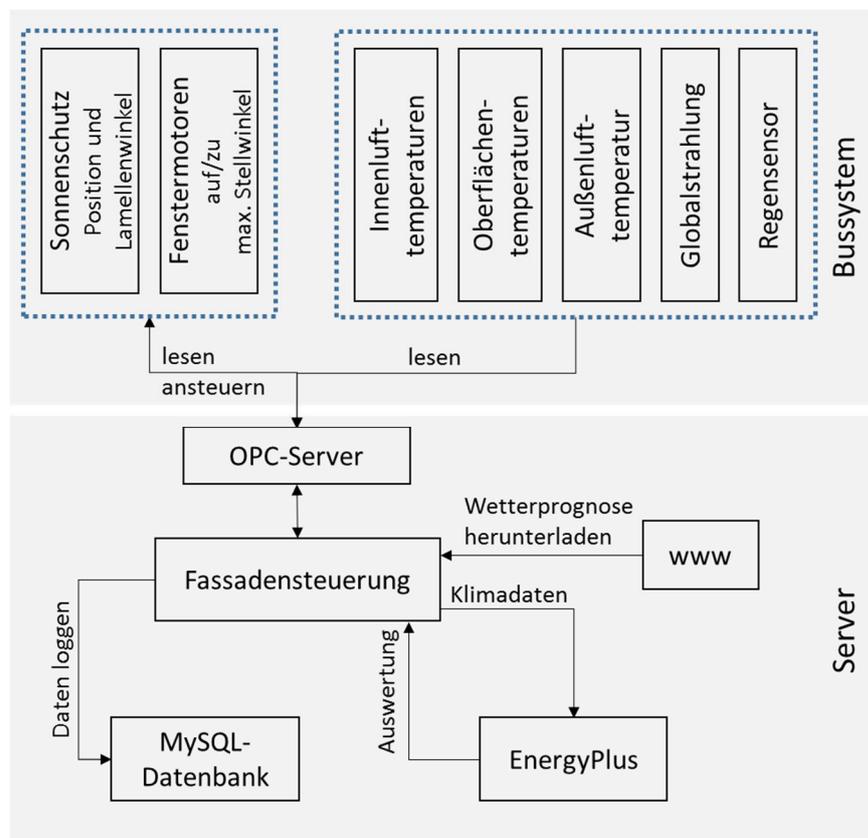


Abbildung 19: Kommunikationsprinzip der Fassadensteuerung

3.4.5 Koppelung mit der thermischen Gebäudesimulation

Die Koppelung zwischen der Fassadensteuerung (MATLAB) und der thermischen Gebäudesimulation (EnergyPlus) erfolgt über die Schnittstelle MLE+ [18]. Hierdurch ist es möglich über MATLAB in jedem Zeitschritt der Simulation einzugreifen und Daten in beide Richtungen auszutauschen. Die Fassadensteuerung übergibt an das EnergyPlus Modell variable Parameter und die aus der Wettervorhersage erstellten klimatischen Randbedingungen als Wetterdatei. EnergyPlus gibt dann für jeden Zeitschritt die z.B. operative Raumtemperatur zurück. Innerhalb der Fassadensteuerung erfolgt eine Komfortauswertung. Hierbei ist zu beachten, dass Eingaben von MATLAB in

EnergyPlus immer für einen Zeitschritt (i) genutzt werden und die Ergebnisse nach der Simulation des Zeitschrittes (i+1) wieder zurückgegeben werden (siehe Abbildung 20). Hierdurch kann es zu einer kleineren Abweichung der Zielwertsteuerung kommen, was einer Hysterese von einem Zeitschritt der Simulation entspricht. Daher sollte der Zeitschritt nicht zu groß gewählt werden, um die Differenzen möglichst klein zu halten.

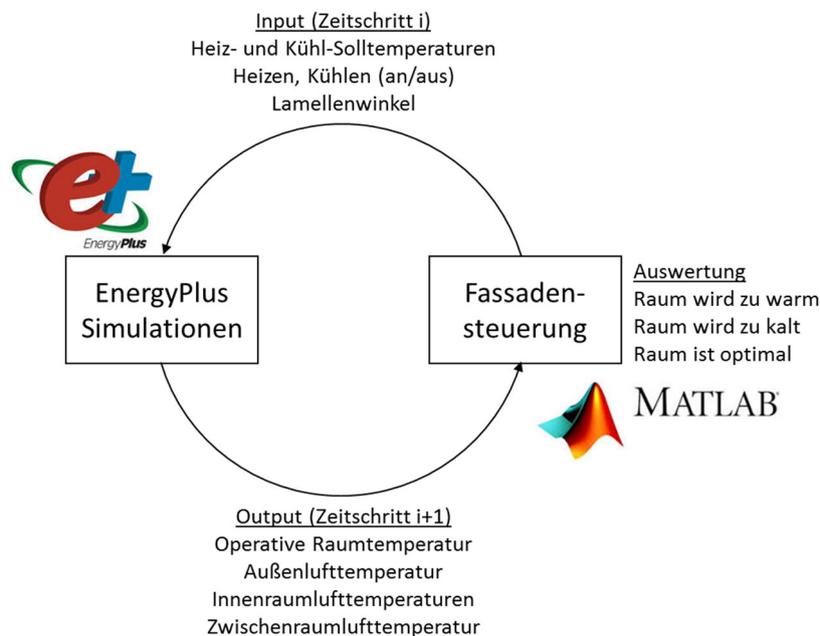


Abbildung 20: Datentransfer zwischen EnergyPlus und Matlab

Um die Raumprognose in der Fassadensteuerung mit EnergyPlus durchführen zu können, muss eine Wetterdatei auf Grundlage der aktuellen Wettervorhersage erstellt werden. Durch die Fassadensteuerung wird automatisch von *openweathermap.org* alle 30 Minuten die aktuelle Klimaprognose heruntergeladen. In dem zur Verfügung stehenden Datensatz ist die Wettervorhersage für die nächsten fünf Tage in 3h-Intervallen gegeben. Zur Erstellung der Wetterdatei werden durch lineare Interpolation Stundenwerte für den atmosphärischen Luftdruck, die Luftfeuchtigkeit, die Außenlufttemperatur, den Taupunkt, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit und die totale Bewölkung berechnet.

Auf Basis dieser Daten wird anschließend eine Wetterdatei erstellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Wetterdatei immer am 01. Januar beginnen muss. Für den Zeitraum zwischen dem 01. Januar und dem Beginn des betrachteten Zeitraums wird die Wetterdatei auf Grundlage von statistischen Wetterdaten erstellt. Die prognostizierten Werte werden immer für fünf Tage geschrieben. Dies ist zum einen die maximale Tagesanzahl aus der Wettervorhersage und stellt zum anderen sicher, dass auch an einem Freitag immer der nächste Nutzungstag (Montag) mit analysiert werden kann. Schließlich soll über die Fassadensteuerung sichergestellt werden, dass das Raumklima für den Nutzer an nächsten Nutzungstag optimal ist. Die Raumtemperaturen außerhalb der Nutzungszeiten (z.B. Wochenende) spielen eine untergeordnete Rolle und dürfen den Komfortbereich über- und

unterschreiten. Nach erfolgreicher Simulation prüft die Fassadensteuerung, ob die operative Raumtemperatur die Komfortraumtemperatur einschließlich des Toleranzbereichs über- oder unterschreitet. Bei Überschreiten wird der Raum als zu warm respektive bei Unterschreiten als zu kalt prognostiziert. Sollte es bei der Simulation zu Fehlern kommen, wird der Raum in Zukunft als optimal angesehen und ausschließlich nach der Ist-Situation gesteuert. Entsprechende Steuerbefehle werden an die Fenstermotoren gesendet. Die Ergebnisse der Simulation basieren auf einem vereinfachten Raummodell, welchem die Annahme zu Grunde liegt, dass alle Lüftungsöffnungen geschlossen sind und bleiben.

3.4.6 Berechnung der zu erwartenden Solarstrahlung

Eine wesentliche Größe für die Bilanzierung in EnergyPlus stellt die Solarstrahlung dar. Da diese in der Wettervorhersage nicht vorhanden ist, wird sie aus dem Sonnenstand und dem Bewölkungsgrad errechnet. Hierfür werden als erstes die Sonnenhöhe und der Azimut bestimmt. Die Berechnung des Sonnenverlaufs geschieht auf der Grundlage von [19].

Die Abschätzung der Solarstrahlung erfolgt über die Gleichungen der VDI 3789 Blatt 2 [20]. Für die Wetterdatei sind folgende Werte zu berechnen:

- Globalstrahlung $G = D + B$
- Horizontale Diffusstrahlung D
- Horizontale Direktstrahlung B
- Extraterrestrische Strahlung I_0 .

Als erstes wird die extraterrestrische Strahlung I_0 sowie die direkte Sonnenstrahlung I auf eine zur Einfallrichtung normale Ebene berechnet. Die extraterrestrische Strahlung berechnet sich wie folgt:

$$I_0 = \bar{I}_0 \cdot (\bar{r}/r)^2 \quad (3.2)$$

Mit

- \bar{I}_0 Solarkonstante 1367 W/m²
- $(\bar{r}/r)^2$ Abstandskorrektur $1 + 0,003344 \cos(x)$
- x $0,9856 J - 2,72$
- J Tag des Jahres (1. Januar = 1 usw.)

Anschließend kann hieraus die direkte Sonnenstrahlung I bestimmt werden. Hierbei werden die Fälle, dass der Sonnenhöhenwinkel γ kleiner gleich 10° und größer 10° ist, unterschieden.

$$\gamma \leq 10^\circ \quad I = I_0 \cdot \exp(-T_L \cdot \delta_{R0} \cdot m \cdot p/p_0) \quad (3.3)$$

$$\gamma > 10^\circ \quad I = I_0 \cdot \exp \left[\frac{-T_L \cdot (p/p_0)}{0,9 + 9,4 \sin \gamma} \right] \quad (3.4)$$

Mit

T_L Linke-Trübungsfaktor nach VDI 3789 Blatt 2, Anhang A.

δ_{R0} Vertikale optische Dicke der reinen und trockenen Normatmosphäre einschließlich Ozonabsorbierung nach VDI 3789 Blatt 2, Anhang B.

m relative optische Luftmasse nach VDI 3789 Blatt 2, Anhang B.

(p/p_0) Druckkorrektur zur Reduktion der optischen Dicke der Normatmosphäre mit dem Luftdruck $p_0 = 1013,25$ hPa auf Meeresniveau auf den aktuellen Luftdruck p in der Höhe z gegeben durch die Gleichung $(p/p_0) = \exp(-z/8434,5)$

Die von der Bewölkung N abhängige Strahlung wird wie folgt abgemindert:

$$I(N) = (1 - N/8) \cdot I \quad (3.5)$$

Mit

N Gesamtbedeckungsgrad in Achteln

Bei der Berechnung der Globalstrahlung G wird in der VDI zwischen wolkenlosem Himmel und bewölktem Himmel unterschieden. Die Gleichungen können jedoch wie folgt zusammengefasst werden:

$$G(N) = 0,84 \cdot I_0 \cdot \sin \gamma \cdot \exp \left[-0,027 \cdot \frac{(p/p_0) \cdot T_L}{\sin \gamma} \right] \cdot [1 - a(N/8)^b] \quad (3.6)$$

Mit

a, b empirische Konstanten, für Deutschland gilt $a = 0,72$ und $b = 3,20$

Anschließend können die diffuse Sonnenstrahlung D sowie die direkte Strahlung B auf horizontale Flächen umgerechnet werden und ergeben sich zu:

$$D(N) = G(N) - I(N) \cdot \sin \gamma \quad (3.7)$$

$$B(N) = I(N) \cdot \sin \gamma \quad (3.8)$$

3.4.7 Begrenzung des CO₂-Gehaltes der Raumluft

Die CO₂-Steuerung stellt aufgrund der Hysterese und der Anforderungen aus der Arbeitsstättenrichtlinie ASR A3.6 [21] eine Besonderheit dar und ist allen thermischen Steuerbefehlen übergeordnet. Sobald im Raum der dort definierte Grenzwert von 1000 ppm überschritten wird, muss mindestens eine Fenstergruppe öffnen, um den Raum mit Frischluft zu versorgen ($HCO2_2=true$).

Je nach Temperaturverteilung und Steuerfall öffnet eine energetisch sinnvolle Fenstergruppe. Beispielsweise öffnen im Winter bei sehr kalten Außenlufttemperaturen im Regelfall zuerst die inneren Kippfenster, um eine Lüftung mit möglichst geringer Temperaturdifferenz zu wahren. Sollte innerhalb von zehn Minuten die CO₂-Konzentration nicht unter den selbst gesetzten Grenzwert von 800 ppm sinken, erfolgt eine „Notlüftung“ ($HCO2_1=true$). Der untere Grenzwert der Hysterese wurde im Laufe des Projektes variiert, um einen sinnvollen Wert zu finden. Da die Geschwindigkeit, mit der die CO₂-Raumlufkonzentration abfällt, von der Differenz zur natürlichen CO₂-Außenluftkonzentration (ca. 400 ppm) abhängt, sind zwei gegenläufige Effekte zu beachten. Wenn ein sehr geringer unterer Grenzwert der CO₂-Raumlufkonzentration angestrebt wird, ist ein sehr langer Luftaustausch mit entsprechenden Lüftungswärmeverlusten bzw. -gewinnen verbunden. Ein minimaler Lüftungswärmeverlust/-gewinn wäre entsprechend bei einem sehr hohen unteren Grenzwert der CO₂-Raumlufkonzentration möglich, hätte aber viele Steuerungen der Fensteröffnungen zur Folge. Für die Testfassade erwies sich ein unterer Grenzwert von 800 ppm als sinnvoll, da sowohl im Sommer als auch im Winter die Anzahl und die Dauer der Fensteröffnungen begrenzt bleiben. Im Fall der Notlüftung werden alle Fenster, egal ob es energetisch sinnvoll ist oder nicht, geöffnet. Sobald die CO₂-Konzentration unter 800 ppm sinkt, ist keine CO₂-bedingte Lüftung mehr erforderlich ($HCO2_1=false$; $HCO2_2=false$).

Der Zeitschritt für das Durchlaufen der Steuerbefehle beträgt zwei Minuten. Hiermit wird ein Überschreiten der Grenzwerte minimal gehalten bei gleichzeitiger Begrenzung der Anzahl an Steuerbefehle.

3.4.8 Thermische Raumregelung

Die Grundlage für die Komfortauswertung und -prognose ist die Komfortraumtemperatur nach der DIN EN 15251. Während der Nutzungszeit wird nach einem sehr schmalen Korridor gesteuert und die nach Norm zulässige Über- bzw. Unterschreitung von 2 K wird auf lediglich 0,5 K begrenzt. Dadurch wird angestrebt, dass auch trotz der thermischen Trägheit des Raumes die zeitlich verzögerten Effekte der natürlichen Lüftung dazu führen, dass der Verlauf der Raumtemperatur innerhalb des genormten Komfortkorridors liegt. Ist aktuell der Raumkomfort gegeben und keine Anpassung der Lüftungssituation erforderlich, erfolgt zusätzlich eine Auswertung anhand der Raumprognose. Für die Betrachtung des Raumes in der Zukunft erfolgt die Auswertung anhand des normierten Korridors (± 2 K). Ein Beispiel zu diesem Steuerfall ist anhand von Abbildung 21 erläutert.

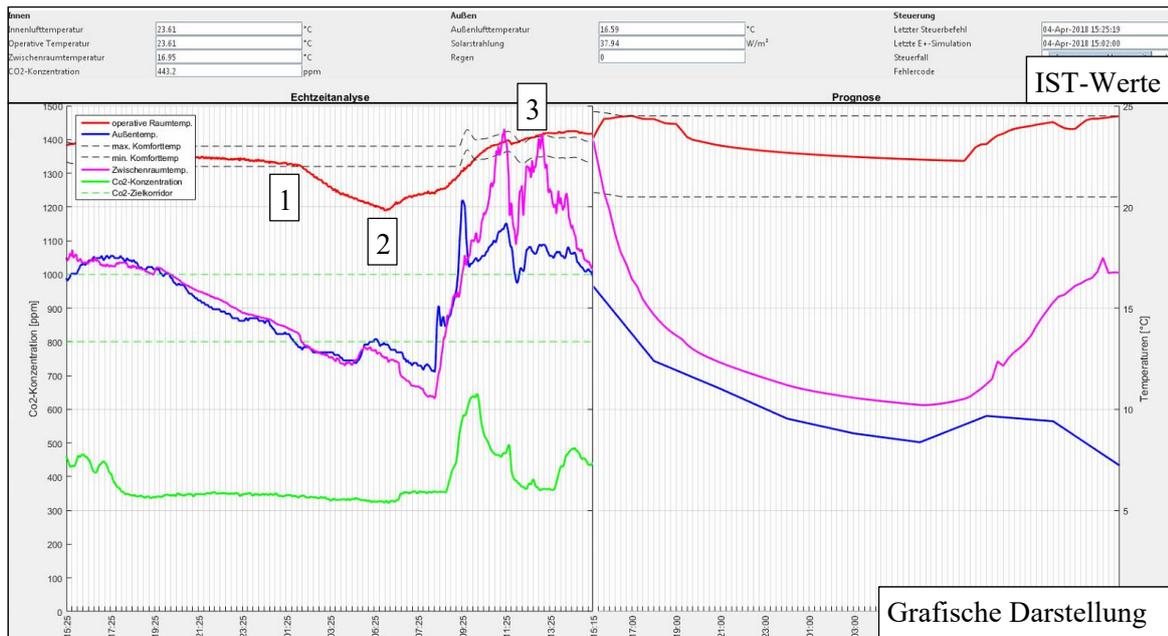


Abbildung 21: Oberfläche Fassadensteuerung

In der Abbildung 21 wird exemplarisch für den 04.04.2018 die Programmoberfläche dargestellt. Trotz der geringen Außentemperaturen (blaue Linie) erfolgt um ca. 2:00 Uhr eine Nachtauskühlung (Punkt 1), da der Raum mit der zu diesem Zeitpunkt heruntergeladenen Wettervorhersage am darauffolgenden Tag die Komforttemperatur zuzüglich des zulässigen Toleranzbereichs von 2 K überschreiten würde. Der Raum wird daher solange gekühlt, bis entweder innerhalb der Nutzungszeit der kleinere zulässige Zielbereich (Komforttemperatur - 0,5K) unterschritten wird, oder der Raum entsprechend einer weiteren Prognose in Zukunft zu kalt (Komforttemperatur -2 K) wird. Diese Prognose wurde um ca. 6:00 Uhr morgens mit der aktualisierten Wetterprognose gestellt (Punkt 2) und der Raum begann sich wieder langsam über die gespeicherte Energie in den Bauteilen zu erwärmen, so dass bereits gegen Mittag der Zielbereich (Komforttemperatur \pm 0,5K) überschritten wurde (Punkt 3). Mit dieser Art der Fassadensteuerung und der damit verbundenen nächtlichen Auskühlung wurde sichergestellt, dass die operative Raumtemperatur während der gesamten Nutzungszeit im Toleranzbereich der DIN EN 15251 blieb.

Die Oberfläche der Fassadensteuerung lässt sich in drei Bereiche unterteilen.

Tabelle 13: Gliederung der Fassadensteuerung

Menüband: (nicht dargestellt)	Hier werden die Einstellungen (z.B. Grenzbestrahlungsstärke für die Sonnenschutzsteuerung, gewünschte maximale Temperaturabweichung von der Komfortraumtemperatur, etc.) vorgenommen und auf Wunsch in die Konfigurationsdatei geschrieben.
Ist-Werte:	In diesem Bereich werden die Messwerte und Steuergrößen dargestellt. Diese sind: Innenlufttemperatur, Außenlufttemperatur, operative Temperatur, Solarstrahlung, Zwischenraumtemperatur, Regen, CO ₂ -Konzentration.
Grafische Darstellung:	<p>Im linken Bereich werden die gemessenen Werte der letzten 24 h dargestellt. Hier gibt es eine Vertikalachse für die Temperaturen (operative Temperatur, Außenlufttemperatur und Zwischenraumtemperatur) und eine zweite Vertikalachse für die CO₂-Konzentration.</p> <p>Im rechten Bereich wird das prognostizierte thermische Verhalten des Raumes dargestellt.</p>

Nachfolgend werden die entwickelten Steueralgorithmen zur Begrenzung des CO₂-Gehaltes und zur thermischen Raumregelung dargestellt.

Fall	Bedingung A	Bedingung B	Bedingung C	Bedingung D	Bedingung E	Bedingung F	Bedingung G	Bedingung H	Bedingung I	Bedingung J	Bedingung K	Bypass innen	Fenster innen	Bypass außen	Fenster außen oben	Fenster außen unten	Bemerkung
	HCO2_1=True	Raum wird zu warm	HCO2_2=true	Traum<=Tmin,Komfort && Nutzung=true	Traum>Tcavity	Traum>Tausen	Traum-Tausen > Traum-Cavity	Traum-Tcavity>0	Raum wird kalt	Traum>=Tmax,Komfort && Nutzung=true	Traum-Tausen <= Traum-Cavity						
1	ja	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	100	100	100	100	100	Notlüftung CO2
2	nein	ja	nein	ja	ja	nein	egal	egal	egal	egal	egal	0	0	100	100	100	Raum wird zu warm ist aber jetzt zu kalt
3	nein	ja	nein	ja	ja	nein	egal	egal	egal	egal	egal	100	0	100	100	100	Raum wird zu warm ist aber jetzt zu kalt
4	nein	ja	nein	ja	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	0	100	100	100	100	Raum wird zu warm ist aber jetzt zu kalt
5	nein	ja	nein	ja	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	100	100	100	100	100	Raum wird zu warm ist aber jetzt zu kalt
6	nein	ja	nein	nein	ja	ja	egal	egal	egal	egal	egal	100	100	100	100	100	Raum wird zu kalt und kann weiter gekühlt werden
7	nein	ja	nein	nein	ja	nein	egal	egal	egal	egal	egal	0	100	100	100	100	Raum wird zu kalt und kann weiter gekühlt werden
8	nein	ja	nein	nein	ja	ja	egal	egal	egal	egal	egal	100	0	100	100	100	Raum wird zu kalt und kann weiter gekühlt werden
9	nein	ja	nein	nein	nein	nein	egal	egal	egal	egal	egal	0	0	100	100	100	Raum wird zu kalt und kann weiter gekühlt werden
10	nein	ja	ja	egal	egal	egal	ja	ja	egal	egal	egal	100	100	100	100	100	Raum wird zu warm und CO2-Lüftung
11	nein	ja	ja	egal	egal	egal	ja	nein	egal	egal	egal	100	0	100	100	100	Raum wird zu warm und CO2-Lüftung
12	nein	ja	ja	egal	egal	egal	nein	egal	egal	egal	egal	0	100	100	100	0	Raum wird zu warm und CO2-Lüftung
13	nein	nein	nein	egal	ja	ja	egal	egal	ja	ja	egal	100	100	100	0	0	Raum wird zu kalt, ist jetzt aber zu warm
14	nein	nein	nein	egal	ja	nein	egal	egal	ja	ja	egal	0	100	0	0	0	Raum wird zu kalt, ist jetzt aber zu warm
15	nein	nein	nein	egal	nein	ja	egal	egal	ja	ja	egal	100	0	100	0	0	Raum wird zu kalt, ist jetzt aber zu warm
16	nein	nein	nein	egal	nein	nein	egal	egal	ja	ja	egal	0	0	0	0	0	Raum wird zu kalt, ist jetzt aber zu warm
17	nein	nein	nein	egal	ja	ja	egal	egal	ja	nein	egal	0	0	0	0	0	Raum wird zu kalt und kann jetzt noch weiter gekühlt werden
18	nein	nein	nein	egal	ja	nein	egal	egal	ja	nein	egal	100	0	100	0	0	Raum wird zu kalt und kann jetzt noch weiter gekühlt werden
19	nein	nein	nein	egal	nein	ja	egal	egal	ja	nein	egal	0	100	0	0	0	Raum wird zu kalt und kann jetzt noch weiter gekühlt werden
20	nein	nein	nein	egal	nein	nein	egal	egal	ja	nein	egal	100	100	100	0	0	Raum wird zu kalt und kann jetzt noch weiter gekühlt werden
21	nein	nein	nein	egal	nein	nein	egal	egal	ja	nein	egal	100	100	100	0	100	Raum wird zu kalt und CO2-Lüftung
22	nein	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	ja	egal	ja	100	0	100	0	0	Raum wird zu kalt und CO2-Lüftung
23	nein	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	ja	egal	nein	0	100	0	0	100	Raum wird zu kalt und CO2-Lüftung
24	nein	optimal	nein	egal	ja	ja	egal	egal	nein	ja	egal	100	100	100	100	100	Raum ist in Zukunft optimal, jetzt aber zu warm
25	nein	optimal	nein	egal	ja	nein	egal	egal	nein	ja	egal	0	100	100	100	100	Raum ist in Zukunft optimal, jetzt aber zu warm
26	nein	optimal	nein	egal	nein	ja	egal	egal	nein	ja	egal	100	0	100	100	100	Raum ist in Zukunft optimal, jetzt aber zu warm
27	nein	optimal	nein	egal	nein	nein	egal	egal	nein	ja	egal	0	0	100	100	100	Raum ist in Zukunft optimal, jetzt aber zu warm
28	nein	optimal	ja	egal	egal	egal	ja	ja	nein	ja	egal	100	100	100	100	100	Raum ist in Zukunft optimal und CO2-Lüftung
29	nein	optimal	ja	egal	egal	egal	ja	nein	nein	ja	egal	100	0	100	100	100	Raum ist in Zukunft optimal und CO2-Lüftung
30	nein	optimal	ja	egal	egal	egal	nein	egal	nein	ja	egal	0	100	100	100	100	Raum ist in Zukunft optimal und CO2-Lüftung
31	nein	optimal	nein	ja	ja	ja	egal	egal	nein	nein	egal	0	0	0	0	0	Raum ist in Zukunft optimal und jetzt zu kalt
32	nein	optimal	nein	ja	ja	nein	egal	egal	nein	nein	egal	100	0	100	0	0	Raum ist in Zukunft optimal und jetzt zu kalt
33	nein	optimal	nein	ja	nein	ja	egal	egal	nein	nein	egal	0	100	0	0	0	Raum ist in Zukunft optimal und jetzt zu kalt
34	nein	optimal	nein	ja	nein	nein	egal	egal	nein	nein	egal	100	100	100	0	0	Raum ist in Zukunft optimal und jetzt zu kalt
35	nein	optimal	ja	egal	egal	egal	egal	egal	nein	nein	egal	100	100	100	0	100	Raum ist in Zukunft optimal und jetzt zu kalt
36	nein	optimal	ja	ja	egal	egal	egal	egal	nein	nein	ja	100	0	100	0	0	Raum ist in Zukunft optimal und CO2-Lüftung
37	nein	optimal	ja	ja	egal	egal	egal	egal	nein	nein	ja	100	0	100	0	0	Raum ist in Zukunft optimal und CO2-Lüftung
38	nein	optimal	nein	nein	egal	egal	egal	egal	nein	nein	egal	Der Raum ist jetzt und in Zukunft optimal	0	100	0	100	Raum ist jetzt und in Zukunft optimal, aber CO2-Lüftung
39	nein	optimal	ja	nein	egal	egal	egal	egal	nein	nein	ja	100	0	100	0	0	Raum ist jetzt und in Zukunft optimal, aber CO2-Lüftung
40	nein	optimal	ja	nein	egal	egal	egal	egal	nein	nein	nein	0	100	0	0	100	Raum ist jetzt und in Zukunft optimal, aber CO2-Lüftung
41												0	0	0	0	0	Fehler - Alles wird geschlossen

Abbildung 22: Steuerungsmatrix für die Bypass-Doppelfassade

Um die Anzahl der Steuerschritte für den Sonnenschutz, der beim hoch- und runterfahren recht laut ist, zu reduzieren, wird ein Zähler beim ersten Herunterfahren gestartet. Erst wenn der Zähler den Grenzwert von 30 Minuten überschreitet und der Grenzwert der Solarstrahlung ebenfalls unterschritten sind, wird der Sonnenschutz wieder hochgefahren. Die Lamellennachführung erfolgt alle zwei Minuten. Der Nutzer hat die Möglichkeit auch hier in die automatische Steuerung einzugreifen. Dafür findet ein Ist-Soll-Vergleich statt und bei Abweichungen wird ein zweiter Zähler gestartet. Dieser belässt ebenfalls für 30 Minuten die Einstellungen wie sie vom Nutzer vorgenommen wurden. Danach übernimmt die Steuerung wieder. Im Folgenden ist die entwickelte Steuermatrix dargestellt:

Fall	Bedingung A	Bedingung B	Bedingung C	Bedingung D	Bedingung E	Bedingung F	Bedingung G	Sonnenschutz	Lamellenwinkel nachstellen	Timer 1	Timer 2
	aktuelle Sonnenschutzposition <> Sollposition	Timer1 = 0	Timer1 < Grenz1	Globalstrahlung > Grenz2 & Azimut > Startwert & Azimut < Endwert	Timer2 = 0	Timer2 < Grenz3	Azimut > Startwert & Azimut < Endwert				
1	nein	egal	egal	Abfrage ob es einen manuellen Eingriff gab				Sollposition=0%	nein	0	0
2	ja	ja	egal					aktuelle Position	nein	1	0
3	ja	nein	ja					aktuelle Position	nein	Timer1+1	0
4	ja	nein	nein					Sollposition=0%	nein	0	0
5	Automatikbetrieb Bestimmung der Sollposition			ja	ja	egal	egal	Sollposition=100%	ja	0	1
6				ja	nein	egal	egal	Sollposition=100%	ja	0	Timer2+1
7				nein	egal	ja	ja	Sollposition=100%	ja	0	Timer2+1
8				nein	egal	ja	nein	Sollposition=0%	nein	0	0
9				nein	egal	nein	egal	Sollposition=0%	nein	0	0
10				Sonst (Absicherung)							Sollposition=0%

Abbildung 25: Steuermatrix des Sonnenschutzes

3.4.10 Messwerte aufzeichnen

Zum Aufzeichnen der Messdaten sind zwei Applikationen entwickelt worden. Die erste Variante läuft seit Beginn der Datenaufzeichnung im Mai 2016. Es werden alle 30 Sekunden die Messwerte der einzelnen Sensoren abgefragt und in 5-Minuten-Mittelwerten in einer Textdatei gespeichert. Zusätzlich stellt die Applikation die gemessenen Werte der letzten 48h in Form einer Tabelle grafisch dar. Diese Anwendung stellt einen nahezu vollständigen Datensatz der Messwerte zur Verfügung. Die Datenauswertungen in Kapitel 5 erfolgen auf Grundlage dieser Daten.

Darüber hinaus ist in der Fassadensteuerung ein Datenlogger integriert. Auch hier werden alle 30 Sekunden die Messwerte abgefragt und zu 2-Minuten-Mittelwerten auf einem MySQL-Server gespeichert. Die Datenbank ist in der Lage auch deutlich größere Datenmengen übersichtlich zu verwalten und ermöglicht ein sicheres Arbeiten mit diesen Daten. Hieraus kann auch für zukünftige Forschungsprojekte eine umfassende Datengrundlage zur Verfügung gestellt werden.

Messdaten bis einschließlich 16.01.2018 sind mit der Basissteuerung erzeugt. Ab diesem Tag erfolgt die Steuerung mit integrierter Raumprognose.

3.4.11 Übertragbarkeit der Steuerung auf andere Gebäude

Die Fassadensteuerung ist so entwickelt, dass sie auf mehrere Räume übertragen werden kann. So können unter dem Menüpunkt „*Konfiguration*“ folgende Punkte angepasst werden:

- Verbindung OPC-Server
Eingabe der IP-Adresse sowie des Servernamens
- Verbindung MySQL-Server
Eingabe der IP-Adresse des Servers, Zugangsdaten (Benutzername und Passwort), sowie Datenbankname.
- Zähler
Hier werden drei Zähler unterschieden. Der Hauptzähler ist der zum Auslesen der Sensoren. Dieser ist im Projekt auf 30 Sekunden eingestellt. Der zweite Zähler dient zur Mittelwertbildung der ausgelesenen Sensoren und verhindert punktuelle Ausreißer. Des Weiteren werden in diesem Zeitintervall die Steuerbefehle an die Aktoren gesendet. Der Zähler muss ein Vielfaches vom ersten Zähler sein. Der dritte Zähler gibt das Intervall zum Herunterladen der Wettervorhersage an. Auch dieser Zähler muss ein Vielfaches vom ersten Zähler sein.
- Sensoren hinzufügen
Unter diesem Untermenü können bis zu 100 Sensoren vom OPC-Server automatisch hinzugefügt werden und mit einer eigenen Beschreibung versehen werden. Alle hier aufgeführten Sensoren werden auf dem MySQL-Server geloggt.
- Aktoren hinzufügen
Es gibt in der Steuerung fünf unterschiedliche Fenstergruppen, die jeweils getrennt voneinander angesteuert werden können:
 - Außenlamellen oben
 - Außenlamellen unten
 - Kippfenster (Innenfenster)
 - Bypass-Außenlamellen
 - Bypass-InnenlamellenZu jeder dieser Gruppen können über ein Auswahlmenü bis zu 20 Aktoren eingefügt werden. Des Weiteren wird hier der Sonnenschutz hinzugefügt. Dies beinhaltet bis zu 10 Sonnenschutz-Aktoren zum hoch- und runterfahren und bis zu 10 Sonnenschutz-Aktoren zum Verstellen des Lamellenwinkels.
- Maximale Fensterposition festlegen
Für die fünf unterschiedlichen Fenstergruppen kann hier der maximale Öffnungswinkel in Prozent angegeben werden. So kann z.B. das Innenfenster auf 80% der maximalen Öffnungsweite begrenzt werden, um z.B. eine Kollision mit dem Blendschutz zu vermeiden.

Außerdem ist es möglich den Außenfenstern die Variable „*Regen*“ als maximale Öffnungsweite zu übergeben. Hier werden dann in Abhängigkeit des Regensensors zwei unterschiedliche Öffnungsweiten zugelassen.

- Einstellungen Sonnenschutz

Hier sind mehrere Eingaben erforderlich. Zum einen muss die geografische Lage des Gebäudes über Längen- und Breitengrad eingegeben werden. Auch die Abmessungen des Lamellenabstandes und der Lamellentiefe können hier definiert werden. Damit die Ansteuerung des Lamellenwinkels nach dem Sonnenstand funktioniert, fehlt der maximale Stellwinkel der Lamellen und in wie vielen Schritten dieser ansteuerbar ist. Des Weiteren kann noch ein Zeitschritt zur Reduktion der Häufigkeit der Steuerbefehle für den Sonnenschutz gesetzt werden. Im Projekt hat sich ein Steuerintervall von 30 Minuten bewährt. Und schlussendlich kann noch definiert werden bei welcher Grenzbestrahlungsstärke der Sonnenschutz herunterfahren soll und bei welchen Winkeln (Azimut) die direkte Sonnenstrahlung den Raum geometrisch erreicht. Außerhalb der Reichweite bleibt dann der Sonnenschutz geöffnet, um eine maximale Tageslichtnutzung zu ermöglichen.

- Einstellungen Wettervorhersage

Für die Wettervorhersage wird der „Stadtcode“ benötigt unter dem die Prognosedaten zu finden sind. Des Weiteren muss hier der Zugangscode von *openweathermap.org* eingegeben werden, damit die Daten heruntergeladen werden können.

- Zuordnung von Sensoren zu den Steuervariablen

Die Fassadensteuerung basiert auf sieben Steuergrößen:

- Operative Raumtemperatur
- Raumlufthtemperatur
- CO₂-Konzentration
- Außenlufttemperatur
- Lufttemperatur des Fassadenzwischenraums
- Regensensor
- Solarstrahlung

In diesem Menü können jedem der sieben Steuergrößen die entsprechenden Sensoren zugeordnet werden. Es können auch mathematische Beziehungen eingegeben werden. Beispielsweise kann die operative Raumtemperatur aus dem Mittelwert eines Raumlufthtemperatursensors und eines Oberflächentemperatursensors gebildet werden. Oder es kann für die CO₂-Steuerung der Mittelwert mehrerer Sensoren berechnet werden und als Steuervariable genutzt werden.

- Einstellungen EnergyPlus

Damit die Simulation in EnergyPlus und die anschließende Auswertung der Überhitzung während der Nutzungszeit funktionieren, müssen folgende Eingangsgrößen definiert werden:

- Name der EnergyPlus-Datei (.idf)

- Schrittweite der Simulation
- Anzahl der zu simulierenden Tage
- Größe des Komfortkorridors

Hier wird angegeben, ab welcher Abweichung von der Komforttemperatur der Raum als „zu warm“ oder „zu kalt“ gilt.

- Beginn und Ende der Nutzungszeit
- Einstellungen Steuerung

Hier werden die festen Grenzwerte für die Steuerung angegeben. Für die Hysterese werden ein oberer Startwert und ein unter Grenzwert angegeben. Zudem wird für die CO₂-Lüftung ein Grenzwert festgelegt, ab dem die Notlüftung erfolgen soll.

Zur Temperatursteuerung des Ist-Zustands wird eine zulässige Abweichung von der Raumkomforttemperatur angegeben. Diese stellt die Hysterese in der Temperatursteuerung dar. Da die gefühlte Temperatur subjektiv ist, gibt es die Möglichkeit den optimalen Zielwert der Temperatur zu erhöhen oder zu verringern.

Alle hier genannten Einstellungsmöglichkeiten können im laufenden Betrieb geändert werden.

4 Schallschutz der Bypass-Doppelfassade

4.1 Stand der Technik

Das wohl meist genutzte Argument für den Einsatz von Doppelfassaden ist der verbesserte Schallschutz gegen Außenlärm im Vergleich zu konventionellen einschaligen Fassaden. Insbesondere an den Hauptverkehrsadern in großen Städten werden viele Neubauten mit Doppelfassaden realisiert. Generell ist die Verbesserung des Schalldämmmaßes vor allem abhängig von dem Schalldämmmaß der inneren Fassade und von der Öffnungsfläche der äußeren Fassade. Je größer der Anteil geöffneter Fläche in der Außenfassade ist, desto geringer wird folglich die Verbesserung des Schallschutzes. In der Kombination mit natürlicher Lüftung reduziert sich daher der Schallschutz deutlich. Eine geschickte Anordnung der Öffnungen in der Primär- und Sekundärfassade ermöglicht die Unterbindung von Direktschall und gewährleistet auch bei geöffneten Fenstern einen verbesserten Schallschutz.

Untersuchungen an Prallscheiben haben gezeigt, dass bei gekippten Innenfenstern eine frequenzabhängige Verbesserung der Schalldämmwirkung von 10 dB bei 1000 Hz erzielt werden kann und bei höheren Frequenzen etwa 5 dB. Es wurde jedoch auch nachgewiesen, dass in den sehr tiefen Frequenzen (je nach Fassadenaufbau bis zu 200 Hz) Resonanzeinbrüche in der Schalldämmwirkung zu beobachten sind, sodass sich der Schallschutz mitunter gegenüber einer einschaligen Fassade verschlechtert [22]

Die Grenze der theoretischen Verbesserung des Schalldämmmaßes einer vollflächig geschlossenen Doppelfassade gegenüber einer Einfachfassade liegt nach [23] bei:

$$\Delta R_{W,GDF,max} = -0,59 R_{W,primär} + 33,7 \quad (4.1)$$

(eigene Auswertung einer graphischen Darstellung)

Die graphische Darstellung, auf welcher diese Beziehung zugrunde liegt, ist in Abbildung 26 dargestellt.

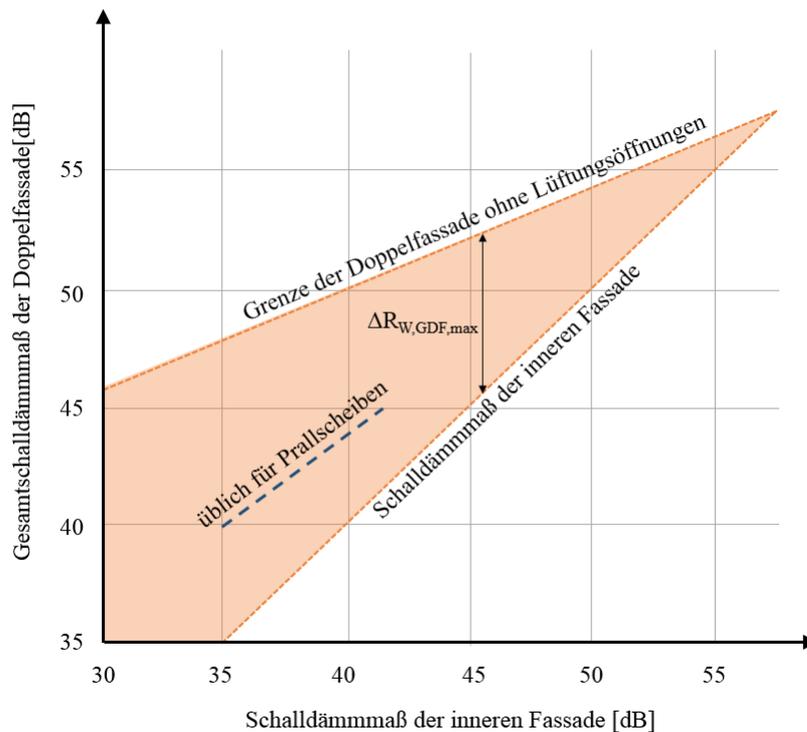


Abbildung 26: Verbesserung des Schallschutzes einer Doppelfassade im Vergleich zu einer einschaligen Fassade nach [23]

Unter Laborbedingungen konnten für eine vollflächig geschlossene Doppelfassade eine Verbesserung des Schallschutzes infolge der zweiten Haut von 5 bis 25 dB gemessen werden [24]. Auch hier weisen die höheren Frequenzbereiche die größeren Verbesserungen auf.

Feldmessungen an gebauten Doppelfassaden wurden im Rahmen des Forschungsprojektes *TwinSkin* [3] durchgeführt. Bei gleichzeitiger natürlicher Lüftung sind Schallpegeldifferenzen an neun Gebäuden mit Doppelfassaden gemessen worden. Die bewerteten Schallpegeldifferenzen bei geöffneten Primär- sowie Sekundärfassaden liegen zwischen 24 dB(A) und 39 dB(A), wobei an drei Vergleichsobjekten mit einschaligen Fassaden mit geöffneten Kippfenstern Schallpegeldifferenzen zwischen 15 dB(A) und 38 dB(A) gemessen wurden. Bei der Doppelfassade, welche die 39 dB(A) erreicht, handelt es sich um eine Vorhangfassade, wo die äußeren Lüftungsöffnungen ausschließlich im oberen und unteren Fassadenbereich angeordnet sind. Bei geschlossenen Fenstern und Lüftungsöffnungen erreichten die Doppelfassaden bis zu 60 dB(A) und die Einfachfassaden bis zu 50 dB(A) Schallpegeldifferenz. Auch bei diesen Untersuchungen wurden im niedrigen Frequenzbereich um 150 Hz Resonanzeinbrüche von bis zu 10 dB(A) festgestellt. Ein weiterer Einbruch lässt sich im Bereich der Koinzidenzgrenzfrequenz bei etwa 2 kHz feststellen.

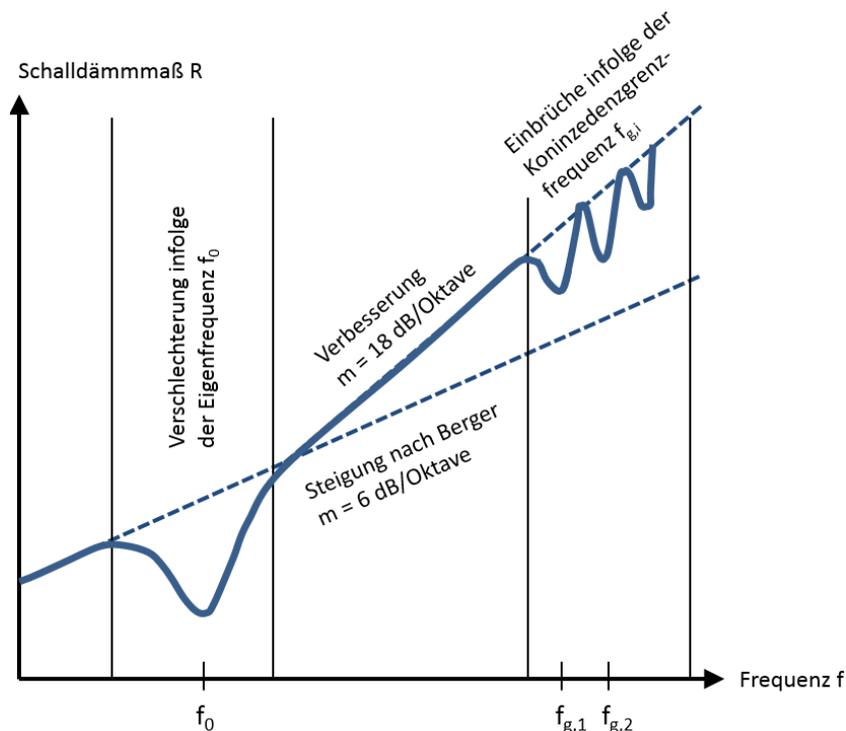


Abbildung 27: Typischer Verlauf des Schalldämmmaßes eines i-schaligen Bauteils

Ein weiterer Aspekt, der häufig im Fokus von akustischen Untersuchungen an Doppelfassaden steht, ist die Schallübertragung von Raum zu Raum über den Fassadenzwischenraum. Diese interne Schallübertragung wurde in diesem Forschungsprojekt nicht betrachtet, da es sich um eine Kastenfassade handelt, welche vor einem einzigen Büroraum installiert ist.

4.2 Entwicklung des Bypass-Kanals

4.2.1 Konzeptfindung

Ein entscheidender Vorteil von Doppelfassaden gegenüber konventionellen einschaligen Fassaden ist der verbesserte Schutz vor Außenlärm. Bei geöffneten Fenstern reduziert sich jedoch das Schalldämmmaß einer (Doppel)fassade erheblich. Da die Bypässe eine Direktverbindung des Innenraumes mit dem Außenklima herstellen, kann es zu einer direkten Schallübertragung von außen nach innen kommen. Die Bypass-Kanäle werden daher mit Schalldämmung ausgekleidet, um bei natürlicher Lüftung dennoch ein hohes Schalldämmmaß zu erreichen.

Jegliche Art von Schalldämmung innerhalb der Bypass-Kanäle beeinflusst den freien Lüftungsquerschnitt und reduziert die Effizienz der natürlichen Lüftung. Daher wird bei der Gestaltung der Kanäle darauf geachtet, dass mit möglichst geringfügigen Eingriffen

- der Einfall von Direktschall in den Büroraum unterbunden wird
- alle schallharten Oberflächen mit Absorbermaterial verkleidet werden.

4.2.2 Modellentwicklung

Um Aussagen über die Effizienz der Schalldämmwirkung treffen zu können, sind im Vorfeld akustische Messungen an einem Bypass-Kanal-Modell im Maßstab 1:1 durchgeführt worden. Dazu wurde der Korpus (B/H/T = 150/50/120 cm) aus Rohspanplatten gefertigt und in den Türrahmen einer Doppelflügeltür (B/H = 1,95/2,12 m) eingespannt. Die verbleibende Türöffnung wurde in Anlehnung an DIN 4109:1989-11 Beiblatt 1 [25] so verschlossen, dass ein deutlich höheres Schalldämmmaß erzielt wird, als für den Bypass-Kanal vorgesehen ist² (siehe Abbildung 28). Dadurch wurde sichergestellt, dass die Schallübertragung hauptsächlich über den Bypass-Kanal stattfand und die Flankenübertragung sowie die direkte Schalltransmission eine untergeordnete Rolle spielte.

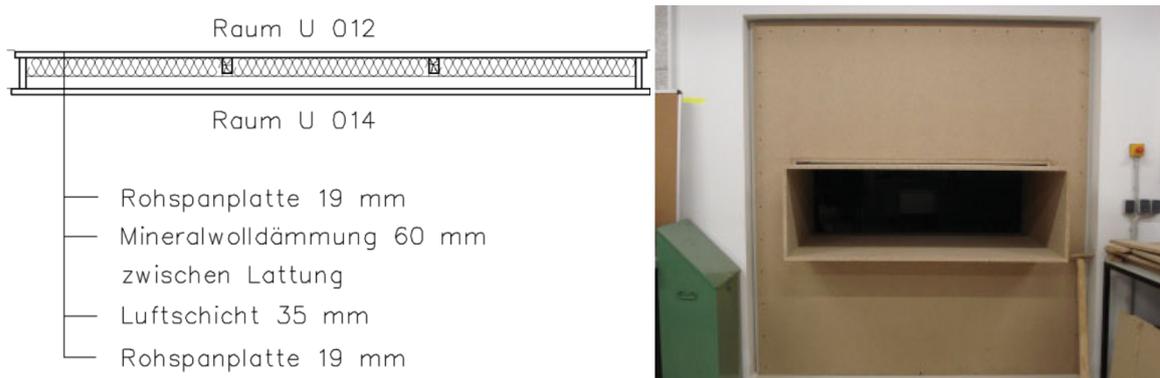


Abbildung 28: links: Querschnitt der Trennwand; rechts: Foto des eingesetzten Kanalkorpus

Die Berechnung des Schalldämmmaßes erfolgte durch die Schallpegeldifferenz und einem Korrekturwert:

$$R_W = \Delta L_r - 10 \log \frac{A_E}{S_0} \quad (4.2)$$

Mit

ΔL_r Schallpegeldifferenz zwischen Sender und Empfänger

A_E Äquivalente Absorptionsfläche in Empfangsraum

S_0 Trennfläche des schallübertragenden Bauteils

Die äquivalente Absorptionsfläche A_E wurde in Abhängigkeit der Nachhallzeit T und des Raumvolumens V bestimmt:

$$A_E = 0,163 \frac{V}{T} \quad (4.3)$$

Für die vollflächig geschlossene Türöffnung, ohne den Einbau des Bypass-Modells, wurden Schalldämmmaße gemäß Tabelle 14 ermittelt.

² Anmerkung: Das Beiblatt 1 zu DIN 4109:1989-11 ist zum Zeitpunkt dieses Forschungsberichts zurückgezogen. Die akustischen Grundlagen, die diesen Konstruktionen zu Grunde liegen, gelten dennoch.

Tabelle 14: Schalldämmmaße für die vollflächig verschlossene Türöffnung ohne Bypass-Kanal

Frequenzband [Hz]					
125	250	500	1000	2000	4000
25,7 dB	24,6 dB	26,8 dB	35,4 dB	37,6 dB	37,7 dB

4.2.3 Modellmessungen

Als Schallquelle wurde ein dodekaederförmiger Lautsprecher eingesetzt (Abbildung 29). Dieser erzeugt ein rosa Rauschen, also ein Breitbandrauschen, dessen Pegel mit steigender Frequenz (3 dB pro Oktave) abnimmt. Somit ist die Schallleistung über alle Oktaven konstant. Durch die gleichmäßige Schallemission in 12 Richtungen kann ein nahezu diffuses Schallfeld erzeugt werden. Die Theorie eines diffusen Schallfeldes besagt, dass der Schallpegel an jedem beliebigen Punkt, der weiter als der Hallradius vom Sender entfernt ist, etwa gleich groß ist und der Schalleinfall aus allen Richtungen erfolgt. Dies ist möglich, da nicht der Direktschall ausschlaggebend ist, sondern die Schallwellen an Wänden und Gegenständen im Raum reflektieren und der Schall somit gleichmäßig verteilt ist. Voraussetzung für diese Annahme ist, dass die Oberflächen der Wände und Gegenstände den Schall hauptsächlich reflektieren und nur wenig Schallenergie absorbieren. Nach Ausschalten der Schallquelle sollte die Schallenergie an jedem Messpunkt im Raum im gleichen Maße abnehmen und die Nachhallzeit dementsprechend gleich lang sein.



Abbildung 29: Dodekaederförmiger Lautsprecher

Alle Messungen wurden jeweils als *Vorwärtsmessung* sowie als *Rückwärtsmessung* durchgeführt, das heißt, dass Sende- und Empfangsraum für die Wiederholungsmessung vertauscht sind. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die baulichen Gegebenheiten eines Raumes die Messwerte nicht maßgeblich beeinflussen. Die Abweichungen beider Messungen betragen für alle Messungen weniger als 2 dB. Im Folgenden werden die Mittelwerte dargestellt.

Als Absorbermaterial wurde ein Produkt ausgewählt, welches 50 mm stark ist und folgende Absorptionseigenschaften (Herstellerangaben) aufweist:

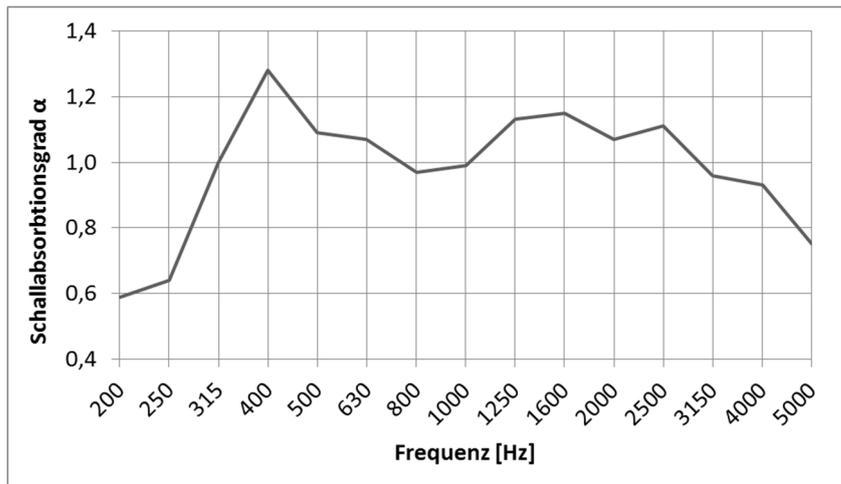


Abbildung 30: Schallabsorptionsgrad des Absorbermaterials gemäß Herstellerangaben

Die folgenden Messungen wurden durchgeführt:

- 1) Referenzmessung der verschlossenen Türöffnung ohne Kanaleinbau (siehe Tabelle 14)
- 2) Einbau des Kanalkorpus, hölzerne Oberflächen, ohne Absorbermaterial
- 3) Verkleidung der Oberflächen mit Absorbermaterial, keine Unterbindung des Direktschalls (Abbildung 31)
- 4) – 6) Unterschiedliche Einbauvarianten mit Unterbindung des Direktschalls, mit dem Fokus auf maximalem Schallschutz bzw. maximalem freien Lüftungsquerschnitt (Abbildung 32 bis Abbildung 34)



Abbildung 31: links: Ausgekleideter Bypass-Kanal; rechts: Oberfläche des Absorbermaterials

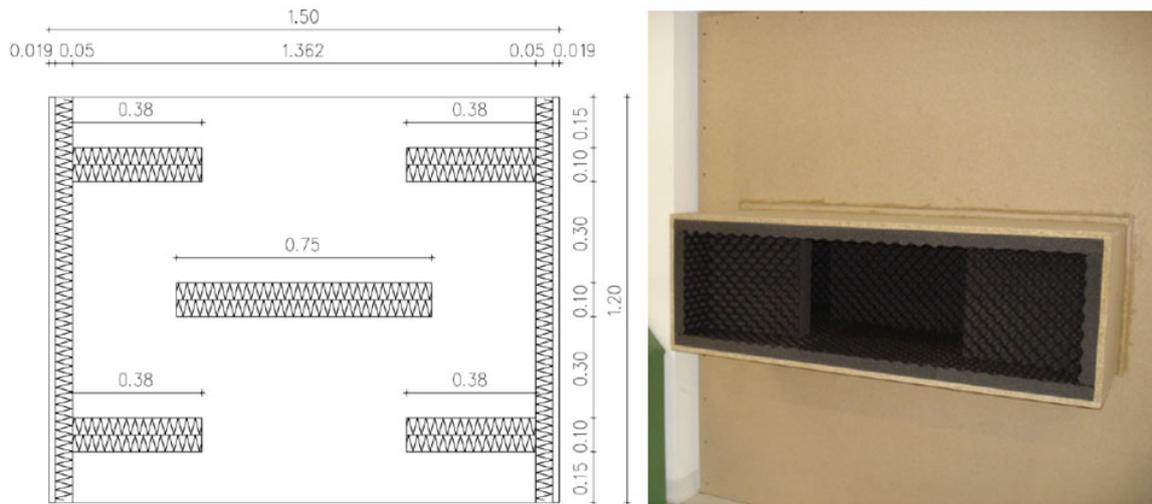


Abbildung 32: Messung 4) Minimaler Einbau zur Maximierung der natürlichen Lüftung (Draufsicht und Foto)

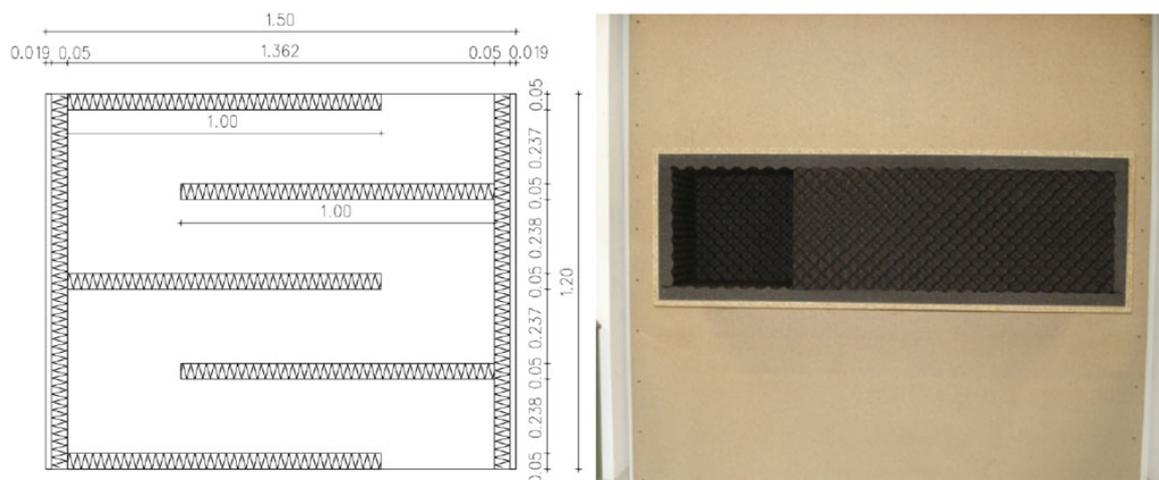


Abbildung 33: Messung 5) Maximierung der Hindernisse zur Erhöhung des Schallschutzes (Draufsicht und Foto)

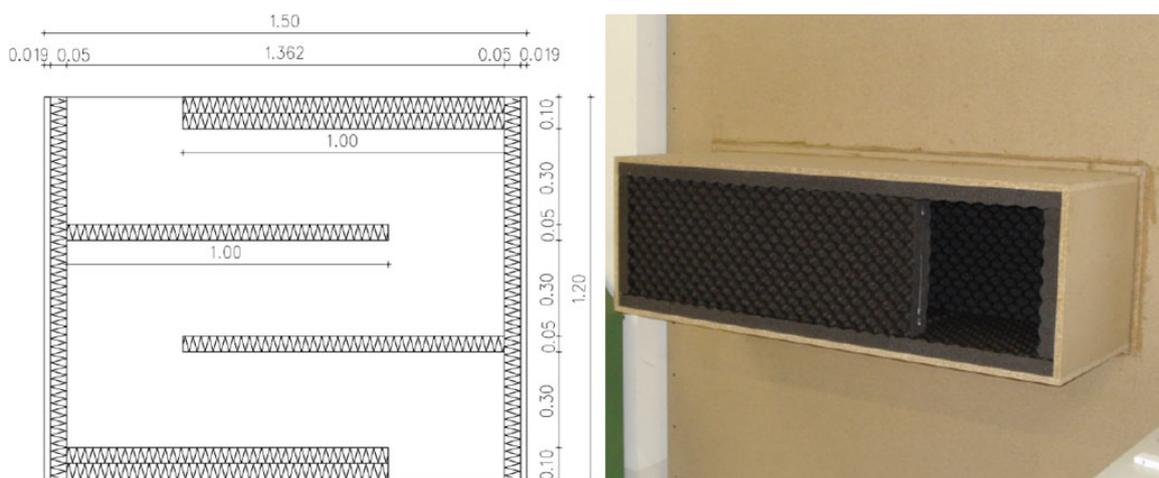


Abbildung 34: Messung 6) Mittelmäßig viele Einbauten zur Erzielung eines hohen Schallschutzes bei gleichzeitiger natürlicher Lüftung (Draufsicht und Foto)

Die Ergebnisse der akustischen Messungen sind in Tabelle 15 dargestellt. Der leere Korpus sorgt für eine leichte Verschlechterung der Schalldämmung ab einer Frequenz von 250 Hz. Die bloße Verkleidung der Oberflächen reduziert die Übertragung von reflektierenden Schallwellen erheblich. Direktschall kann den Empfänger in diesem Versuchsaufbau noch erreichen.

Auffällig ist, dass sich die Schalldämmmaße der unterschiedlichen Einbauten (Zeile 4-6) nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Es ist zu erkennen, dass die Reduzierung des Schalldruckpegels maßgeblich von dem verwendeten Absorbermaterial abhängt und weniger von der Geometrie der Einbauten.

Aus diesem Grund wird die Einbauvariante „maximale Lüftung“ für die Realisierung der Bypass-Doppelfassade verwendet.

Tabelle 15: Schalldämmmaße der Bypass-Konstruktionen in dB(A)

Messung	Frequenzband [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
1) Verschlussene Öffnung	25,7	24,6	26,8	35,4	37,6	37,7
2) Kanalkorpus	6,0	-1,2	-0,6	-1,7	-1,8	-1,6
3) Verkleidete Oberflächen	8,2	2,6	9,9	11,0	9,7	7,8
4) Einbau "maximale Lüftung"	11,7	9,0	15,8	23,8	24,4	23,8
5) Einbau "maximaler Schallschutz"	13,5	11,7	17,9	25,2	24,5	24,5
6) Einbau "Mittelwert"	12,0	12,8	17,3	25,3	24,7	24,8

4.3 Auswertung der Langzeitmessungen

Die Datenaufzeichnung der Akustiksensoren erfolgt seit September 2016 nahezu lückenlos. Einige technisch bedingte kurze Unterbrechungen sind unvermeidlich. Mit zwei busfähigen Akustiksensoren wird der A-bewertete Schalldruckpegel direkt vor und hinter dem Bypass aufgezeichnet. Ziel der Aufzeichnungen ist die Erfassung der schalldämmenden Wirkung durch den Bypass-Kanal bei gleichzeitiger natürlicher Lüftung. Daher werden nur jene Messdaten ausgewertet, die

- bei geöffneten Bypassen aufgezeichnet werden und
- bei denen keine Personen im Raum anwesend sind. Störeinflüsse durch die Nutzung von Geräten, Unterhaltungen etc. können dadurch ausgeschlossen werden.

Die Auswertung der Pegeldifferenzen zeigt, dass der Schalldruckpegel innerhalb des Raumes nahezu immer zwischen 5 und 15 dB(A) unterhalb des äußeren Schalldruckpegels liegt. Nachhallzeitmessungen in dem Büroraum haben einen mittleren Wert von $T = 0,61$ s ergeben. Die Korrektur der Pegeldifferenz nach Gleichung 4.2 ergibt demnach einen Wert von -2,4 dB, wodurch das

Schalldämmmaß der Fassade mit geöffneten Bypassen etwas niedriger ausfällt als die Pegeldifferenz. Dieses Maß der Schalldämmung deckt sich mit den Beobachtungen nach [22]. Schwankungen in den Messwerten haben verschiedene Ursachen:

- Der Frequenzbereich und die Schallintensität des Außenlärms sind nicht konstant. Vor allem im Hafengebiet kann es kurzzeitig zu sehr lauten und niederfrequenten Einflüssen durch den Schiffsbetrieb kommen. Die Auswertung einer zusätzlichen kurzzeitigen Messung über 48 Stunden der Frequenzbänder bestätigt, dass der Außenlärmpegel durch die tiefen Frequenzbereiche dominiert wird. Abbildung 35 zeigt die Mittelwerte der Schallpegel je Frequenz für innen und außen sowie die dazugehörigen energieäquivalenten Dauerschallpegel *LEQ*.
- Der Außenlärmpegel ist mit einem energieäquivalenten Dauerschallpegel von 48 dB relativ gering. Für die Modellmessungen im Vorfeld wurde eine deutlich lautere Schallquelle verwendet. Daher können sonst übliche Schalldämmmaße von über 20 dB messtechnisch nicht erfasst werden, da aufgrund des Serverbetriebs auch in Zeiten der Abwesenheit von Personen stets ein leises Hintergrundrauschen im Raum vorhanden ist.

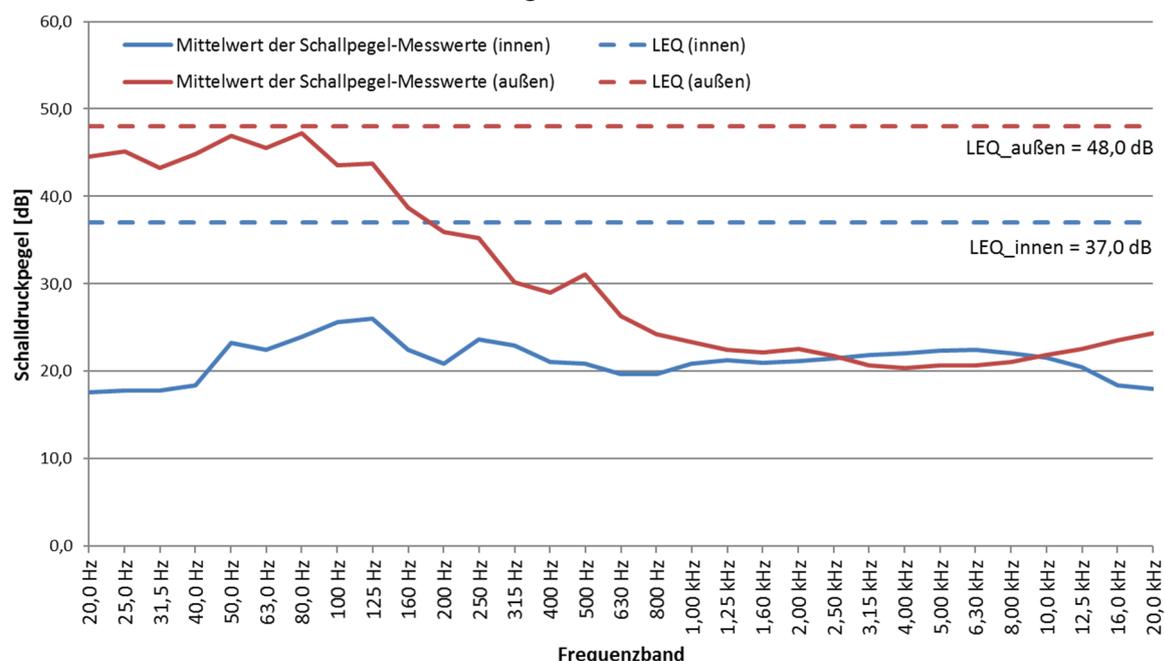


Abbildung 35: Auflösung der Schallpegelmittelwerte nach ihren Frequenzbändern

Auch die Lage des Universitätsgebäudes am Rande des Stadtentwicklungsgebiets *HafenCity* sorgt für zeitweise Schallquellen aus benachbarten Baustellen, was die Frequenzverteilung zusätzlich beeinflusst. Die verwendete Messtechnik erlaubt es nicht, eine frequenzabhängige Analyse der in den Langzeitmessungen ermittelten Schallpegeldifferenzen durchzuführen. Subjektiv ist festzuhalten, dass alle Raumnutzer einen deutlich reduzierten Lärmpegel bei natürlicher Lüftung über die Bypass-Kanäle festgestellt haben im Vergleich zur Lüftung über den Fassadenzwischenraum. Abbildung 36 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Schallpegeldifferenzen zwischen dem Innenraum und

außen für die Zeiträume mit natürlicher Lüftung über die Bypass-Kanäle und ohne anwesende Personen. Diese Darstellung umfasst knapp 57.000 aufgezeichnete Datensätze. 78% aller Messwerte weisen eine Schallpegeldifferenz zwischen 8 dB(A) und 12 dB(A) auf.

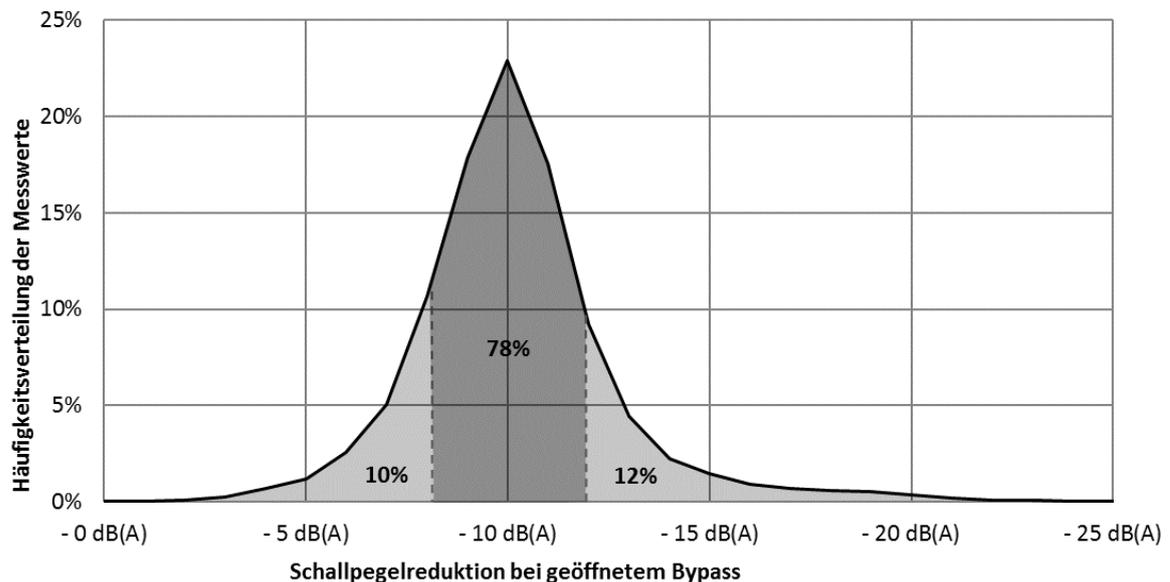


Abbildung 36: Häufigkeitsverteilung der Pegeldifferenzen für alle Zeiträume mit geöffneten Bypassen ohne Personenbelegung

In Abbildung 37 ist exemplarisch ein Zeitraum von 72 Stunden über den Jahreswechsel 2016/2017 dargestellt, an welchem der Verlauf der Schalldruckpegel innen und außen sowie die Pegeldifferenz abgelesen werden kann. Es ist gut zu erkennen, dass die Pegeldifferenz zwischen 10 und 20 dB(A) schwankt während der Außenlärmpegel deutlich größere Schwankungen zwischen 45 und 60 dB(A) aufweist und in der Silvesternacht sogar die 75 dB(A) kurzzeitig überschreitet.

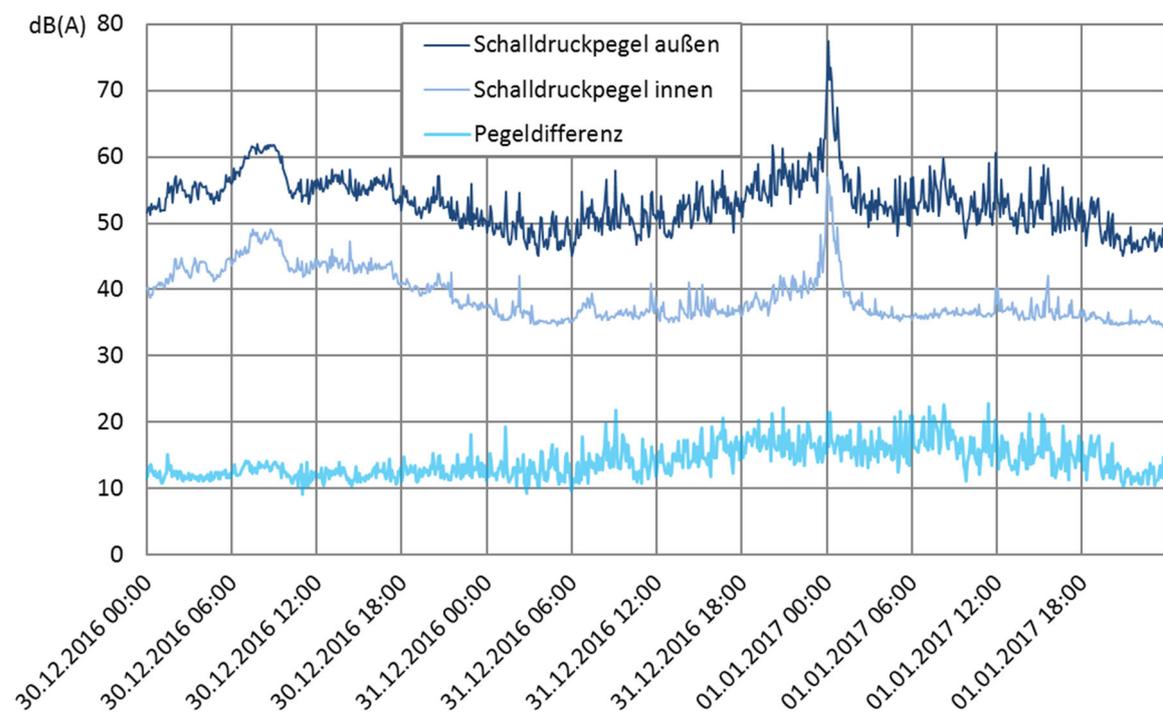


Abbildung 37: Visualisierung der Schalldruckpegel außen/innen sowie der Pegeldifferenz

4.4 Schlussfolgerungen

Doppelfassaden weisen meist ein deutlich höheres Schalldämmmaß als konventionelle einschalige Fassaden auf. Bei natürlicher Lüftung reduziert sich das Schalldämmmaß einer (Doppel)fassade erheblich. Die Luftführung durch einen mit Schallabsorbern ausgekleideten Bypass-Kanal ist eine Option, um bei natürlicher Lüftung ein höheres Schalldämmmaß aufrecht zu erhalten.

Die Labormessungen an einem Kanalmodell haben gezeigt, dass das Schalldämmmaß der Doppelfassade mit geöffneten Bypässen maßgeblich von dem verwendeten Absorbermaterial abhängt. Darüber hinaus ist es wichtig, dass alle Oberflächen ausgekleidet sind sowie dass der Einfall von Direktschall unterbunden wird.

Langzeitmessungen an der gebauten Bypass-Doppelfassade haben im langfristigen Mittel eine Pegelreduktion von rund 10 dB(A) ergeben. Dies entspricht einer Halbierung der Lautstärke. Subjektiv wurde von allen Mitarbeitern in dem Testraum festgestellt, dass eine deutliche Pegelreduktion bei Bypass-Lüftung wahrzunehmen ist im Vergleich zur Lüftung über den Fassadenzwischenraum.

5 Thermisches Verhalten und Energieeffizienz des Testraumes

5.1 Analyse der Klimadaten

Die nachfolgenden Auswertungen beziehen sich auf den Zeitraum vom 10.11.2016 bis zum 30.04.2018. Der Zeitraum ist so gewählt, dass alle nachträglich installierten Sensoren sowie die Kalibrierungen berücksichtigt werden. Es werden zwei Winterperioden sowie eine Sommerperiode berücksichtigt. Abbildung 38 zeigt eine Gegenüberstellung der Außenlufttemperaturen direkt vor der Bypass-Doppelfassade mit den Messwerten vom Deutschen Wetterdienst (DWD)³ an der Station *Hamburg Fühlsbüttel* (ID 1975), 2 m über dem Boden. Es sind sowohl die 5-Minuten-Messwerte als auch Monatsmitteltemperaturen dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die Messwerte vor der Südfassade der HCU etwas über den Werten des DWD liegen. Insgesamt zeigt sich aber eine sehr gute Übereinstimmung.

Die Messperioden zeichnen sich durch ein relativ mildes Klima aus, was den energieeffizienten Gebäudebetrieb sowie die Fassadensteuerung zur Komfortregelung begünstigt. In den Sommermonaten 2017 sowie im April 2018 erreichten die Temperaturspitzen vereinzelt die 30°C. Längere Hitzeperioden blieben jedoch aus. In den Wintermonaten wurde der Gefrierpunkt selten für einen längeren Zeitraum unterschritten. Eine sehr kalte Winterwoche ereignete sich in der letzten Februarwoche 2018, wo an mehreren aufeinanderfolgenden Nächten Temperaturen unterhalb von -10°C gemessen wurden und auch tagsüber die 0°C nicht erreicht wurden.

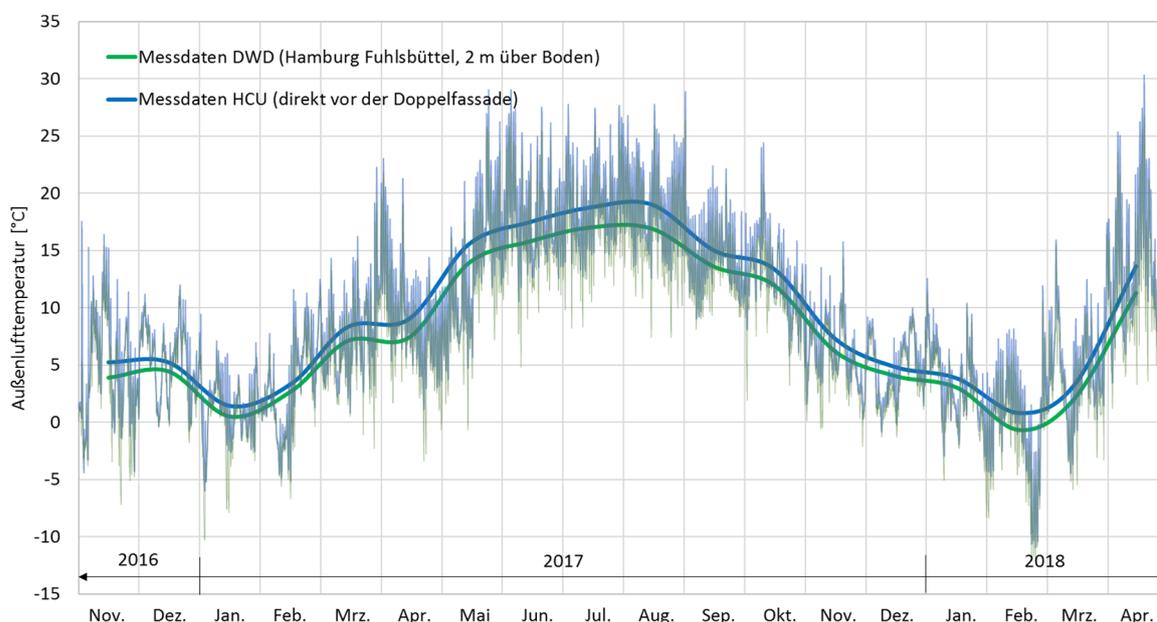


Abbildung 38: Gegenüberstellung der Außenlufttemperaturen direkt vor der Bypass-Doppelfassade mit den Messwerten vom DWD

³ Die Daten des Deutschen Wetterdienstes stammen aus dem Climate Data Center, welches online verfügbar ist. Das Copyright und die Verantwortung für diese Daten liegen beim Deutschen Wetterdienst.

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Global- und Diffusstrahlung auf der horizontalen Fläche als Monatsmittelwert und der Außenlufttemperatur-Spanne gemessen vor der Bypass-Doppelfassade. Von besonderem Interesse für die Auswertungen sind

- warme, strahlungsreiche Monate zur Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes,
- sehr kalte, strahlungsreiche Monate (Februar und März 2018) für die Analyse der Zwischenraumtemperaturen sowie
- kalte, strahlungsarme Monate (jeweils November bis Januar) für die Analyse des Heizwärmebedarfs.

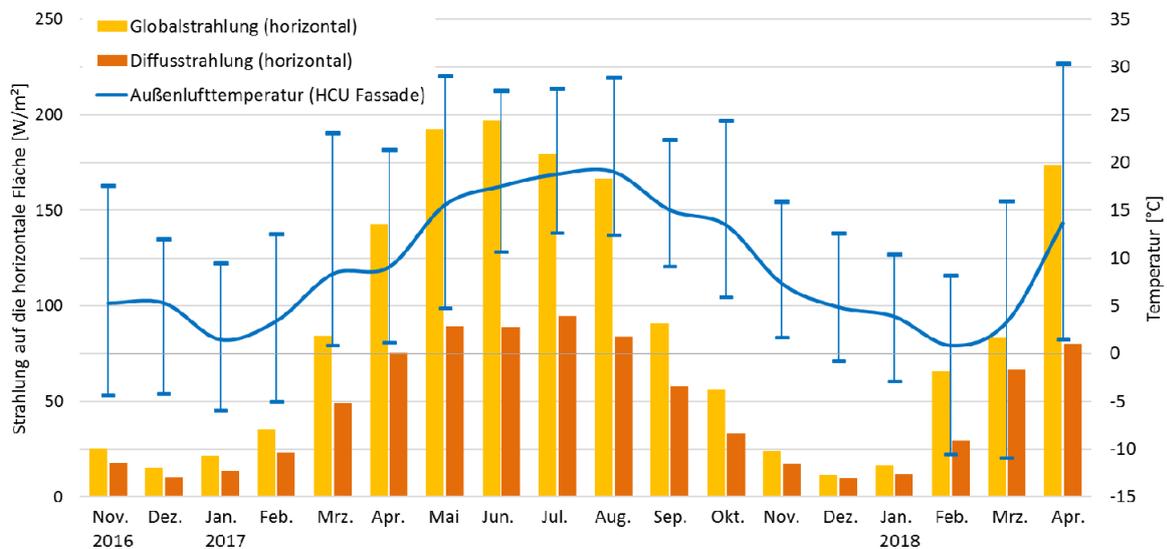


Abbildung 39: Zusammenhang zwischen Solarstrahlung und Außenlufttemperaturen

5.2 Komfortauswertungen

Beide Varianten der Fassadensteuerungen, welche während des Projektzeitraumes entwickelt wurden, sehen vor, dass die operative Raumtemperatur innerhalb des Komfortbereiches des adaptiven Komfortmodells gehalten wird. Eine Über- bzw. Unterschreitung des Komfortkorridors um weitere 2 K ist in maximal 1% der Nutzungszeit zulässig, um die Kategorie II nach DIN EN 15251 (< 10% Unzufriedene) zu erhalten. Die Bereiche sind in Abbildung 40 dargestellt.

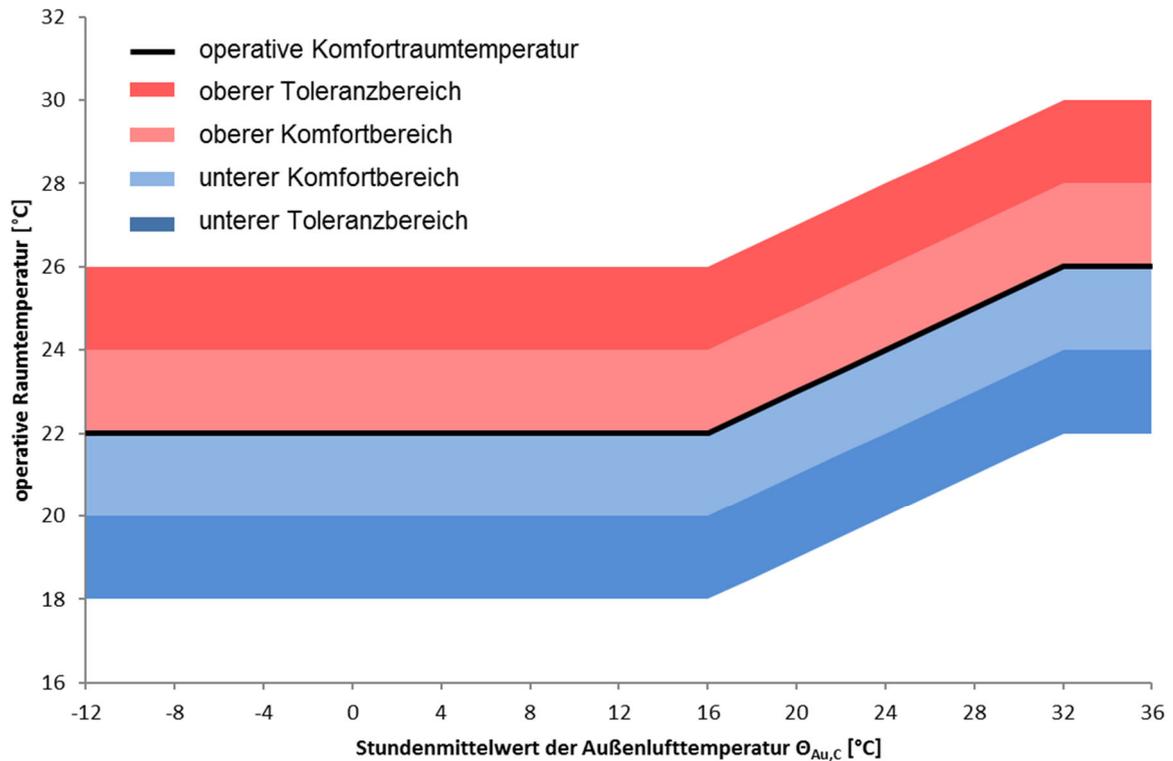


Abbildung 40: Adaptives Komfortmodell nach DIN EN 15251

Die Auswertung nach den Komfortbereichen erfolgt nach dem Stundenmittelwert der Außenlufttemperatur. Es werden nur dann Daten zur Auswertung genutzt, wenn mindestens eine Stunde lang ununterbrochen vollständige Datensätze zur Verfügung stehen, um den Mittelwert zu berechnen. Ausgewertet werden nur die Nutzungszeiten. Insgesamt werden 33.600 Datensätze in die Auswertung der operativen Temperaturen einbezogen. Zu erwähnen ist, dass die Zeiträume sowohl die vereinfachte Fassadensteuerung (Aktivierung der nächtlichen Auskühlung über einen Zähler) als auch die weiterentwickelte Steuerung (Implementierung der Raumprognose) beinhalten.

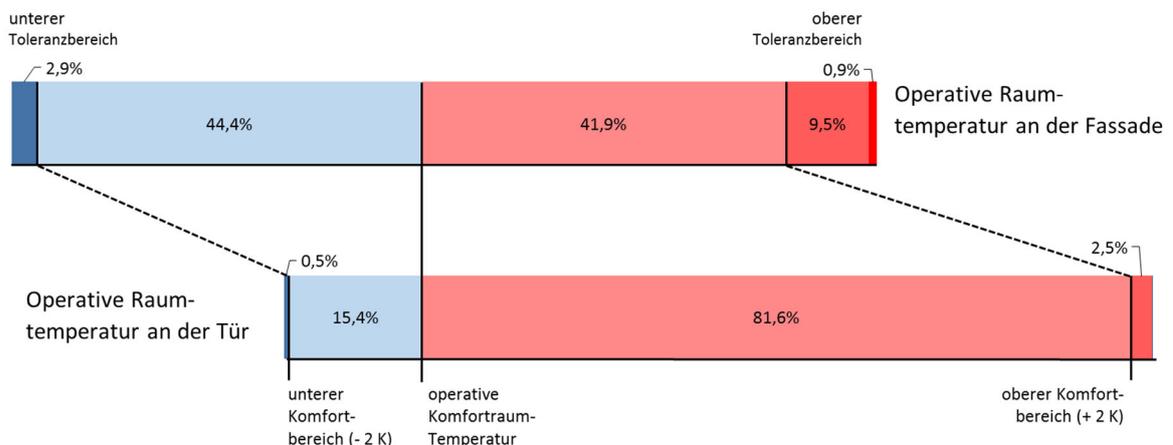


Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Messwerte innerhalb der Bereiche nach dem adaptiven Komfortmodell

Die Auswertung zeigt einen auffälligen Temperaturgradienten innerhalb des Raumes (siehe Abbildung 41). An der **Sensorposition nahe der Tür** (maximale Raumtiefe) ergeben sich zu 97% der

Nutzungszeit Wertepaare, die sich innerhalb des Komfortkorridors befinden. Auffällig ist, dass eine deutliche Verlagerung der operativen Temperatur an die obere Grenze heran stattfindet. Dies erklärt sich durch die hohe Wärmeabgabe durch die internen Lasten. Darüber hinaus wird an sehr kalten Tagen die nicht vorgewärmte Zuluft als unangenehm kühl empfunden. Daher ist die Fassadensteuerung durch die Nutzer im Winter so eingestellt, dass die Idealtemperatur der Regelung oberhalb der Komforttemperatur nach dem Komfortmodell liegt. An Tagen mit Auskühlungsgefahr bleiben die Fenster geschlossen (sofern kein Lüftungsbedarf aufgrund der CO₂-Konzentration besteht), sodass sich auch an kalten Tagen die operative Raumtemperatur im oberen Bereich des Komfortkorridors befindet. Die kälteren Werte ergeben sich vor allem an Tagen mit nächtlicher Auskühlung in den frühen Morgenstunden, wo die neue Variante der Fassadensteuerung mit dem Ziel regelt, dass zu Beginn der Nutzungszeit der untere Grenzwert des Komfortkorridors erreicht ist. In Abbildung 42 sind in einer Punktwolke die einzelnen Messwerte der operativen Raumtemperatur in dem Diagramm des Komfortmodells dargestellt. Die einzelnen Datenpunkte in allen Abbildungen mit Punktwolken sind schwarz mit Transparenz dargestellt, sodass die Bereiche, wo sich die Messwerte häufen, in den Abbildungen dunkler erscheinen. Diese Darstellung unterstreicht noch einmal die Tatsache, dass sich die operative Raumtemperatur im oberen Bereich, aber überwiegend innerhalb des Komfortkorridors befindet.

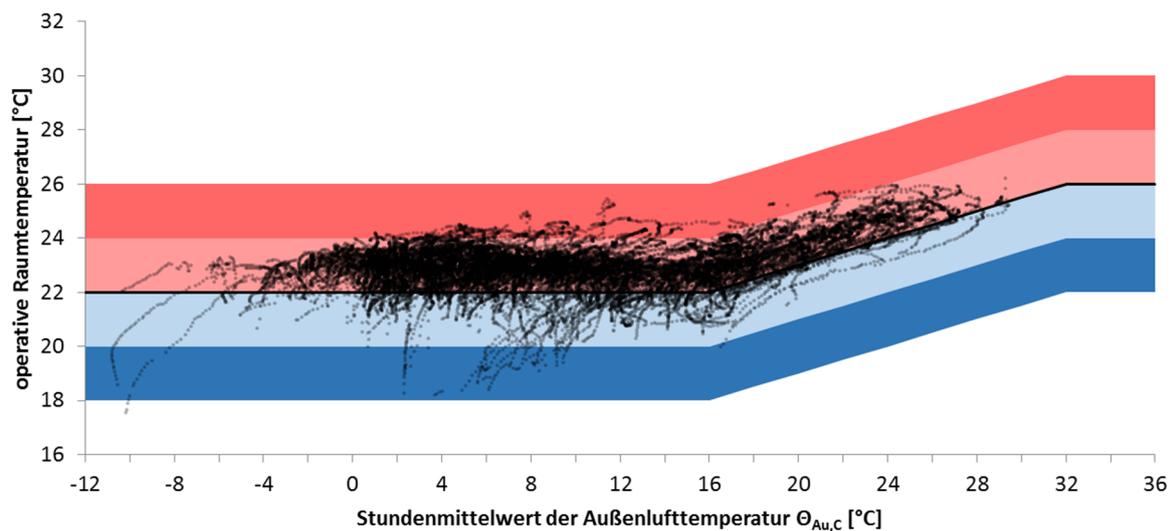


Abbildung 42: Messwerte der operativen Raumtemperatur in maximaler Raumtiefe

Der **Sensor an der Fassade** zeigt eine relativ ausgewogene Verteilung der Messdaten (Abbildung 41). Insgesamt liegen 86,3% der Messdaten innerhalb des Komfortkorridors. Auffällig ist hier, dass sogar 0,9% der Nutzungszeit eine Erwärmung um mehr als 2 K oberhalb des Komfortkorridors stattfindet. Der Oberflächentempersensor auf der Glasscheibe reagiert im Vergleich zu dem Wandtempersensor relativ sensibel auf solare Einstrahlung. Besonders im Winter bei Benutzung des innenliegenden Blendschutzes ist der Oberflächentempersensor nur durch die reflektierende Folie verschattet und nicht zusätzlich durch den Sonnenschutz im Zwischenraum. Daher erfasst dieser Sensor hohe Messwerte. An Tagen mit geringer Solarstrahlung und niedrigen Außenlufttemperaturen sinkt auch die Oberflächentemperatur der Glasscheibe ab, sodass die gefühlte

Temperatur in Fassadennähe abnimmt. Abbildung 43 zeigt die einzelnen Messwerte der Sensoren an der Fassade auf dem Diagramm des adaptiven Komfortmodells. Auffällig ist, dass auch bei Außentemperaturen im gemäßigten Bereich Übertemperaturen zustande kommen. Die einzelnen Ausreißer bis über 30°C hinaus resultieren aus einer starken Erwärmung der Glasscheiben infolge der solaren Strahlung. Diese Messwerte sind zu Projektbeginn aufgezeichnet worden, als noch die erste Variante der Fassadensteuerung lief, die lediglich den Temperatursensor im Rauminnen berücksichtigt.

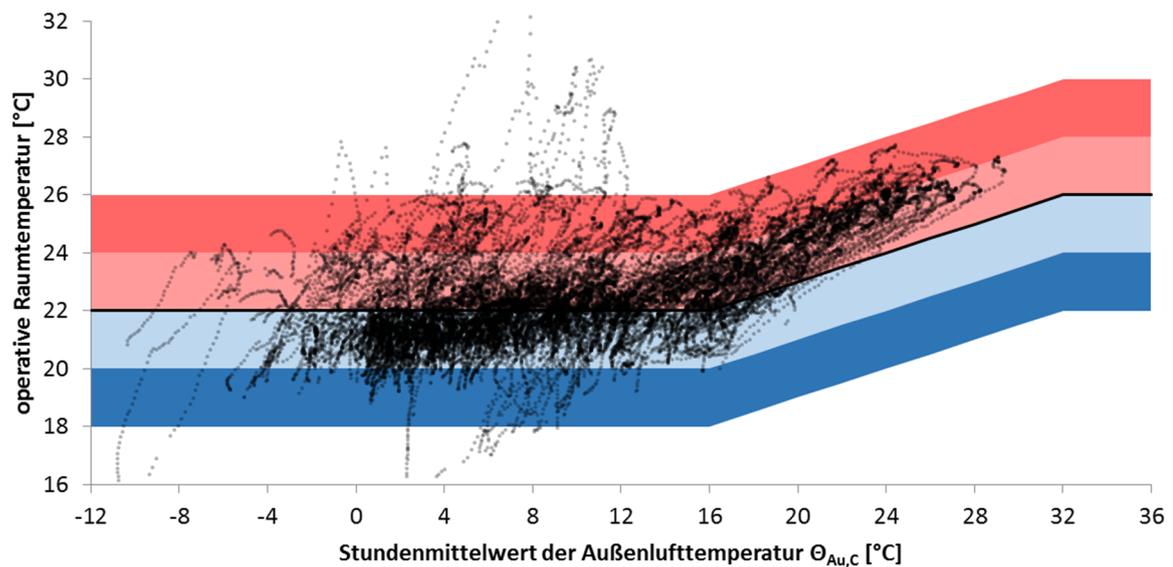


Abbildung 43: Messwerte der operativen Raumtemperatur an der Fassade

Eine von der Außenlufttemperatur unabhängige Verteilung der operativen Raumtemperatur zeigt Tabelle 16. Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass die Überschreitung des Grenzwertes der operativen Innentemperatur minimal ist. Dieser liegt in Hamburg (Sommerklimaregion B nach DIN 4108-2 [26]) bei 26°C. Dies ist maßgeblich auf die milden Außentemperaturen in dem betrachteten Zeitraum zurückzuführen. Ein Großteil der Zeit kann die natürliche Lüftung effektiv genutzt werden, um überschüssige Wärme aus dem Raum zu transportieren. Es ist außerdem anzumerken, dass die 18 ausgewerteten Monate nur einen Sommer aber zwei Winterperioden umfassen.

Tabelle 16: Verteilung der operativen Raumtemperatur

Sensor- position	Stundenzahl über operativer Temperatur [°C]									
	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
max.	299	48	0	0	0	0	0	0	0	0
Raumtiefe	12%	1,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Fassade	549	288	92	22	10	6	3	2	1	1
	24%	13%	4,0%	1,0%	0,4%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%

5.3 Zwischenraumtemperaturen

Die Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum ist eine wichtige Größe zur Bewertung der Effizienz einer Doppelfassade. Im Winter kann die Erwärmung gegenüber der Außenlufttemperatur dazu genutzt werden, um bei geschickter Luftführung die Zuluft passiv zu erwärmen. Außerdem erfolgt eine Reduktion der Transmissionswärmeverluste. Im Sommer hingegen sollte die Erwärmung durch eine starke Belüftung des Zwischenraumes weitestgehend reduziert werden, damit zusätzliche Wärmeerträge in den Raum minimal gehalten werden.

Abbildung 44 zeigt den Zusammenhang zwischen den gemessenen Außenlufttemperaturen und den dazugehörigen Zwischenraumtemperaturen. Dargestellt ist der Mittelwert aller Temperatursensoren im Zwischenraum. Es ist gut zu erkennen, dass auch bei Außentemperaturen unterhalb des Gefrierpunktes im Zwischenraum Lufttemperaturen von 30°C und mehr erreicht werden. Dieses Temperaturniveau liegt deutlich über der Soll-Heiztemperatur im Winter und eignet sich daher zur Erwärmung der Zuluft. Im Sommer werden aufgrund der Durchspülung des Fassadenzwischenraumes mit Außenluft selten extrem hohe Lufttemperaturen im Zwischenraum gemessen. Vereinzelt werden jedoch auch hier Temperaturen um die 50°C gemessen.

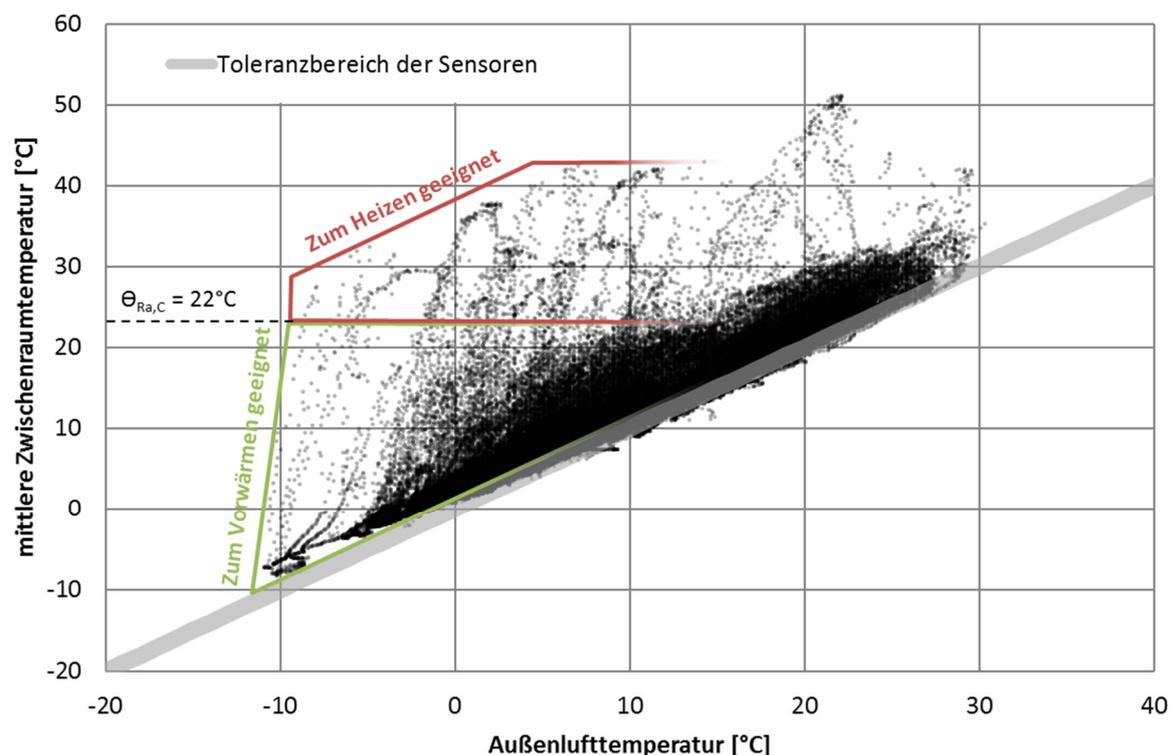


Abbildung 44: Zusammenhang zwischen Außenlufttemperatur und mittlerer Zwischenraumtemperatur

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Erwärmung des Zwischenraumes gegenüber der Außenlufttemperatur. Auch hier ist der Mittelwert aller Temperatursensoren im Zwischenraum dargestellt. Diese Darstellung zeigt deutlich, dass die Differenztemperatur im Winter höher ist als im Sommer und dass diese Temperaturen häufiger erzielt werden. Dies hat folgende Gründe:

- Die Sommersonne hat einen steilen Einfallswinkel auf die Doppelfassade. Die Strahlung auf die vertikale Glasscheibe ist dadurch verhältnismäßig gering.
- Im Winter ist die Erwärmung gewollt. Die äußeren Lamellen werden geschlossen gehalten, um die Zuluft für den Raum zu erwärmen. In Zeiten mit potentieller Überhitzung erfolgt auch in den Wintermonaten eine Durchspülung zur Wärmeabfuhr.
- Im Sommer ist das Niveau der Außenlufttemperatur höher, sodass die Temperaturdifferenz dadurch niedriger ausfällt.

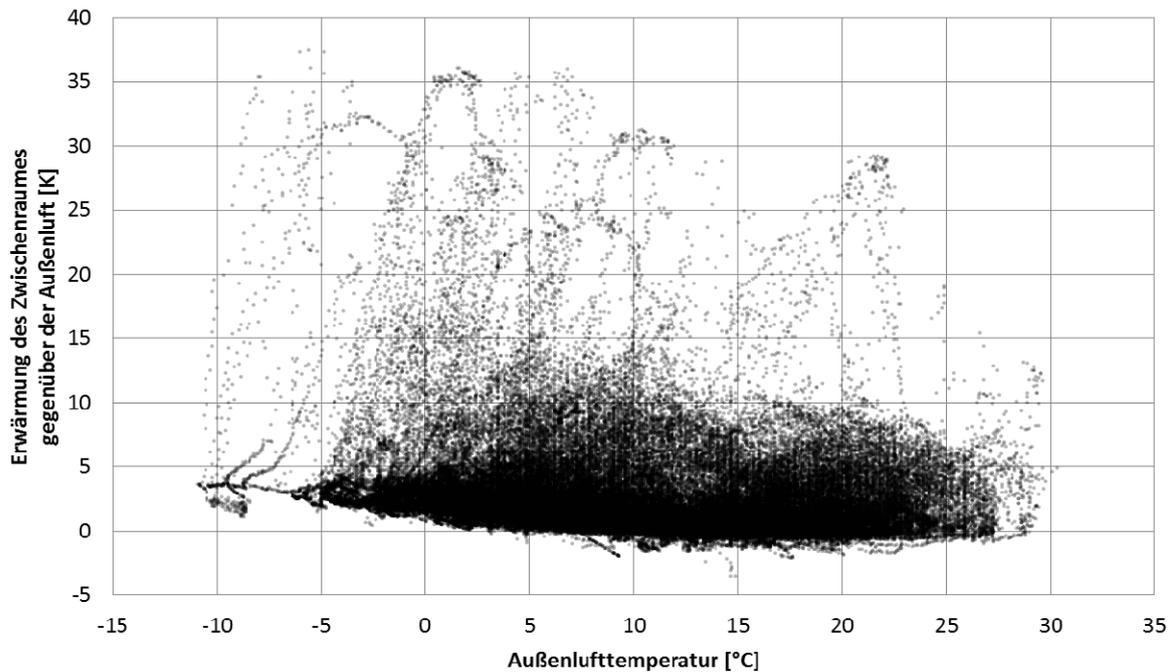


Abbildung 45: Erwärmung des Zwischenraumes gegenüber der Außentemperatur

Abbildung 46 zeigt den Tagesverlauf der Zwischentemperaturen an einem wolkenlosen, sehr kalten Wintertag Ende Februar 2018. An diesem Tag waren die äußeren Lamellenfenster vollständig geschlossen. Deutlich zu erkennen ist, dass die Temperaturen im Zwischenraum dem Verlauf der Globalstrahlung folgen. Die Außenlufttemperatur erreicht erst rund 3 Stunden später am Nachmittag den Höchstwert. An diesem Tag wird eine Zwischenraumerwärmung auf rund 20°C im unteren Bereich und auf nahezu 40°C im oberen Bereich nahe der Zuluftfenster zum Innenraum erzielt.

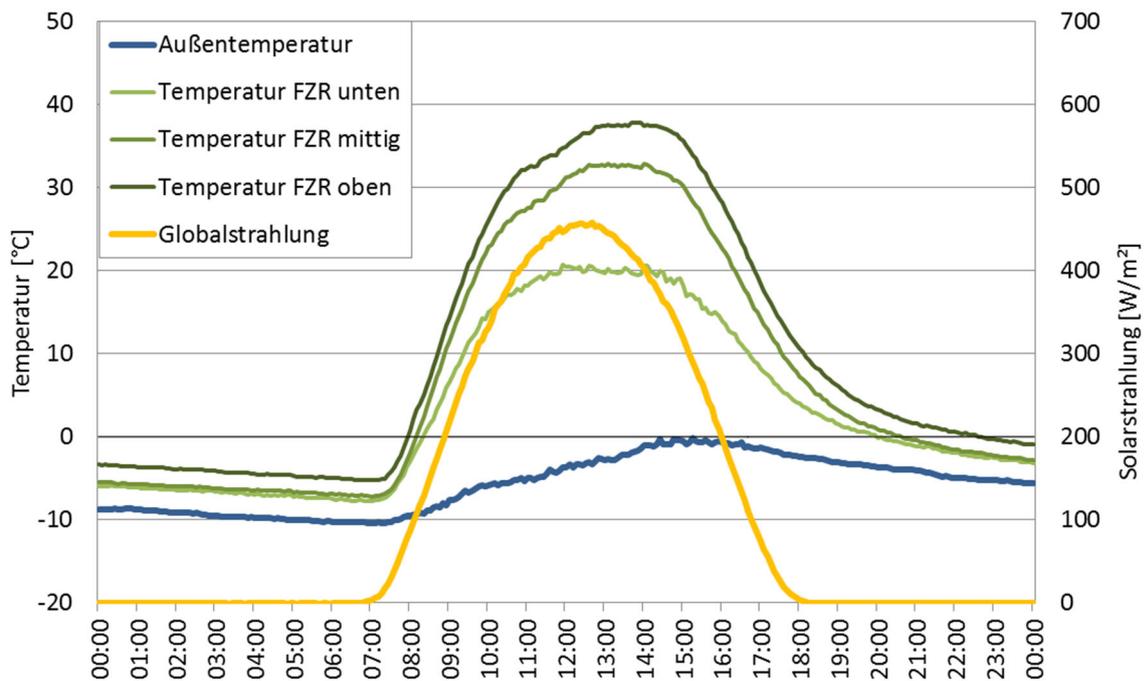


Abbildung 46: Temperaturverlauf im Zwischenraum im Winter bei geschlossenen Außenlamellen

Ein warmer, sonnenreicher Sommertag ist in Abbildung 47 dargestellt. Die Öffnungszeiten der Lamellen sind hervorgehoben. Bis zur Mittagszeit hat sich der Zwischenraum aufgrund der Solarstrahlung stark erwärmt. Im Gegensatz zu dem oben dargestellten Wintertag liegt die Temperaturdifferenz zwischen dem Zwischenraum und der Außentemperatur jedoch nur bei gut 10 K. Gegen 15:00 Uhr (siehe Punkt 1) sind die äußeren Lamellen kurzzeitig geschlossen. In diesem Zeitraum ist ein starker Anstieg der Temperaturen erkennbar. Sobald die Lamellen geöffnet werden, fällt die Temperatur um einige Kelvin ab und nähert sich dem Außentemperaturniveau.

Interessant ist, dass sich hier keine klare Schichtung der Lufttemperaturen einstellt. Die Temperatursensoren im mittleren und oberen Bereich weisen nahezu denselben Messwert auf – zeitweise liegt der Messwert des oberen Sensors sogar etwas unterhalb des mittleren Sensors (siehe Punkt 2). Dies liegt daran, dass aufgrund lokaler Verwirbelungen ein „Auswaschen“ der Luft im oberen Bereich des Zwischenraumes stattfindet. Diesen „wind wash out effect“ hat Larsen [8] an Messungen an einem Versuchsstand für Doppelfassaden in Aalborg, Dänemark, ebenfalls beobachtet.

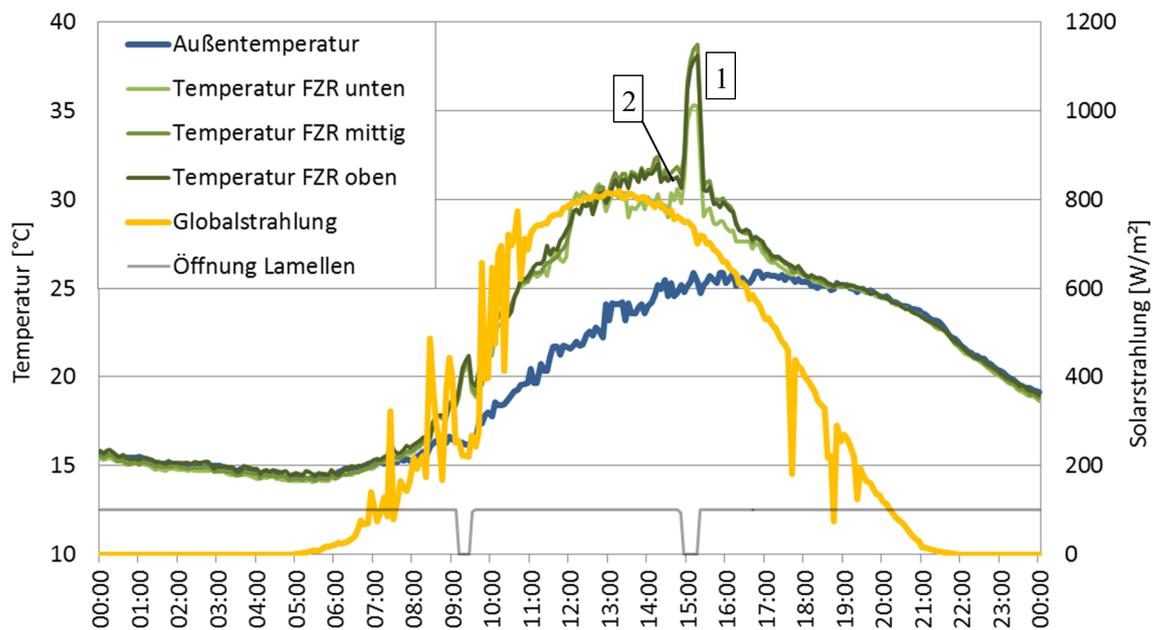


Abbildung 47: Temperaturverlauf an einem Sommertag mit geöffneten Außenlamellen

5.4 Heizenergiebilanz und interne Wärmelasten

Bürräume zeichnen sich durch relativ hohe interne Lasten aus elektrischen Geräten und der Personenbelegung aus. Überwiegend sind drei Personen im Testraum anwesend. Dieser Wert repräsentiert die planmäßige und dauerhafte Büronutzung. Reduzierungen durch Urlaubszeiten oder kurzfristige Überbelegungen bleiben unberücksichtigt. Abbildung 48 zeigt den Zusammenhang zwischen den gemessenen internen Lasten infolge elektrischer Geräte und der Personenbelegung. Die Daten entstammen dem Zeitraum von Juli 2016 bis Januar 2018. Die Kurve flacht bei zunehmender Personenbelegung ab, da eine Personenbelegung über drei Personen hinaus nicht üblich ist und weitere Personen (häufig Besucher) die internen Gerätelasten nicht beeinflussen. Ein gelegentliches Benutzen der zwei weiteren Arbeitsplätze lässt sich an dem geringen Zuwachs erkennen.

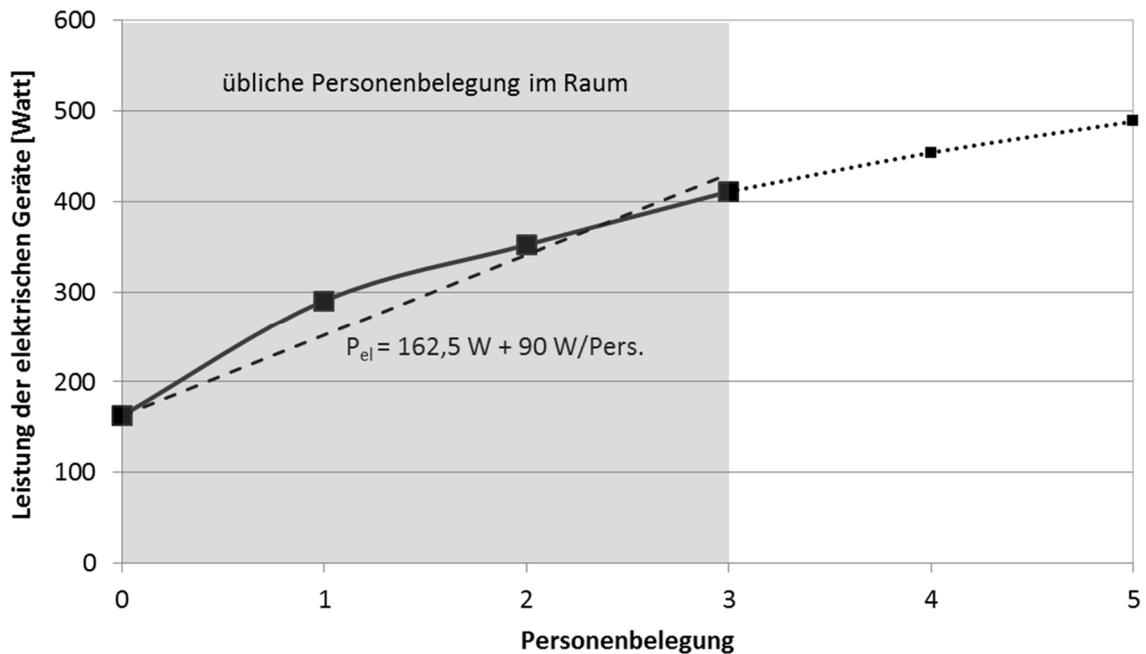


Abbildung 48: Interne Lasten aus Geräten in Abhängigkeit der Personenbelegung

In den Wintermonaten wird durch diese Wärmeerträge der Heizwärmebedarf reduziert. Tabelle 17 zeigt die Verteilung der internen Wärmegewinne sowie die Heizenergie. Der Zeitraum umfasst zwei Winterperioden und einen Sommer. Die erforderliche Heizenergie ist deutlich geringer als die Wärmeerträge aus internen Lasten und liegt mit 13,0 kWh/(m²a) auf Passivhausniveau. Dies ist bemerkenswert, da der Raum ausschließlich natürlich belüftet wird und nicht wie bei Passivhäusern üblich mit einer Lüftungsanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung betrieben wird. Die Heizung ist nicht aktiv an die Fassadensteuerung angeschlossen. Die Wunschtemperatur wird manuell über ein Thermostat eingestellt.

Tabelle 17: Interne Lasten und Heizenergie

		Heizenergie	Beleuchtung	Sonstige Verbraucher	Personen
Energiever-	[kWh]	765,7	1012,1	2625,5	766,0
brauch/-eintrag	[kWh/m ² a]	13,0	17,2	44,7	13,0

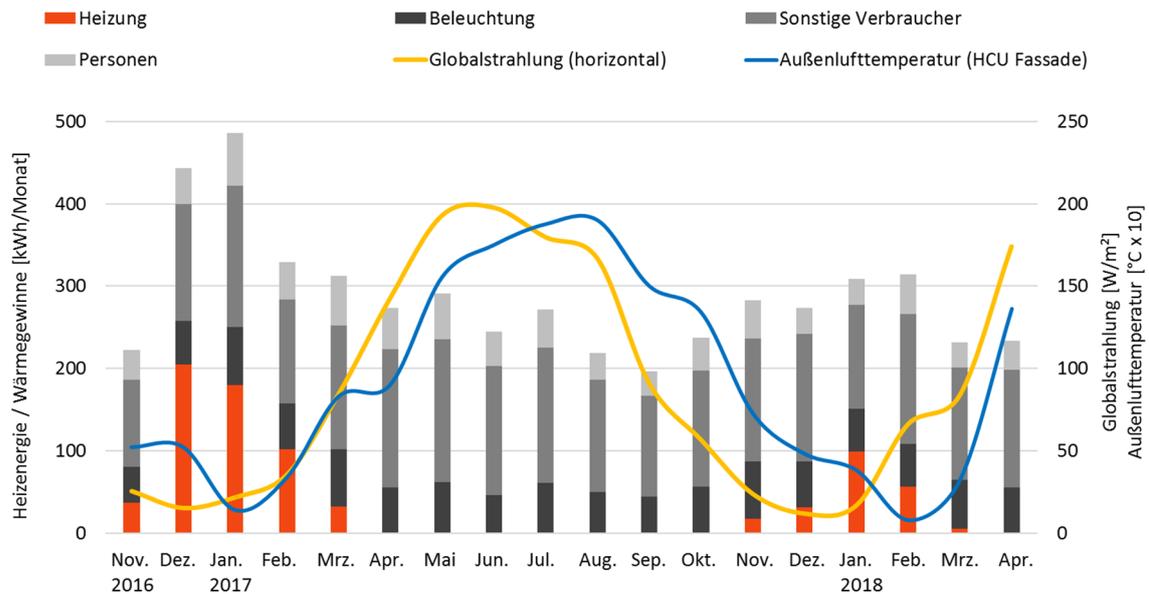


Abbildung 49: Heizenergie, interne Lasten und die klimatischen Grundbedingungen

Die monatliche Verteilung der internen Wärmegewinne sowie der Heizenergie ist in Abbildung 49 dargestellt. Die Heizenergie ist im Wesentlichen von der Solarstrahlung abhängig und weniger von der Außenlufttemperatur.

5.5 Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit von natürlich belüfteten Räumen kann ausschließlich über das Öffnen und Schließen von Fenstern reguliert werden, sofern auf konventionelle Luftbehandlung verzichtet wird. Während die relative Luftfeuchtigkeit im Außenbereich im Jahresverlauf annähernd konstant ist, unterliegt die absolute Feuchtigkeit starken Schwankungen.

In den Wintermonaten (im Rahmen der Auswertung der Luftfeuchtigkeit definiert als Oktober bis März) ist die Wassermenge in der Außenluft gering. Bei natürlicher Lüftung gelangt diese Luft nach innen. Aufgrund der Lufterwärmung durch Heizen und durch interne Lasten nimmt die relative Feuchtigkeit stark ab. Dieses Phänomen wird häufig als „*trockene Heizungsluft*“ bezeichnet und ist auch in dem Testraum während der Projektlaufzeit erkennbar (Abbildung 50).

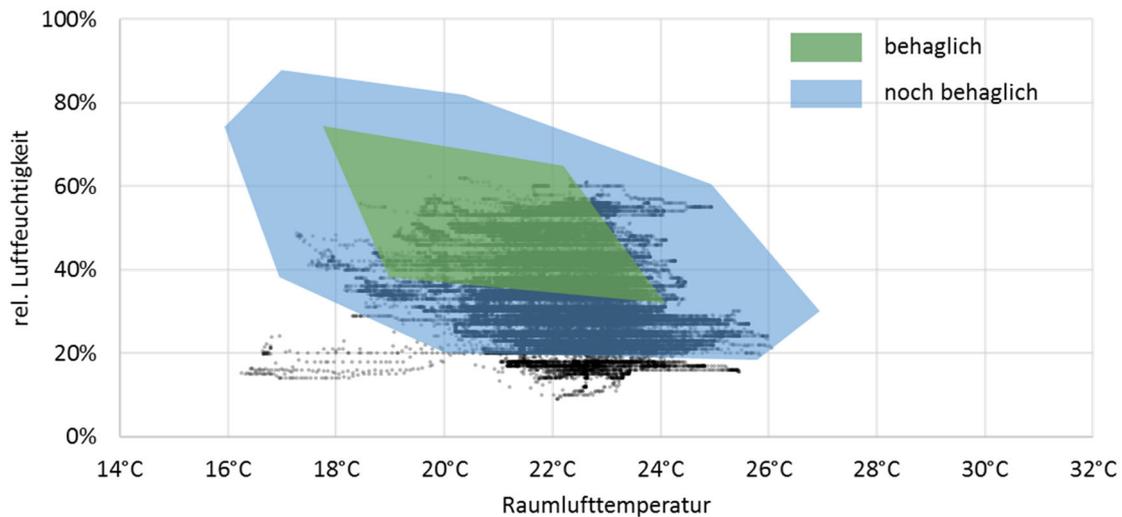


Abbildung 50: Raumlufffeuchte im Winter, Behaglichkeitsbereich nach [27]

Im Sommer hingegen enthält die Außenluft mehr absolute Feuchtigkeit. Für den Fall der maximalen Raumbelüftung zur Temperaturregulierung gelangt diese Luft direkt nach innen und erfährt im Regelfall keine weitere Erwärmung. Eine relative Luftfeuchtigkeit über 70% ist in Abbildung 51 erkennbar. An sehr warmen Sommertagen erfolgt nur dann eine Lüftung, wenn dies zur CO₂-Abfuhr erforderlich ist. Die relative Luftfeuchtigkeit wird in diesem Fall nur kurzzeitig reguliert und erhöht sich zusätzlich aufgrund der Personenbelegung im Raum.

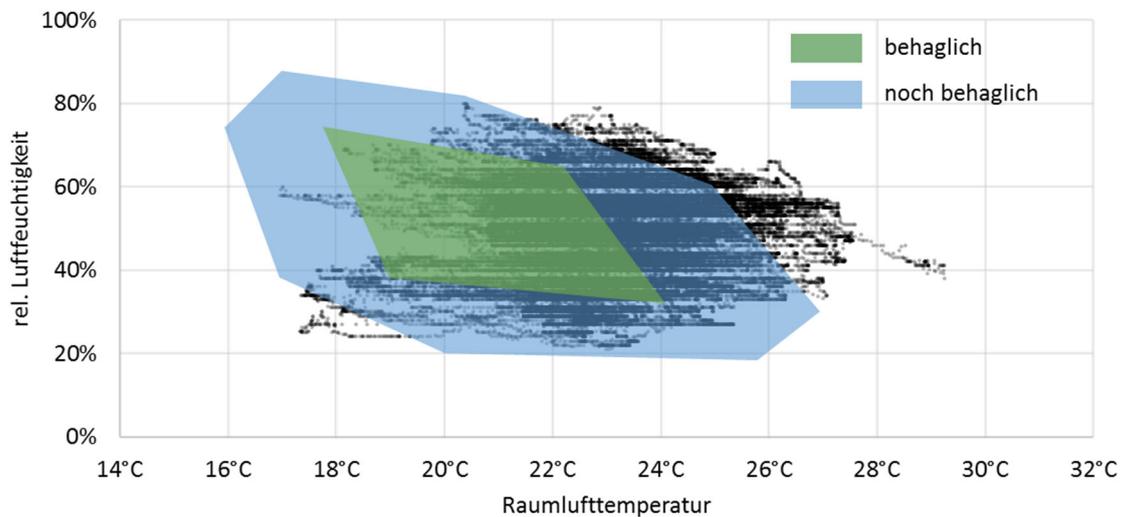


Abbildung 51: Raumlufffeuchte im Sommer, Behaglichkeitsbereich nach [27]

5.6 CO₂-Konzentration im Büroraum

Die Konzentration an Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Raumluft ist ein wichtiger Indikator für die Raumluftqualität. Hohe Konzentrationen führen zu einer Abnahme der Konzentration und zu Kopfschmerzen. Aus diesen Gründen nimmt der CO₂-Gehalt den höchsten Stellenwert in der Fassadensteuerung ein. Das primäre Ziel der Steuerung ist es, den CO₂-Gehalt beim Überschreiten von

1000 ppm zu reduzieren. Nach der Auswertung der DIN EN 15251 darf demnach die Kategorie III erreicht werden. Die Hysterese-Steuerung sieht vor, dass erst nach dem Erreichen von 800 ppm die Fenster wieder geschlossen werden. Analog zu der DIN EN 13779 soll die Kategorie IDA 2 (mittlere Raumluftqualität) erhalten werden.

Tabelle 18: Kategorisierung anhand der CO₂-Konzentration nach der DIN EN 15251

Kategorie	Beschreibung	CO ₂ -Konzentration über der Außenluft
Kategorie I	Hohes Erwartungsmaß	350 ppm
Kategorie II	Normales Erwartungsmaß	500 ppm
Kategorie III	Annehmbares, moderates Erwartungsmaß	800 ppm
Kategorie IV	Werte außerhalb von Kat. I bis Kat. III	> 800 ppm

Tabelle 19: Kategorisierung anhand der CO₂-Konzentration nach der DIN EN 13779

Kategorie	Beschreibung	CO ₂ -Konzentration über der Außenluft
IDA 1	Hohe Raumluftqualität	≤ 400 ppm
IDA 2	Mittlere Raumluftqualität	400 – 600 ppm
IDA 3	Mäßige Raumluftqualität	600 – 1000 ppm
IDA 4	Niedrige Raumluftqualität	> 1000 ppm

Abbildung 52 zeigt eine Auswertung der aufgezeichneten Daten zur Raumluftqualität. Es ist der Sensor in 1,40 m Höhe ausgewertet. Dargestellt sind mehr als 47.400 Datensätze der CO₂-Konzentration während der Nutzungszeit. Die Nutzungszeit entspricht nicht einem definierten Zeitraum, sondern all jenen Zeitpunkten, an denen Personen im Raum waren (Personenzähler > 0).

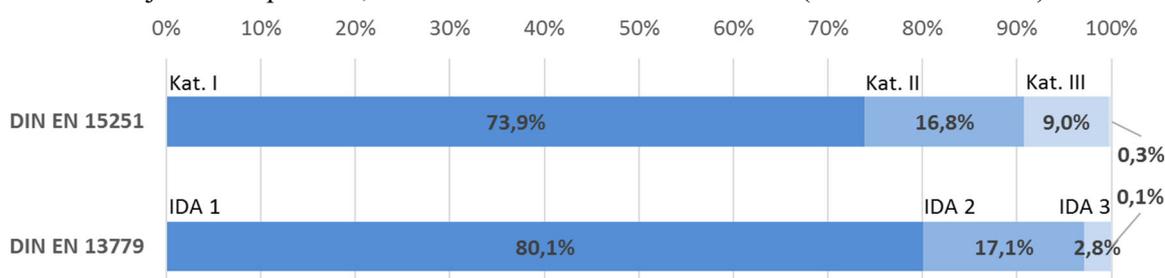


Abbildung 52: Anteil der Nutzungsstunden in den Klassen nach DIN EN 15251 und DIN EN 13779

6 Modellierung der Bypass-Doppelfassade

6.1 Allgemeine Modellbeschreibung

6.1.1 Vorgehensweise

Für die thermische Gebäudesimulation sowie der Fassadensteuerung wird *EnergyPlus 8-6-0* verwendet. Diese wird mittels der Schnittstelle *MLE+* mit *MATLAB R2017a* gekoppelt. Hierdurch ist es möglich mit MATLAB in jeden Zeitschritt der EnergyPlus Simulation einzugreifen. Es können Ausgabewerte von EnergyPlus (z.B. Temperaturen, Zeitpläne) nach MATLAB übergeben und wiederum Steuereinheiten oder Zeitpläne von MATLAB an EnergyPlus geschrieben werden. Eine Variation der Geometrie oder anderen Modellparametern von EnergyPlus ist über diese Schnittstelle nicht möglich. Diese festen Parameter, welche sich während eines Simulationsdurchganges nicht ändern, werden durch eigene Programm-Routinen der EnergyPlus-Datei mittels MATLAB variiert.

6.1.2 Gebäudebeschreibung

Hamburg liegt auf dem 10. Längengrad Ost und auf dem 53,5. Breitengrad nördlich des Äquators. Das Universitätsgebäude befindet in innerstädtischer Lage direkt an der Elbe in einem ehemaligen Hafengebiet. Aufgrund der Lage innerhalb des Entwicklungsgebiets des wachsenden Stadtteils *HafenCity* ist während der Projektlaufzeit die Bebauung um das Gebäude entstanden und gewachsen. Die Bypass-Doppelfassade befindet sich im 3. Obergeschoss (14,31 m über Geländeoberkante) an der Südfassade (164° von Norden). Die Fassadenfläche beträgt $B \times H = 6,30 \text{ m} \times 3,25 \text{ m}$ in der inneren Ebene und die äußere Ebene erstreckt sich über $B \times H = 6,30 \text{ m} \times 3,60 \text{ m}$ (jeweils Innenmaße). Der Rahmenanteil beträgt 30% in der Primärfassade und 10% in der Sekundärfassade. Die Testfassade ist aufgrund der wasserseitigen Ausrichtung nicht durch die umgebene Bebauung beeinflusst. Eine freie Windanströmung aus dem südlichen Hafengebiet ohne markante Bauwerke ist möglich.

6.1.3 Raum- und Fassadengeometrie

Die Breite der Außenfassade beträgt 6,30 m (Innenmaß) mit einem Rastermaß von $4 \times 1,60 \text{ m}$. Abbildung 53 zeigt die Außenansicht der Bypass-Doppelfassade. Oben und unten sind Lamellenfenster angeordnet, die über eine Höhendifferenz von 3,13 m (Achismaß) einen hohen natürlichen Luftwechsel im Zwischenraum ermöglichen. Die beiden äußeren Elemente sind aus einer absturzsichernden Festverglasung hergestellt während die beiden mittleren Elemente aus jeweils einer zweigeteilten Schiebetür erstellt sind. Die Geometrie und Glasstärken sind in Abbildung 53 dargestellt.

Der Messraum hat eine Tiefe von 6,00 m und eine lichte Höhe von 3,25 m. Die Räume an der Südfassade sind mit einem umlaufenden Balkon ausgestattet, der etwa 1,20 m auskragt. Um die

nutzbare Fläche des Fassadenzwischenraumes als Loggia zu maximieren, wird die zweite Fassadenebene an der Außenkante des Balkons direkt hinter dem Geländer montiert. Der lichte Abstand der beiden Verglasungsebenen beträgt 1,125 m.

Die Bypässe weisen jeweils Innenabmessungen von $B \times H = 1,38 \times 0,41$ m an der engsten Stelle auf. Die Fensterflächenanteile, definiert als lichter Öffnungsquerschnitt im Verhältnis zur Raumgrundfläche, sind in Tabelle 20 dargestellt. Die Rahmenanteile betragen 30% in der Primärfassade und 10% in der Sekundärfassade.

Tabelle 20: Darstellung der Fensterflächenanteile

Fenstertyp	Abmessungen	Anzahl	Fensterfläche	Fensterflächenanteil
Kippfenster (innen)	1,50 x 0,60 m	3	2,70 m ²	6,75 %
Bypass	1,38 x 0,41 m	2	1,13 m ²	2,83 %
Summe			3,83 m ²	9,58 %

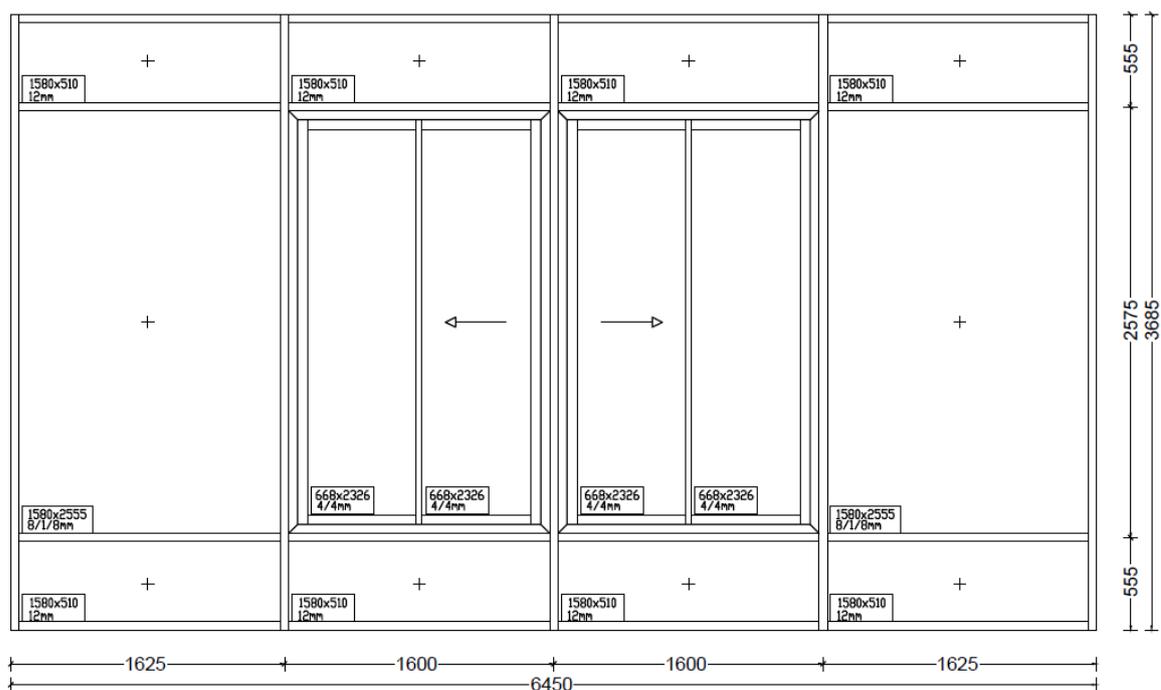


Abbildung 53: Außenansicht der Bypass-Doppelfassade

6.1.4 Zonierung

Gebäudeteile, die sich in ihrer Art, Nutzung, Konditionierung oder technischen Ausstattung von benachbarten Gebäudeteilen signifikant unterscheiden, sollten einer eigenen thermischen Zone zugewiesen werden. Der Büroraum bildet eine thermische Zone. Da dieser Raum im Fokus der Auswertungen steht und als einziger eine Doppelfassade hat, werden benachbarte Büroräume nicht zu dieser Zone hinzugefügt. Damit die Wärmetransmission zwischen den angrenzenden Räumen auch

bei kleinen Temperaturdifferenzen erfasst werden kann, werden die umliegenden Räume in dem Modell erfasst und eigenen Zonen zugewiesen.

Das Strömungsmodell in EnergyPlus abstrahiert eine thermische Zone zu einem Knoten und die Lüftungsöffnungen zwischen den Zonen sowie nach außen zu Verbindungen zwischen diesen Knoten. Das so entstehende Knotenmodell (siehe Abbildung 54) kennzeichnet sich vor allem durch die strömungsdynamischen Eigenschaften der Fenster (Strömungswiderstände) und durch die Druckdifferenzen zwischen den Zonen resultierend aus Windeinflüssen und Temperaturdifferenzen.

Der Fassadenzwischenraum ist in südorientierter Lage einer hohen Solarstrahlung ausgesetzt. Dadurch entsteht ein vertikaler Temperaturgradient innerhalb des Zwischenraumes. Damit dieser im Programm erfasst werden kann, sind mehrere Zonen erforderlich. Der Fassadenzwischenraum wird daher in drei übereinanderliegende Zonen eingeteilt. Aktuelle Forschungsberichte bestätigen, dass die Unterteilung des Fassadenzwischenraumes von Doppelfassaden in EnergyPlus zu Ergebnissen führt, die dichter an der Realität liegen [28].

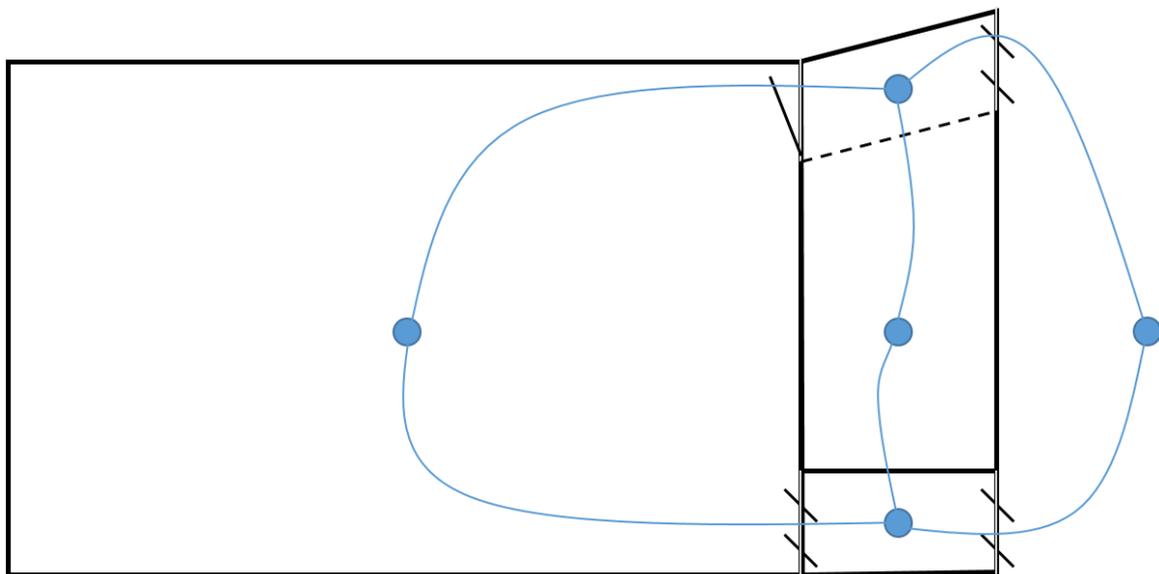


Abbildung 54: Illustration des Knotenmodells im Schnitt

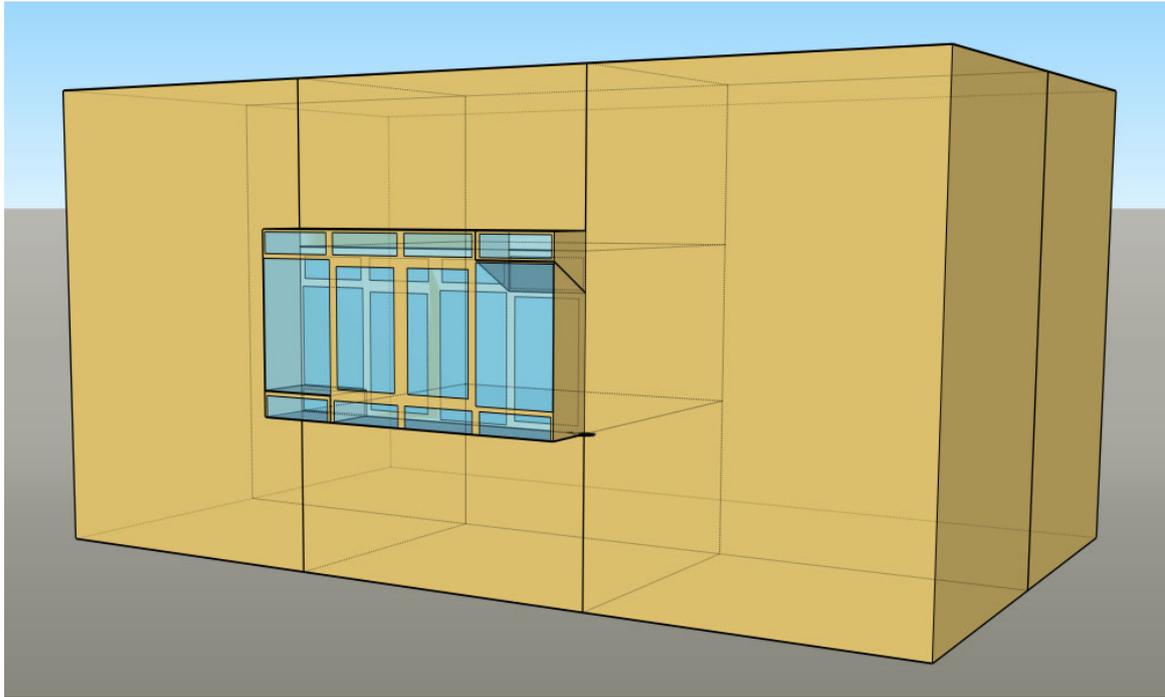


Abbildung 55: Isometrie der Bypass-Doppelfassade und der angrenzenden Gebäudezonen

6.1.5 Bauteilaufbauten

Die raumumschließenden Wände sind in Leichtbauweise mit Gipskartonwänden erstellt. Die Decke ist eine unverkleidete Betondecke, welche in einigen Bereichen als Hohlkörperdecke ausgebildet ist. Der Fußbodenaufbau besteht aus einem 20 cm dicken Doppelboden.

Die Sekundärfassade ist vollständig aus Einfachverglasung hergestellt. Aufgrund konstruktiver und sicherheitstechnischer Anforderungen sind unterschiedliche Glasstärken gewählt worden. Die Primärfassade besteht aus einer Dreifachisolierverglasung mit zwei low- ϵ -Beschichtungen. Es ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U_g = 0,60 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ sowie ein Gesamtenergiedurchlassgrad von $g = 0,45$.

6.1.6 Verschattung

Der ursprüngliche außenliegende Sonnenschutz des Universitätsgebäudes wurde beibehalten. Dieser Raffstore befindet sich jetzt windgeschützt im Fassadenzwischenraum. Der Luftspalt zwischen dem Sonnenschutz und der inneren Verglasungsebene ist 4,5 cm breit, wenn sich die Lamellen in horizontaler Position befinden. Aufgrund der dunklen Lamellenfarbe und der fortlaufenden Verschmutzung durch Staub (Hausstaub, Pollen, Feinstaub aus der Hafenluft) wird die Oberfläche des Sonnenschutzes mit einem Reflexionsgrad von 10% modelliert. In EnergyPlus ist es nicht möglich, einer nicht außenliegenden Fläche einen außenliegenden Sonnenschutz zuzuweisen. Aus diesem Grund wird der Sonnenschutz als innenliegend mit dem Flächenbezug der Sekundärfassade modelliert mit einem entsprechend großen Abstand zwischen Verglasung und Sonnenschutz.

Der Lamellenwinkel wird, wie auch an der gebauten Bypass-Doppelfassade, anhand des Sonnenstandes nachgeführt (siehe Kapitel 3.4.9).



Abbildung 56: Blick in den Fassadenzwischenraum mit heruntergefahrenem Sonnenschutz

6.1.7 Interne Lasten

Die Modellierung der internen Lasten wird im Rahmen der Modellvalidierung anhand der Messdaten durchgeführt (siehe Kapitel 6.2.2). Die Parameterstudie wird unabhängig von den Messdaten durchgeführt, damit die Ergebnisse auf ein möglichst großes Spektrum an Bauwerken übertragbar sind (siehe Kapitel 7.2.3.3).

6.1.8 Kohlenstoffdioxid

Die Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Umgebungsluft wird durch das Umweltbundesamt überwacht. Im Jahre 2017 hat das Umweltbundesamt eine Konzentration von 404,2 ppm auf der Zugspitze veröffentlicht. Dieser Standort gilt für die Bundesrepublik Deutschland als besonders repräsentativ, „weil er dauerhaft in der freien Troposphäre liegt“ [29]. Zum Vergleich lag in demselben Zeitraum der globale Referenzwert der Messstation Mauna Loa (Hawaii) bei 401,9 ppm.

Der CO₂-Anstieg der Raumluft durch die Atmung wird von EnergyPlus mit $3,82 \times 10^{-8} \text{ m}^3/(\text{s W})$ in Anlehnung an die U.S. Amerikanische Normung vorgeschlagen. Bei einer metabolischen Rate des menschlichen Körpers von 125 W und der Annahme, dass die Atemluft rund 4% CO₂ aufweist, entspricht dies einem Atemminutenvolumen von 7,2 Litern je Minute. Dieser Wert deckt sich mit

durchschnittlichen Angaben zur menschlichen Atmung. Daher wird der CO₂-Anstieg der Raumluft entsprechend berücksichtigt.

6.1.9 Infiltration

Zur Abschätzung des Infiltrationsluftwechsels in dem Büroraum und in dem Fassadenzwischenraum werden einige Tracergas-Messungen durchgeführt. Bei vollständig geschlossenen Fenstern und Türen wird eine geringe Menge Schwefelhexafluorid (SF₆) in den Raum injiziert und mit der Raumluft gut durchmischt. Über den Konzentrationsabfall des Gases kann auf den stattfindenden Luftwechsel geschlossen werden. Details über den Ablauf und den physikalischen sowie mathematischen Hintergrund dieser Messungen sind in [30] sowie [31] zu finden.

Für den Büroraum ergibt sich ein mittlerer Infiltrationsluftwechsel von 0,21 h⁻¹. Für den Fassadenzwischenraum ergibt sich ein mittlerer Luftwechsel durch Infiltration von 2,88 h⁻¹. Der deutlich höhere Infiltrationsluftwechsel im Fassadenzwischenraum ist maßgeblich auf zwei Gründe zurückzuführen:

- Die Außenlamellen haben keine Dichtlippen und schließen daher nicht vollständig luftdicht
- Die Sekundärfassade ist direkt den Umwelteinflüssen ausgesetzt und hat daher deutlich größere Druckdifferenzen nach außen als der Büroraum zum Fassadenzwischenraum hin.

In der Simulationsumgebung EnergyPlus wird die Infiltration für jeden Fenstertyp separat über das Potenzgesetz berücksichtigt und für jeden Zeitschritt in Abhängigkeit der klimatischen Randbedingungen ermittelt:

$$\dot{m}_{inf} = C \Delta P^n \quad (6.1)$$

Mit

C Strömungskoeffizient [kg/(s m Paⁿ)]

ΔP Druckdifferenz an der Lüftungsöffnung [Pa]

n Strömungsexponent [-]

Der Strömungskoeffizient C ist abhängig von dem Fenstertyp, der Dichtigkeit der umlaufenden Dichtungen sowie von der Konstruktion der anschließenden Bauteile. In [32] wird für Dreh- und Kippfenster ein Wert von 0,000386 kg/(s*m) dokumentiert. Für die äußeren Lamellen wird entsprechend der Ergebnisse der Infiltrationsmessungen ein deutlich höherer Wert angesetzt. In diesem Projekt werden daher Strömungskoeffizienten von $C = 0,000386$ kg/(s*m) für Öffnungen in der Primärfassade bzw. $C = 0,00386$ kg/(s*m) für Öffnungen in der Sekundärfassade angesetzt.

Der Strömungsexponent n liegt im Bereich zwischen 0,5 für vollständig turbulenten Durchfluss und 1,0 für vollständig laminaren Durchfluss. Im Allgemeinen wird für Fenster- und Türöffnungen ein Exponent von 0,65 angesetzt.

6.1.10 Natürliche Lüftung

Luftbewegungen zwischen den Zonen eines Gebäudes werden in dem Simulationsprogramm EnergyPlus durch ein Knotenmodell berechnet („*Airflow Network*“). Dieses Modell entsteht durch eine Abstrahierung der thermischen Zonen zu jeweils einem Knoten (siehe Abbildung 54). Die Knoten selbst werden durch Strömungselemente verbunden. Die Strömungselemente stellen die Lüftungsöffnungen (Fenster, Türen), Undichtigkeiten sowie ggf. mechanische Lüftungskomponenten dar.

Jedem Knoten werden Strömungseigenschaften zugewiesen, um die antreibenden Druckdifferenzen zu ermitteln. Die Lüftungsöffnungen bilden die Strömungswiderstände. Über diese Zusammenhänge wird die sich einstellende Luftströmung zwischen den einzelnen thermischen Zonen nach Gleichung 6.2 iterativ bestimmt.

$$\dot{m}_i = C_i \rho \frac{\Delta P_i}{\mu} \quad (6.2)$$

Mit

C_i	Strömungskoeffizient [m ³]
ρ	Dichte des Fluides [kg/m ³]
ΔP_i	Druckdifferenz an der Lüftungsöffnung [Pa]
μ	Viskosität des Mediums [Pa s]

Antreibende Kräfte natürlicher Lüftung sind Druckdifferenzen infolge von Temperaturunterschieden und Wind. Hinzu kommen Einflüsse aus lokalen Windverwirbelungen in der Nähe der Lüftungsöffnungen. Die Zonentemperaturen werden aus den Wärmebilanz-Berechnungen bestimmt. Die antreibenden Kräfte aus Wind können über zwei Methoden berücksichtigt werden:

- 1) Wenn die Winddruckbeiwerte c_p für die komplette Gebäudehülle bekannt sind, können diese eingegeben und in der Berechnung berücksichtigt werden.
- 2) Sind die genauen Winddruckbeiwerte nicht bekannt, kann mit einem vereinfachten Ansatz gerechnet werden. Bei diesem Ansatz wird jeweils ein durchschnittlicher Winddruckbeiwert für jede der vier Gebäudeseiten sowie das Dach ermittelt. Es wird daher empfohlen, diese Methode ausschließlich bei quaderförmigen Gebäuden anzuwenden. Die Ermittlung der Winddruckbeiwerte erfolgt für Gebäude, deren Höhe niedriger ist als das Dreifache der kürzeren Grundrisskante, nach folgendem Zusammenhang [33]:

$$c_{p,n} = 0,6 * \ln \left[\begin{array}{l} 1,248 - 0,703 \sin(\alpha/2) - 1,175 \sin^2(\alpha) + 0,131 \sin^3(2\alpha G) \\ + 0,769 \cos(\alpha/2) + 0,07 G^2 \sin^2(\alpha/2) + 0,717 \cos^2(\alpha/2) \end{array} \right] \quad (6.3)$$

Mit

α	Winkel zwischen der Windanströmrichtung und der Flächennormale der betrachteten Fassade [°]
----------	---

- G Natürlicher Logarithmus aus dem Längenverhältnis der betrachteten Fassade und der angrenzenden Fassade [-]
- n Index der Windanströmrichtung in 30°-Schritten [-]

Die Untersuchungen dieses Projekts beschränken sich auf Kastenfassaden. Dieser Doppelfassadentyp zeichnet sich dadurch aus, dass alle Lüftungsöffnungen relativ dicht beisammen liegen (zum Vergleich: Bei einer Schachtfassade liegen interagierende Öffnungen im oberen und unteren Bereich der Fassade). Es wird daher angenommen, dass die realen Winddruckbeiwerte an allen Öffnungen nahezu denselben Wert haben. Aus diesem Grund ist der vereinfachte Berechnungsansatz unter der Verwendung eines mittleren Winddruckbeiwertes hinreichend genau. Der Einfluss von lokalen Verwirbelungen durch Wind, welcher bei einseitiger natürlicher Lüftung signifikant ist [34], bleibt davon unberührt.

Die Strömungswiderstände einer Lüftungsöffnung werden in EnergyPlus durch den Strömungsbeiwert c_D („discharge coefficient“) berücksichtigt. Dieser Wert beschreibt das Verhältnis aus dem tatsächlichen Durchfluss Q und dem verlustfreien Durchfluss und wird wie folgt definiert:

$$Q = c_D A_{geo} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (6.4)$$

Mit

- c_D Strömungsbeiwert der betrachteten Lüftungsöffnung [-]
- A_{geo} Geometrischer Öffnungsquerschnitt (bei Fenstern in der Regel die rechteckige Öffnung) [m²]
- ΔP Druckdifferenz an der Lüftungsöffnung [Pa]
- ρ Dichte des Fluids [kg/m³]

Für jeden Öffnungstyp ist die Eingabe eines Strömungsbeiwertes erforderlich. Dieser Wert ist im Rahmen der Strömungssimulation konstant. Tatsächlich ist c_D jedoch keine konstante Eigenschaft eines Fensters, sondern ist neben den geometrischen Eigenschaften und dem Öffnungstyp auch von variablen Größen wie der Strömungsrichtung, dem Windanströmwinkel und der Turbulenzintensität (Reynolds-Zahl) abhängig [35] [36] [37].

Die Größe des Strömungsbeiwertes ist Gegenstand von vielen Forschungsprojekten. Für eine scharfkantige rechteckige Öffnung beträgt der Wert 0,61. Für andere Öffnungstypen ist eine kleine Auswahl an Größenordnungen in Veröffentlichungen zu finden [30] [38]. Für dieses Projekt ist die Größenordnung aus vorhandener Literatur entnommen und im Rahmen der Modellvalidierung genauer festgelegt worden. Die verwendeten Strömungsbeiwerte c_D sind in Tabelle 22 zu finden.

Wie in Gleichung 6.4 zu erkennen ist, beeinflusst das Produkt $c_D A_{geo}$ die Größe des Luftvolumenstroms. Die einzelnen Größen c_D oder A_{geo} reichen nicht aus, um eine Aussage über die Effizienz

der natürlichen Lüftung zu treffen. Es ist jedoch hilfreich, eine einzige Größe als Grundlage für Vergleiche heranziehen zu können. Daher wird die effektive Öffnungsfläche A_{eff} verwendet, welche einer äquivalenten verlustfreien Lüftungsöffnung ($c_D = 1,0$) entspricht⁴:

$$A_{eff} = c_D A_{geo} \quad (6.5)$$

Die folgende Darstellung veranschaulicht die in der Literatur verwendeten Zusammenhänge am Beispiel eines Kippfensters.

Tabelle 21: Bezeichnung der Öffnungsflächen

	<p>Darstellung eines geöffneten Kippfensters mit Markierung der geometrischen Fensterfläche A_{geo}. Der Durchflussbeiwert berücksichtigt die Einflüsse der Öffnungsart und des Öffnungswinkels.</p> $A_{eff} = c_D A_{geo}$
	<p>Darstellung der äquivalenten effektiven Öffnungsfläche A_{eff} ohne strömungsbeeinflussende Elemente. Der Durchflussbeiwert beträgt in diesem Fall $c_D = 1,0$.</p> <p>Hinweis: Eine reale, rechteckige Öffnung hat einen Durchflussbeiwert von $c_D = 0,61$.</p>
	<p>In anderen Projekten wird häufig die der Strömung zur Verfügung stehende Fläche als A_{eff} bezeichnet. Diese Bezeichnung wird in dem vorliegenden Projekt <u>nicht</u> verwendet.</p>

Der Strömungsbeiwert für die **Bypass-Lamellen** (jeweils innen und außen) ist mit einem Wert von 0,06 relativ gering. Dieser Wert schließt die Strömungswiderstände durch die im Bypass-Kanal installierten Schallabsorber mit ein. Die Bypass-Lamellen in der äußeren Fassadenebene weisen die gleiche Geometrie wie die Lamellen des Zwischenraumes auf (siehe Abbildung 58). Die Bypass-Lamellen in der inneren Fassadenebene haben denselben Öffnungsmechanismus, jedoch sind die Elemente aufgrund ihrer wärmedämmenden Konstruktion deutlich dicker.

⁴ Diese Definition wird in der Wissenschaft nicht einheitlich verwendet. Viele Autoren verwenden eigene Definitionen für effektive Querschnittsflächen

Die **inneren Kippfenster** (siehe Abbildung 57) haben einen Öffnungswinkel von 20° . Für diesen Öffnungswinkel ergibt sich nach [39] ein Öffnungsbeiwert von 0,18. Im Laufe der Modellvalidierung hat sich für die Einbausituation im Testraum ein Wert von $c_D = 0,13$ ergeben. Dieser liegt rund ein Drittel unterhalb des Vergleichswertes aus der Literatur. Dies ist durch die tiefen Fassadenpfosten zu erklären, welche einer Fensterlaibung ähneln (siehe Abbildung 3, Innenansicht den Büroraumes).

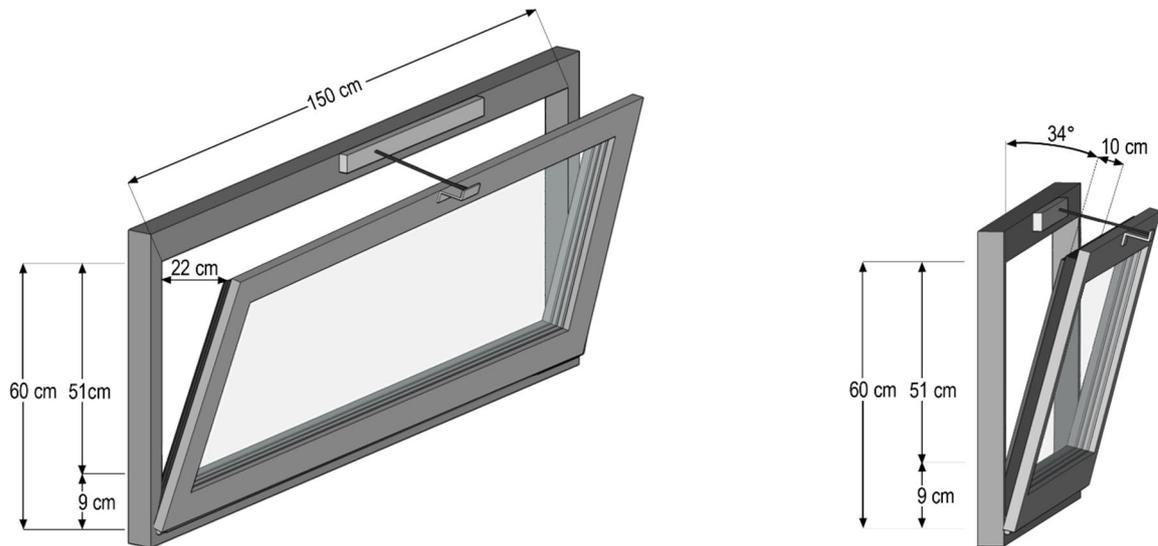


Abbildung 57: Geometrie der inneren Kippfenster

Die **Lamellenfenster in der Sekundärfassade** haben mit einem Strömungsbeiwert von 0,58 die günstigste Strömungssituation. Wenn die Lamellen vollständig geöffnet sind ergibt sich ein Öffnungswinkel von 78° (siehe Abbildung 58). Der Einfluss der Glasscheiben ist daher relativ gering, wodurch der Strömungsbeiwert einer scharfkantigen rechteckigen Öffnung ähnelt.

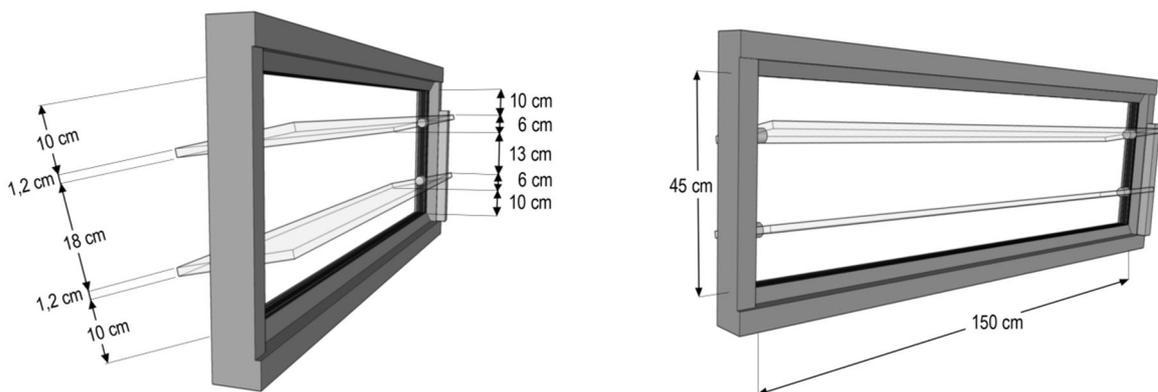


Abbildung 58: Geometrie der äußeren Lamellenfenster

Tabelle 22: Übersicht der Durchflussbeiwerte c_D

Fenstertyp	Bypass	Kippfenster	Lamellenfenster
Strömungsbeiwert c_D [-]	0,06	0,13	0,58

6.2 Modellvalidierung anhand von Messdaten

6.2.1 Ziel

Thermische Gebäudesimulationen ermöglichen das Abbilden von komplexen physikalischen Zusammenhängen unter zeitlich veränderlichen Randbedingungen. Mit einer Vielzahl an Parametern wurde das Computermodell erstellt. Die Qualität von den Ergebnissen ist von der Genauigkeit der Eingaben abhängig („garbage in – garbage out“). Für diese Studie sind die Parameter im Vorfeld so genau wie möglich festgelegt worden. Hierfür sind der Stand der Technik, Programmbeschreibungen und Erfahrungswerte verwendet worden. Um dieses Modell an die Besonderheiten der Bypass-Doppelfassade anzupassen, wurden die im Projekt gemessenen Daten mit den Simulationsergebnissen verglichen. Bei größeren Abweichungen wurden kleine Anpassungen in den Einstellungen vorgenommen. Der Validierungsprozess und die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dokumentiert.

6.2.2 Modellierung der internen Lasten

Die **Personenbelegung** wird entsprechend der realen Büronutzung mit Hilfe der Datenaufzeichnung abgebildet. Die Wärmeabgabe durch Personen wird nach DIN EN 13779 [12] mit einer Gesamtwärme (metabolische Rate) von 125 Watt pro Person berücksichtigt. Der Anteil latenter Wärme nimmt mit steigender Umgebungslufttemperatur zu. Die sensible Wärme wird mit einem Strahlungsanteil von 50% sowie einem Konventionsanteil von 50% berücksichtigt.

$$\text{Metabolische Rate} = \text{Sensible Wärme} + \text{Latente Wärme} \quad (6.6)$$

$$\text{Sensible Wärme} = \text{Strahlungsanteil} + \text{Konventionsanteil} \quad (6.7)$$

Die Leistungsaufnahme der **Beleuchtung** wird über einen Stromzähler separat erfasst. Entsprechend der installierten Leuchtmittel (6 Hängelampen mit jeweils 2 Leuchtstoffröhren) entspricht die maximale ungedimmte Leistung 350 Watt. Die Leuchtkörper verfügen über zwei integrierte Helligkeitssensoren (siehe Abbildung 59) und sind stufenlos dimmbar. Diese Konstantlichtregelung wird in der Modellierung berücksichtigt. Der sichtbare Strahlungsanteil der Beleuchtungsenergie wird nach [40] mit 18% angenommen. Der nicht sichtbare Strahlungsanteil beträgt 72% und 10% der Beleuchtungsenergie wird über Konvektion an die Raumlufte abgegeben.

$$\begin{aligned} \text{Beleuchtungsenergie} = \\ \text{Strahlung (sichtbar + nicht sichtbar)} + \text{Konvektion} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Über einen Präsenzmelder wird sichergestellt, dass die Beleuchtung nur dann in Betrieb ist, wenn Personen im Raum anwesend sind. Dies wird in der Modellierung entsprechend berücksichtigt.

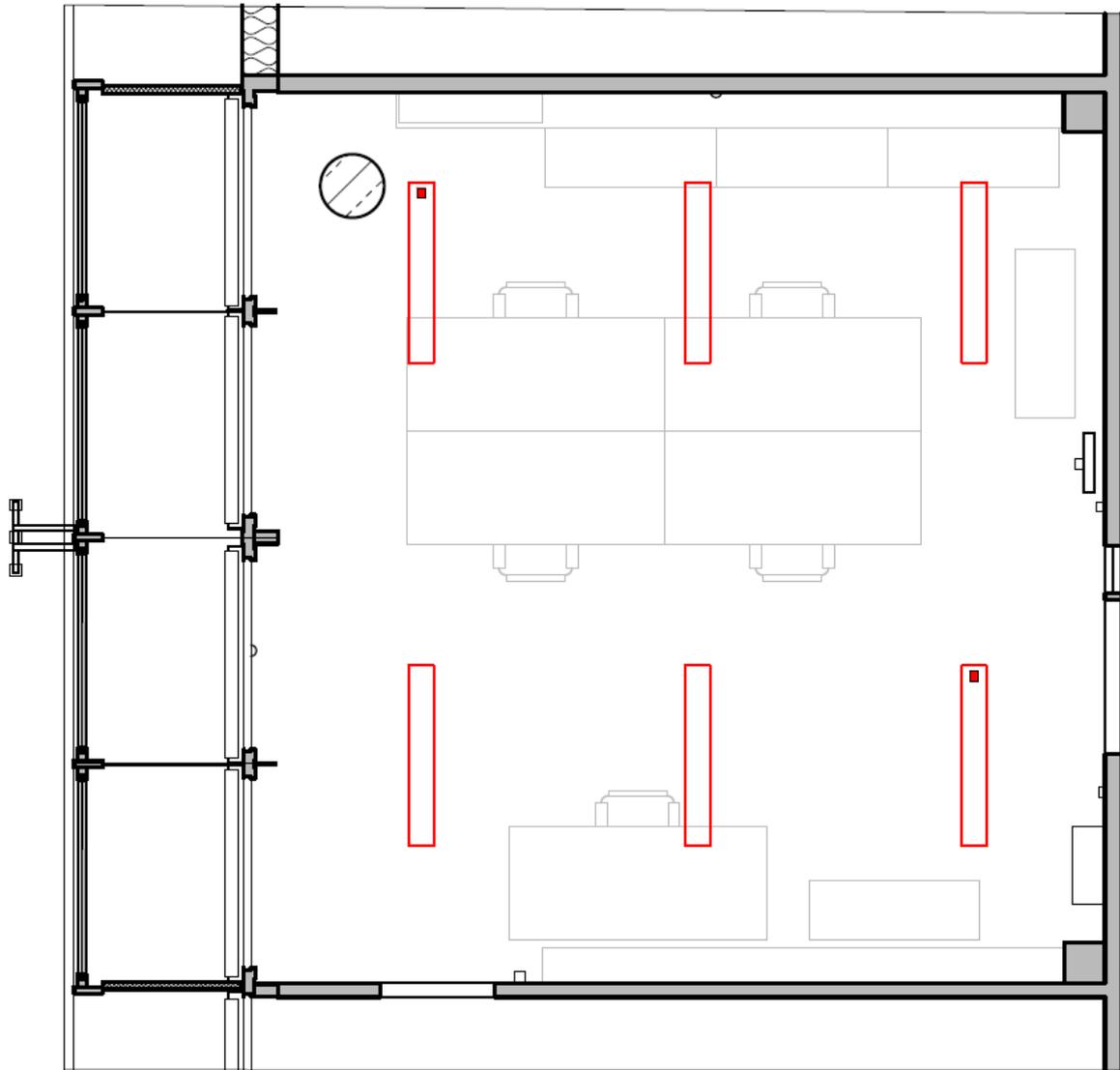


Abbildung 59: Grundriss des Büroraumes mit Markierung der sechs Lampen und der zwei Messpunkte für die Beleuchtungsstärke

Die internen Lasten aus den **sonstigen Verbrauchern** (überwiegend Bürogeräte und Stand-By-Leistung für das Bussystem) werden aus der gesamten Leistungsaufnahme für den Büroraum abzüglich der Beleuchtungsenergie erfasst.

Der **Heizkörper des Büroraumes** verfügt über einen Wärmemengenzähler. Mit jeweils 50% Strahlungs- und Konvektionsanteil wird die Wärmeabgabe des Heizkörpers in der Modellvalidierung entsprechend der gemessenen Daten berücksichtigt.

6.2.3 Fassadensteuerung

Alle öffenbaren Fenster, der Sonnenschutz sowie die Türen zum Fassadenzwischenraum und die Schiebetüren in der Sekundärfassade werden anhand der aufgezeichneten Öffnungszustände gesteuert.

6.2.4 Untersuchte Parameter

Gegenstand der Modellvalidierung sind die Effizienz der natürlichen Lüftung, die Größe der Infiltration und der Einfluss der Hohlkörperdecke auf den Wärmeaustausch mit der darüber liegenden Zone.

Die **Effizienz der natürlichen Lüftung** wird über die Durchflussbeiwerte c_D bestimmt. Für jeden Fenstertyp wird ein konstanter Wert angesetzt. Die Werte für die Lüftungsöffnungen Bypass, Kippfenster sowie Lamellen sind in Kapitel 6.1.10 erläutert. Für die Bypässe werden zwei signifikant unterschiedliche Bereiche für den Durchflussbeiwert untersucht. In einer ersten Untersuchung wird eine grobe Abschätzung der Größenordnung zwischen den Werten 0,1 und 0,6 vorgenommen. Der Grund für die Mehrstufigkeit ist der unbekannte Einfluss der in den Bypass-Kanälen verbauten Schallabsorber. Es hat sich herausgestellt, dass geringe Durchflussbeiwerte Ergebnisse liefern, welche deutlich dichter an den Messwerten liegen. In einer zweiten Phase werden daher niedrige Werte im Bereich von 0,05 bis 0,10 genauer untersucht.

Für die Modellvalidierung werden zusätzlich Werte für die Balkontüren in der Primärfassade sowie für die Schiebefenster in der Sekundärfassade benötigt, da diese zwischenzeitlich geöffnet sind. Diese Öffnungstypen sind für die folgende Parameterstudie jedoch nicht von Belangen, da der Steuerungsalgorithmus der Fassadensteuerung ausschließlich die Bypässe, Kippfenster sowie Lamellenfenster berücksichtigt.

Die **Größe des Infiltrationsluftwechsels** wird anhand des Potenzgesetzes beschrieben (siehe Kapitel 6.1.9). Als Strömungsexponent wird der Wert $n = 0,65$ konstant gehalten. Mit Hilfe des Strömungskoeffizienten C wird die Größe des Infiltrationsluftwechsels beeinflusst. Das Variationspektrum liegt zwischen dem von EnergyPlus empfohlenen Wert $C = 0,0000456 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$ und dem in [32] dokumentierten Wert von $C = 0,000386 \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$. Für den Zwischenraum wurde analog zu den Ergebnissen der Tracergas-Messungen jeweils der zehnfache Wert angesetzt. Im Laufe der Modellvalidierung hat sich herausgestellt, dass die größeren Werte die Realität besser abbilden. Die eigentliche Dichtebene der Gebäudehülle ist durch die Demontage von zwei Fenstern zum nachträglichen Einbau der Bypässe sowie durch die vielen Kabeldurchführungen etwas verschlechtert worden.

Der **Einfluss der Hohlkörperdecke** auf den Wärmeaustausch mit der darüber liegenden Zone leitet sich aus den Lufthohlkörpern ab, die in einem großen Bereich der Decke liegen. Durch die eingeschlossene Luft verringert sich die Wärmeleitfähigkeit des Betons. In EnergyPlus werden Bauteile als homogene Bauteile berücksichtigt. Insofern wird die Betondecke als Massivdecke modelliert. Der darüber liegende Doppelboden wird über eine ruhende Luftschicht abgebildet. Diese hat einen Wärmedurchgangswiderstand von $0,16 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Im Rahmen der Modellvalidierung wird dieser Wert variiert und schlussendlich auf $0,20 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ festgelegt. Durch diese Erhöhung wird der zusätzliche Dämmeffekt der in der Betondecke eingeschlossenen Hohlkörper pauschal berücksichtigt.

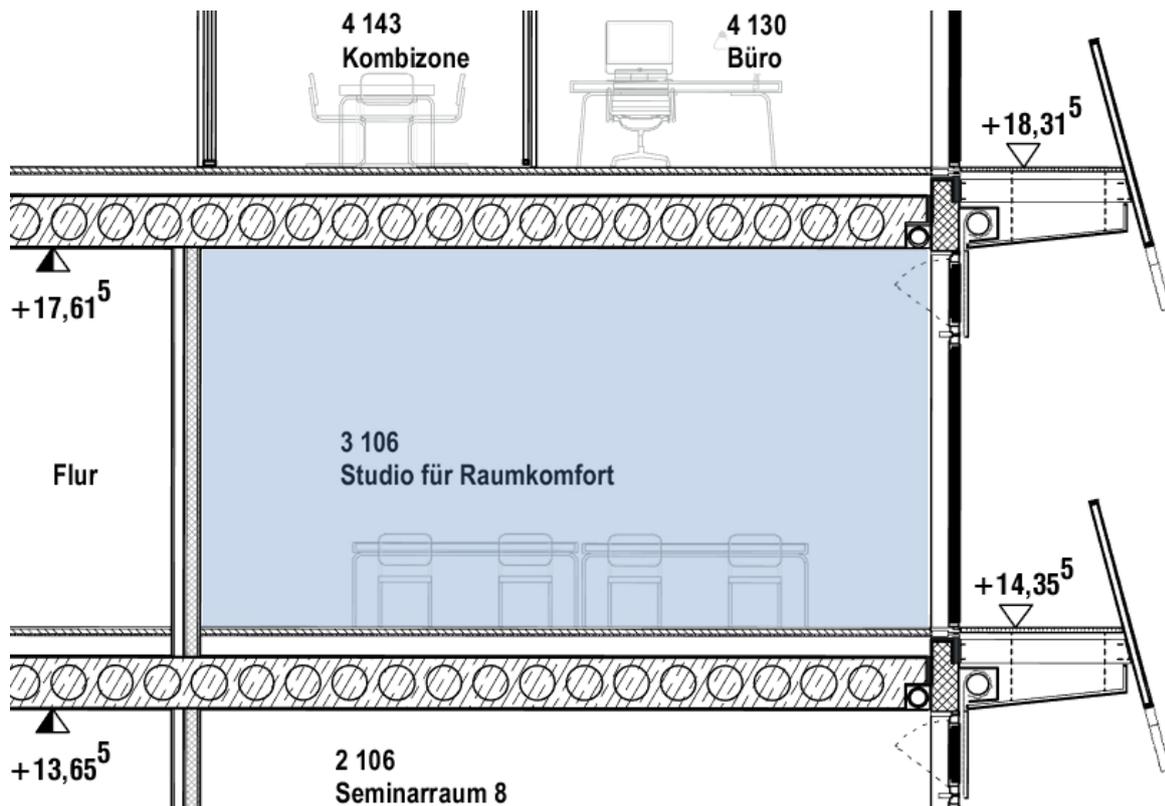


Abbildung 60: Ausschnitt aus dem Gebäudeschnitt vor dem Bau der Doppelfassade mit Darstellung der Hohlkörperdecke

Tabelle 23 fasst den Untersuchungsbereich der Modellvalidierung zusammen.

Tabelle 23: Übersicht der in der Modellvalidierung untersuchten Parameter

Parameter	Variationsbereich	Schrittweite	Anzahl Parameter	Wert final
<u>Durchflussbeiwert c_D [-]</u>				
Bypass (Schritt 1)	0,1 – 0,6	0,1	6	-
Bypass (Schritt 2)	0,05 – 0,1	0,005	11	0,060
Kippfenster	0,10 – 0,20	0,01	11	0,13
Lamellen	0,4 – 0,6	0,02	11	0,58
Balkontür	0,30 – 0,40	0,05	3	0,35
Schiebetür	0,45 – 0,55	0,05	3	0,55
<u>Strömungskoeffizient C [kg/(s m)]</u>				
Bypass	0,0000456 und	-	2	0,0000456
Kippfenster	0,000386			0,000386
Lamellen	Zehnfaches n_{inf} von dem Büroraum			0,00386
<u>Einfluss der Hohlkörper [m²K/W]</u>				
Durchgangswiderstand R	0,10 – 0,30	0,05	5	0,20

6.2.5 Ablauf des Simulationsprozesses

Die Simulationsergebnisse können in vielerlei Hinsicht ausgewertet und mit Messdaten verglichen werden. Über ausgewählte Zeiträume von wenigen Tagen mit definierten und nicht veränderlichen Fensterstellungen (z.B. alle Fenster geschlossen) erreicht die Modellgenauigkeit mittlere quadratische Abweichungen von 0,06 K². Die Modellvalidierung wird jedoch mit der Zielsetzung durchgeführt, dass die Ergebnisse für das gesamte Jahr eine möglichst hohe Aussagekraft besitzen. Aus diesem Grund wird ein möglichst langer, nicht unterbrochener Zeitraum simuliert und ausgewertet.

Die Aufzeichnung der Messdaten läuft seit November 2016 ohne größere Unterbrechungen. Es kommt jedoch vor, dass einzelne Sensoren zeitweilig keine Daten liefern. Ein Grund hierfür ist, dass für die Wartung oder Reinigung elektrischer Komponenten kurzzeitig die Stromzufuhr des Systems unterbrochen wurde. Alle Daten sind in 5-Minuten Intervallen als Mittelwert aufgezeichnet. Für einen einzigen fehlenden Datensatz ist der entsprechende Wert aus den benachbarten Messwerten interpoliert. Für längere Unterbrechungen erfolgt keine Interpolation, um die Aussagekraft der aufgezeichneten Daten nicht zu beeinflussen. Der längste Zeitraum ohne fehlende Daten ist vom 04.04.2017 bis zum 15.06.2017 (73 Tage). Die Messwerte werden in die Wetterdatei als Eingangsgröße übernommen. Die anderen Zeiträume des Jahres werden mit den statistischen Klimadaten aus der Wetterdatei des Standortes Hamburg gefüllt. In die folgenden Auswertungen fließt ausschließlich der oben genannte Zeitraum ein. Damit der Raum im Modell zu Beginn des Zeitraumes

möglichst exakt die Eigenschaften des Büroraumes aufweist (Temperaturen, Speichermassen, etc.), erfolgt die Simulation nach dem folgenden Ablauf:

- a) 01. Jan. bis 01. Apr.
„*Aufwärmphase*“: Die Simulation wird anhand der Wetterdaten für die Stadt Hamburg durchgeführt. Diese Daten werden nicht ausgewertet.
- b) 02. Apr. bis 03. Apr.
„*Vorkonditionierung*“: Die Lufttemperaturen im Raum, in den Zonen des Zwischenraumes und in den Nachbarräumen werden in 5-Minuten-Schritten exakt auf den gemessenen Wert konditioniert. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass zu Beginn des Auswertungszeitraumes möglichst exakt die realen Bedingungen herrschen. Diese Daten werden nicht ausgewertet.
- c) 04. Apr. bis 15. Jun.
„*Validierungsphase*“: Die Simulation wird anhand der aus den Messwerten erstellten Wetterdatei durchgeführt. Damit ein realistischer Wärmetransport zwischen den benachbarten Zonen und dem betrachteten Büroraum untersucht werden kann, werden die Nachbarräume für diesen Zeitraum in 5-Minuten-Schritten auf die gemessenen Lufttemperaturen konditioniert.
- d) 16. Jun. bis 31.12.
„*Auslaufphase*“: Die Simulation wird anhand der Wetterdatei für den Standort Hamburg beendet. Diese Daten werden nicht ausgewertet.

6.2.6 Abweichungen des validierten Modells zu den Messwerten

Die Anpassung der Parameter erfolgt mit dem Ziel, primär den Büroraum ideal abbilden zu können. Das thermische Verhalten des Fassadenzwischenraums ist enorm wichtig, damit auch der Büroraum realitätsgetreu abgebildet werden kann. Zeitweise Abweichungen im Zwischenraum werden jedoch toleriert, sofern das Verhalten des Raumes den Messwerten entspricht. Die Abweichungen zwischen den gemessenen Temperaturen sowie den Simulationsergebnissen sind in Tabelle 24 zusammengefasst. Im Anschluss daran folgen detaillierte Analysen zu der Größe und den Gründen der Abweichungen.

Tabelle 24: Zusammenfassung der Validierungsergebnisse

	Raum	Zwischenraum
Mittlere Abweichung	-0,17 K	-0,97 K
Mittelwert von den Beträgen der Abweichungen	0,75 K	1,54 K
Mittlere quadratische Abweichung	0,95 K ²	5,00 K ²
Häufigkeit Ergebnisse im Bereich der Genauigkeit der Sensoren	73% (± 1,0 K)	28% (± 0,5 K)
Häufigkeit Ergebnisse im Bereich Genauigkeit ± 1,0 K	97%	64%
„Ausreißer“: Abweichung > ± 4,0 K	0,06%	6,50%

Der simulierte **Temperaturverlauf des Büroraumes** zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten. Fehlerquellen für Abweichungen liegen in dem Modell sowie der klimatischen Datengrundlage, welche dem Modell zugrunde liegt und auch in der Genauigkeit der verwendeten Sensoren. Abbildung 61 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Temperaturabweichungen für den Büroraum. Mehr als zwei Drittel aller Ergebnisse liegen innerhalb des Genauigkeitsbereichs der Sensoren und können somit als nahezu fehlerfrei bewertet werden. 97% aller simulierten Temperaturergebnisse weichen um nicht mehr als 1 K von den Messwerten zuzüglich des Genauigkeitsbereichs der Sensoren ab. Abweichungen > ± 3 K treten nur in 0,26% der Fälle auf und Ausreißer (Abweichung > ± 4,0 K) gibt es mit 0,06% quasi nicht.

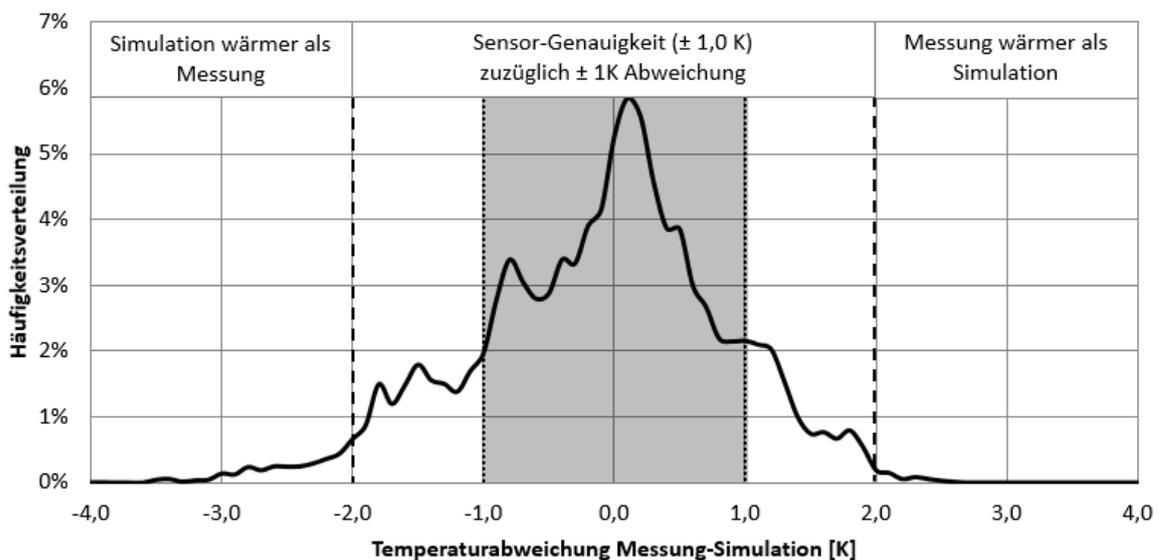


Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der Temperaturabweichungen für den Büroraum

Die **Ergebnisse für den Fassadenzwischenraum** zeigen eine ausreichend hohe Übereinstimmung mit den Messwerten. Der Betrag der Abweichung beträgt im Mittel 1,54 K. Eine Komfortanalyse ist mit diesen Abweichungen nicht sinnvoll, jedoch auch für den Fassadenzwischenraum nicht erforderlich. Die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen ist in Abbildung 62 dargestellt. Rund zwei

Drittel aller simulierten Temperaturen liegen im Bereich der Messwerte zuzüglich des Genauigkeitsbereichs der Sensoren. Mit einem Auftreten von 6,5% ist die Zahl der Ausreißer verhältnismäßig hoch. Da jedoch die Ergebnisse für den planungsrelevanten Büroraum eine sehr gute Übereinstimmung zeigen, werden die Abweichungen toleriert. Die höheren Abweichungen des Fassadenzwischenraumes werden auf folgende Gründe zurückgeführt:

- Die Doppelfassade des Testraumes an der HafenCity Universität ist nahezu südausgerichtet und dadurch sehr hoher solarer Strahlung ausgesetzt.
- Trotz eines umfangreich getesteten Strahlungsschutzes und eines zusätzlichen Ventilators zur Vermeidung von angestauter Luft um den Sensorkopf ist ein Einfluss der Solarstrahlung auf die Messergebnisse nicht vollständig auszuschließen.
- Die Lufttemperaturen im Fassadenzwischenraum reagieren sehr sensibel auf die Solarstrahlung. Der Grund hierfür ist die vollständig verglaste Außenhaut mit nur 10% Rahmenanteil sowie die Tatsache, dass quasi keine Speichermassen zur Dämpfung von Temperaturspitzen vorhanden sind.
- Die Simulation beruht auf einer Wetterdatei, welche die Klimadaten in Stundenmittelwerten beinhaltet. Durch die Mittelwertbildung gehen Spitzen-Werte verloren, sodass die Realität nicht exakt abgebildet werden kann.

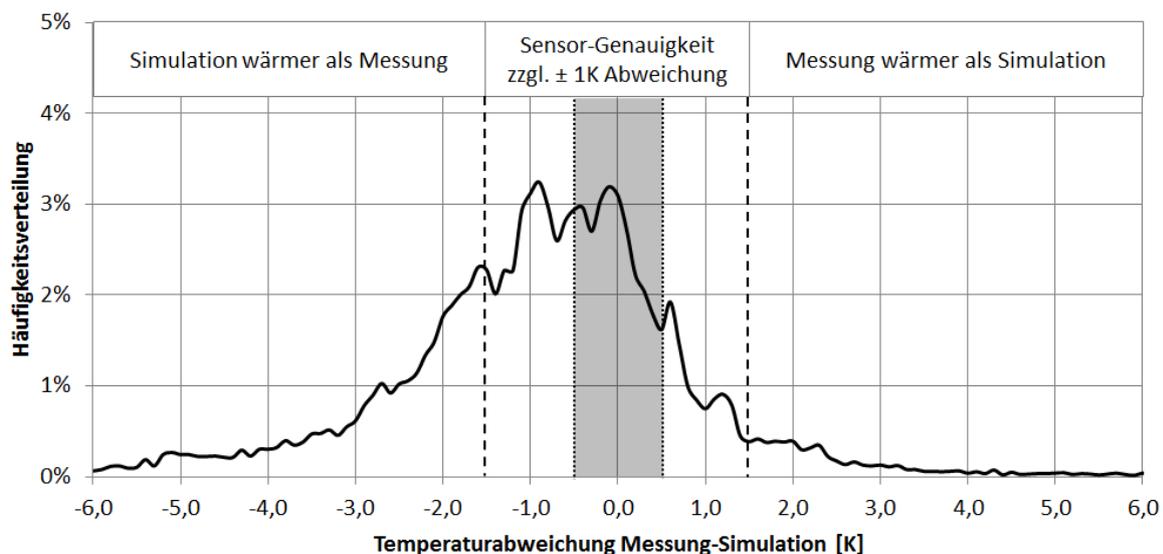


Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der Temperaturabweichungen für den Fassadenzwischenraum

6.2.7 Vor- und Nachteile eines real genutzten Raumes

Das Studio für Raumkomfort der HafenCity Universität wird zur Aufzeichnung von komfortbeeinflussenden Messgrößen genutzt. Gleichzeitig dient der Raum als Arbeitsplatz für überwiegend drei wissenschaftliche Mitarbeiter. Zeitweise waren auch vier bis fünf Personen in dem Raum tätig. Die Kombination von Laborraum und Arbeitsplatz bietet gleichermaßen Vor- sowie Nachteile.

Im Zusammenhang mit der durchgeführten Validierung des thermischen Gebäudemodells anhand von Messdaten erzeugt die reale Nutzung eine Reihe an Ungenauigkeiten. Beispielsweise betreten

Besucher den Raum, ohne den installierten Personenzähler zu nutzen. Kurzzeitiges Öffnen bzw. Schließen von Bürotüren erzeugt Querlüftungseinflüsse, die aufgrund des Lese-Intervalls des Busystems nicht erfasst werden. Darüber hinaus führt die Nutzung dazu, dass die Randbedingungen innerhalb des Raumes verändert werden und dadurch die Sensoren im geringen Maß beeinflusst werden können (z.B. Umstellen von Möbeln). Auch die in der Simulation angesetzte Wärmeabgabe durch die anwesenden Personen ist in Wirklichkeit nicht konstant und ändert sich mit der ausgeübten Tätigkeit.

Im Vergleich zu einer reinen Labornutzung sind die Mitarbeiter in einem Büro viele Stunden am Tag anwesend. Dies führt zu sehr interessanten Erkenntnissen, die aus den subjektiven Erlebnissen herrühren. Einige dieser Erkenntnisse werden exemplarisch genannt:

- Die Temperaturverteilung über die Raumtiefe wird sehr stark durch die Nutzer wahrgenommen. Besonders im Winter frieren die Personen an den Arbeitsplätzen nahe der Fassade, während Personen im Rauminnen das Raumklima als komfortabel empfinden. Diese Erkenntnis führte dazu, dass im Laufe des Projekts ein zusätzlicher Kombisensor in Fassadennähe installiert wurde.
- Luftbewegungen innerhalb des Raumes werden sehr stark wahrgenommen und sind keineswegs gleichmäßig verteilt. Es lässt sich auch kein gleichmäßiges, wiederkehrendes Strömungsmuster beobachten. Witterungsabhängig werden die Strömungen an den verschiedenen Arbeitsplätzen unterschiedlich stark wahrgenommen. Diese Effekte können in EnergyPlus nicht abgebildet werden. Eine detaillierte Strömungsanalyse mittels CFD (Computational Fluid Dynamics) wäre erforderlich.
- Das Temperaturempfinden jedes Menschen ist anders. Die Festlegung eines Komfortbereiches, wie es beispielsweise die DIN EN 15251 vorsieht, ist zwar zielführend in der Gebäudeplanung, in dem Gebäudebetrieb führt ein definierter Korridor jedoch dazu, dass gezwungenermaßen Einbußen in dem individuellen Komfortempfinden toleriert werden müssen. Aus diesem Grund ist die Fassadensteuerung in der Form entwickelt, dass eine Anpassung der Komfortraumtemperatur vorgenommen werden kann (vergleiche dazu Kapitel 3.4.11).
- Die Fassadensteuerung und deren Auswirkungen wurden von den Nutzern direkt wahrgenommen. Viele Steuerungsbefehle wurden immer wieder diskutiert und hinterfragt. So wurden notwendige Anpassungen bemerkt und es fand dadurch eine stetige Optimierung des Steuerungsalgorithmus über die Projektlaufzeit statt.

6.3 Bilanzierung einer Wärmerückgewinnung

Anhand des validierten Gebäudemodells wird eine mögliche Wärmerückgewinnung (WRG) bilanziert. Die potentielle Ersparnis an Heizenergie wird der tatsächlichen Heizenergie im Jahr 2017

gegenübergestellt. Zur Überwindung des zusätzlichen Druckverlustes durch den Baustein der Wärmerückgewinnung ist ein kleiner Lüfter erforderlich. Die zusätzliche Betriebsenergie wird berücksichtigt.

Das Gebäudemodell bestimmt aus dem zugrundeliegenden Strömungsnetzwerk den Massenstrom, welcher bei natürlicher Lüftung durch den oberen Bypass strömt. In diese Strömung kann ein dezentraler Lüfter mit Wärmerückgewinnung integriert werden (vergleiche Abbildung 4).

Zusammen mit der Temperaturdifferenz zwischen der Raumlufte und der Außenluft können die Lüftungswärmeverluste sowie eine potentielle Energieeinsparung ΔP_{Heiz} ermittelt werden.

$$\Delta P_{Heiz} = (\dot{m} c_L \Delta T) \eta_{WRG} - P_{el} \quad (6.9)$$

Mit

- \dot{m} Luftmassenstrom durch den oberen Bypass [kg/s]
- c_L Spezifische Wärmekapazität der Luft = 1005 [Ws/(kgK)]
- ΔT Temperaturdifferenz zwischen der Raumlufte und der Außenluft [K]
- η_{WRG} Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnung [-]
- P_{el} elektrische Betriebsenergie des Lüftungsgerätes [W]

Der folgenden Untersuchung liegt ein handelsübliches dezentrales Lüftungssystem zu Grunde, welches die folgenden Kenndaten besitzt.

Tabelle 25: Kenndaten des untersuchten Wärmetauschers

Stufe	Luftströmung [m ³ /h]	Leistungsaufnahme [W]	Wirkungsgrad
1	20	1,4	90%
2	40	2,3	90%
3	60	3,8	90%

Die Gegenüberstellung der möglichen Energieeinsparung durch eine Wärmerückgewinnung mit der tatsächlich gemessenen Heizenergie im Jahr 2017 ist in Abbildung 63 dargestellt. Die Jahressumme der gemessenen Heizenergie beträgt 361,9 kWh. Entgegen der Definition einer „Heizperiode“ war in den Monaten April sowie Oktober kein Heizen erforderlich. Eine mögliche Wärmerückgewinnung in den Monaten Januar bis März sowie November und Dezember beträgt 105,6 kWh. Die Betriebsenergie des Lüfters summiert sich in diesen fünf Monaten zu 5,8 kWh. Der Endenergiebedarf ließe sich durch den Einsatz einer dezentralen Wärmerückgewinnung um 27,6% reduzieren. Die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme ist aufgrund des generell sehr niedrigen Heizwärmebedarfs im Einzelfall zu bewerten unter Berücksichtigung des vorhandenen Heizsystems sowie des Installations- und Wartungsaufwands der dezentralen Lösung.

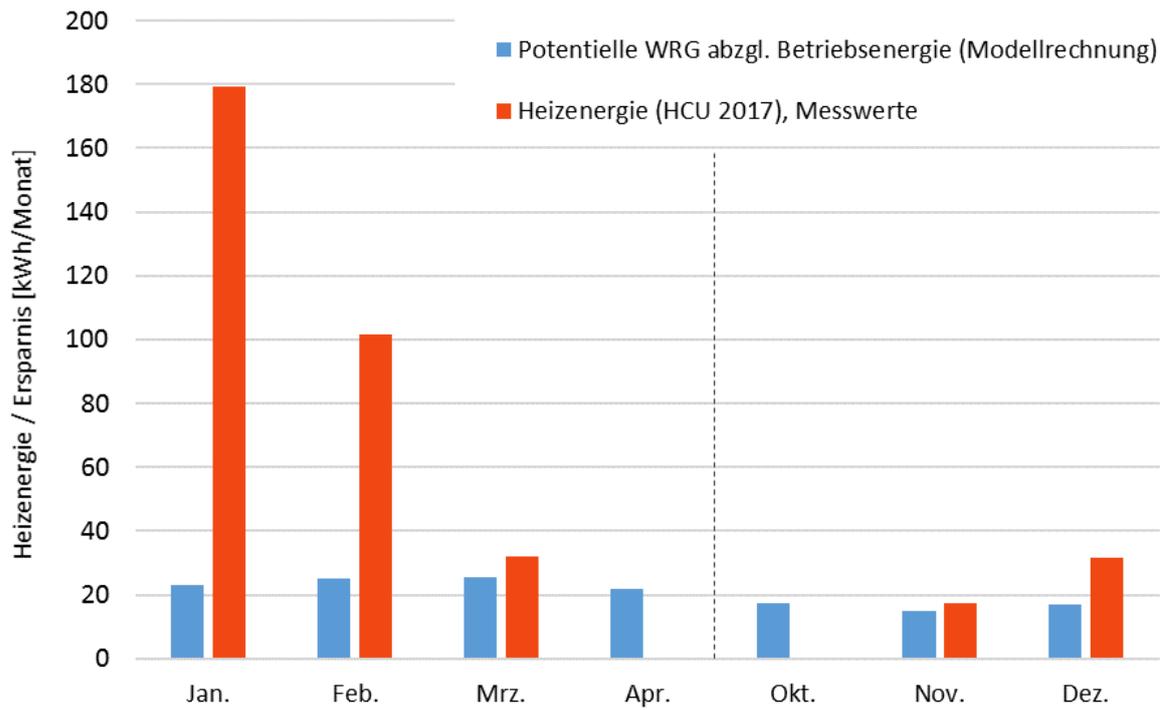


Abbildung 63: Gegenüberstellung der potentiellen Heizenergieerduzierung mit der tatsächlichen Heizenergie 2017

7 Parameterstudie

7.1 Zielfestlegung und Abgrenzung

Ziel der Parameterstudie ist die Quantifizierung von Zusammenhängen der planungsrelevanten Parameter. Der Fokus liegt auf dem sommerlichen Wärmeschutz des Büroraumes sowie der Reduzierung des Heizwärmebedarfes durch eine geschickte natürliche Lüftung.

In umfangreichen Simulationen werden ausgewählte Parameter variiert. Die Grundlage der Parameterstudie bildet das zuvor anhand der gesammelten Messdaten validierte Modell. Es ist zu erwarten, dass die Ergebnisse der Parameterstudie von der Realität in mindestens dem Maße abweichen, wie die Validierung es von den gesammelten Messdaten tut. Als ein maßgeblicher Grund hierfür sei erwähnt, dass die strömungsdynamischen Eigenschaften des Zwischenraumes durch die Zwischenraumtiefe und die Größe der Fensteröffnungen maßgeblich beeinflusst werden. Ebenfalls ist bekannt, dass die Strömungswiderstände, welche anhand eines konstanten *discharge coefficient* c_D in EnergyPlus definiert werden, nicht konstant sind (vergleiche Kapitel 6.1.10). Diese Abweichungen können jedoch akzeptiert werden, da

- a) die Modellvalidierung eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten zeigt, sodass die Abweichungen gering ausfallen und da
- b) das thermische Verhalten jedes Gebäudes sowohl von den klimatischen Randbedingungen als auch von dem Nutzerverhalten abhängig ist. Beides ist in der Planungsphase nicht zu beeinflussen, sodass das tatsächliche Verhalten des Gebäudes nie exakt bestimmt werden kann.

Die gebaute Bypass-Doppelfassade, welche dem validierten Modell zugrunde liegt, ist eine **Kastenfassade** vor einem Büroraum. Andere Doppelfassadentypen (z.B. Schachtfassade oder Korridorfassade) erstrecken sich über größere Gebäudeteile bzw. über mehrere Geschosse. Diese Fassadentypen werden erst im Rahmen des Anschlussprojektes untersucht (*EnOB: EnaPlanDF; Entwicklung eines allgemeingültigen Planungsleitfadens für natürlich belüftete Doppelfassaden*; Bearbeitungszeit 2018-2021).

7.2 Auswahl und Beschreibung der Parameter

7.2.1 Anforderungen der DIN 4108-2

Die nachfolgenden Randbedingungen sind den Empfehlungen für die Nachweisführung des sommerlichen Wärmeschutzes mit thermischen Gebäudesimulationsprogrammen der DIN 4108-2:2013-02 [26] entnommen. Diese Randbedingungen werden für alle Parametervariationen verwendet.

- Die Nutzungszeit beschränkt sich auf Mo.-Fr. in der Zeit von 07:00 Uhr – 18:00 Uhr ohne Pausenzeiten,
- Es wird jeweils ein ganzes Jahr, beginnend mit dem 1. Januar als Montag, simuliert,
- Feiertage und Ferienzeiten werden nicht berücksichtigt,
- Die Soll-Raumtemperatur in der Heizperiode beträgt 21°C. Es wird zusätzlich eine Nachtabsenkung von 4 K berücksichtigt zwischen 18:00 Uhr – 05:00 Uhr,
- Die Heizperiode wird festgelegt auf den Zeitraum von dem 01. Oktober – 30. April. Diese Anforderung ist nicht explizit in der DIN 4108-2 genannt. Ein Aussetzen der Heizperiode ist jedoch notwendig, damit eine effektive nächtliche Auskühlung im Sommer nicht durch das Einsetzen der Heizung unterbunden wird (Details dazu siehe Kapitel 7.2.6).
- Der Sonnenschutz unterliegt einer automatischen Sonnenschutzsteuerung. Ab einer Grenzbestrahlungsstärke (Globalstrahlung auf die Fensterfläche) von 150 W/m² für Nord-, Nordost- und Nordwestorientierte Fenster bzw. ab 200 W/m² für die restlichen Orientierungen schließt der Sonnenschutz vollständig und der Lamellenwinkel wird anhand des Sonnenstandes eingestellt (siehe Kapitel 3.4.9).

7.2.2 Umgebungsparameter

7.2.2.1 Standort

Die Untersuchungen werden jeweils für die Sommerklimaregionen A, B und C entsprechend der DIN 4108-2:2013-02 durchgeführt. Die Referenzstandorte innerhalb dieser Regionen werden anhand der Empfehlungen für thermische Gebäudesimulationsberechnungen ausgewählt und sind in Tabelle 26 zusammengefasst.

Die Daten für die Testreferenzjahre (TRY = Test Reference Year) sind im November 2010 vom Deutschen Wetterdienst veröffentlicht worden. Die Datenbasis stammt aus dem Beobachtungszeitraum 1988 – 2007. Aus diesen TRY-Daten werden Datensätze für die Simulation in EnergyPlus erstellt. Es werden keine Stadteffekte aufgeprägt und es erfolgt auch keine Anpassung zur Höhenkorrektur.

Tabelle 26: Standorte der Sommerklimaregionen

Sommerklimaregion	Testreferenzjahr (TRY)	Referenzstandort
A	TRY-Zone 2	Rostock
B	TRY-Zone 4	Potsdam
C	TRY-Zone 12	Mannheim

7.2.2.2 Gebäudeorientierung

Die Gebäudeorientierung beeinflusst maßgeblich die eintreffende Solarstrahlung. Aus diesem Grund wird die Gebäudeorientierung als Umgebungsparameter klassifiziert. Für den sommerlichen

Wärmeschutz werden im Regelfall Süd- oder Südwest orientierte Räume maßgebend. Doppelfassaden werden häufig aus Gründen eines verbesserten Schallschutzes gebaut. Dadurch kann es durchaus vorkommen, dass die Nordfassade eines Gebäudes eine Doppelfassade aufweist und die im Sommer kritischen Räume mit einschaligen Fassaden ausgestattet sind. Aus diesen Gründen werden in der Parameterstudie alle Himmelsrichtungen in 45° Schritten untersucht.

7.2.3 Gebäudeparameter

7.2.3.1 Geometrie des Gebäudekubus

Es wird ein quaderförmiges Gebäude mit den Abmessungen $B \times H \times T = 14,40$ bis $19,20$ m x $9,00$ m x $12,00$ m untersucht. Die Kubatur hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Verteilung der Winddruckbeiwerte c_p auf der Gebäudehülle. Wie in Kapitel 6.1.10 beschrieben, wird mit einem mittleren Winddruckbeiwert je Fassadenseite gerechnet. Der Winddruckbeiwert ist an allen Lüftungsöffnungen nahezu gleich, sodass sich die Ergebnisse auch auf andere Gebäudegeometrien und andere Abmessungen übertragen lassen.

7.2.3.2 Raumgeometrie

Die Arbeitsstättenrichtlinie ASR A1.2 [41] schreibt für Räume ab 100 m² Grundfläche eine **lichte Raumhöhe** von mindestens $3,00$ m vor. Es ist anzunehmen, dass ein Großteil der Gebäude Räume dieser Größenordnung besitzt (Großraumbüros, etc.). Es ist daher zweckmäßig, auch kleinere Räume mit dieser Geschosshöhe zu planen. Die Raumhöhe von $3,00$ m wird im Rahmen der Parameterstudie nicht geändert.

Typische Werte für **Raumtiefen** im Verwaltungsbau liegen zwischen 5 m und 6 m. Je tiefer ein Raum ist, desto größer ist der Energiebedarf für Kunstlicht. Auch die internen Wärmequellen steigen meist mit einer größeren Raumgrundfläche. Für die Parameterstudie wird eine Raumtiefe von $6,00$ m gewählt und nicht variiert.

Die **Raumbreite** beeinflusst proportional sowohl die Raumgrundfläche als auch den Verglasungsanteil sowie die offenbaren Fensterflächenanteile. Im Gegensatz dazu verändert sich die Speichermasse der Bauteile nicht linear, da zwei Innenwände von der Raumbreite unbeeinflusst sind. Für die Parameterstudie wird ein Vierachs-Büro mit einem Achsmaß zwischen $1,20$ m und $1,60$ m verwendet. Daraus ergeben sich Raumgrößen zwischen $28,8$ m² und $38,4$ m², was in Abhängigkeit der Belegungsdichte typischen Büros für 2 bis 4 Personen entspricht.

7.2.3.3 Interne Lasten

Interne Lasten bestehen aus Personenbelegung, der Nutzung an elektrischen Geräten sowie dem Kunstlicht. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie in einem sehr weit gespannten Rahmen variieren

können. Damit die Übertragbarkeit der Parametervariation auf andere Objekte und Fassadenplanungen möglich ist, werden die internen Lasten, dargestellt in der flächenbezogenen Einheit W/m², jeweils in den Größenordnungen *gering*, *mittel* und *hoch* gruppiert. Realitätsnahe Werte werden auf der Basis der Nutzungsprofile der DIN V 18599:2016-10 [42] abgeleitet. Für den Flächenbedarf pro Person sowie die Arbeitshilfen werden dort direkt Empfehlungen für die entsprechenden Wärmequellen angegeben.

Die Wärmeerzeugung durch Personen wird nach DIN EN 13779 [12] mit einer Gesamtwärme (metabolische Rate) von 125 Watt pro Person bei sitzender Bürotätigkeit berücksichtigt. Die Berechnung der flächenspezifischen Leistung durch Kunstlicht erfolgt nach der DIN V 18599:2016-4, wobei jeweils Annahmen für die Beleuchtungsart und die Leuchtmittel getroffen werden. Tabelle 27 gibt eine Zusammenfassung der für die Parameterstudie angesetzten internen Wärmequellen.

Tabelle 27: Interne Wärmequellen

	Personen	Arbeitshilfen	Beleuchtung	Gesamt
gering	18 m ² je Person	50 W/Person	7,8 W/m ² *	17,5 W/m ²
mittel	14 m ² je Person	100 W/Person	11,9 W/m ² **	28,0 W/m ²
hoch	10 m ² je Person	150 W/Person	15,9 W/m ² ***	38,4 W/m ²

* entspricht einer direkten Beleuchtung mit LED-Leuchtbändern

** entspricht dem Mittelwert aus geringer und hoher Wärmelast

*** entspricht einer indirekten Beleuchtung mit LED-Leuchtbändern oder einer direkten Beleuchtung mit Leuchtstoffröhren

Damit die Anzahl der Parameter begrenzt werden kann und die Ergebnisse möglichst anschaulich dargestellt werden können, erfolgt keine Kombination der unterschiedlichen Lastprofile. Wenn die internen Lasten als gering angenommen werden, werden also eine geringe Personenbelegung sowie energieeffiziente Bürogeräte und Beleuchtung angenommen. Für hohe interne Lasten werden sowohl eine hohe Personenbelegung als auch höhere Energieverbräuche für Arbeitshilfen und Beleuchtung angenommen.

7.2.4 Fassadenparameter

7.2.4.1 Glasaufbauten

Die Primärfassade wird mit einer Dreifachisolierverglasung modelliert. Auch wenn dies aus wärmeschutztechnischen Gründen bei dem Einsatz einer Doppelfassade nicht erforderlich ist, entspricht dies durch die geringen Zusatzkosten im Vergleich zu einer Zweifachisolierverglasung dem

Stand der Technik. Die Sekundärfassade ist mit einer Einfachverglasung, Absturzsicherung Kat. A, ausgestattet. Die Glaskennwerte sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Die Rahmenanteile werden mit 30% für die Primärfassade und 10% für die Sekundärfassade berücksichtigt.

Tabelle 28: Eigenschaften der Verglasungen

Fassaden-ebene	Glasaufbau	U-Wert	g-Wert	τ -Wert	Rahmen-anteil
Primärfassade	VSG 2x 4mm Float 14 mm Argon 4 mm Float 14 mm Argon VSG 2x 4mm Float	0,65	0,46	0,69	30%
Sekundär-fassade	VSG 2x 8mm Float	5,35	0,76	0,86	10%

7.2.4.2 Tiefe des Fassadenzwischenraumes

Ein großzügig gestalteter Zwischenraum ermöglicht die Nutzung als Loggia oder als witterungsgeschützter Balkon. Im Gegenzug dafür reduziert sich bei tiefen Zwischenräumen mitunter die Gebäudenutzfläche, da die Geschossflächenzahl baurechtlich begrenzt ist. Häufig führen bereits diese Überlegungen zu einer Zwischenraumtiefe, die auf das notwendige Minimum begrenzt ist. Im Rahmen der Untersuchungen soll der Einfluss der Zwischenraumtiefe quantifiziert werden. Aus diesem Grund werden Zwischenraumtiefen zwischen 20 cm und 100 cm untersucht.

7.2.4.3 Öffenbare Fensterflächenanteile

Die öffenbaren Fensterflächenanteile beeinflussen die natürliche Lüftung und sind dadurch ein maßgeblicher Hebel zur Abfuhr von überschüssiger Wärmeenergie in Zeiten mit potentieller Überhitzung. Faustformeln für einschalige Fassaden fordern einen öffenbaren Fensterflächenanteil von 3% der Raumgrundfläche für einseitige Lüftung bzw. 2% bei Querlüftung, um einen „ausreichenden Luftwechsel“ zu erzielen. Neben den geometrischen Fensterflächenanteilen beeinflusst vor allem die Art des Fensters (z.B. Kippfenster, Lamellen, etc.) die Effizienz der natürlichen Lüftung. Die strömungstechnischen Eigenschaften der Fenster werden mit dem Parameter c_D zusammengefasst (vgl. Kapitel 6.1.10). Dies findet in den bekannten Faustformeln keine Berücksichtigung. Um die Ergebnisse einerseits mit den Faustformeln vergleichbar zu machen und andererseits den Einfluss unterschiedlicher Fenstertypen zu berücksichtigen, werden folgende Definitionen getroffen (vgl. Tabelle 21):

$$\text{Fensterflächenanteil} = \frac{\text{geometrische Fensterfläche}}{\text{Raumgrundfläche}} * 100\% \quad (7.1)$$

$$A_{eff} * 0,61 = c_D * A_{geometrisch} \quad (7.2)$$

Die **Bypässe** weisen in dem vorliegenden Forschungsprojekt den geringsten Fensterflächenanteil auf. Um den Anteil der opaken Bypass-Fläche zu begrenzen, werden für die Bypass-Kanäle Fensterflächenanteile (Summe der Bypässe) mit 1/2/3% festgelegt.

Die restlichen Lüftungsöffnungen in der **Primärfassade** dienen zur Belüftung des Innenraumes über den Fassadenzwischenraum im Winterfall sowie zur Maximierung des Luftwechsels zur CO₂- und Wärmeabfuhr. Diese Fensterflächenanteile werden daher etwas größer mit 2/3/4% untersucht.

Die Öffnungen in der **Sekundärfassade** sollten möglichst groß dimensioniert werden, um in den Zeiten mit potentieller Überhitzung eine möglichst gute Belüftung des Fassadenzwischenraumes zu ermöglichen. Eine Begrenzung der Öffnungsfläche macht zur Wahrung eines verbesserten Schallschutzes Sinn. Durch die Bypässe wird ein Zusammenhang zwischen den Öffnungshöhen der Primär- und der Sekundärfassade geschaffen, denn die Höhen der inneren Fenster entsprechen immer auch der Höhe der äußeren Öffnungen. Daraus ergeben sich geometrisch die folgenden Kombinationen:

Tabelle 29: Untersuchte Kombinationen der Fensterflächenanteile

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bypass	1%	1%	1%	2%	2%	2%	3%	3%	3%
Innen	2%	3%	4%	2%	3%	4%	2%	3%	4%
Außen	11,0%	15,4%	19,7%	13,4%	17,7%	22,1%	15,7%	20,1%	24,4%

$$FF_{außen} = 2,344 * FF_{Bypass} + 4,344 * FF_{Kipp} \quad (7.3)$$

Mit

FF_i Fensterflächenanteil der entsprechenden Fenstergruppe [%]

7.2.5 Zusammenfassung der Parameter

Die folgende Tabelle fasst die variablen Parameter zusammen.

Tabelle 30: Zusammenfassung der untersuchten Parameter

Standort	Orientierung	Raumbreite	Interne Lasten	Tiefe FZR*	Fensterflächenanteile	
					Bypass	Innen
A: Rostock	Nord	4x 1,20 m	gering	20 cm	1%	2%
B: Potsdam	Nord-Ost	4x 1,40 m	mittel	40 cm	2%	3%
C: Mannheim	Ost	4x 1,60 m	hoch	60 cm	3%	4%
	Süd-Ost			80 cm		
	Süd			100 cm		
	Süd-West					
	West					
	Nord-West					

*FZR = Fassadenzwischenraum

7.2.6 Steuerung der Lüftungsöffnungen im Modell

In der Parameterstudie wird die Fassadensteuerung des Testraumes (siehe Kapitel 3.4) in etwas abgeänderter Form umgesetzt.

Die oberste Priorität hat auch im Modell die Begrenzung des CO₂-Gehaltes. Die entsprechende Steuerlogik wird aus der umgesetzten Fassadensteuerung übernommen. Beim Überschreiten des Grenzwertes von 1000 ppm öffnet sich eine Fenstergruppe, die für den thermischen Raumkomfort am günstigsten ist. Die Hysterese umfasst 200 ppm. Erfolgt innerhalb von 10 Minuten kein ausreichender Abfall der Konzentration unterhalb von 800 ppm, wird kurz eine sog. „Notlüftung“ durchgeführt, bei welcher alle Fenstergruppen maximal geöffnet werden.

Die Raumprognose auf Grundlage der Wettervorhersage entfällt, da dies prognostizierte Klimadaten voraussetzt. Im Rahmen der Parameterstudie wird mit den statistischen Wetterdaten der drei Standorte gearbeitet. Überschreitet der Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur des Folgetages einen Grenzwert von 15°C wird das Nachtlüften aktiviert. Im Fall der Nachtlüftung wird der maximale Luftwechsel sichergestellt, sofern durch die natürliche Lüftung Wärme abgeführt werden kann, bis der Grenzwert die 15°C wieder unterschreitet.

In der Modell-Steuerung wird die Heizung ausgeschaltet, wenn alle Fenster (z.B. zur CO₂-Abfuhr) geöffnet sind. Nachfolgend wird die Steuermatrix der Lüftungsöffnungen in Modell dargestellt.

Fall	Bedingung A	Bedingung B	Bedingung C	Bedingung D	Bedingung E	Bedingung F	Bedingung G	Bedingung H	Bedingung I	Bedingung J	Bedingung K	Bedingung L	Bypass innen	Fenster innen	Bypass außen	Fenster außen oben	Fenster außen unten	Bemerkung
	$HC2_1=TRUE$	Nachtlüftung= True	$Traum>Tmax$, Komfort & Nutzung=true	$Traum<Tmin$, Komfort & Nutzung=true	$Traum>Tmax$, Komfort & Nutzung=false	$Traum<Tmin$, Komfort & Nutzung=false	$HC2_2=false$	$Traum-Tauren <=$ Traum-Cavity	$Traum>Tcavity$	$Traum>Tauren$	$Traum-Tauren >=$ Traum-Cavity	$Traum-Cavity >0$						
1	ja	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	egal	100	100	100	100	100	Notlüftung CO2
2	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	egal	ja	ja	egal	egal	100	100	100	100	100	Nachtlüftung
3	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	egal	ja	nein	egal	egal	0	100	100	100	100	Nachtlüftung
4	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	egal	nein	ja	egal	egal	100	0	100	100	100	Nachtlüftung
5	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	egal	nein	nein	egal	egal	0	0	100	100	100	Nachtlüftung
6	nein	nein	ja	egal	egal	egal	ja	egal	ja	ja	egal	egal	100	100	100	100	100	Raum zu warm + ohne CO2
7	nein	nein	ja	egal	egal	egal	ja	egal	ja	nein	egal	egal	0	100	100	100	100	Raum zu warm + ohne CO2
8	nein	nein	ja	egal	egal	egal	ja	egal	nein	ja	egal	egal	100	0	100	100	100	Raum zu warm + ohne CO2
9	nein	nein	ja	egal	egal	egal	ja	egal	nein	nein	egal	egal	0	0	100	100	100	Raum zu warm + ohne CO2
10	nein	nein	ja	egal	egal	egal	nein	egal	nein	egal	ja	ja	100	100	100	100	100	Raum zu warm + mit CO2
11	nein	nein	ja	egal	egal	egal	nein	egal	egal	egal	ja	nein	100	0	100	100	100	Raum zu warm + mit CO2
12	nein	nein	ja	egal	egal	egal	nein	egal	egal	egal	nein	egal	0	100	100	100	100	Raum zu warm + mit CO2
13	nein	nein	nein	ja	egal	egal	ja	egal	ja	ja	egal	egal	0	0	0	0	0	Raum zu kalt + ohne CO2
14	nein	nein	nein	ja	egal	egal	ja	egal	ja	nein	egal	egal	100	0	100	0	0	Raum zu kalt + ohne CO2
15	nein	nein	nein	ja	egal	egal	ja	egal	nein	ja	egal	egal	0	100	0	0	0	Raum zu kalt + ohne CO2
16	nein	nein	nein	ja	egal	egal	ja	egal	nein	nein	egal	egal	100	100	100	0	0	Raum zu kalt + ohne CO2
17	nein	nein	nein	ja	egal	egal	nein	egal	nein	egal	egal	egal	100	0	100	0	0	Raum zu kalt + mit CO2
18	nein	nein	nein	ja	egal	egal	nein	egal	egal	egal	ja	nein	100	100	100	0	0	Raum zu kalt + mit CO2
19	nein	nein	nein	ja	egal	egal	nein	egal	egal	egal	egal	nein	100	100	100	0	100	Raum zu kalt + mit CO2
20	nein	nein	nein	nein	ja	egal	nein	egal	ja	egal	egal	egal	0	0	0	0	100	Raum zu kalt + mit CO2
21	nein	nein	nein	nein	ja	egal	egal	egal	ja	ja	egal	egal	100	100	100	100	100	Raum außerhalb der Nutzung zu warm
22	nein	nein	nein	nein	ja	egal	egal	egal	ja	nein	egal	egal	0	100	100	100	100	Raum außerhalb der Nutzung zu warm
23	nein	nein	nein	nein	ja	egal	egal	egal	nein	ja	egal	egal	100	0	100	100	100	Raum außerhalb der Nutzung zu warm
24	nein	nein	nein	nein	nein	ja	egal	egal	nein	nein	egal	egal	0	0	100	100	100	Raum außerhalb der Nutzung zu warm
25	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	egal	egal	egal	egal	egal	0	0	0	0	0	Raum außerhalb der Nutzung zu kalt
26	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	egal	egal	egal	egal	100	0	100	0	0	Raum ist optimal
27	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	egal	egal	egal	egal	0	100	0	0	0	Raum ist optimal mit CO2
28	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	egal	egal	egal	egal	0	0	0	0	0	Fehler, alles schließen

Abbildung 64: Steuermatrix für die Parameterstudie

7.3 Datenauswertung

Die Verkettung der oben beschriebenen Gebäude- und Fassadenparameter jeweils in den drei Sommerklimaregionen Deutschlands ergibt insgesamt 9.720 unterschiedliche Kombinationen. Die Herausforderung der Auswertung bestand darin, aus der großen Datenmenge die maßgebenden physikalischen Zusammenhänge zu detektieren und in geeigneter Form (z.B. zeichnerisch in Form von Nomogrammen) darzustellen. Dazu wurden zuerst Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern und den Zielgrößen hergestellt. Beispielsweise ergibt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Tiefe des Fassadenzwischenraumes und den resultierenden Übertemperaturstunden (je tiefer der Zwischenraum, desto geringer die Überhitzung). Diese Zusammenhänge wurden parametrisiert und mit dem Nelder-Mead-Verfahren [43] wurden die Parameter dahingehend optimiert, dass anschließend Nomogramme erstellt werden konnten. Der Optimierungsprozess erfolgte anhand der Methode der kleinsten Quadrate. Abbildung 65 zeigt exemplarisch für die Sommerklimaregion C, Nordausrichtung eine Gegenüberstellung der Übertemperaturstunden aus der Parameterstudie (horizontale Achse) und dem entsprechenden Wert in dem Nomogramm (vertikale Achse). Die Begrenzung auf eine Himmelsrichtung erfolgt im Sinne der Übersichtlichkeit der Darstellung. Die schwarze Linie zeigt den Idealfall der exakten Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnis und Nomogrammwert. Das Bestimmtheitsmaß zwischen den Wertepaaren und der Ideallinie beträgt für die Orientierung Nord $R^2 = 0,994$.

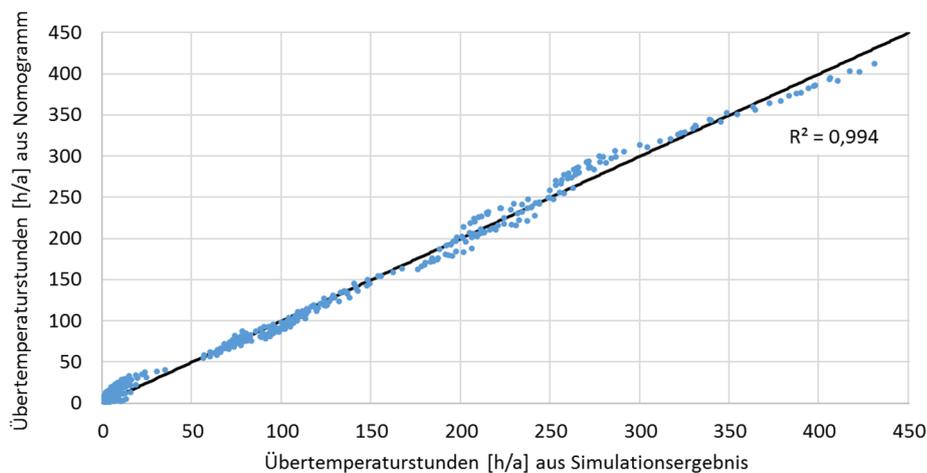


Abbildung 65: Gegenüberstellung der Übertemperaturstunden aus Simulationen und Nomogrammen (Standort C, Nord)

Tabelle 31 zeigt die Bestimmtheitsmaße für die drei Standorte mit jeweils vollständigen Daten für alle Ausrichtungen (jeweils 3240 Daten für die Simulation sowie für das Nomogramm).

Tabelle 31: Bestimmtheitsmaße der Nomogramme

Klimaregion	A	B	C
Übertemperaturstunden	$R^2 = 0,989$	$R^2 = 0,990$	$R^2 = 0,988$
Heizwärmebedarf	$R^2 = 0,969$	$R^2 = 0,966$	$R^2 = 0,971$

8 Planungsempfehlungen für Bypass-Doppelfassaden

8.1 Allgemeine Empfehlungen

Die Parameter Gebäudestandort, Fassadenorientierung, Raumbreite, Höhe der internen Wärmelasten, Tiefe des Fassadenzwischenraumes sowie Fensterflächenanteile wurden untersucht. Folgende Aussagen lassen sich treffen:

- Je größer die **Tiefe des Fassadenzwischenraumes** ausgebildet wird, desto geringer wird die Überhitzung des Büroraumes. Dies gilt für alle Parametervariationen. Das größere Luftvolumen stellt bei hoher Solarstrahlung einen kleinen Puffer dar und verzögert die Wärmetransmission an den Innenraum.
- Je **breiter der Raum** ist, desto größer wird die Überhitzung. Der Einfluss ist relativ gering, aber für alle Variationen zu beobachten. Begründen lässt sich dies durch das Verhältnis der Speichermassen der raumumschließenden Bauteile. Während der Einfluss von Fußboden und Decke mit der Raumbreite proportional ansteigt, wird nur eine von drei Innenwänden bei steigender Raumbreite länger.
- Die **internen Lasten** haben den stärksten Einfluss auf die Erwärmung des Raumes. Es wird dringend empfohlen energiesparende Geräte zu verwenden. Durch Präsenzmelder und eine tageslichtabhängige Beleuchtungssteuerung kann der Stromverbrauch weiter reduziert werden, was auch geringere internen Lasten zur Folge hat.
- Je größer die **offenbaren Fensterflächen** sind, desto effizienter kann überschüssige Wärme im Sommer abgeführt werden. In Winter reduzieren sich durch große Öffnungsquerschnitte die notwendigen Lüftungsdauern. Der Einfluss der Bypässe auf die Wärmeabfuhr im Sommer ist größer als der Einfluss der Kippfenster. Der Grund liegt darin, dass die Kippfenster immer dann geschlossen werden, wenn der Fassadenzwischenraum sich über das Raumlufttemperaturniveau hinaus erwärmt.

Die nachfolgenden Nomogramme sind kein Werkzeug zur Nachweisführung des sommerlichen Wärmeschutzes entsprechend DIN 4108-2. Sie dienen ausschließlich zur Vordimensionierung ausgewählter Parameter und zur Abschätzung deren Einflusses auf den sommerlichen Wärmeschutz sowie der Abschätzung des Heizwärmebedarfes in frühen Planungsphasen.

8.2 Anwendungsgrenzen der Nomogramme

Es werden sechs Nomogramme, jeweils eines für die Sommerklimaregionen A, B und C, zur Bestimmung der Übertemperaturstunden sowie zur Bestimmung des Heizwärmebedarfes eines Raumes mit Bypass-Doppelfassade gezeigt. Allen Nomogrammen liegen die folgenden Randbedingungen zu Grunde:

- Nutzungszeit Mo.-Fr. 07:00 Uhr – 18:00 Uhr
Bei Berücksichtigung der nationalen Feiertage ergeben sich für das Jahr 2018 insgesamt 252 Arbeitstage. Urlaubszeiten werden nicht berücksichtigt. Somit wird der Grenzwert der Übertemperaturstunden (10% der Nutzungszeit) als Anhaltswert auf 277 Stunden pro Jahr festgelegt.
- Es ist die Fenstersteuerung wie in Kapitel 7.2.6 umgesetzt.
- Die Soll-Raumtemperatur in der Heizperiode (01. Oktober bis 30. April) beträgt 21°C. Es wird zusätzlich eine Nachtabsenkung von 4 K berücksichtigt zwischen 18:00 Uhr – 05:00 Uhr.
- Der Sonnenschutz ist im Fassadenzwischenraum angeordnet und schließt ab einer Globalstrahlung von 200 W/m², bzw. ab 150 W/m² für die Ausrichtungen Nord / Nord-Ost / Nord-West.
- Die Raumhöhe beträgt 3,00 m und die Raumtiefe beträgt 6,00 m.
- Die Betondecke ist unverkleidet. Der Raum hat einen Doppelboden. Die Außenfassade ist vollflächig verglast. Die Raumwände sind in Trockenbauweise erstellt.
- Primärfassade 3-fach Isolierverglasung mit 30% Rahmenanteil.
- Sekundärfassade einfach verglast mit 10% Rahmenanteil.
- Die Nomogramme beschränken sich auf den Wertebereich der untersuchten Parameter. Extrapolationen sind nicht validiert.

Die Nomogramme werden hier im Fließtext erläutert und zur Anwendung in entsprechender Größe im Anhang abgedruckt. Die untersuchten Parameter können auf nebeneinanderliegenden Skalen eingetragen werden. Über Verbindungen zu vertikalen Hilfslinien kann der Zusammenhang zu weiteren Parametern hergestellt werden.

8.3 Nomogramme zur Bestimmung der Übertemperaturstunden

Die Nähe der Skala für die internen Lasten zu der ersten Referenzskala zeigt, dass der Einfluss der Raumbreite relativ gering ist und dass der Einfluss der internen Lasten von großer Bedeutung ist. Insbesondere bei geringen internen Lasten liegen diese Skalen sehr dicht beisammen, sodass der Einfluss der Raumbreite in diesem Fall nicht mehr grafisch sichtbar ist. Die Neigung der Skalen für die Fensterflächenanteile verdeutlicht, dass bei hohen internen Lasten die Bedeutung der Fensterflächen für eine effiziente Wärmeabfuhr sehr groß ist. Bei geringen internen Lasten kann es vorkommen, dass die Verbindungslinien der Referenzskalen nahezu parallel zu den Skalen verlaufen. In diesem Fall reduziert sich der Einfluss der Fensterflächen, da Räume mit geringen internen Lasten nicht zur Überhitzung neigen.

Die Nomogramme sind vielseitig einsetzbar. Die folgenden beiden Beispiele erläutern das Einsatzgebiet der Nomogramme an exemplarisch gewählten Zahlenbeispielen.

Beispiel 1: Abschätzung der Übertemperaturstunden

Zur Abschätzung der Übertemperaturstunden auf Grundlage von bekannten Parametern kann das Nomogramm „von links nach rechts“ genutzt werden. Die vorhandenen Gebäude- und Fassadenparameter werden über die vertikalen Hilfslinien miteinander verbunden. Auf der rechten Skala können die zu erwartenden Übertemperaturstunden abgeschätzt werden.

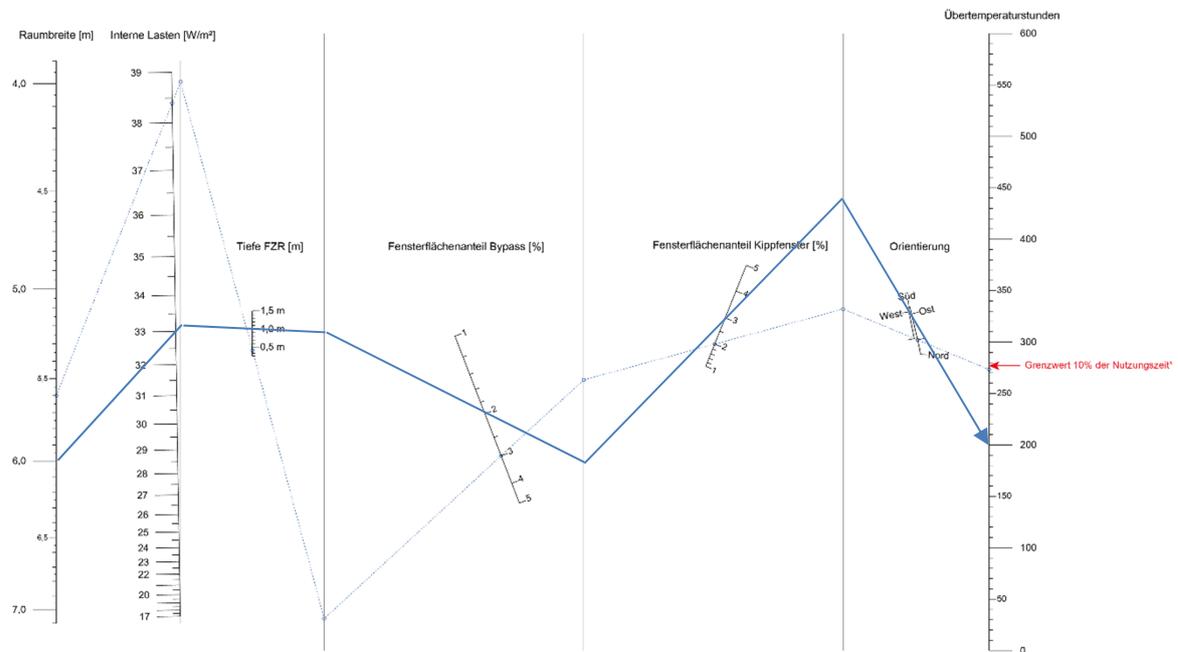


Abbildung 66: Beispielhafte Anwendung, Abschätzung der Übertemperaturstunden

Beispiel 2: Bestimmung unbekannter Parameter

Zur Bestimmung unbekannter Parameter können die Nomogramme „von rechts“ und „von links“ genutzt werden. Beginnend bei dem markierten Grenzwert der Übertemperaturstunden werden die bereits bekannten Parameter verbunden. Es kann dann bestimmt werden, welche Größenordnung die unbekannt Parameter haben müssen, damit die Überhitzung auf das zulässige Maß begrenzt wird. In dem gezeigten Beispiel wird der Fensterflächenanteil für die Kippfenster bestimmt. Es handelt sich um einen Ost-orientierten Raum, die Raumbreite beträgt 5,00 m und die internen Lasten summieren sich zu 36 W/m². Der Fensterflächenanteil der Bypässe soll auf 2% begrenzt werden. Damit die Begrenzung der Übertemperaturstunden gelingt, muss die geometrische Fläche der Kippfenster mindestens 2,7% der Raumgrundfläche betragen.

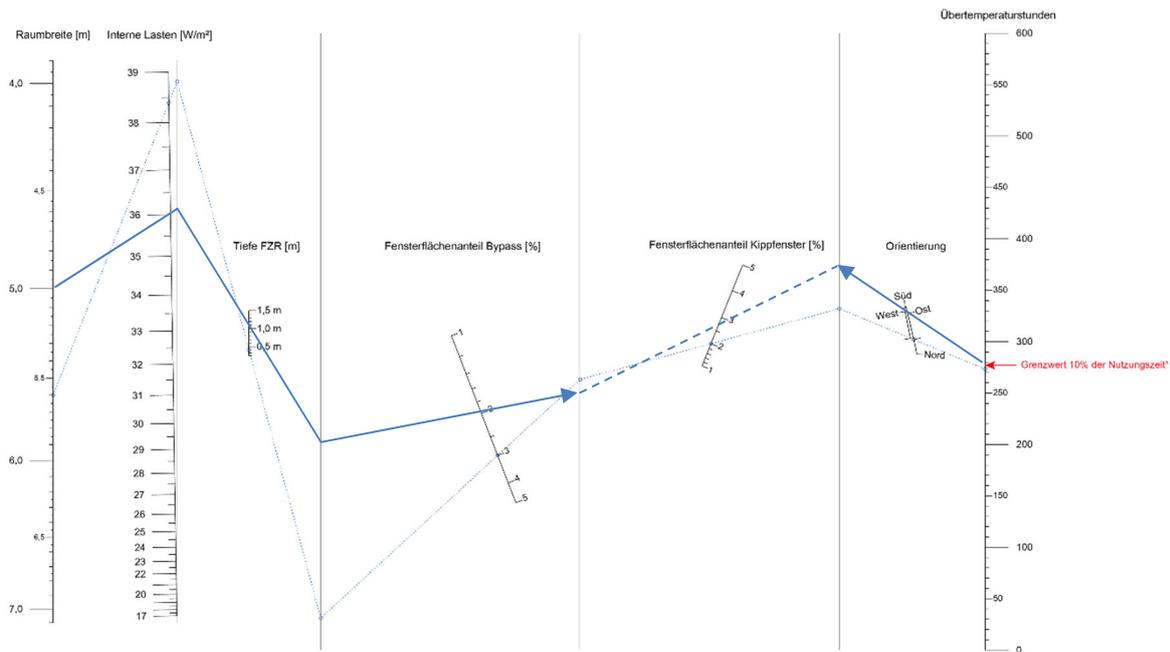


Abbildung 67: Beispielhafte Anwendung, Bestimmung des Fensterflächenanteils der Kippfenster

Vergleicht man die Nomogramme der Sommerklimaregionen A, B und C untereinander so stellt man fest, dass die Ergebnisse der Übertemperaturstunden relativ dicht beisammen liegen. Dies ist auf folgende Gründe zurückzuführen:

- Der Grenzwert, ab wann das Innenraumklima als „zu warm“ bewertet wird, ist in der sommerkühlen Region A mit 25°C am niedrigsten. Folglich führen auch geringere Erwärmungen schon zu Übertemperaturstunden, während in der Sommerklimaregion C ab einer Überschreitung der 27°C von Übertemperatur die Rede ist. Durch diese Einteilung wird die DIN 4108-2 den unterschiedlichen Klimata in Deutschland in Bezug auf eine sommerliche Bewertung gerecht.
- In Deutschland herrscht flächendeckend gemäßigtes Klima. Selbst in den warmen Sommermonaten ist das Potential zur nächtlichen Auskühlung in der Regel vorhanden. Zeiträume, an denen sehr warme Nächte auf heiße Tage folgen, sind sehr selten. Dadurch gelingt es durch eine entsprechende Fenstersteuerung, die Raumtemperatur effektiv zu regulieren und größtenteils innerhalb der Komfortgrenzen zu erhalten.
- Die im Modell integrierte Fassadensteuerung nutzt anhand der statistischen Klimadaten die Temperatur des Folgetages als Wettervorhersage. Analog zu der im Testraum an der HCU umgesetzten Fassadensteuerung kann so in Abhängigkeit des Klimas einer potentiellen Überhitzung bereits im Vorfeld entgegengewirkt werden.

8.4 Nomogramme zur Bestimmung des Heizwärmebedarfs

Der Heizwärmebedarf ist in allen Untersuchungen auf dem Stand eines modernen Neubaus. Die Werte schwanken zwischen 3,0 kWh/(m²a) und einem Maximalwert von 32,6 kWh/(m²a). Die vollflächig verglaste Außenhaut ist sehr luftdicht ausgebildet. Die Dreifachisolierverglasung mit einem U-Wert von $U_g = 0,65 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ reduziert die Transmissionswärmeverluste stark. Tatsächlich ist der Heizwärmebedarf stark vom Nutzerverhalten, insbesondere dem Lüftungsverhalten im Winter, abhängig. Dem Modell liegt eine CO₂-optimierte Steuerung zugrunde. Ein zusätzliches Verlangen nach Frischluft kann den Heizwärmebedarf deutlich höher ausfallen lassen. Auffällig ist, dass für alle durchgeführten Untersuchungen der Heizwärmebedarf in der Sommerklimaregion B oberhalb des Wertes für die Sommerklimaregion A liegt. Die Einstufung in eine Sommerklimaregion erfolgt anhand des Höchstwerts der monatlichen Durchschnittstemperatur und erlaubt keinen direkten Rückschluss auf das Temperaturprofil im Winter.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Fokus dieser Arbeit steht die Planung von natürlich belüfteten Doppelfassaden mit Schwerpunkt auf dem sommerlichen Wärmeschutz sowie auf der Reduzierung des Heizwärmebedarfs. Der Schallschutz bei gleichzeitiger natürlicher Lüftung wurde durch schallabsorbierende Bypass-Kanäle optimiert. Darüber hinaus ist eine intelligente Fassadensteuerung für diesen Fassadentyp entwickelt worden.

Messungen zum **Schallschutz** (Kapitel 4) an einem Bypass-Kanalmodell haben gezeigt, dass das Schalldämmmaß der Doppelfassade mit geöffneten Bypässen maßgeblich von dem verwendeten Absorbermaterial abhängig ist. Darüber hinaus ist es wichtig, dass alle Oberflächen ausgekleidet sind sowie dass der Einfall von Direktschall unterbunden wird. Langzeitmessungen an der gebauten Bypass-Doppelfassade haben im langfristigen Mittel eine Pegelreduktion von rund 10 dB(A) bei gleichzeitiger natürlicher Lüftung ergeben. Bypass-Kanäle sind daher ein geeignetes Instrument, um einen Mindestluftwechsel bei gleichzeitigem hohem Schallschutz sicherzustellen.

Die Entwicklung der **Fassadensteuerung** (Kapitel 3.4) hat grundlegende Fragestellungen ergeben. Intuitiv wird bei manueller Fensterbedienung das Fenster geöffnet, wenn es „zu warm“ ist oder wenn die Luftqualität „schlecht“ ist. Diese subjektiven Empfindungen in einen Algorithmus zu übersetzen ist eine Herausforderung. Ein erster und sehr einfacher Ansatz zur Temperaturregelung an Tagen mit potentieller Überhitzung wurde über einen Zähler umgesetzt, der die Überhitzung des Raumes erfasst und beim Überschreiten eines definierten Grenzwertes die Nachtlüftung aktiviert. Deutlich bessere Ergebnisse sind durch die Integration eines thermischen Gebäudemodells erzielt worden. Unter Verwendung der Wettervorhersage für die folgenden Tage wird das thermische Verhalten des Raumes prognostiziert. Auf Grundlage dieser Raumprognose können detaillierte Steuerbefehle abgeleitet werden, um das Raumklima sowohl im Sommer als auch im Winter innerhalb der Komfortgrenzen zu halten.

Aus einer umfangreichen Parameterstudie sind Nomogramme zur Abschätzung der potentiellen Überhitzung des Büroraumes (Kapitel 8.3) entwickelt worden. Die Auswahl der untersuchten Parameter erfolgte anhand von gängigen Planungsgrößen sowie Anforderungen. Diese sind in Kapitel 6.2.4 detailliert beschrieben. Die Nomogramme zeigen, dass die Raumbreite nur einen sehr geringen Einfluss auf die Übertemperaturstunden hat. In einem frühen Planungsstadium ist es legitim, diese vorerst nicht in Betracht zu ziehen. Ebenfalls zeigt sich, dass der Standort (Sommerklimaregion A, B oder C) einen relativ geringen Einfluss aufweist. Dies ist maßgeblich damit zu erklären, dass der Grenzwert der tolerierten Innenlufttemperatur von dem Standort abhängig ist. Grundlage der Untersuchungen ist eine Fenstersteuerung, die entsprechend der aktuellen und der Klimadaten des Folgetages die Lüftungsöffnungen steuert.

Die Nomogramme zur **Abschätzung des Heizwärmebedarfs** sind in Kapitel 8.4 erläutert. Mit einem Spektrum von 3,0 kWh/(m²a) in der Sommerklimaregion C und einem Maximalwert von

32,6 kWh/(m²a) weisen alle untersuchten Parameterkombinationen einen geringen Heizwärmebedarf auf. Die maßgeblichen Gründe hierfür sind die verwendete Dreifach-Isolierverglasung und die relativ hohen internen Lasten sowie die bedarfsgerechte Steuerung der Lüftungsöffnungen, die eine passive Erwärmung des Raumes über den Fassadenzwischenraum ermöglicht. Im Gegensatz zu der sommerlichen Überhitzung ist hier eine klare Standortabhängigkeit zu erkennen. Der Heizwärmebedarf der Sommerklimaregionen A und B liegen relativ dicht beisammen, wobei der Wert des Standortes Potsdam (B) stets über dem Wert des Ortes Rostock (A) liegt. In Mannheim (C) beträgt der Heizwärmebedarf im Mittel nur 58% des Wärmebedarfes des gleichen Gebäudes in Potsdam.

Die **Übertragbarkeit der Ergebnisse** auf andere Doppelfassadentypen (z.B. Korridorfassade, Vorhangfassade, etc.) sowie die Erweiterung der Parameter außerhalb der untersuchten Grenzen kann nicht sichergestellt werden. In einem bereits bewilligten Folgeprojekt werden zu diesem Zwecke Luftwechsellmessungen an gebauten Doppelfassaden über einen Zeitraum von rund zwei Jahren durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsberichtes sowie andere Veröffentlichungen, die sich mit der Quantifizierung des natürlichen Luftwechsels beschäftigen, werden mit den Messwerten gegenübergestellt. Auf dieser Grundlage wird ein allgemeingültiger Planungsleitfaden für natürlich belüftete Doppelfassaden erstellt.

10 Danksagung

Wir bedanken uns bei dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die finanzielle Projektförderung und dem Projektträger Jülich für die stets unkomplizierte Projektsteuerung.

Wir danken der Firma Permasteelisa für die Fertigung und den Aufbau der Sekundärfassade und der Firma WindowMaster für die Installation der Basissteuerung und der Aktoren sowie der ständigen Erreichbarkeit bei Störungen und Systemveränderungen.

In das Projekt wurden zwei Abschlussarbeiten einbezogen, die ebenfalls lobend erwähnt werden sollten: Johanna Theelke, *Schallschutztechnische Ertüchtigung eines Luftkanals in einer Bypass-Doppelfassade*, Masterthesis 06/2015. Marcella Dorsch, *Detaillierte konstruktive Planung der Bypass Doppelfassade*, Bachelorthesis 07/2015.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Institut der deutschen Wirtschaft Köln, „Energieeffizienz bei Büroimmobilien. dena-Analyse über den Gebäudebestand und seine energetische Situation.“ Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin/Köln, 2016.
- [2] E. Kolle, V. Sperlich und O. Verheyen, „Wissenschaftliches Begleitprogramm für das Haus der Wirtschaftsförderung (HdW) in Duisburg,“ Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Energietechnik, Duisburg, 1997.
- [3] M. N. Prof. Dr.-Ing. Fisch, V. Huckemann und L. Altendorf, „F + E Projekt TwinSkin - Validierung von Planungskonzepten für Doppelfassaden bei Bürogebäuden anhand der Betriebs- und Nutzungserfahrungen,“ TU Braunschweig Institut für Gebäude- und Solartechnik, 2008.
- [4] T. Pasquay, „Energetisches Verhalten von Doppelfassaden Auswertung von drei gemessenen Beispielen,“ Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund, 2002.
- [5] I. Heusler, H. Sinnesbichler, H. Erhorn und A. Nimtsch, „Erarbeitung einer vereinfachten Berechnungsmethode für Doppelfassaden für die Integration in die Deutsche EPBD-Energieeffizienzbewertungsmethode DIN V 185999 (Bewertungsmethode GDF),“ Fraunhofer-Insitut für Bauphysik, Stuttgart, 2009.
- [6] T. D. D. Schmidt, D.-I. I. Heusler und D.-I. H. Sinnesbichler, „Messtechnische Überprüfung und Weiterentwicklung der vereinfachten Berechnungsmethode für Glasdoppelfassaden (GDF) nach DIN V 18599 anhand realer Gebäude (Monitoring GDF),“ Fraunhofer IBP, Stuttgart, 2014.
- [7] C. Ziller, „Modellversuche und Berechnungen zur Optimierung der natürlichen Lüftung durch Doppelfassaden,“ RTWH Aachen, Aachen, 1999.
- [8] O. K. Larsen, "Double-Skin Facade," Aalborg University, Department of Civil Engineering, Aalborg, 2008.
- [9] D. Saelens, „Energy Performance Assessment of Single Storey Multiple-Skin Facades,“ Katholieke Universiteit Lueven, 2002.
- [10] H. Poirazis und H. Kragh, „Establishing a Simplified Correlation Between a Proposed Double Skin Facade and a Thermally Equivalent Single Skin Facade for Dynamic Building Energy Modelling,“ *Eleventh International IBPSA Conference*, 2009.

- [11] W. Yagoub, S. Appleton und W. Stevens, „Case study of double skin façade in hot climates,“ in *Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking of Comfort*, London, 2010.
- [12] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 13779:2007-09, Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Kaumkühlsysteme*.
- [13] F. Allard, M. Santamouris und S. Alvarez, *Natural ventilation in buildings*, London: James & James, 2002.
- [14] G. C. da Graça, P. F. Linden und P. Haves, „Design and testing of a control strategy for a large, naturally ventilated office building,“ *Building Services Engineering Research and Technology*, p. 223–239, 2004.
- [15] M. Liu, K. B. Wittchen und P. K. Heiselberg, „Control strategies for intelligent glazed façade and their influence on energy and comfort performance of office buildings in Denmark,“ *Applied Energy*, pp. 43-51, 15 2015.
- [16] U. Eicker und T. Erhart, „KonLuft - Energieeffizienz von Gebäuden durch kontrollierte natürliche Lüftung,“ 2016.
- [17] DIN EN 15251 Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden, 2012.
- [18] T. X. Nghiem, „MLE+: a Matlab-EnergyPlus Co-simulation Interface,“ 2015.
- [19] J. Meeus, *Astronomical Algorithms*, 1991.
- [20] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 3789 Blatt 2 Umweltmeteorologie Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen*, 1994.
- [21] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) - Ausschuss für Arbeitsstätten, *Technische Regeln für Arbeitsstätten Lüftung ASR A3.6*, 2012.
- [22] S. Koch, P. Teller, S. Mehra, L. Weber und D. Brandstetter, *Zur Schalldämmung von zweischaligen Fassaden und "Prallscheiben"*, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart.
- [23] E. Digl.-Ing. Sälzer, „Schallschutz mit Fassaden - Es muss nicht immer die Doppelfassade sein,“ in *2. Weimarer Bauphysiktage*, 2002.
- [24] A. Mahdavi, E. L. J. Bajraktari und U. Pont, „Doppelfassaden mit Kombination von Schallschutz und (natürlicher) Lüftungsmöglichkeit,“ *Bauphysik-Kalender 2017: Gebäudehülle und Fassaden*, pp. 531-542, 2017.

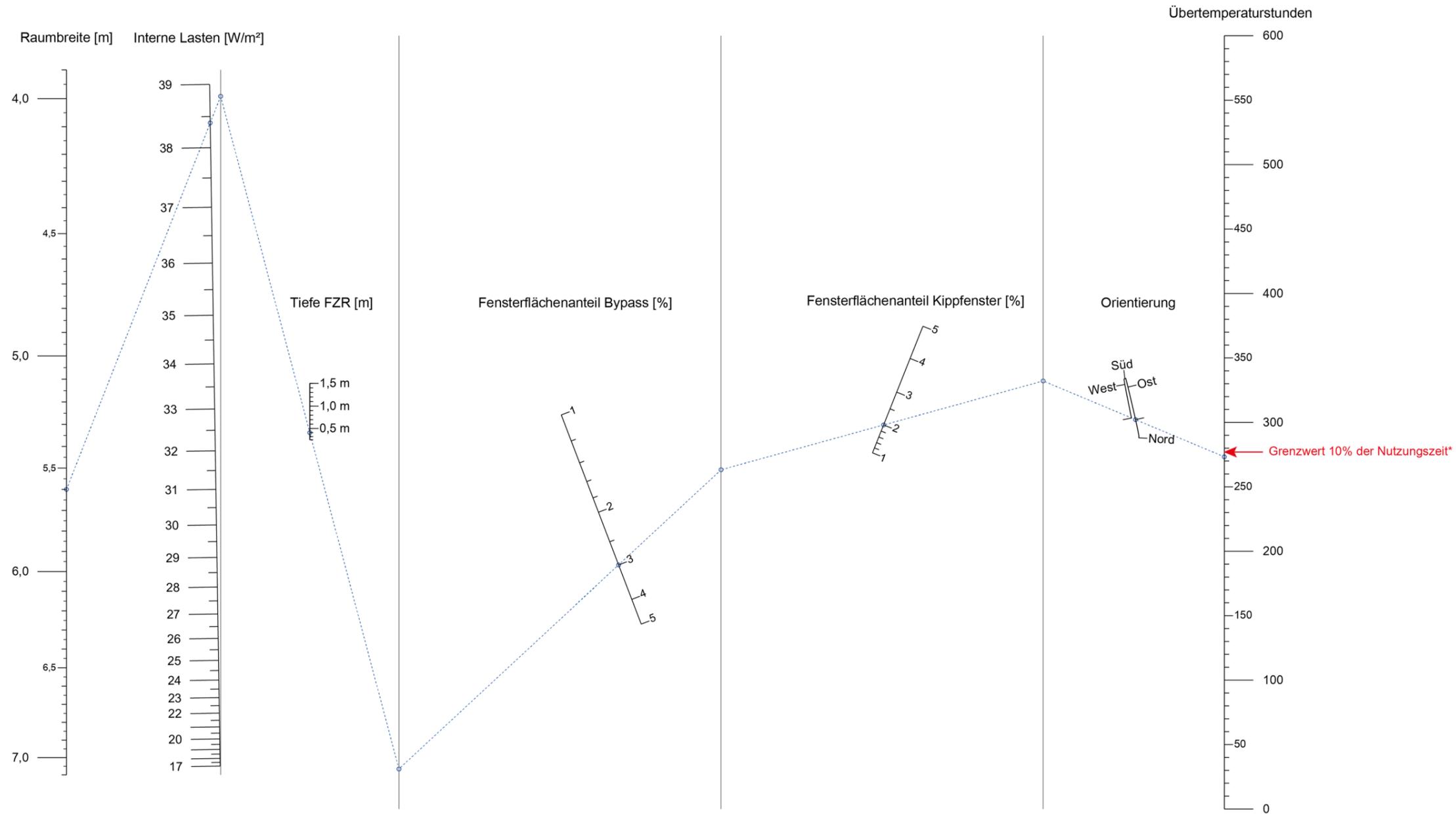
- [25] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „Beiblatt 1 zu DIN 4109:1989-11“.
- [26] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 4108-2:2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“.
- [27] F. P. Leusden und H. Freymark, „Darstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch,“ *Gesundheitsingenieur*, Bd. 16, pp. 271-273, 1951.
- [28] A. Li et al. (eds.), „Modeling and Simulation of Ventilated Double-Skin Facades Using EnergyPlus,“ *Proceedings of the 8th International Symposium of Heating, Ventilation and Air Conditioning*, pp. 241-252, 2014.
- [29] Umweltbundesamt, „Umweltbundesamt,“ 07 08 2017. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#textpart-1>. [Zugriff am 06 08 2018].
- [30] F. Wellershoff, L. C. Labaki, M. Friedrich, L. Fernandes, K. Schweers und B. Arantes, „Energy efficient retrofitting of buildings in Brazil (Final Report),“ Hamburg/Campinas, 2018.
- [31] D. Laussmann and D. Helm, "Air Change Measurements Using Tracer Gas," Robert Koch Institute, Germany.
- [32] M. W. Liddament, „Air Infiltration Calculation Techniques - An Applications Guide,“ *AIVC Annex V Air Infiltration and Ventilation Centre*, 1986.
- [33] M. V. Swami und S. Chandra, „Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflow Rates in Buildings,“ Florida Solar Energy Center, 1987.
- [34] T. S. Larsen, „Natural Ventilation Driven by Wind and Temperature Difference,“ Department of Civil Engineering, Aalborg University, Aalborg, 2006.
- [35] P. Heiselberg und M. Sandberg, „Evaluation of Discharge Coefficients for Window Openings in Wind Driven Natural Ventilation,“ *International Journal of Ventilation*, pp. 43-52, Volume 5 No 1 (2006).
- [36] J. Wang, S. Wang, T. Whang und F. Battaglia, „Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations,“ *Energy & Buildings* (139), pp. 762-779, 2017.
- [37] D. Etheridge, *Natural Ventilation of Buildings - Theory, Measurement and Design*, WILEY, 2012.
- [38] I. Idelchik, *Handbook of Hydraulic Resistance* (3rd Edition), Moskau: Jaico Publishing House, 2000.

- [39] A. van Paassen, S. Liem und B. Gröninger, „Control of Night Cooling with Natural Ventilation, Sensitivity Analysis of Control Strategies and Vent openings,“ in *Ventilation And Cooling, 19th Annual AIVC Conference*, Oslo, Norway, 1998.
- [40] Illuminating Engineering Society of North America, *Lighting Handbook: Reference & Application*, 8th Edition, New York, 1993.
- [41] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) - Ausschuss für Arbeitsstätten, „ASR A1.2 Raumabmessungen und Bewegungsflächen,“ September 2013.
- [42] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN V 18599:2016-10, Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung*.
- [43] J. C. Lagarias, J. A. Reeds und M. H. W. P. E. Wright, „Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions,“ *SIAM J. Optim. Vol. 9, No. 1*, pp. 121 - 147, 1998.
- [44] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN EN ISO 7730:2006-04, Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“.
- [45] A. Maas, "Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung," Kassel (DE), 1995.
- [46] Verein Deutscher Ingenieure, "VDI 4300 Part 7 - Indoor air pollution measurement. measurement of the indoor air change rate," July 2007.
- [47] Umweltbundesamt [German Environment Agency], "Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft," *Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz*, pp. 1358-1369, 2008 - 51.
- [48] H.-D. Schulze and G. Schuschke, "Studie über Notwendigkeit und Zuverlässigkeit von Luftwechsel und Luftvolumenstrommessungen," *Gesundheits-Ingenieur Haustechnik Bauphysik Umwelttechnik*, pp. 12-16, 111 (1990) Heft 1.
- [49] W. Raatschen, "Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik," *Gesundheits-Ingenieur Haustechnik Bauphysik Umwelttechnik*, pp. 78-87 & 129-138, 116 (1995) Heft 2 & 3.
- [50] F.-D. Heidt and H. Werner, "Microcomputer-aided measurement of air change rates," *Energy and Buildings*, pp. 313-320, Vol. 9, No. 4 (December 1986).
- [51] "ASHRAE Handbook Fundamentals," 2004.

12 Anhang

12.1 Nomogramme zur Abschätzung der Übertemperaturstunden

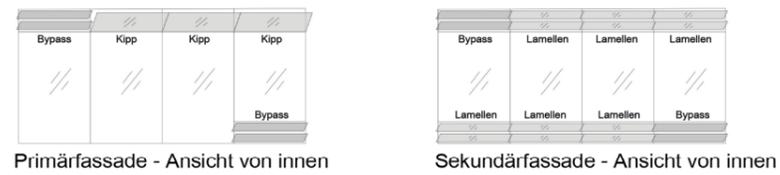
Nomogramm zur Abschätzung der Übertemperaturstunden eines Büros mit Bypass-Doppelfassade | Sommerklimaregion A



Dem dargestellten Nomogramm liegen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Standort Rostock (TRY 02, 2010)
- FZR = Fassadenzwischenraum
- Nutzungszeit Mo. - Fr. 07:00 - 18:00 Uhr, Urlaub bleibt unberücksichtigt, nur nationale Feiertage
- Heizperiode 01.10. - 30.04., Solltemperatur 21°C tagsüber, 17°C zwischen 18:00 - 05:00 Uhr
- Fenstersteuerung entsprechend des Projektberichtes Kap. 7.2.6
- Sonnenschutz im FZR, geschlossen ab 200 W/m² bzw. 150 W/m² für N/NO/NW-Ausrichtung
- Raumhöhe 3,00 m, Raumtiefe 6,00 m
- Betondecke unverkleidet, Doppelboden, Außenfassade vollflächig verglast, Innenwände Trockenbau
- Primärfassade 3-fach Isolierverglasung, 30% Rahmenanteil, Sekundärfassade einfach verglast, 10% Rahmenanteil
- Durchflussbeiwerte c_{d1} : 0,06 (Bypass) | 0,13 (Kippfenster) | 0,58 (Lamellen)

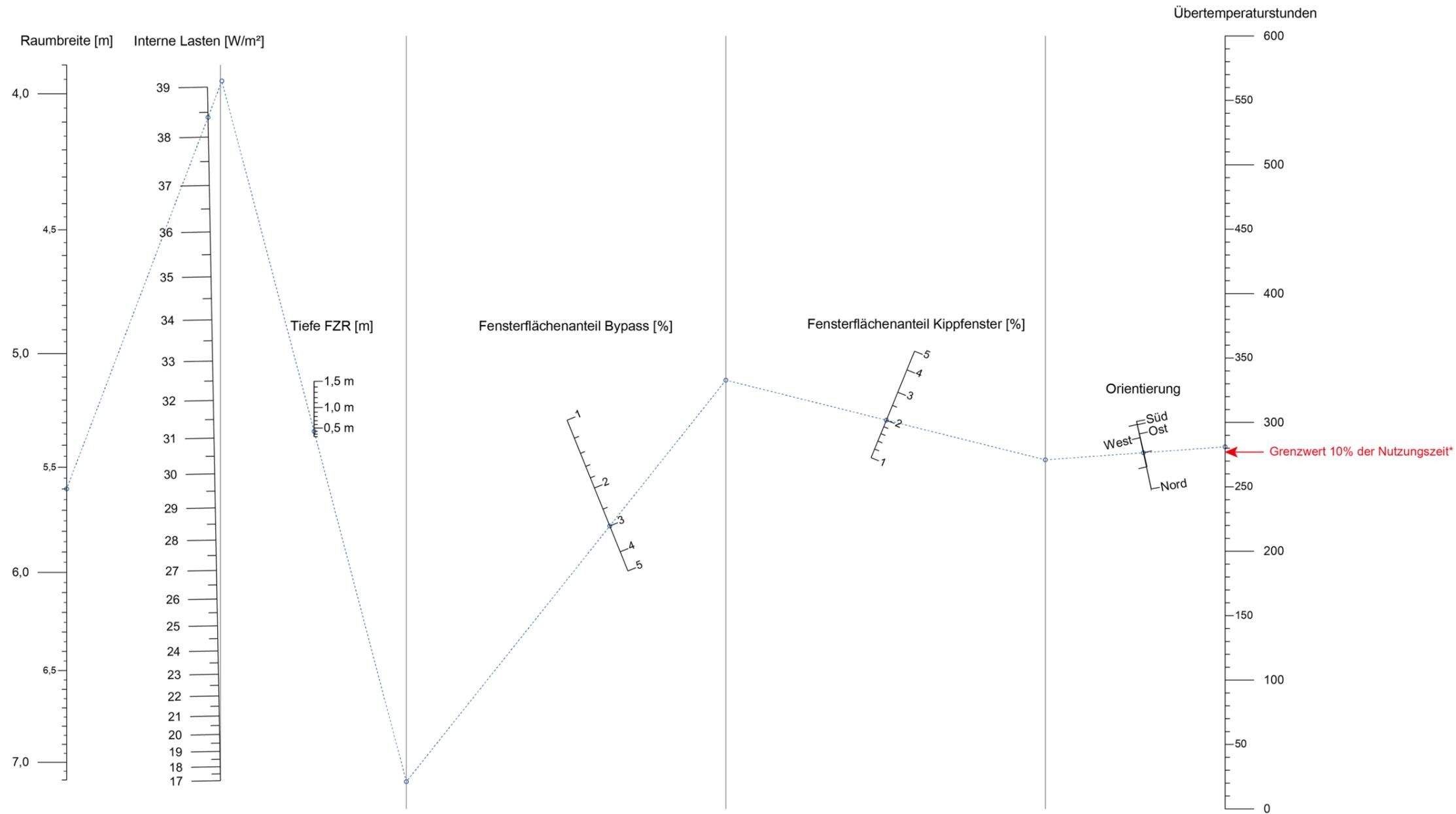
Geometrische Zusammenhänge der zugrunde liegenden Modelle:



$$\text{Fensterflächenanteil} = \frac{\text{Raumgrundfläche [m}^2\text{]}}{\text{Fensterfläche [m}^2\text{]}} \times 100 \%$$

$$\text{Fensterflächenanteil Außenlamellen} = 2,344 \times \text{Bypass [\%]} + 4,344 \times \text{Kipp [\%]}$$

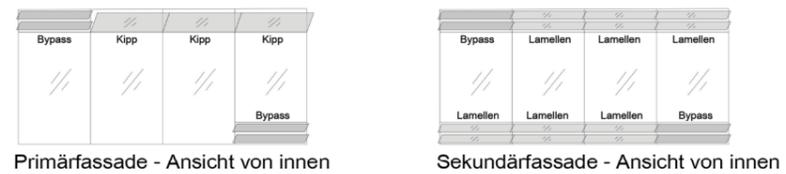
Nomogramm zur Abschätzung der Übertemperaturstunden eines Büros mit Bypass-Doppelfassade | Sommerklimaregion B



Dem dargestellten Nomogramm liegen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Standort Potsdam (TRY 04, 2010)
- FZR = Fassadenzwischenraum
- Nutzungszeit Mo. - Fr. 07:00 - 18:00 Uhr, Urlaub bleibt unberücksichtigt, nur nationale Feiertage
- Heizperiode 01.10. - 30.04., Solltemperatur 21°C tagsüber, 17°C zwischen 18:00 - 05:00 Uhr
- Fenstersteuerung entsprechend des Projektberichtes Kap. 7.2.6
- Sonnenschutz im FZR, geschlossen ab 200 W/m² bzw. 150 W/m² für N/NO/NW-Ausrichtung
- Raumhöhe 3,00 m, Raumtiefe 6,00 m
- Betondecke unverkleidet, Doppelboden, Außenfassade vollflächig verglast, Innenwände Trockenbau
- Primärfassade 3-fach Isolierverglasung, 30% Rahmenanteil, Sekundärfassade einfach verglast, 10% Rahmenanteil
- Durchflussbeiwerte c_{d1} : 0,06 (Bypass) | 0,13 (Kippfenster) | 0,58 (Lamellen)

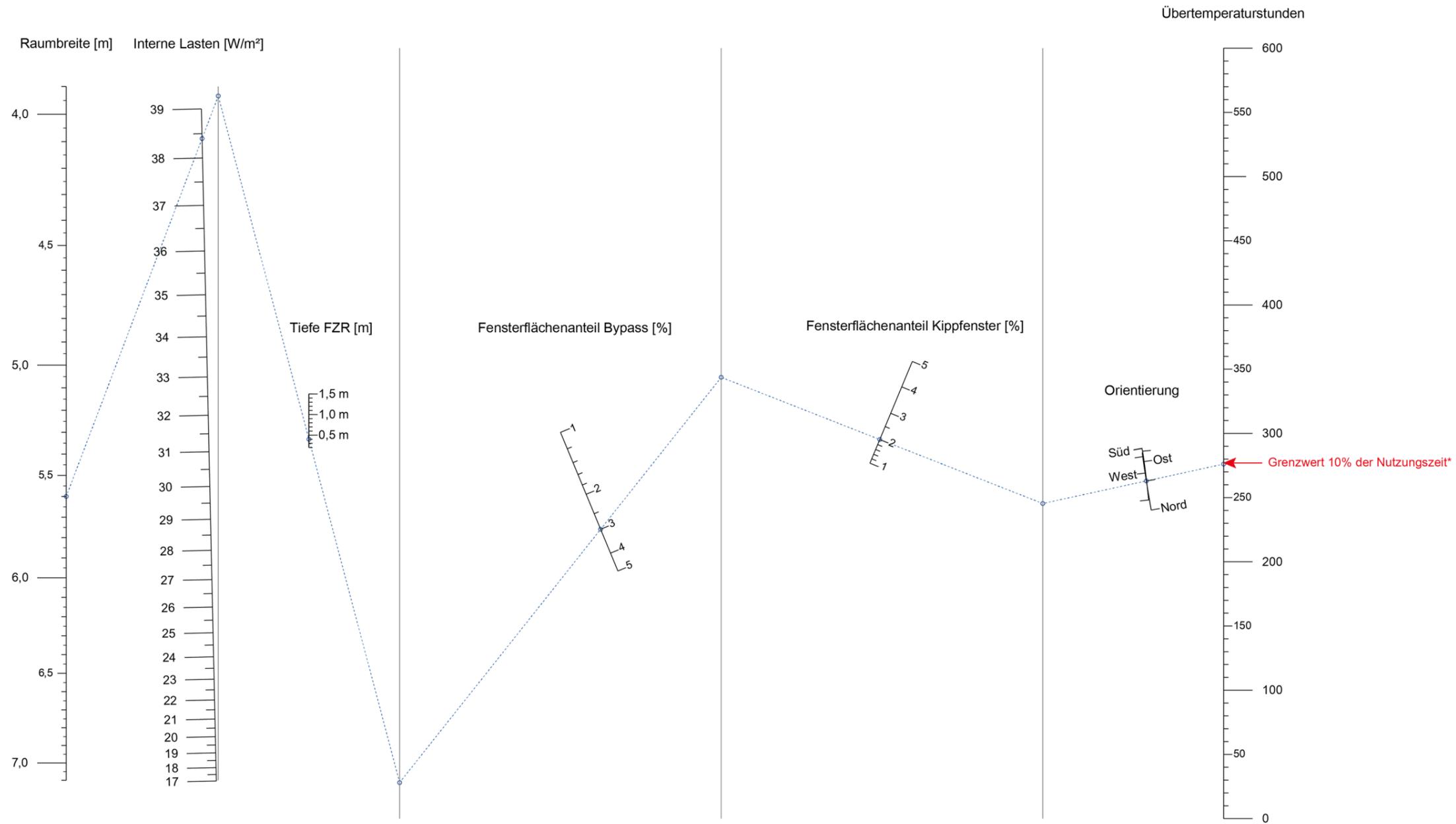
Geometrische Zusammenhänge der zugrunde liegenden Modelle:



$$\text{Fensterflächenanteil} = \frac{\text{Raumgrundfläche [m}^2\text{]}}{\text{Fensterfläche [m}^2\text{]}} \times 100 \%$$

$$\text{Fensterflächenanteil Außenlamellen} = 2,344 \times \text{Bypass [\%]} + 4,344 \times \text{Kipp [\%]}$$

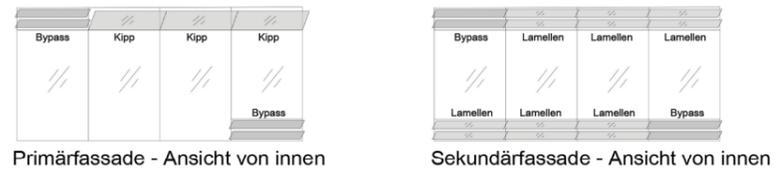
Nomogramm zur Abschätzung der Übertemperaturstunden eines Büros mit Bypass-Doppelfassade | Sommerklimaregion C



Dem dargestellten Nomogramm liegen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Standort Mannheim (TRY 12, 2010)
- FZR = Fassadenzwischenraum
- Nutzungszeit Mo. - Fr. 07:00 - 18:00 Uhr, Urlaub bleibt unberücksichtigt, nur nationale Feiertage
- Heizperiode 01.10. - 30.04., Solltemperatur 21°C tagsüber, 17°C zwischen 18:00 - 05:00 Uhr
- Fenstersteuerung entsprechend des Projektberichtes Kap. 7.2.6
- Sonnenschutz im FZR, geschlossen ab 200 W/m² bzw. 150 W/m² für N/NO/NW-Ausrichtung
- Raumhöhe 3,00 m, Raumtiefe 6,00 m
- Betondecke unverkleidet, Doppelboden, Außenfassade vollflächig verglast, Innenwände Trockenbau
- Primärfassade 3-fach Isolierverglasung, 30% Rahmenanteil, Sekundärfassade einfach verglast, 10% Rahmenanteil
- Durchflussbeiwerte c_{d1} : 0,06 (Bypass) | 0,13 (Kippfenster) | 0,58 (Lamellen)

Geometrische Zusammenhänge der zugrunde liegenden Modelle:

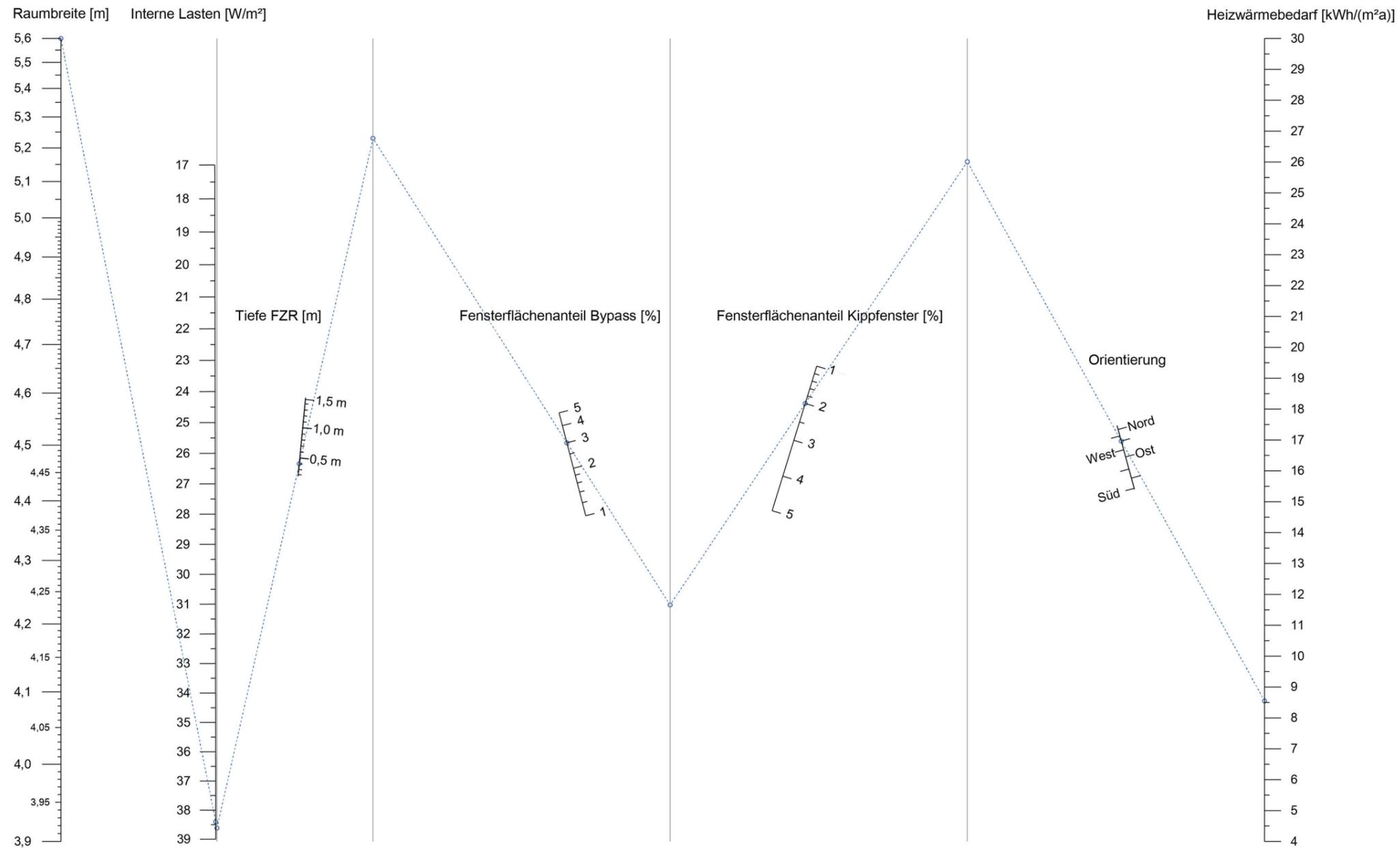


$$\text{Fensterflächenanteil} = \frac{\text{Raumgrundfläche [m}^2\text{]}}{\text{Fensterfläche [m}^2\text{]}} \times 100 \%$$

$$\text{Fensterflächenanteil Außenlamellen} = 2,344 \times \text{Bypass [\%]} + 4,344 \times \text{Kipp [\%]}$$

12.2 Nomogramme zur Abschätzung des Heizwärmebedarfs

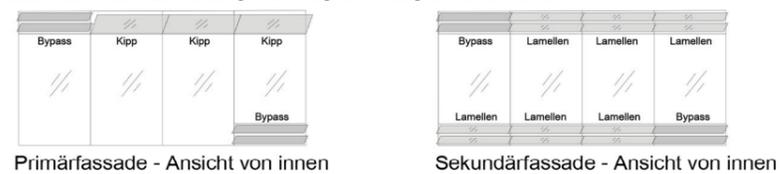
Nomogramm zur Abschätzung des Heizwärmebedarfs eines Büros mit Bypass-Doppelfassade | Sommerklimaregion A



Dem dargestellten Nomogramm liegen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Standort Rostock (TRY 02, 2010)
- FZR = Fassadenzwischenraum
- Nutzungszeit Mo. - Fr. 07:00 - 18:00 Uhr, Urlaub bleibt unberücksichtigt, nur nationale Feiertage
- Heizperiode 01.10. - 30.04., Solltemperatur 21°C tagsüber, 17°C zwischen 18:00 - 05:00 Uhr
- Fenstersteuerung entsprechend des Projektberichtes Kap. 7.2.6
- Sonnenschutz im FZR, geschlossen ab 200 W/m² bzw. 150 W/m² für N/NO/NW-Ausrichtung
- Raumhöhe 3,00 m, Raumtiefe 6,00 m
- Betondecke unverkleidet, Doppelboden, Außenfassade vollflächig verglast, Innenwände Trockenbau
- Primärfassade 3-fach Isolierverglasung, 30% Rahmenanteil, Sekundärfassade einfach verglast, 10% Rahmenanteil
- Durchflussbeiwerte c_{d1} : 0,06 (Bypass) | 0,13 (Kippfenster) | 0,58 (Lamellen)

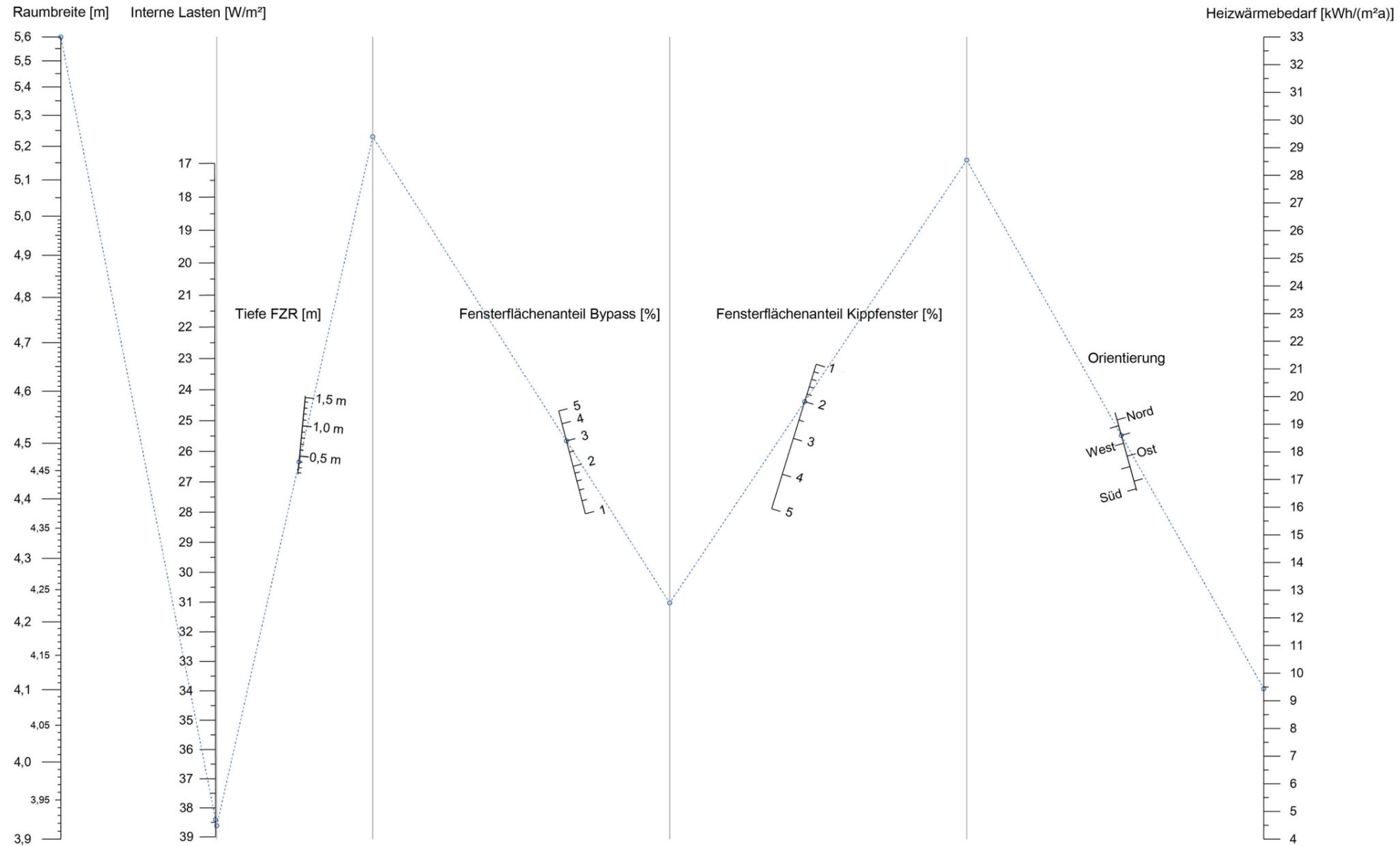
Geometrische Zusammenhänge der zugrunde liegenden Modelle:



$$\text{Fensterflächenanteil} = \frac{\text{Raumgrundfläche [m}^2\text{]}}{\text{Fensterfläche [m}^2\text{]}} \times 100 \%$$

$$\text{Fensterflächenanteil Außenlamellen} = 2,344 \times \text{Bypass [\%]} + 4,344 \times \text{Kipp [\%]}$$

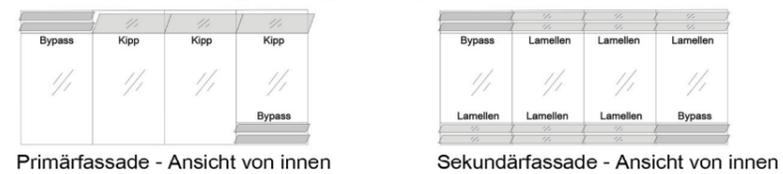
Nomogramm zur Abschätzung des Heizwärmebedarfs eines Büros mit Bypass-Doppelfassade | Sommerklimaregion B



Dem dargestellten Nomogramm liegen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Standort Potsdam (TRY 04, 2010)
- FZR = Fassadenzwischenraum
- Nutzungszeit Mo. - Fr. 07:00 - 18:00 Uhr, Urlaub bleibt unberücksichtigt, nur nationale Feiertage
- Heizperiode 01.10. - 30.04., Solltemperatur 21°C tagsüber, 17°C zwischen 18:00 - 05:00 Uhr
- Fenstersteuerung entsprechend des Projektberichtes Kap. 7.2.6
- Sonnenschutz im FZR, geschlossen ab 200 W/m² bzw. 150 W/m² für N/NO/NW-Ausrichtung
- Raumhöhe 3,00 m, Raumtiefe 6,00 m
- Betondecke unverkleidet, Doppelboden, Außenfassade vollflächig verglast, Innenwände Trockenbau
- Primärfassade 3-fach Isolierverglasung, 30% Rahmenanteil, Sekundärfassade einfach verglast, 10% Rahmenanteil
- Durchflussbeiwerte c_d : 0,06 (Bypass) | 0,13 (Kippfenster) | 0,58 (Lamellen)

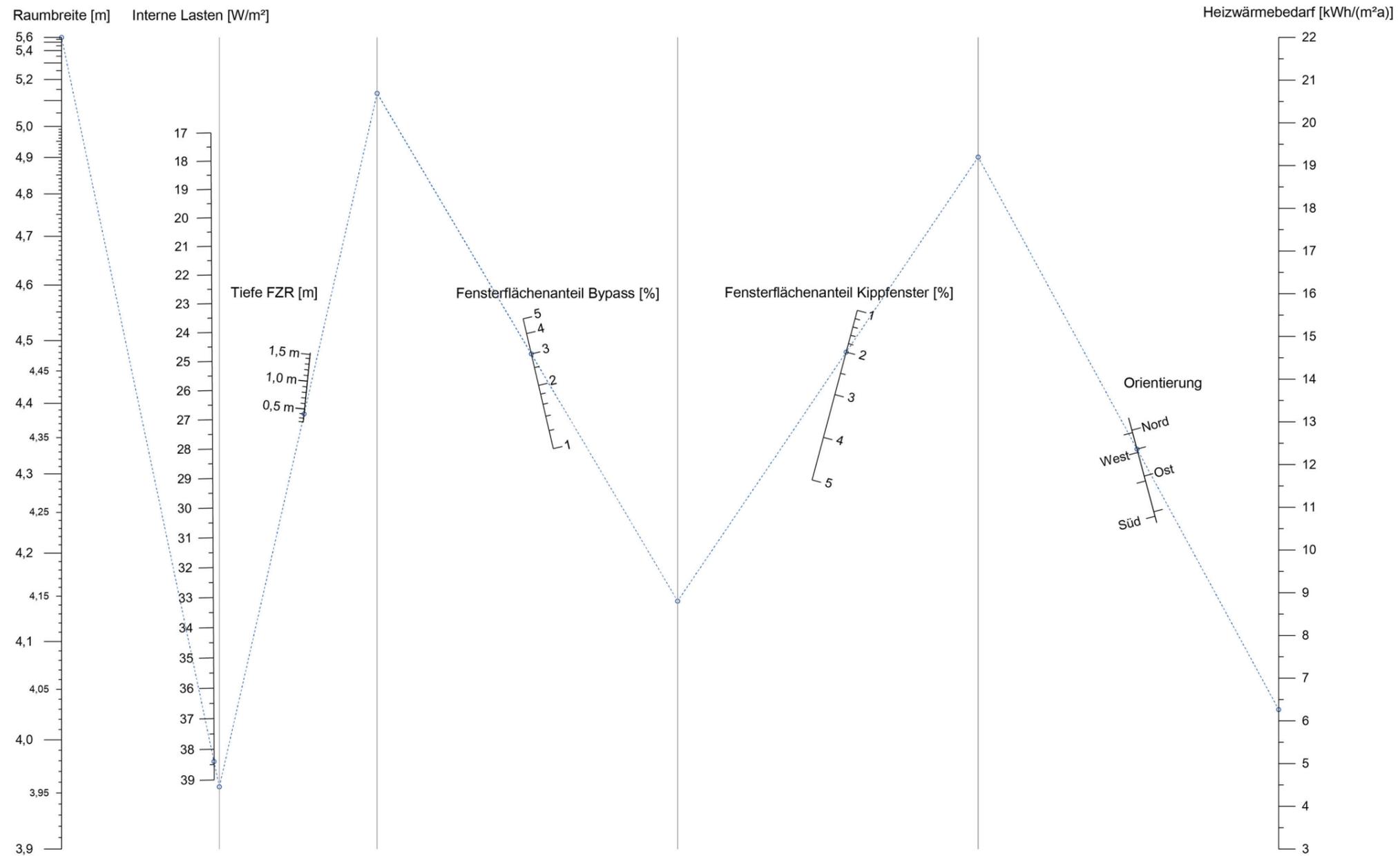
Geometrische Zusammenhänge der zugrunde liegenden Modelle:



$$\text{Fensterflächenanteil} = \frac{\text{Raumgrundfläche [m}^2\text{]}}{\text{Fensterfläche [m}^2\text{]}} \times 100 \%$$

$$\text{Fensterflächenanteil Außenlamellen} = 2,344 \times \text{Bypass [\%]} + 4,344 \times \text{Kipp [\%]}$$

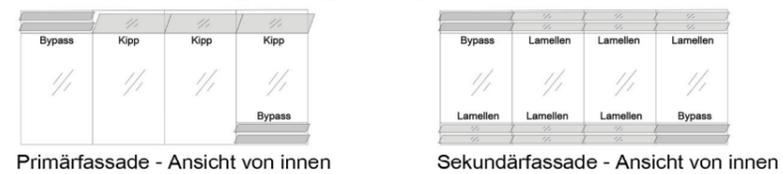
Nomogramm zur Abschätzung des Heizwärmebedarfs eines Büros mit Bypass-Doppelfassade | Sommerklimaregion C



Dem dargestellten Nomogramm liegen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Standort Mannheim (TRY 12, 2010)
- FZR = Fassadenzwischenraum
- Nutzungszeit Mo. - Fr. 07:00 - 18:00 Uhr, Urlaub bleibt unberücksichtigt, nur nationale Feiertage
- Heizperiode 01.10. - 30.04., Solltemperatur 21°C tagsüber, 17°C zwischen 18:00 - 05:00 Uhr
- Fenstersteuerung entsprechend des Projektberichtes Kap. 7.2.6
- Sonnenschutz im FZR, geschlossen ab 200 W/m² bzw. 150 W/m² für N/NO/NW-Ausrichtung
- Raumhöhe 3,00 m, Raumtiefe 6,00 m
- Betondecke unverkleidet, Doppelboden, Außenfassade vollflächig verglast, Innenwände Trockenbau
- Primärfassade 3-fach Isolierverglasung, 30% Rahmenanteil, Sekundärfassade einfach verglast, 10% Rahmenanteil
- Durchflussbeiwerte c_d : 0,06 (Bypass) | 0,13 (Kippfenster) | 0,58 (Lamellen)

Geometrische Zusammenhänge der zugrunde liegenden Modelle:



$$\text{Fensterflächenanteil} = \frac{\text{Raumgrundfläche [m}^2\text{]} \times 100\%}{\text{Fensterfläche [m}^2\text{]}}$$

$$\text{Fensterflächenanteil Außenlamellen} = 2,344 \times \text{Bypass [\%]} + 4,344 \times \text{Kipp [\%]}$$