

ABSCHLUSSBERICHT

Messungen am Testkubus in Ziegelbauweise auf dem Gelände der
JUWÖ Poroton-Werke Ernst Jungk & Sohn GmbH

Technische Universität Kaiserslautern
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Bauphysik/Energetische Gebäudeoptimierung
Paul-Ehrlich-Straße, Gebäude 29
67663 Kaiserslautern

ENTWURF: 04.06.2019

ENDVERSION: 16.07.2019

KAISERSLAUTERN, 16.07.2019

Jonas Spiegel, B.Sc.
Dipl.-Ing. Markus Hofmann
Prof. Dr. Oliver Kornadt

Inhalt

Einleitung	3
1. Vorhabenbeschreibung	4
1.1 Vorangegangene Untersuchung	4
1.2 Aktuelle Untersuchung	5
2. Stand der Technik	7
2.1 Spezifische Wärmekapazität	7
2.2 Sommerlicher Wärmeschutz	9
2.3 Luftwechsel	10
3. Versuchskubus	11
3.1 Bauliche Details	11
3.2 Technische Gebäudeausrüstung	12
3.3 Messtechnik	13
4. Durchführung	15
4.1 Datenaufnahme	15
4.2 Regelungskonzepte	16
4.2.1 Allgemeine Lüftungsvorgänge	16
4.2.2 Nachtlüftung	17
4.2.3 Bauteilverhalten	19
4.2.4 Abkühlphase	19
4.2.5 Aufheizphase	20
4.2.6 Nutzerabwesenheit	20
5. Experimentelle Messergebnisse	22
5.1 Allgemeine Lüftungsvorgänge	23
5.2 Nachtlüftung	24
5.3 Abkühlphase	28
5.4 Aufheizphase	28
5.5 Nutzerabwesenheit	29
6. Auswertung von Messdaten	31
6.1 Allgemeine Lüftungsvorgänge	31
6.2 Nachtlüftung	35
6.3 Abkühlphase	39
6.4 Aufheizphase	41
6.5 Nutzerabwesenheit	43
7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	46
8. Bildverzeichnis	49
9. Literatur	51

Einleitung

Die thermische Speicherfähigkeit von Baukonstruktionen kann erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch und die thermische Behaglichkeit von Gebäuden haben. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an die Energieeffizienz [1–4] und den Nutzungskomfort von Gebäuden [5] müssen nicht nur die Weiterentwicklung von Dämmsystemen und der Systeme zur Energiebereitstellung berücksichtigt werden. Im Zuge immer genauerer Berechnungs- und Bilanzierungsverfahren ist es notwendig, unter anderem auch den wechselseitigen Einfluss von Außenklima, Nutzerverhalten und Konstruktionsweise eines Gebäudes auf den Energiebedarf zu berücksichtigen.

Das vorliegende Forschungsprojekt untersucht vor diesem Hintergrund das Zusammenspiel von Innen- und Außenklima bei unterschiedlichen Nutzungsszenarien. Weiterhin soll betrachtet werden, wie das thermische Verhalten der Bauteile beeinflusst wird und wie diese ihrerseits Einfluss auf das Innenklima nehmen.

1. Vorhabenbeschreibung

1.1 Vorgegangene Untersuchung

In einem vorangegangenen Forschungsvorhaben [6] wurden vier Versuchskuben in verschiedenen Bauweisen errichtet. Im Zeitraum von August 2015 bis April 2018 wurde insbesondere der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit der verschiedenen Baumaterialien auf das thermische Verhalten Kuben untersucht. Das Ziel dieses vorangegangenen Forschungsprojektes ist es, einen Wärmespeicherindex für Gebäude zu entwickeln, um Aussagen über den Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit auf den Heizenergiebedarf, das sommerliche Überhitzungspotential und die thermische Behaglichkeit machen zu können. Dafür wurde je ein Kubus mit Außenwänden aus Ziegel-Mauerwerk, Porenbeton und Kalksandstein mit außenseitiger Dämmung errichtet. Ein vierter Kubus wurde in Holzbauweise aus Brettsperrelementen errichtet. Hergestellt und eingebaut wurden die Baustoffe für die Außenwände von den verschiedenen Projektpartnern.

Jeder der Kuben verfügt über die gleiche Geometrie und Ausrichtung. Weiterhin sind identische Fenstertüren installiert. Die technische Gebäudeausrüstung zur Belüftung und Heizung ist in allen Versuchskuben gleich, sodass eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse gewährleistet wird.

Neben verschiedenen Bauteiltemperaturen wurde auch die thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 [7] im Innern der Kuben gemessen. Durch eine Wetterstation an den jeweiligen Standorten der Kuben wurde das Außenklima für spätere Auswertungen gemessen.

Mit der verbauten Regelungstechnik konnten beliebige Heiz- und Lüftungsszenarien realisiert werden. Zunächst wurde für die Sommermonate von Mai bis September untersucht, wann der Einsatz der Heizung erforderlich war, um eine Solltemperatur von rund 20 °C aufrecht zu erhalten. Weiterhin wurde betrachtet, wann und wie häufig die operative Raumtemperatur die Grenzwerte für den Sommerlichen Wärmeschutz überschritt. Daran anschließend wurde die Behaglichkeit im Kubusinneren für verschiedene Sommertage mit dem berechneten vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) [7] analysiert. Zuletzt wurde für einen exemplarischen Sommertag der Temperaturverlauf im Wandquerschnitt untersucht.

Vergleichbare Untersuchungen wurden auch für die Wintermonate November und Dezember durchgeführt. Im Dezember wurde zudem ein besonderes Regelungsprogramm

durchgeführt. Die Raumlufthtemperatur wurde auf 30°C erhöht und über einen Zeitraum von 11 Tagen konstant gehalten. Anschließend wurde die Heizung abgestellt und der Auskühlvorgang bis auf 16°C Raumlufthtemperatur beobachtet. Dabei wurde einerseits der Verlauf der Raumlufthtemperatur während des Aufheiz- und Abkühlvorgang untersucht und andererseits der Verlauf des oben genannten PPD-Werts.

In einem weiteren Regelungsszenarium von Ende Januar bis Februar wurde der Einfluss einer Nachtabenkung der Heizung auf die Raumlufthtemperatur betrachtet.

Über den gesamten Messzeitraum wurde zusätzlich zu den physikalischen Größen auch der Stromverbrauch der Kuben aufgezeichnet. Gemessen wurden alle internen Wärmeinträge in die Kuben durch technische Geräte. Dazu zählte der Stromverbrauch des Rippenrohrheizkörpers, des Laptops, der Messtechnik, der Regelungsbox und der künstlichen Beleuchtung.

Parallel zur Errichtung der realen Versuchskuben wurden Simulationsmodelle erstellt und mit den Messergebnissen validiert. Auf Grundlage dessen wurde ein Simulationsmodell für ein repräsentatives Mehrfamilienhaus erstellt, in dem zwei ausgewählte Räume näher ausgewertet wurden.

Die Forschungsarbeit hat zu der Erkenntnis geführt, dass der Nutzenergiebedarf für Heizen umso niedriger ist, je höher die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} eines Gebäudes ist. Für Gebäude mit extrem schwerer im Vergleich zu extrem leichter Bauweise wurde ein um bis zu 9 % geringerer jährlicher Heiz-Nutzenergiebedarf ermittelt.

Außerdem hat sich gezeigt, dass sich eine höhere wirksame Wärmespeicherfähigkeit günstig auf Übergradtemperaturstunden und thermische Behaglichkeit auswirkt.

Auf Grundlage der validierten Simulationsergebnisse wurden Wärmespeicherindices abgeleitet, mit denen der Unterschied bezüglich Heizenergiebedarf, Übertemperaturgradstunden und thermischer Behaglichkeit von einer betrachteten Bauweise zu einer Referenzbauweise mit einem C_{wirk} von 50 Wh/(m²K) berechnet werden kann.

1.2 Aktuelle Untersuchung

Das aktuelle Forschungsprojekt soll die oben genannten Ergebnisse, die den Ziegel-Kubus betreffen, überprüfen, mit einer längeren Messdauer untermauern und erweitern.

Nach einem kurzen Überblick über den aktuellen Stand der Technik in Kapitel 2 folgt im anschließenden Kapitel 3 die Beschreibung des Kubus. Es wird der Aufbau des Kubus

sowie seiner Bestandteile erläutert. Weiterhin wird die installierte technische Gebäudeausrüstung und Messtechnik erklärt.

Die Messungen wurden vom 1.5.2018 bis zum 30.4.2019 fortgeführt und weitere Regelungsszenarien untersucht. In Kapitel 4 werden die durchgeführten Regelungsszenarien dargestellt und ihr Zweck erläutert. Es wurden einerseits längere Aufheiz- und Abkühlphasen durchgeführt, um das Verhalten der einzelnen Bauteile genauer zu untersuchen. Andererseits wurden Regelungsszenarien entwickelt, die einem realistischen Nutzerverhalten entsprechen, um den tatsächlichen Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen.

In Kapitel 5 und 6 werden die gesammelten Messwerte vorgestellt und ausgewertet. Zu diesem Zweck werden alle Messergebnisse aus dem Kubus in einer Datenbank gespeichert. Damit ist es möglich, die großen Datenmengen von rund 10.000 Datensätzen pro Woche zu speichern und zu verarbeiten. Das Datenbanksystem hat weiterhin den Vorteil, dass die Messwerte zuverlässig auf Fehler überprüft werden können und so die Belastbarkeit der Forschungsergebnisse erhöht wird. Auch komplexere Abfragen in Abhängigkeit vom Außenklima oder dem eingestellten Regelungsszenario mit großer Datengrundlage können so erstellt und untersucht werden.

Abschließend werden die Auswertungsergebnisse in Kapitel 7 zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

2. Stand der Technik

2.1 Spezifische Wärmekapazität

Zur Beurteilung von Bauteil- und Baukonstruktionseigenschaften im Zusammenhang mit der Wärmespeicherfähigkeit von Baustoffen kann insbesondere die spezifische Wärmekapazität c herangezogen werden. Diese beschreibt diejenige Wärmemenge Q , welche erforderlich ist, um 1 kg eines Materials um 1 K zu erwärmen. [9] Nach der untenstehenden Formel (1) kann in Abhängigkeit der Rohdichte der verwendeten Materialien die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} für eine wirksame Schichtdicke eines Bauteils berechnet werden.

$$C_{\text{wirk}} = \sum_j c_j \cdot \rho_j \cdot d_j \cdot A_j \left[\frac{\text{Wh}}{\text{K}} \right] \quad (1)$$

Legende

C_{wirk}	wirksame Wärmespeicherfähigkeit [Wh/K]
c_j	spezifische Wärmekapazität des Baustoffes in Schicht j [Wh/(kgK)]
ρ_j	Rohdichte des Baustoffes in Schicht j [kg/m ³]
d_j	wirksame Schichtdicke der Schicht j [m]
A_j	wirksame Bauteilfläche [m ²]

Bei instationären Betrachtungen ist nach [10] die wirksame Schichtdicke abhängig von der Periodendauer der Temperaturschwankung. Bei einer Periodendauer von 1 Tag wird hier von einer Einflusstiefe von etwa 10 cm für übliche Baustoffe (ausgenommen Dämmstoffe und Metalle) ausgegangen.

Diese sogenannte 10 cm-Regel wird auch bei der Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 4108-2 angewendet. Bei raumtrennenden Wänden und Decken mit einer Dicke unter 20 cm darf pro Raumseite höchstens der halbe Bauteilquerschnitt berücksichtigt werden. Sofern wärmedämmende Schichten (Wärmeleitfähigkeit $\lambda < 0,1$ W/(mK) und Wärmedurchlasswiderstand $R > 0,25$ m²K/W) im beschriebenen 10-cm-Bereich bzw. im halben Bauteilquerschnitt liegen, ist nur der raumseitige Bereich bis zur Wärmedämmebene anzusetzen.

Entsprechend der EnEV 2016 [11] können sowohl Wohn- als auch Nichtwohngebäude mit Hilfe der Normenreihe DIN V 18599 energetisch bewertet werden. DIN V 18599-2 [12] erlaubt vereinfacht die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} mittels den nachstehenden Formeln (2) bis (4) zu bestimmen.

$$\text{Leichte Bauweise } C_{wirk} = 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot A_B \quad (2)$$

$$\text{Mittlere Bauweise } C_{wirk} = 90 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot A_B \quad (3)$$

$$\text{Schwere Bauweise } C_{wirk} = 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \cdot A_B \quad (4)$$

Legende

C_{wirk} wirksame Wärmespeicherfähigkeit [Wh/K]

A_B Bezugsfläche [m^2]

In Übereinstimmung mit DIN V 18599-2 [12] ist bei Gebäuden mit abgehängten oder thermisch abgedeckten Decken, mit Innendämmung der Außenbauteile und/oder mit hohen Räumen ($> 4,5 \text{ m}$) ohne Nachweis der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} von einer leichten Bauart auszugehen. Sind stattdessen Stahlbetondecken sowie massive Innen- und Außenbauteile mit einer flächenanteilig gemittelten Rohdichte zwischen $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$ vorhanden, kann vereinfacht eine mittlere Bauart angesetzt werden. Bei einer Rohdichte der massiven Innen- und Außenbauteile von mindestens $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ist von einer schweren Bauart auszugehen. Alternativ darf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit auch nach DIN EN ISO 13786 [10] bestimmt und die Bauart entsprechend (5),(6) und(7) ermittelt werden

$$\text{Leichte Bauweise, wenn: } \frac{C_{wirk}}{A_G} < 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (5)$$

$$\text{Mittlere Bauweise, wenn: } 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \leq \frac{C_{wirk}}{A_G} \leq 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (6)$$

$$\text{Schwere Bauweise, wenn: } \frac{C_{wirk}}{A_G} > 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K}) \quad (7)$$

2.2 Sommerlicher Wärmeschutz

Die Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes ist auch bei der Planung des sommerlichen Wärmeschutzes zu berücksichtigen. Die EnEV 2016 [11] fordert für neu zu errichtende Gebäude und für Erweiterungen mit einer hinzukommenden zusammenhängenden beheizten und/oder gekühlten Nutzfläche größer als 50 m² die Einhaltung der Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 [8]. Für reguläre Räume (nicht verbunden mit unbeheizten Glasvorbauten, Doppelfassaden oder transparenten Wärmedämmsystemen) kann die Erfüllung der Vorgaben vereinfacht mit Hilfe des Sonneneintragskennwerte-Verfahrens nachgewiesen werden. Im Rahmen dieses Verfahrens sind für einen kritischen Raum der vorhandene Sonneneintragskennwert S_{vorh} und der zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul} zu bestimmen und gegenüberzustellen. Die Mindestanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz ist erfüllt, wenn der vorhandene Sonneneintragskennwert S_{vorh} den zulässigen Sonneneintragswert S_{zul} nicht überschreitet. Die Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes geht gemäß der folgenden Formel (8) bei der Bestimmung des zulässigen Sonneneintragskennwertes S_{zul} durch die anteiligen Sonneneintragskennwert S_1 und S_6 ein.

$$S_{\text{zul}} = \sum S_x = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 \quad (8)$$

Legende

S_{zul}	zulässiger Sonneneintragskennwert [-]
S_x	anteiliger Sonneneintragskennwert [-]
S_1	Sonneneintragskennwert resultierend aus Nachtlüftung und Bauart [-]
S_2	Sonneneintragskennwert resultierend aus grundflächenbezogenem Fensterflächenanteil [-]
S_3	Sonneneintragskennwert resultierend aus Sonnenschutzglas [-]
S_4	Sonneneintragskennwert resultierend aus Fensterneigung [-]
S_5	Sonneneintragskennwert resultierend aus Fensterorientierung [-]
S_6	Sonneneintragskennwert resultierend aus Einsatz passiver Kühlung [-]

2.3 Luftwechsel

Ein regelmäßiger Austausch der Raumlufte ist aus vielerlei Hinsicht empfehlenswert. Je nach Belegungsdichte und Nutzungsart von Räumen steigt nicht nur die Geruchsbelästigung, auch wird die Raumlufte mit Feuchtigkeit angereichert. Um eine hygienische Luftqualität zu gewährleisten und um Schimmelpilzwachstum zu vermeiden, ist ein ausreichender Luftaustausch erforderlich.

Nach [8] kann für Wohngebäude ein über den Tag gemittelter konstanter Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ angenommen werden. Nachts kann von einem erhöhten Luftwechsel ausgegangen werden, sofern die Möglichkeit der erhöhten Nachtlüftung gegeben ist. Wenn im betrachteten Raum die Möglichkeit zur nächtlichen Fensterlüftung gegeben ist, kann der Luftwechsel für die Nachtstunden auf $2,0 \text{ h}^{-1}$ erhöht werden. Wenn eine geschossübergreifende Fensterlüftung oder eine entsprechende mechanische Lüftungsmöglichkeit gewährleistet ist sogar auf $5,0 \text{ h}^{-1}$.

3. Versuchskubus

3.1 Bauliche Details

Der untersuchte Versuchskubus in Ziegelbauweise wurde auf dem Gelände der JUWÖ Poroton-Werke Ernst Jungk und Sohn GmbH in Wöllstein (Rheinland-Pfalz) im Jahr 2017 errichtet.



Abbildung 1: (links) Aufstellort des Ziegelkubus in Wöllstein

Abbildung 2: (rechts) Fertig errichteter Ziegelkubus

Der Kubus hat Innenmaße von 2,76 / 2,76 / 2,8 m (L/B/H) und weist eine nach Südosten orientierte Fenstertür mit den Rohbaumaßen von 0,885 / 2,01 m (B/H) auf. Die Tür hat eine 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, einen Gesamtenergiedurchlassgrad g von 55 % und einen Wärmedurchgangskoeffizienten U_w von insgesamt 1,10 W/(m²K). Die bauphysikalischen Kenngrößen der opaken Bauteile sind in den Tabellen 1-3 dargestellt. Dabei wurde die flächenbezogene Wärmespeicherkapazität κ_m jeweils für eine Tiefe von 10 cm bzw. nur bis zum Anfang einer wärmedämmenden Schicht berechnet (Fußboden) und auf die Innenoberfläche des jeweiligen Bauteils bezogen.

Tabelle 1: Wandaufbau

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
← außen innen →	1	Innenputz	0,01	0,7	1400	1000
	2	Ziegel	0,365	0,09	700	1000
	3	Außenputz	0,018	0,25	1000	1000
$d = 0,393 \text{ m}$			$U = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$		$\kappa_m = 21,4 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$	

Tabelle 2: Deckenaufbau

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
↓ unten / oben ↑	1	Abdichtung	-	-	-	-
	2	EPS-Gefälledämmung	0,03	0,035	-	1450
	3	EPS-Dämmung	0,08	0,035	-	1450
	4	Stahlbeton	0,2	2,3	2300	1000
d = 0,31 m			U = 0,30 W/(m²K)		$\kappa_m = 63,9$ Wh/(m²K)	

Tabelle 3: Fußbodenaufbau

	Schicht	Baustoff	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
↓ unten / oben →	1	Estrich	0,06	1,4	2000	1000
	2	Dämmung	0,14	0,035	-	1450
	3	Stahlbeton	0,16	2,3	2300	1000
d = 0,36 m			U = 0,24 W/(m²K)		$\kappa_m = 33,3$ Wh/(m²K)	

3.2 Technische Gebäudeausrüstung

Um im Innern des Kubus realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, wurde ein Rippenrohrheizkörper mit einer Maximalleistung von 1000 W installiert. Der Heizkörper ist zwischen Fenstertür und Raummitte platziert. Ein Pt100-Temperaturfühler misst in 0,60m Höhe die Raumlufthtemperatur und dient als Basis für die Steuerung der Heizleistung.

Für eine kontrollierbare Belüftung sind jeweils in die Südwest- (unterer Bereich) und die Nordost-Außenwand (oberer Bereich) Rohre eingebaut. Ein Ventilator im Rohr der Nordost-Wand (Abluftrohr) fördert bei Bedarf Luft vom Rauminnern nach außen. Dabei strömt durch das Rohr in der Südwest-Wand (Zuluftrohr) Außenluft nach. Beide Rohre sind mit Absperrklappen und je einem verbundenen Stellmotor ausgestattet, sodass ein ungewollter Luftwechsel verhindert wird. Zur Regelung des Luftwechsels dient ein Thermoanemometer im Zuluftrohr, das die Zuluftgeschwindigkeit und die Zulufttemperatur misst.

Heizkörper, Ventilator und Stellmotoren sind mit einer Regelungsbox verbunden. Diese steuert mithilfe der genannten Sensoren Raumlufthtemperatur und Luftwechselrate. Um geplante Luftwechselraten möglichst konstant realisieren zu können, wurde dauerhaft auf den Einsatz von Fensterlüftung verzichtet.

Um den Kubus bei Bedarf künstlich beleuchten zu können, wurde jeweils ein LED-Leuchtmittel mit einer Leistung von 11 W mittig oberhalb der Fenstertür installiert.

3.3 Messtechnik

Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens der Bauteile und der hygrothermischen Bedingungen im Innern des Kubus wurden verschiedene Sensoren installiert. Wie in Abbildung 3 zu sehen, wurde ein Wandbaustein der Nord-Ost-Wand in verschiedenen tiefen mit NTC-Sensoren versehen, um den Temperaturverlauf im Wandquerschnitt aufzeichnen zu können. Zusätzlich wurde je ein Sensor in der Innen- und Außenputzschicht angebracht. An den übrigen Wänden wurde jeweils ein Sensor in beiden Putzschichten installiert. Für den unteren Raumabschluss wird ebenfalls die innere und äußere Oberflächentemperatur mittels NTC-Sensoren protokolliert. In der Decke messen fünf Sensoren die Temperatur in verschiedenen Tiefen sowie an den Oberflächen.



Abbildung 3: Präparierter Ziegel-Mauerstein

Zur Aufzeichnung des Raumklimas wurde im Kubus in der Raummitte ein Behaglichkeitsmessstand entsprechend der nachstehenden Abbildung 4 installiert. Entsprechend der DIN EN 15251 [13] wurde ein Globe-Thermometer zur Ermittlung der mittleren Strahlungstemperatur, ein digitaler Fühler zur Messung von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftdruck sowie einem omnidirektionalen Thermoanemometer zur Aufzeichnung der Luftströmung in einer Höhe von 0,60 m oberhalb des Fußbodens installiert. Zusätzlich wurde im Behaglichkeitsmessstand in einer Höhe von 1,10 m ein zweiter baugleicher digitaler Fühler eingesetzt, um Aussagen über eine mögliche Temperaturschichtung treffen zu können.

Versuchskubus



Abbildung 4: Behaglichkeitsmesstand mit Sensoren in Strahlungsschilden; Rippenheizkörper und Zuluftrohr

4. Durchführung

4.1 Datenaufnahme

Die Erfassung der Bauteil- und Raumlufttemperaturen sowie aller anderen gemessenen Größen wie Zulufttemperatur oder –geschwindigkeit erfolgt über Sensoren und Interface des Herstellers Ahlborn. Die Messdaten werden im Minutentakt lokal auf dem Computer im Ziegelkubus gespeichert und für die weitere Verarbeitung per Fernzugriff heruntergeladen. Die ordnungsgemäße Funktion der Regelungstechnik kann jederzeit anhand der entsprechenden Sensoren kontrolliert werden. Zusätzlich fährt ein Mitarbeiter der TU Kaiserslautern in regelmäßigen Abständen zum Kubus und kontrolliert die Geräte. Bei diesen Vor-Ort-Terminen liest der Mitarbeiter auch die Messdaten der Wetterstation auf dem nahegelegenen Dach der JUWÖ Poroton-Werke aus.

Um die Rohdaten für eine weitere Verarbeitung und Auswertung aufzubereiten, werden die Dateien in eine Datenbank eingelesen. Dadurch können Stunden- oder Tagesmittelwerte gebildet und entsprechende Standardabweichungen ermittelt werden.

Ein weiterer Vorteil der Nutzung eines Datenbanksystems ist, dass die Messwerte im Zuge des Einlesens in die Datenbank automatisiert auf Fehler kontrolliert werden können. Insbesondere wird kontrolliert, ob die eingestellte Solltemperatur der Raumluft erreicht wird und ob im Zuluftrohr die für die eingestellte Luftwechselrate erforderliche Luftgeschwindigkeit erreicht wird. Durch diese fortlaufenden Kontrollen kann auf Störungen im Betrieb des Kubus schnellstmöglich reagiert werden und Fehlfunktionen behoben werden. Weiterhin können mit Hilfe der Datenbank auch komplexe Abfragen mit großer Datengrundlage erstellt und ausgewertet werden.

4.2 Regelungskonzepte

Im Verlauf des Forschungsprojektes wurden verschiedene Regelungsszenarien erstellt und durchgeführt. Es wurde einerseits das Bauteilverhalten bei starken Aufheiz- und Abkühlphasen untersucht und andererseits einige möglichst realitätsnahe Szenarien erstellt. Eine Übersicht über die verschiedenen Szenarien, die auf den folgenden Seiten genauer erläutert werden, bietet Abbildung 5.

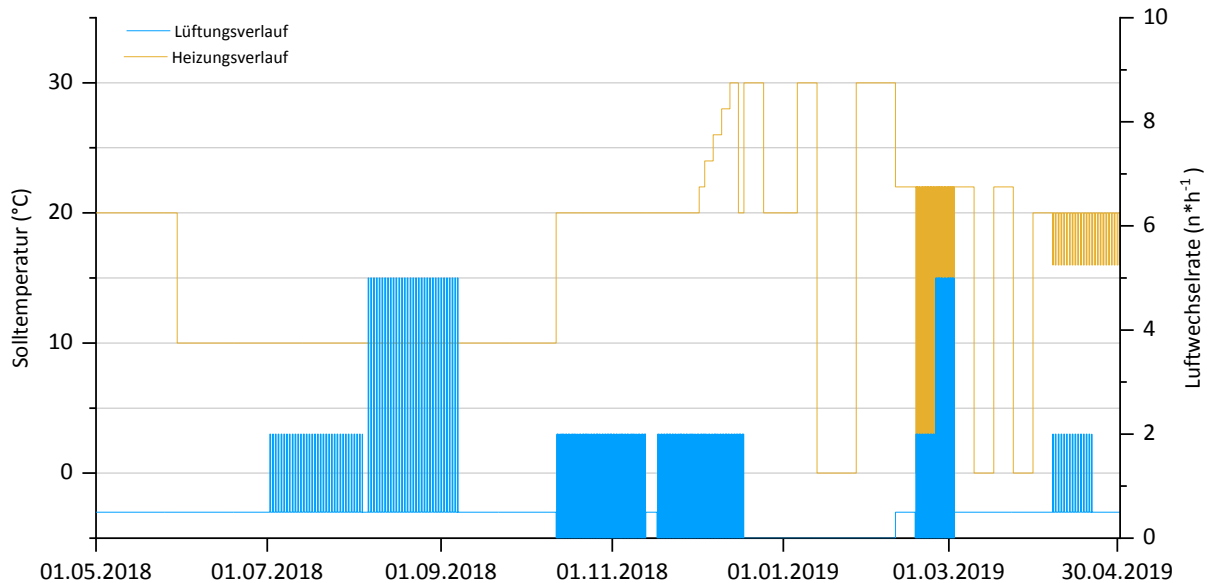


Abbildung 5: Übersicht über durchgeführte Regelungsszenarien im Projektzeitraum (01.05.2018 – 30.04.2019)

4.2.1 Allgemeine Lüftungsvorgänge

Zur Untersuchung des Einflusses der täglichen Lüftung auf den Temperaturverlauf im Inneren des Kubus und seiner Bauteile wurde ein Regelungsszenario zur Abbildung des Nutzerverhaltens bezüglich Heizung und Lüftung erstellt. In der Literatur wird in verschiedenen Quellen Verbrauchern geraten, regelmäßig zu Lüften um entstehende Schadstoffe und Feuchtigkeit sollten abzuführen ([14]). Damit wird sichergestellt, dass eine ausreichende Luftqualität herrscht und Schimmelpilzwachstum vermieden wird.

In dem Ziegelkubus wurde je ein Lüftungsvorgang um 08:00, 14:00 und 20:00 durchgeführt. In einem Wohnhaus entspräche dies dem morgendlichen Lüften nach dem Aufstehen, tagsüber nach dem Mittagessen und abends vor dem zu Bett gehen. Die Luftwechselrate wurden in Anlehnung an DIN 4108-2 [8] für eine Stunde auf einen 2-fachen

Durchführung

Luftaustausch eingestellt. Die Heizung war über den gesamten Zeitraum, auch während der Lüftungsvorgänge, auf eine Solltemperatur von 20 °C eingestellt.

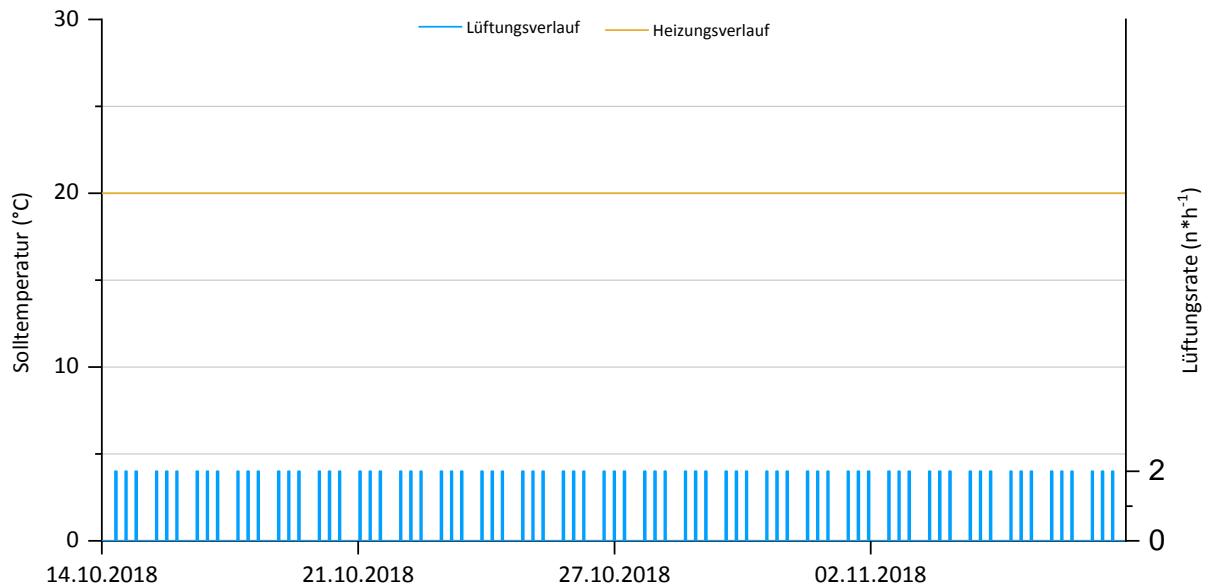


Abbildung 6: Regelungsszenario Stoßlüften in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018)

4.2.2 Nachtlüftung

Für den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes in Wohngebäuden nach DIN 4108-2 [8] darf, wenn die baulichen Gegebenheiten es erlauben, ein erhöhter (2 h^{-1}) oder hoher (5 h^{-1}) Luftwechsel in der Nacht zum Ansatz gebracht werden. Die Voraussetzungen dafür sind, dass die Möglichkeit zur Querlüftung (2-fach) oder zur geschossübergreifenden Querlüftung gegeben sein muss. Auf dieser Grundlage sollte mit den beiden folgenden Regelungsszenarien untersucht werden, wie stark sich diese Luftwechselraten auf die Raumluft- und Bauteiltemperatur auswirken.

Dafür wurde zunächst im Sommer das in Abbildung 7 dargestellte Regelungsszenario durchgeführt.

Durchführung

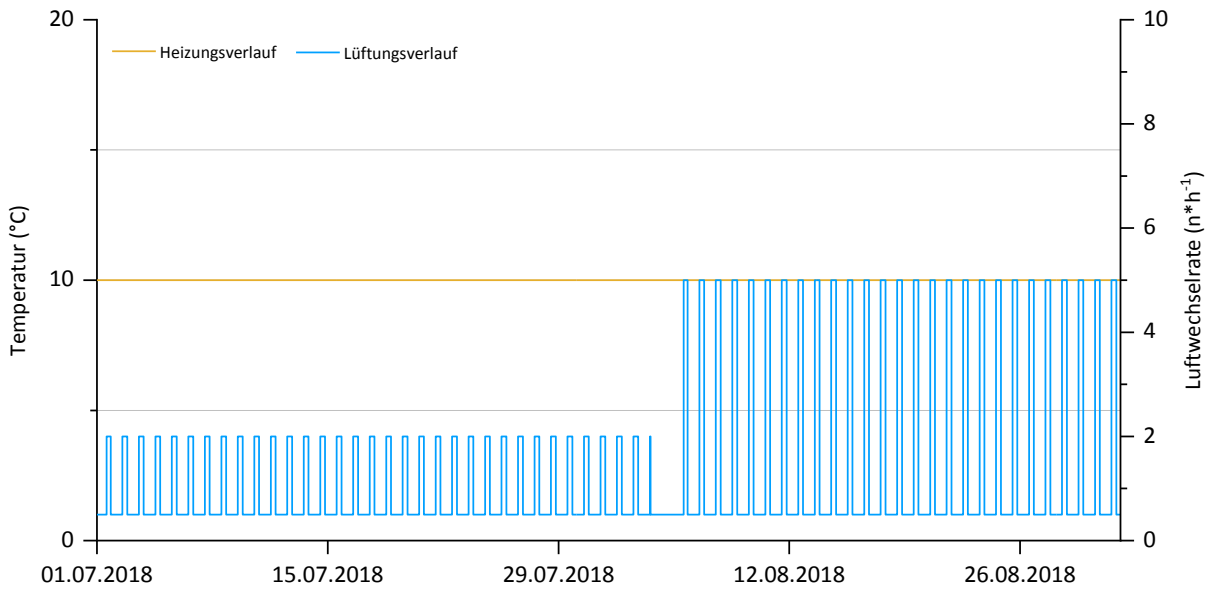


Abbildung 7: Regelungsszenario Nachtlüftung im Sommer (01.07.2018 – 01.09.2018) mit 2-fachem und 5-fachem Lüftungswechsel

Im darauffolgenden Frühjahr wurde dann ein ähnliches Szenario durchgeführt, wie in Abbildung 8 dargestellt ist. Auch wenn im Messzeitraum April keine starken sommerlichen Überhitzungen zu erwarten sind, ist davon auszugehen, dass unter Berücksichtigung der jeweiligen Differenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur ein analoges Bauteilverhalten auch in heißen Sommermonaten zu beobachten wäre. Weiterhin ist es auch aus hygienischen Gründen vor allem in Schlafräumen sinnvoll das Fenster nachts gekippt zu lassen [14].

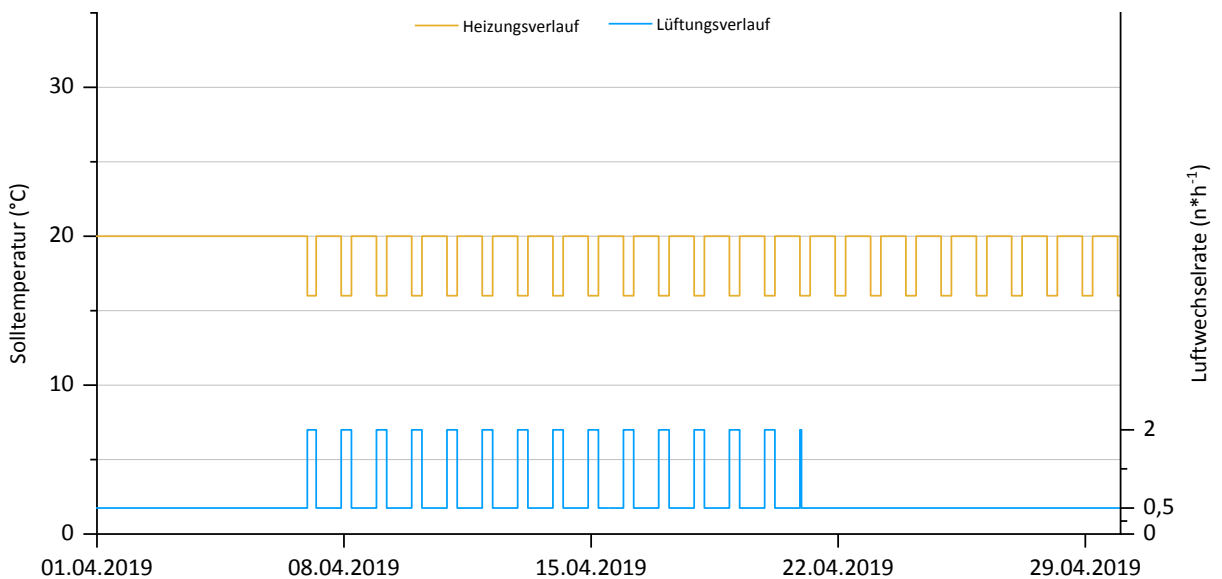


Abbildung 8: Regelungsszenario Nachtabsenkung der Heizung mit und ohne Nachtlüftung im Frühjahr (01.04.2019 - 30.04.2019)

Durchführung

4.2.3 Bauteilverhalten

Periodendauer und Größe der Temperatureinwirkung sind für die Charakterisierung der wirksamen Wärmespeicherkapazität von maßgeblicher Bedeutung (Kapitel 2.1). Prinzipiell gilt, je kürzer die Periodendauer ist, desto geringer ist die hervorgerufene Temperaturveränderung in den tieferen Schichten eines Bauteils. Weiterhin gilt, je höher die Temperaturdifferenz zwischen Bauteil und Raumluft, desto schneller ändert sich die Bauteiltemperatur und dringt in tiefere Bauteilschichten ein.

Um den Einfluss des Baumaterials und somit der materialspezifischen Wärmespeicherkapazität besser einschätzen und charakterisieren zu können, wurden Extremszenarien durchgeführt. Dafür wurden über einen längeren Zeitraum hohe Temperaturdifferenzen angelegt und die Temperaturveränderungen der Bauteilschichten beobachtet.

Die Szenarien in Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen eine Periodendauer von zwei Wochen für das Abkühlen und einer Woche für das erneute Aufheizen. Für die Abkühlphase wurde als Starttemperatur der Raumluft 30°C gewählt. Als Zielwert der Aufheizphase galt ebenfalls 30°C Raumlufttemperatur.

Nach [10] ist für eine Periodendauer von einer Woche näherungsweise eine wirksame Dicke von 250mm anzusetzen. Dieser Wert beruht auf einer Temperaturleitfähigkeit die annähernd der von Beton, Gips und Mörtel entspricht. Daher ist anzunehmen, dass die tatsächliche wirksame Dicke bedingt durch den inhomogenen Aufbau der Ziegel geringer ist. Zur genaueren Bestimmung der Einflusstiefe der Temperatur und des generellen Bauteilverhaltens wird das Aufheiz- und Abkühlverhalten des Kubus, insbesondere des Wandquerschnitts, untersucht.

4.2.4 Abkühlphase

Zunächst wurde der Kubus über einen Zeitraum von einer Woche bei ausgeschalteter Lüftung auf 30 °C geheizt. Anschließend wurde die Heizung ausgeschaltet und bei weiterhin abgeschalteter Lüftung entsprechend Abbildung 9 über zwei Wochen das Auskühlen des Wandquerschnittes beobachtet.

Durchführung

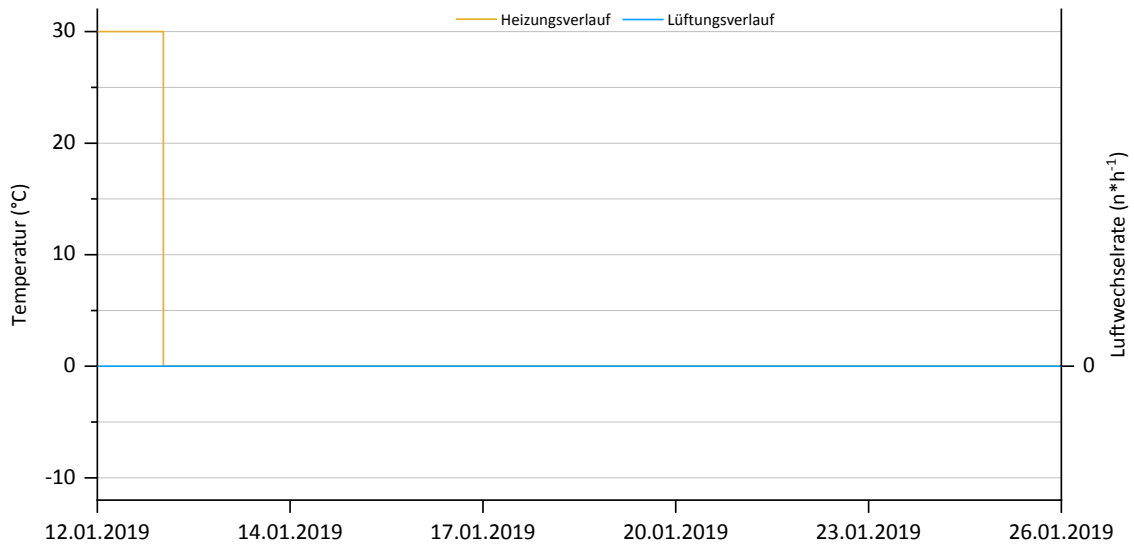


Abbildung 9: Regelungsszenario Abkühlphase (13.01.2019 – 26.01.2019)

4.2.5 Aufheizphase

Nachdem der Kubus über zwei Wochen auskühlen konnte, wurde die Heizung erneut auf 30 °C Solltemperatur eingestellt und nun bei ausgeschalteter Lüftung das erneute Aufheizen des Wandquerschnittes untersucht.

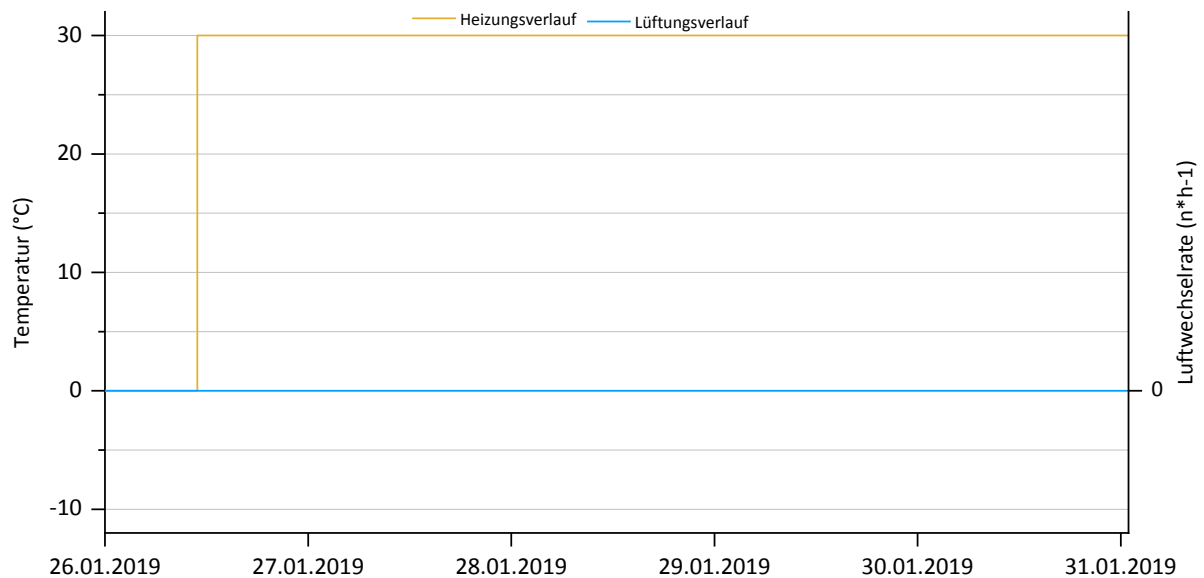


Abbildung 10: Regelungsszenario Aufheizphase (26.01.2019 – 03.02.2019)

4.2.6 Nutzerabwesenheit

Um zu untersuchen, wie sich der Temperaturverlauf in der Wand bei kürzeren Auf- und Abkühlphasen verhält, wurde zusätzlich ein „Urlaubsszenario“, wie in Abbildung 11 dar-

Durchführung

gestellt, durchgeführt. Hierbei wurde als Zeitperiode für das Aufheizen sowie das Abkühlen des Kubus eine Woche gewählt. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass durch Infiltration, Lüftungsanlagen oder z.B. durch Blumen gießen und Lüften durch Nachbarn auch bei Abwesenheit der Nutzer einer Wohnung ein Luftaustausch mit der Außenluft stattfindet. Im März wurde der Kubus bei 0,5-fachem Luftwechsel abwechselnd eine Woche lang auf 22 °C geheizt und anschließend die Heizung für eine Woche ausgeschaltet.

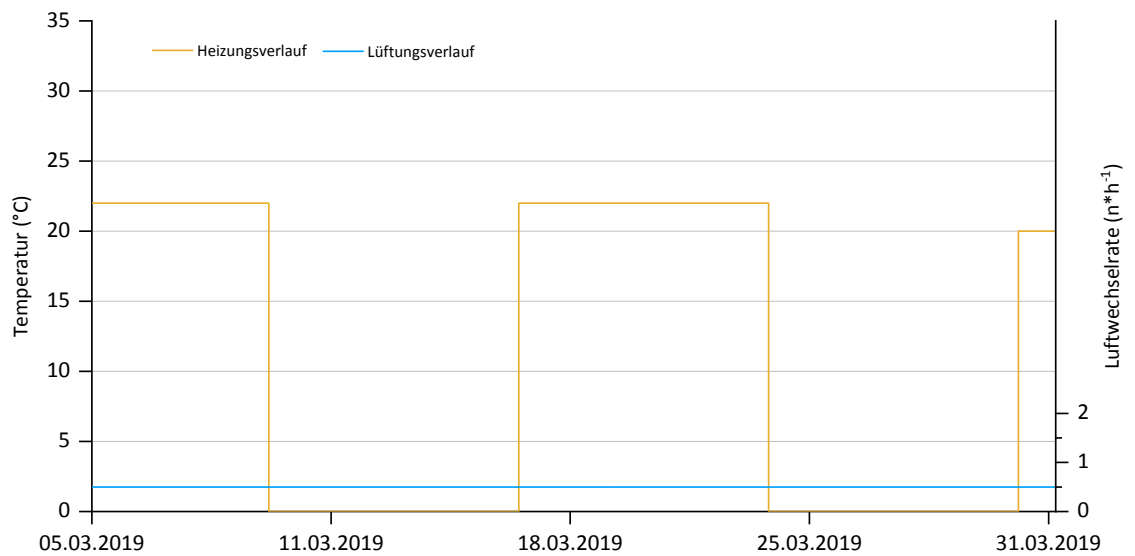


Abbildung 11: Regelungsszenario Aufheiz-/Abkühlphasen "Urlaubsszenario" (05.03.2019 – 01.04.2019)

5. Experimentelle Messergebnisse

Während des Messzeitraumes vom 01.05.2018 bis zum 30.04.2019 wurden die eingangs beschriebenen Größen im Innern des Kubus, in den Außenwänden sowie das Außenklima gemessen. Für den gesamten Messzeitraum zeigt Abbildung 12 die Verläufe von Lufttemperatur und Luftfeuchte. Die linke Y-Achse zeigt die Innen- und Außentemperatur, auf der rechten Y-Achse ist die relative Innen- und Außenluftfeuchte aufgetragen. Aufgrund eines Ausfalls der Wetterstation am Standort wurde für den Zeitraum 4. Juni bis 28. September auf Werte der nahegelegenen DWD-Wetterstation in Bad Kreuznach zurückgegriffen. Ein Abgleich der Zuluftdaten im Ziegelkubus mit diesem Außenklima zeigte eine gute Übereinstimmung, sodass daraus keine Nachteile zu erwarten sind. Der kurzzeitige extreme Temperaturanstieg ist auf eine Fehlfunktion der Heizung zurückzuführen, die allerdings nach wenigen Tagen behoben werden konnte. Auf die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse hat dies keinen Einfluss, da die untersuchten Szenarien erst danach begannen.

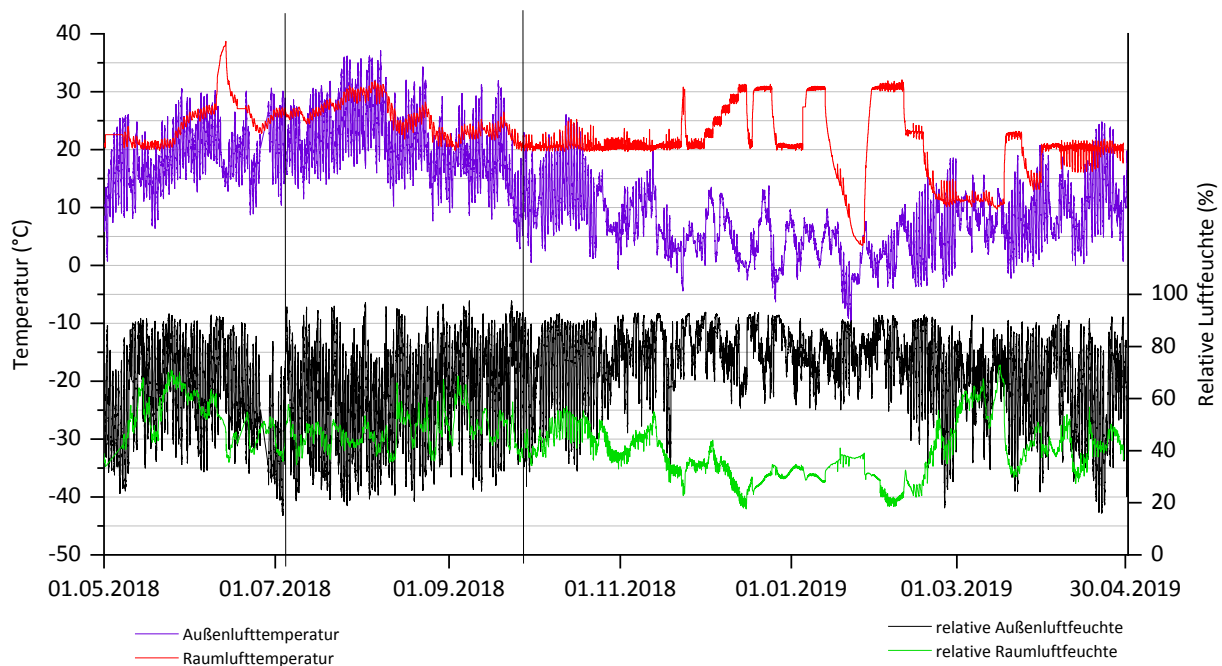


Abbildung 12: Innen –und Außenlufttemperatur und - feuchte über den gesamten Messzeitraum des Projektes (01.05.2018 – 30.04.2019) Das Außenklima wurde direkt am Standort gemessen. Für den eingegrenzten Zeitraum wurden Messwerte einer nahegelegenen Messstation verwendet.

5.1 Allgemeine Lüftungsvorgänge

Während der Übergangszeit von Anfang Oktober bis Anfang November war die Heizung im Kubus auf eine Solltemperatur von 20°C eingestellt und die Lüftungsanlage auf dreimal tägliches Stoßlüften mit einer Luftwechselrate von $n = 2\text{h}^{-1}$.

Unten dargestellt sind die gemessenen Außenlufttemperatur sowie die Raumlufttemperatur. In hellblau dargestellt sind die Lüftungsvorgänge um 08:00, 14:00 und 20:00 Uhr. Ab dem 23.10.2019 war die Heizung bis auf wenige Ausnahmen auch tagsüber dauerhaft eingeschaltet, um die Solltemperatur von 20°C halten zu können.

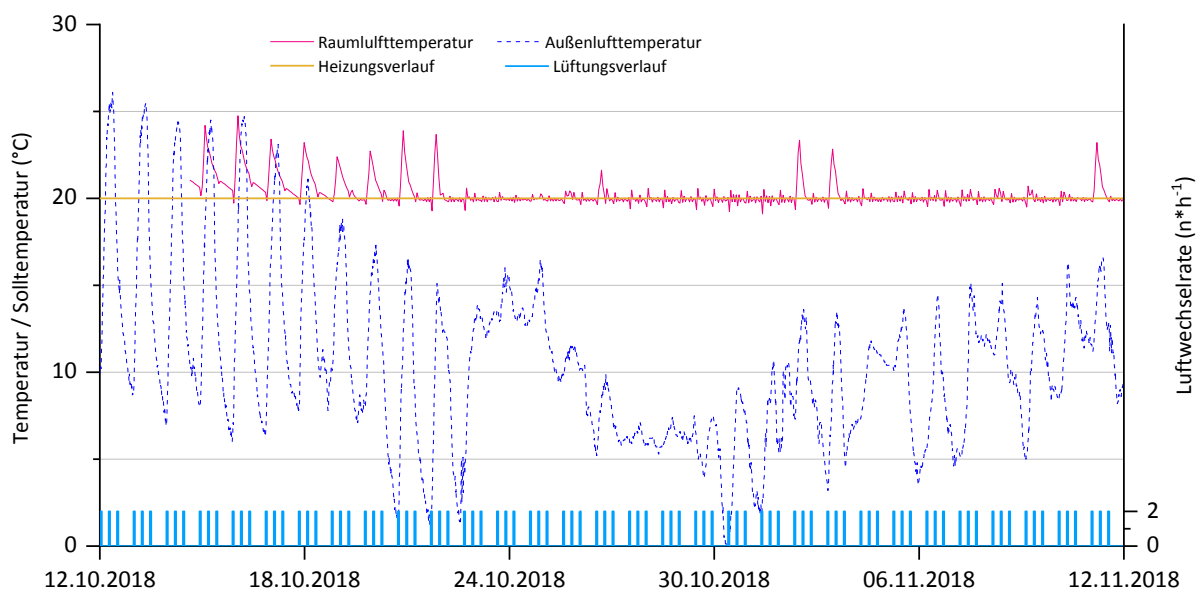


Abbildung 13: Innen- und Außenlufttemperatur in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei Stoßlüftungen und 20 °C Solltemperatur der Heizung

Experimentelle Messergebnisse

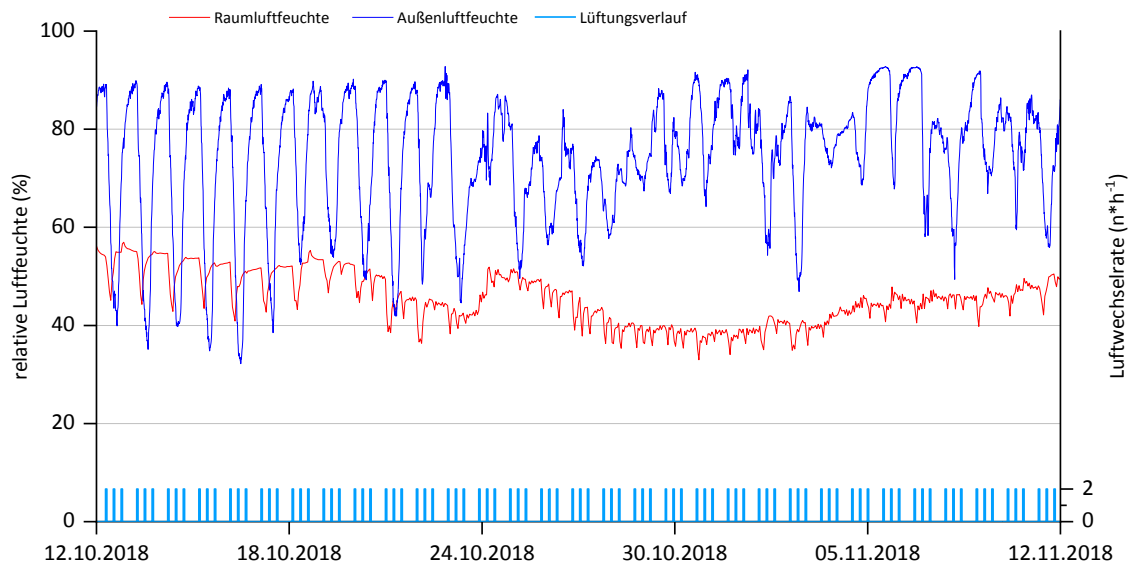


Abbildung 14: Relative Luftfeuchte innen und außen während der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei Stoßlüftungen und 20 °C Solltemperatur der Heizung

Dies resultiert vor allem aus geringerer Sonneneinstrahlung, wodurch der Kubus tagsüber nicht stark aufgeheizt wurde. Gleichzeitig fielen die Temperaturen über die Tage, wie für die Jahreszeit typisch, kontinuierlich ab. Die Luftfeuchte der Außenluft schwankt zunächst stark zwischen 40% und 90% r.F., mit Einsetzen des schlechteren Wetters gegen Ende Oktober verringern sich die Schwankungen und die Werte fallen nur noch selten auf 60% r.F. oder darunter.

5.2 Nachtlüftung

Der Einfluss von Nachtlüftung auf das Raumklima und die Bauteile wurde zunächst im Zeitraum Juli und August 2018 untersucht. Im Juli wurde die Lüftung in der Nacht (23:00-05:00) auf 2-fachen Luftwechsel, im August auf 5-fachen Luftwechsel eingestellt. Tagsüber lag der Luftwechsel bei 0,5 h⁻¹.

Der Messzeitraum war der wärmste im gesamten Jahr 2018. Ende Juli überschritten die Außentemperaturen an mehreren Tagen 35 °C. In der Nacht lagen die Temperaturen meist zwischen 15 und 20 °C, nur selten erreichten sie 10 °C oder weniger. Die Raumlufttemperaturen zeigen einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf, allerdings liegen die Tag-Nachtschwankungen bei deutlich geringeren 2 - 8 K.

Experimentelle Messergebnisse

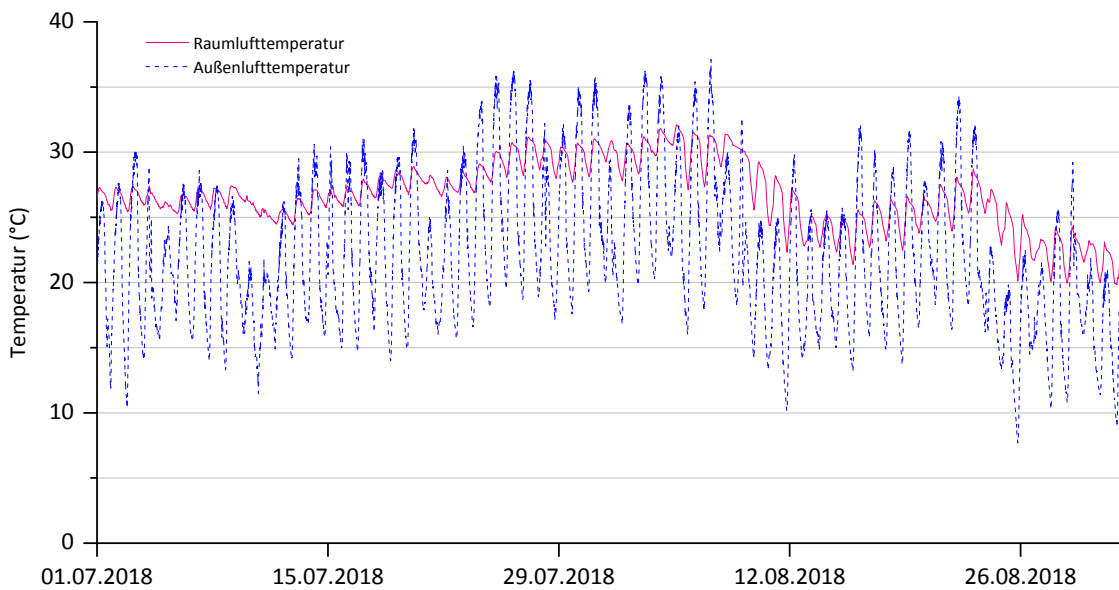


Abbildung 15: Innen- und Außenlufttemperaturen im Sommer (01.07.2018 – 01.09.2018) bei 2-fachem Luftwechsel bis zum 4.8.2018 und 5-fachem Luftwechsel ab 6.8.2019

In Abbildung 16 und 17 sind die Temperaturverläufe aller Sensoren in der NO-Wand aufgetragen. Die Maßangaben beziehen sich dabei auf die Innenwandoberfläche. Je weiter innen die betrachtete Bauteilschicht liegt, desto träger und weniger ausgeprägt reagiert diese auf Schwankungen im Außenklima.

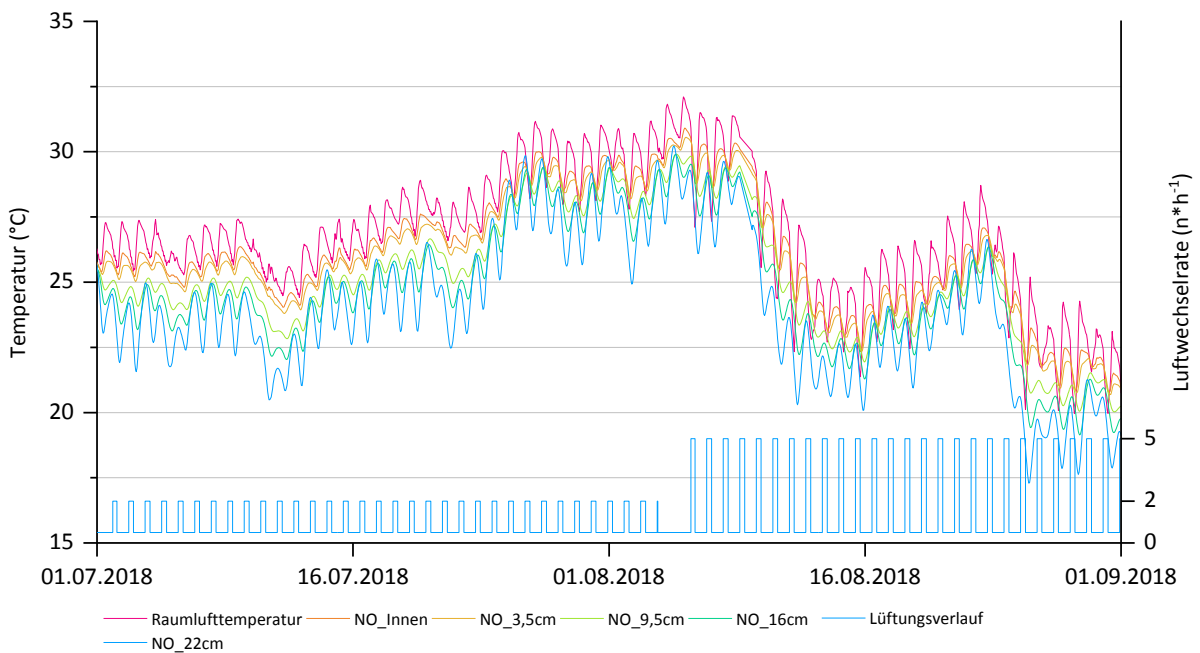


Abbildung 16: Bauteiltemperaturen in verschiedenen Tiefen bis 16 cm der Nord-Ost-Wand im Sommer (01.07.2018 – 01.09.2018) bei 2-fachem Luftwechsel bis zum 4.8.2018 und 5-fachem Luftwechsel ab 6.8.2019

Experimentelle Messergebnisse

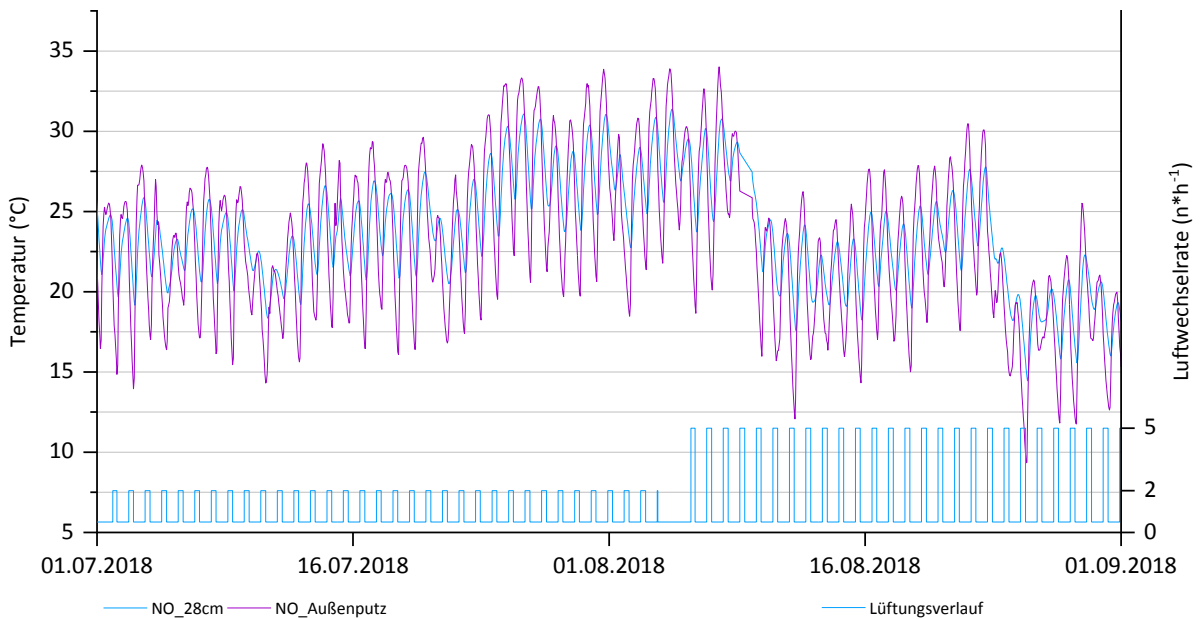


Abbildung 17: Bauteiltemperaturen in 28 cm Tiefe und im Außenputz der Nord-Ost-Wand im Sommer (01.07.2018 – 01.09.2018) bei 2-fachem Luftwechsel bis zum 4.8.2018 und 5-fachem Luftwechsel ab 6.8.2019

Ein vergleichbares Szenario wurde im April durchgeführt und ist in Abbildung 18 dargestellt. Hierbei wurde zusätzlich zur Nachtlüftung mit 2-fachem Luftwechsel eine Nachtabsenkung der Heizung von 20°C auf 16°C durchgeführt. Das Außenklima schwankte in diesem Zeitraum meist zwischen 5 und 15°C. An einigen Tagen fielen die Temperaturen nachts auf 0°C und gegen Ende des betrachteten Zeitraums stiegen Sie Tagsüber auf bis zu 23 °C.

Als Folge der für die Heizung vorgesehenen Nachtabsenkung sanken die Raumlufttemperaturen in der Nacht um 5-6 K. Die Raumlufttemperatur sollte 16°C nicht unterschreiten und musste lediglich in sehr kalten Nächten durch die Heizung sichergestellt werden.

Experimentelle Messergebnisse

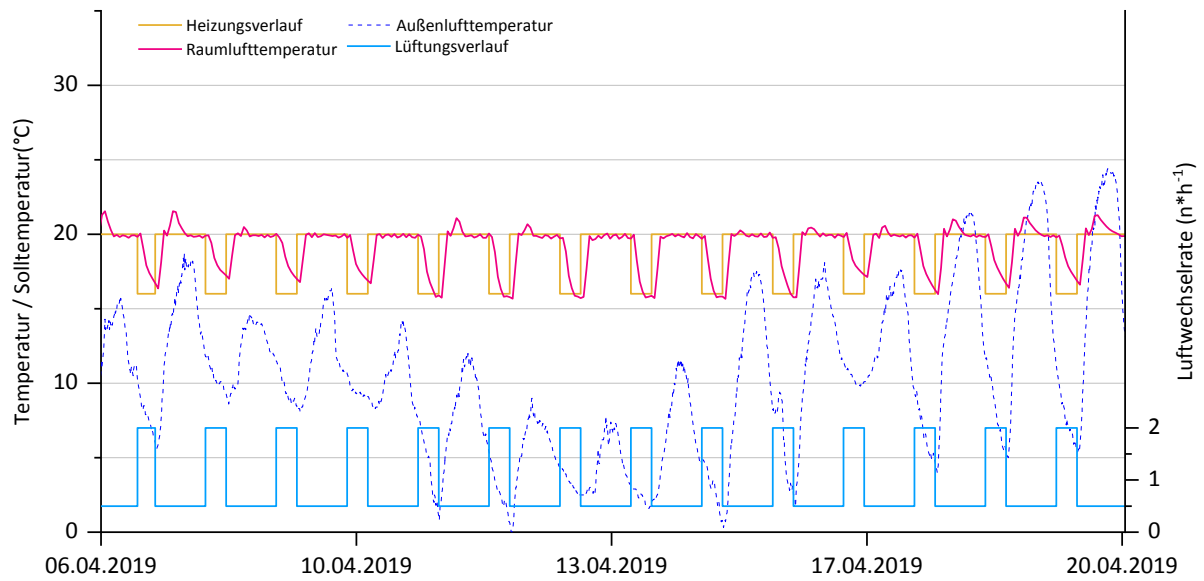


Abbildung 18: Innen- und Außenlufttemperaturen im April bei Nachtlüftung und Absenkung der Heizung (03.04.2019 – 30.04.2019)

Die Bauteiltemperaturen in Abbildung 19 zeigen wie schon im Sommer eine deutliche Abhängigkeit vom Außenklima. Ebenfalls gut sichtbar sind die Absenkungen der Temperaturen an der Innenoberfläche und den oberflächennahen Schichten durch die Nachtabsenkung der Heizung.

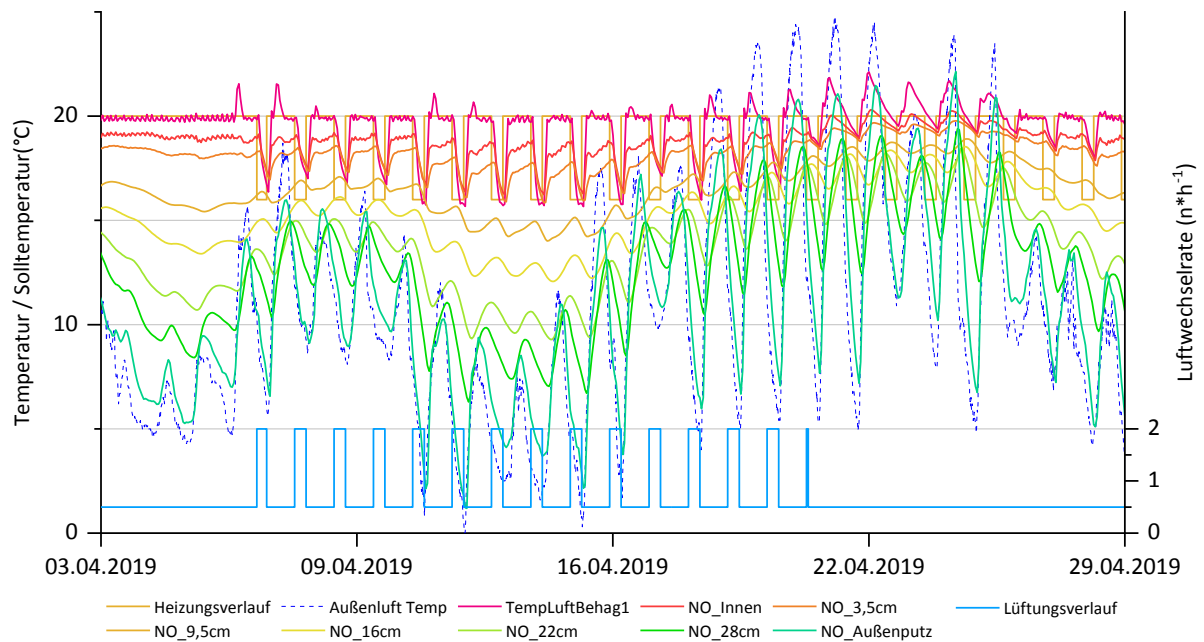


Abbildung 19: Bauteiltemperaturen in verschiedenen Tiefen der Nord-Ost-Wand im April bei Nachtlüftung und Absenkung der Heizung (03.04.2019 – 29.04.2019)

5.3 Abkühlphase

Um das Auskühlverhalten des Kubus zu untersuchen, wurde dieser zunächst bei ausgeschalteter Lüftung auf 30°C aufgeheizt, bis davon ausgegangen werden konnte, dass weiteres Heizen keine Veränderung mehr im Bauteilinnern nach sich zieht.

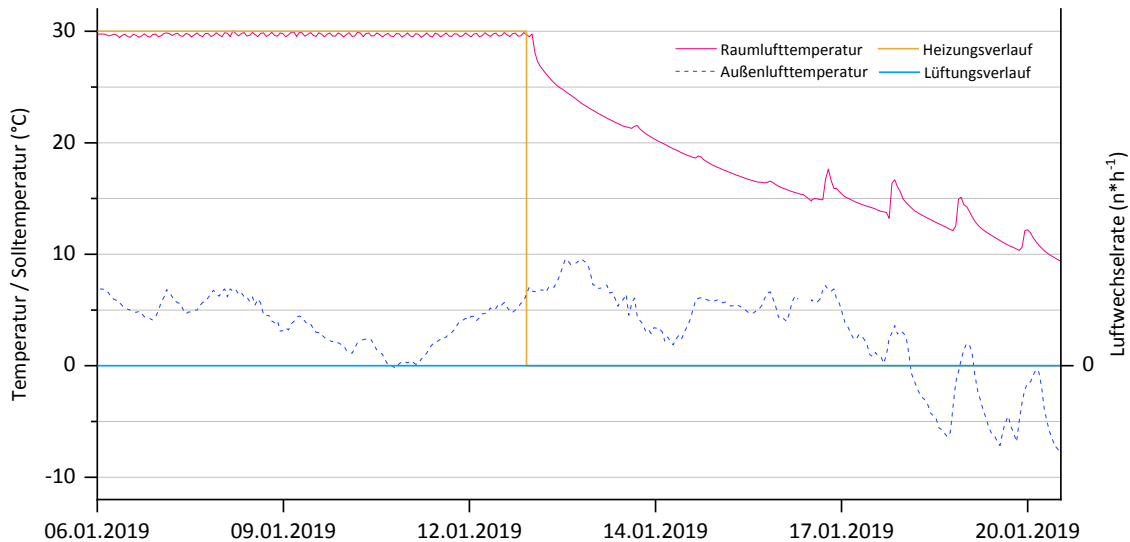


Abbildung 20: Innen- und Außenlufttemperaturen vor während der Abkühlphase im Januar (06.01.2019 – 21.01.2019)

Anschließend wurde ebenfalls bei ausgeschalteter Lüftung die Heizung für zwei Wochen abgeschaltet. Die Außentemperaturen schwankten zu Beginn des betrachteten Zeitraums zwischen 0°C und 10°C, fielen dann dauerhaft auf unter 0°C mit Tiefstwerten von -10°C in der Nacht. Gleichzeitig war es an einigen Tagen sehr sonnig, woraus die kurzzeitigen Anstiege der Raumlufttemperatur resultieren.

5.4 Aufheizphase

Nachdem der Kubus über zwei Wochen auskühlen konnte, war davon auszugehen, dass sich die Bauteiltemperaturen bei den herrschenden Außentemperaturen nicht mehr nennenswert verändern würden. Die Heizung wurde am 27.01. um 00:00 Uhr erneut auf 30°C Solltemperatur eingestellt, die Lüftung weiterhin abgeschaltet gelassen. Am 29.01. gegen 14:00 Uhr erreichte die Raumlufttemperatur die eingestellte Solltemperatur.

Die Außentemperaturen schwankten während der Aufheizphase zwischen 5°C und -4°C.

Experimentelle Messergebnisse

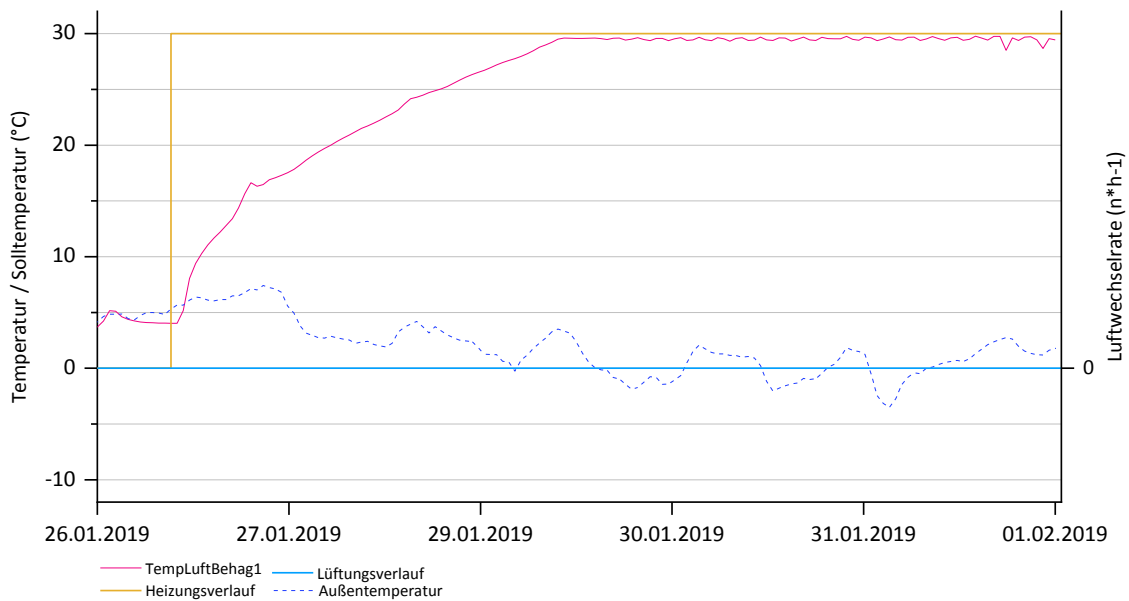


Abbildung 21: Innen und Außenlufttemperaturen während der Aufheizphase im Januar (26.01.2019 – 31.01.2019)

5.5 Nutzerabwesenheit

Wie in 4.2.6 beschrieben, wurde auch untersucht, wie sich die Temperatur in den Bauteilen bei kürzeren Abkühlphasen mit geringerem Temperaturunterschied verhält. Dazu wurde der Kubus zunächst auf 22°C aufgeheizt und die Heizung anschließend für eine Woche abgeschaltet. Die Lüftung war für den gesamten Messzeitraum auf 0,5-fachen Luftwechsel eingestellt.

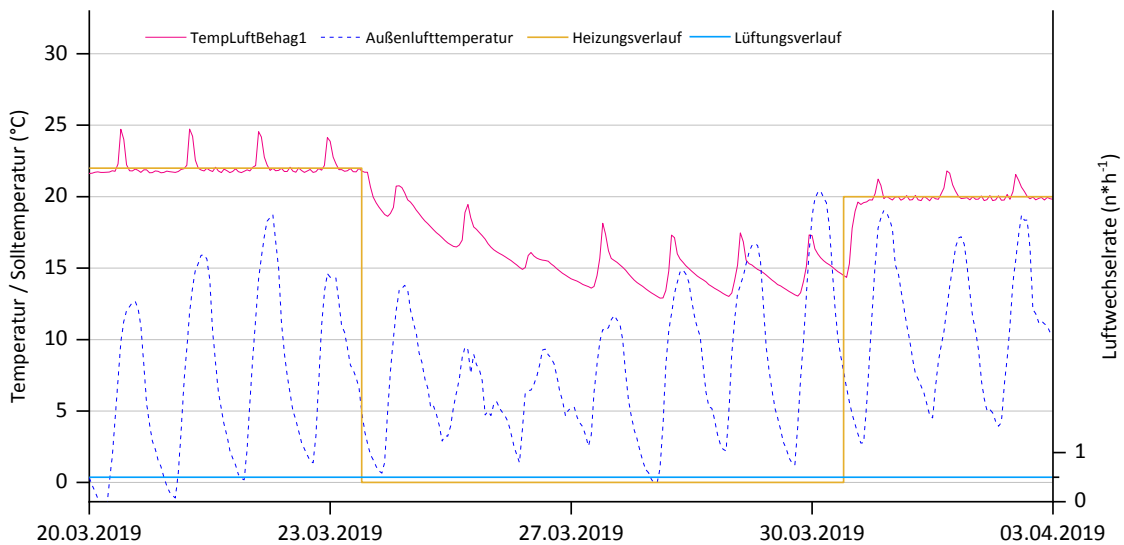


Abbildung 22: Innen- und Außenlufttemperaturen bei einwöchiger "Nutzerabwesenheit" (20.03.2019 – 06.04.2019)

Experimentelle Messergebnisse

Die Außentemperaturen lagen im Bereich von 0°C bis 10°C, lediglich nachts wurde der Gefrierpunkt teilweise unterschritten. Die Raumlufthtemperaturen fielen innerhalb von ca. 4 Tagen um 8 K auf etwa 14°C. Die raumseitigen Oberflächentemperaturen sowie die Temperaturen in 3,5cm tiefe glichen sich in diesem Zeitraum weitestgehend aneinander an und fielen um 6 K auf etwa 13°C. Im restlichen Verlauf der Woche fielen die Temperaturen der Raumlufth und der Oberflächennahen Schichten nachts teilweise auf unter 13°C und blieben aber ansonsten abgesehen von den Tageszeitlichen Schwankungen konstant.

Nach einer Woche wurde die Heizung auf eine Solltemperatur von 20°C eingestellt. Innerhalb von ca. 3 Stunden hatte die Lufttemperatur die eingestellte Solltemperatur erreicht.

6. Auswertung von Messdaten

6.1 Allgemeine Lüftungsvorgänge

In Abbildung 23 sind die Temperaturverläufe aller Sensoren in der NO-Wand und die Innen- sowie Außenlufttemperatur aufgetragen. Die Maßangaben der Wandsensoren beziehen sich dabei auf die Innenwandoberfläche. Der betrachtete Zeitraum liegt in der Übergangszeit währenddessen dreimal täglich eine Stoßlüftung mit 2-fachem Luftwechsel und die Heizung auf eine Solltemperatur von 20°C eingestellt war.

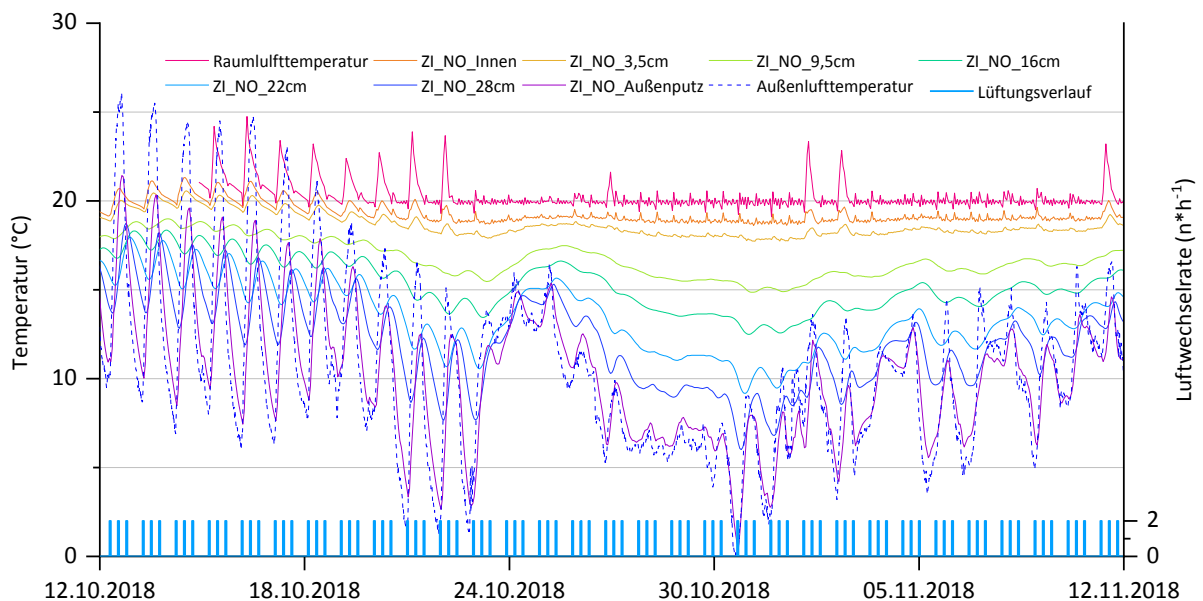


Abbildung 23: Innen- und Außenlufttemperaturen sowie Bauteiltemperaturen in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei Stoßlüftung

Ab dem 23.10.2019 war die Heizung auch tagsüber dauerhaft nötig, um die Solltemperatur von 20°C zu halten. Bis zu diesem Zeitpunkt reichten Außenlufttemperaturen sowie Sonneneinstrahlung aus, um auch nachts die Temperatur im Kubus auf dem gewünschten Niveau zu halten.

Während der warmen Periode gegen Ende Oktober hatten die kurzen Lüftungsvorgänge keinen sichtbaren Einfluss auf die Raumlufthtemperatur oder die Bauteiltemperaturen. Als das Wetter kälter wurde, sieht man den kurzzeitigen Temperaturabfall der Raumlufthtemperatur um 0,5-1 K bedingt durch die Lüftungsvorgänge. Darauf folgt immer ein kurzer Anstieg

über 20°C, der durch die Trägheit der Heizung bedingt ist. Größere Temperaturspitzen der Raumluft, z.B. am 2.11., sind auf stärkere Sonneneinstrahlung zurückzuführen.

Die Auswertung des Temperaturprofils der Außenwand betätigt die starke Abhängigkeit der Bauteiltemperaturen von der Außentemperatur. Deutlich zeigt das auch die Vergrößerung des Messzeitraumes in Abbildung 24. Für ca. drei Tage stiegen die Außenlufttemperaturen von zuvor durchschnittlich 8°C mit Tiefsttemperaturen nahe 0°C auf durchschnittlich 14°C mit Höchsttemperaturen von 16°C. Bedingt durch die Heizung hat die Schwankung des Außenklimas keinen sichtbaren Einfluss auf die Raumlufttemperatur.

Durch die konditionierte Raumlufttemperatur weist auch die Innenoberflächentemperatur keine sichtbare Reaktion auf das schwankende Außenklima. Die Innenoberflächentemperatur folgt in abgeschwächter Form den Schwankungen der Raumlufttemperatur. In 3,5 cm Tiefe sind ebenfalls noch recht stark die Einflüsse der Raumlufttemperatur zu erkennen. Hier zeigt sich allerdings auch bereits deutlich ein Einfluss der Außentemperaturschwankung. Ähnlich einer Sinusfunktion folgt die Temperatur des Bauteils in einer Kurve dem Verlauf der Außenlufttemperatur. Der Sensor verzeichnete hier einen Temperaturanstieg von maximal 0,7 K in diesem Zeitraum. Noch deutlicher wird diese Schwankung in 9,5 cm und mehr Tiefe. Verglichen mit dem Außenklima ist die Amplitude der Temperaturschwankung in den innenliegenden Bauteilschichten deutlich geringer und die Phase um ca. 1,5 Tage verschoben.

Je weiter außen man den Verlauf der Bauteiltemperatur betrachtet, desto größer wird die Amplitude der Temperaturschwankung und die Phase nähert sich der des Außenklimas an. Weiterhin werden die tageszeitlichen Schwankungen der Außentemperatur stärker sichtbar. Die Temperatur im Außenputz folgt schließlich annähernd der Außenlufttemperatur.

Auswertung von Messdaten

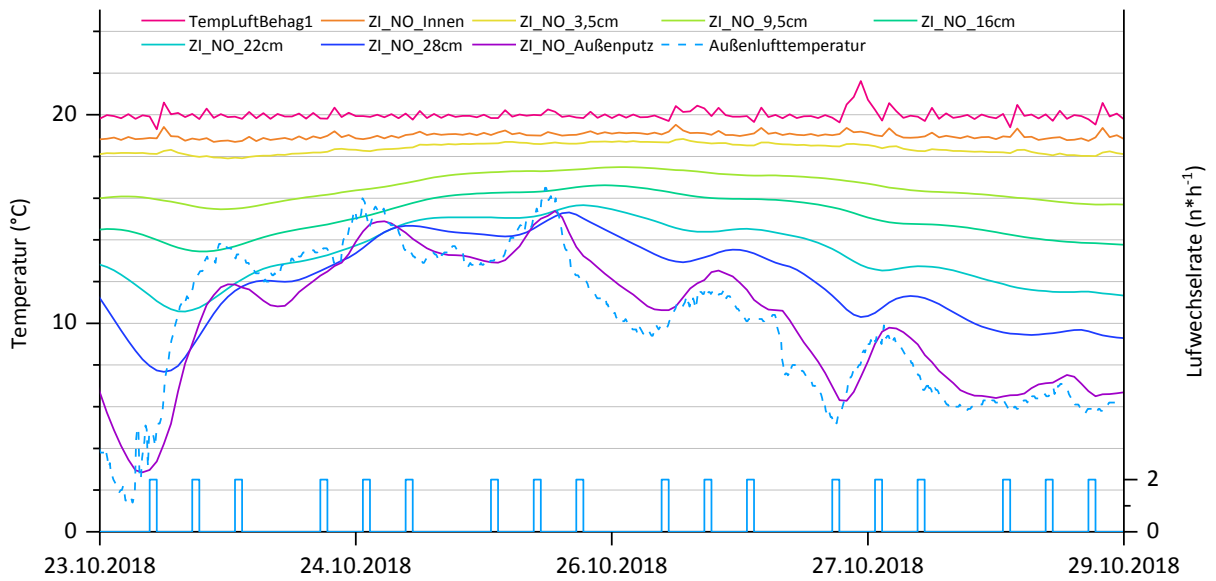


Abbildung 24: Innen- und Außenlufttemperaturen sowie Bauteiltemperaturen in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei Stoßlüftung – Ausschnitt

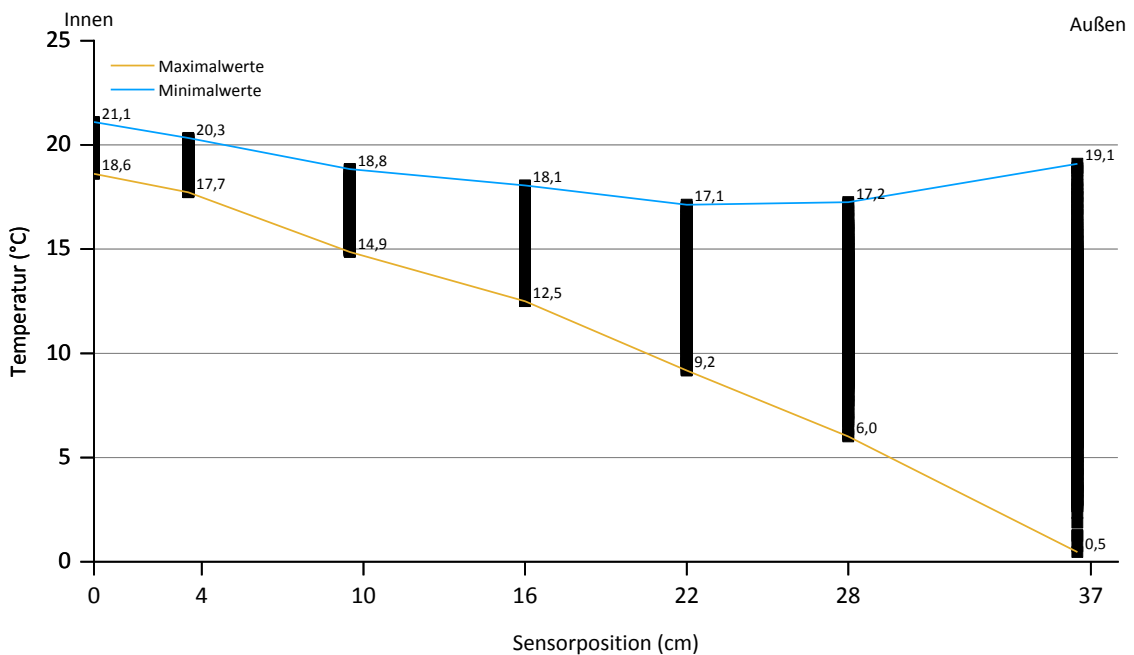


Abbildung 25: Bandbreite der Temperaturschwankungen in allen Bauteilschichten der Nord-Ost-Wand in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei täglichem Stoßlüften

Deutlich sichtbar werden die starken Schwankungen auch in Abbildung 25. Für jede Sensorposition ist das Spektrum der Temperatur in der Übergangszeit aufgetragen. Während die oberflächennahen Temperaturen bedingt durch die Heizung nur um 2,5 K schwanken, umfasst der Wertebereich in Wandmitte bis zu 7,9 K und außen knapp 20 K.

Auswertung von Messdaten

Die geringen Temperaturschwankungen an den raumseitigen, oberflächennahen Schichten zeigen zudem einen Vorteil der hohen raumseitigen Masse des Ziegels. Die von der Lüftungsanlage zugeführte Luft war mit teilweise unter 5 °C deutlich kälter als die Raumluft.

Bauartbedingt weist der verwendete Ziegeltyp an den äußeren Wandoberflächen einen höheren Scherbenanteil auf als im Inneren. Durch diese erhöhte raumseitige Masse des Ziegels ist C_{wirk} in den oberflächennahen Schichten höher als in den innenliegenden Bereichen mit erhöhtem Dämmstoffanteil. Dadurch kann in den kurzen Zeitperioden der Lüftungsvorgänge die erhöhte Wärmespeicherkapazität der raumseitigen Oberfläche ausgenutzt werden. Somit wird ein stärkeres Auskühlen der Raumluft und des Bauteils verhindert. Für das Wiedererreichen der Solltemperatur im Kubus nach dem Lüftungsvorgang bedeutet dies einen geringen minimierten Bedarf an Heizenergie.

Ebenso wie die Raumlufttemperatur wird auch die relative Luftfeuchte im Raum maßgeblich durch das Außenklima beeinflusst, da im Innern des Kubus keine Feuchtequelle vorhanden ist. In Abbildung 26 ist der Verlauf der relativen Luftfeuchte des Innen- und Außenklimas dargestellt, bevor die Heizung für das Halten der Solltemperatur nötig war. Der Temperaturanstieg im Raum, hier bedingt durch Sonneneinstrahlung, resultiert in einem Abfall der relativen Raumluftfeuchte. Abgesehen davon bleibt die relative Raumluftfeuchte weitestgehend konstant und wird durch die Lüftungsvorgänge nur geringfügig beeinflusst.

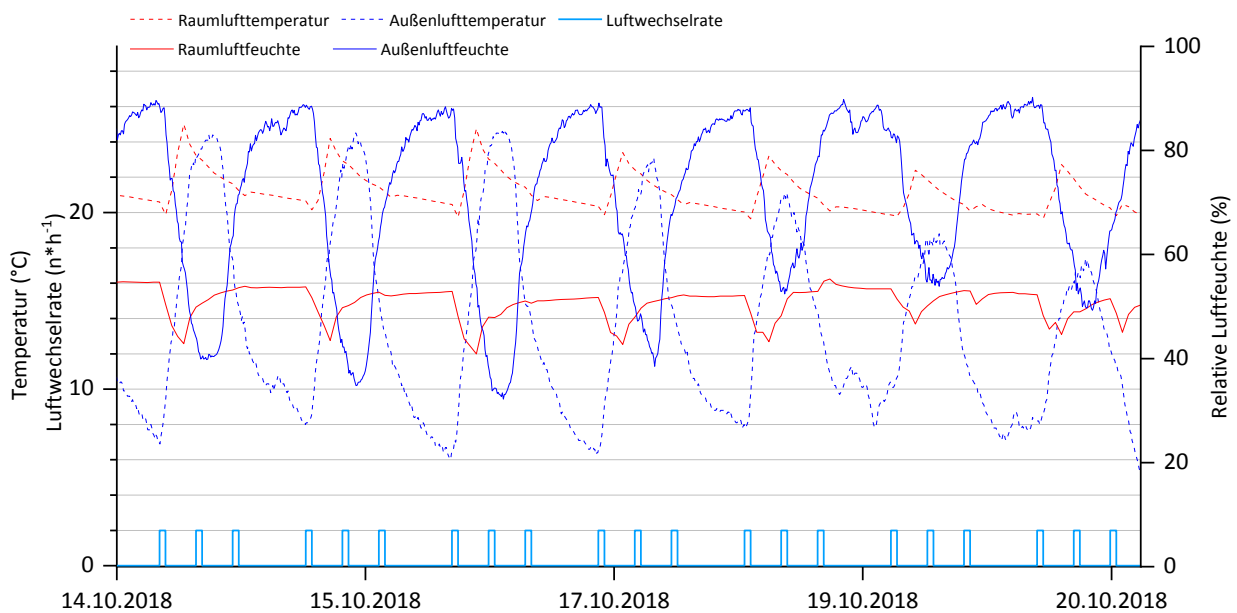


Abbildung 26: Innen- und Außenlufttemperatur und -feuchte bei Stoßlüftungen - ohne Heizungseinsatz (14.10.2018 – 21.10.2018)

Auswertung von Messdaten

In Abbildung 27 ist ein Ausschnitt aus der Übergangszeit dargestellt, in dem die Heizung dauerhaft im Einsatz war. Der Einfluss der Lüftungsvorgänge ist hier deutlich sichtbar. Im Verlauf der dargestellten Woche wird die relative Luftfeuchte im Kubus von durchschnittlich rund 50 % r.F. auf unter 40 % r.F. gesenkt. Das zeigt, dass tägliches Stoßlüften gut geeignet ist, um die relative Luftfeuchtigkeit im Raum zu regulieren und somit das Risiko von Schimmelpilzwachstum zu begrenzen.

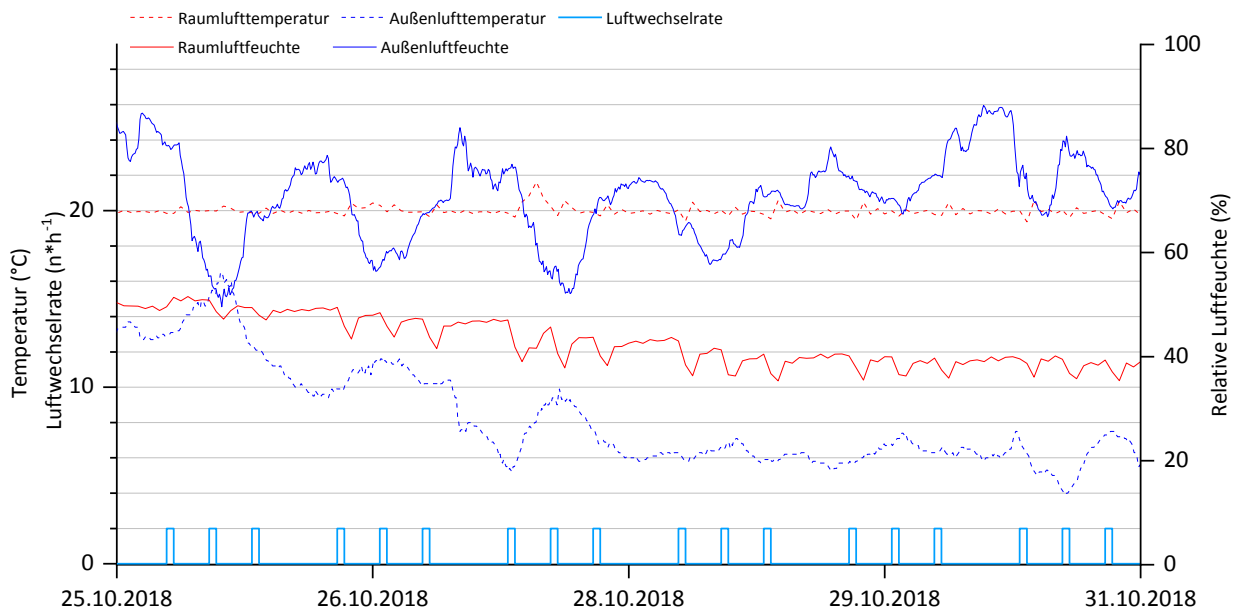


Abbildung 27: Innen- und Außenlufttemperatur und -feuchte bei Stoßlüftungen - ohne Heizungseinsatz (25.10.2018 – 31.10.2018)

6.2 Nachtlüftung

Ein wichtiger Einflussfaktor beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes nach [8] ist der Ansatz einer Nachtlüftung. Wie in 2.2 beschrieben kann die Luftwechselrate für den Nachweis entweder mit 2 h^{-1} oder mit 5 h^{-1} angesetzt werden.

In Abbildung 28 und 30 sind die Innen- und Außenlufttemperaturen sowie die Lüftungsvorgänge anhand der Zuluftgeschwindigkeit mit Temperatur der Zuluft eingezeichnet. Die gemessene Zulufttemperatur während der Nachtlüftung ist zwischen 5 und 20 K kälter als die jeweils aktuell herrschende Lufttemperatur im Kubus. Bei 2-fachem Luftwechsel während der Nacht wird die Raumlufttemperatur damit um 1 – 2 K reduziert. Ein 5-facher Luftwechsel während der Nacht resultiert bei ähnlichen Temperaturunterschieden zwischen Raumluft- und Zulufttemperatur in einer Absenkung der Raumlufttemperatur um 3 – 8 K.

Auswertung von Messdaten

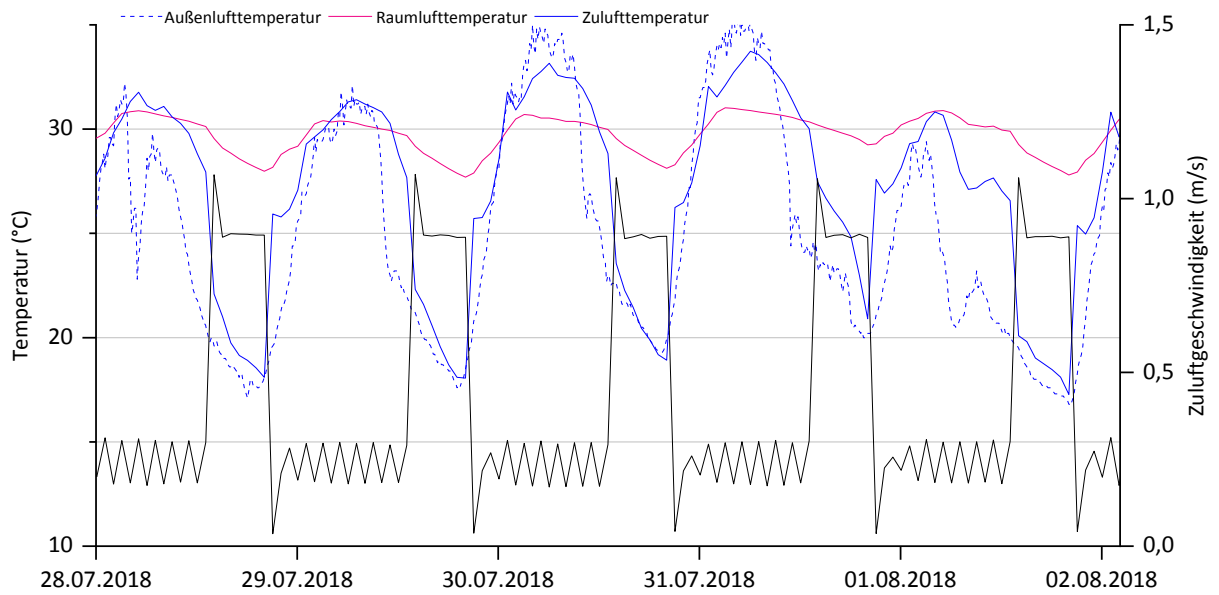


Abbildung 28: Innen- und Außentemperatur sowie Zulufttemperatur in m/s im Sommer (28.07.2018 – 02.08.2018) bei erhöhter Nachtlüftung (2-facher Luftwechsel)

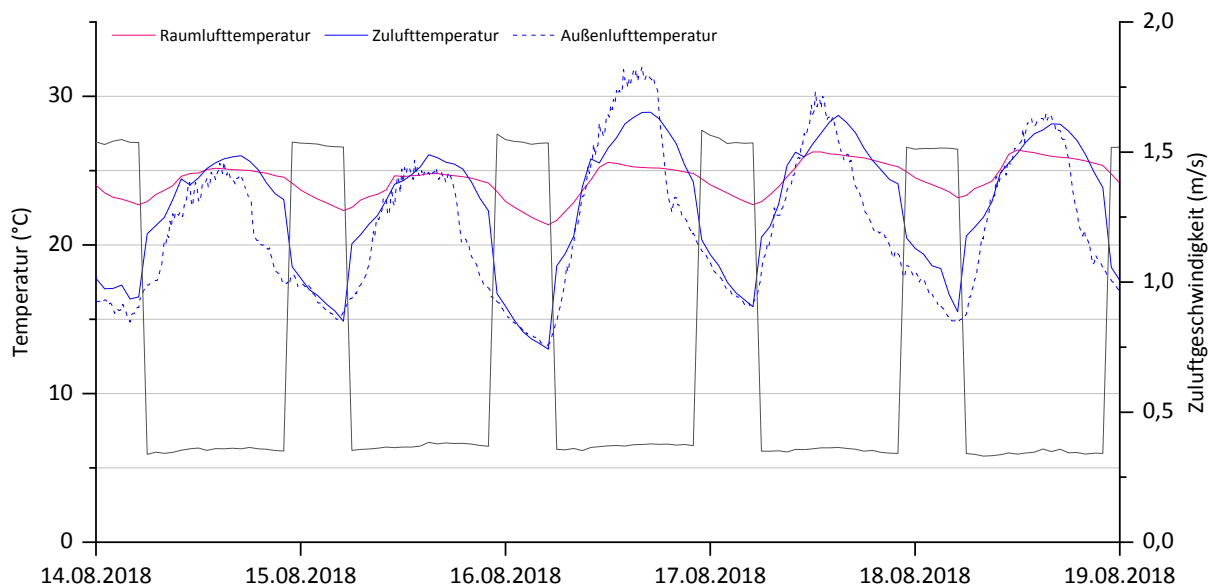


Abbildung 29: Innen- und Außentemperatur sowie Zulufttemperatur in m/s im Sommer (14.8.2018 - 19.8.2018) bei hoher Nachtlüftung (5-Facher Luftwechsel)

Abbildung 30 und 32 zeigen, dass erhöhte Nachtlüftung eine wirkungsvolle Methode ist, um eine Abkühlung der Bauteiltemperaturen durch die kühlere Außenluft zu erreichen. Die hohe raumseitige Wärmekapazität des Ziegels wirkt, dass dadurch am folgenden Tage die mittäglichen Raumlufttemperaturen nicht zu hohe Werte annehmen. Aufgrund dieser Wärmespeicherung werden Temperaturspitzen abgepuffert.

Auswertung von Messdaten

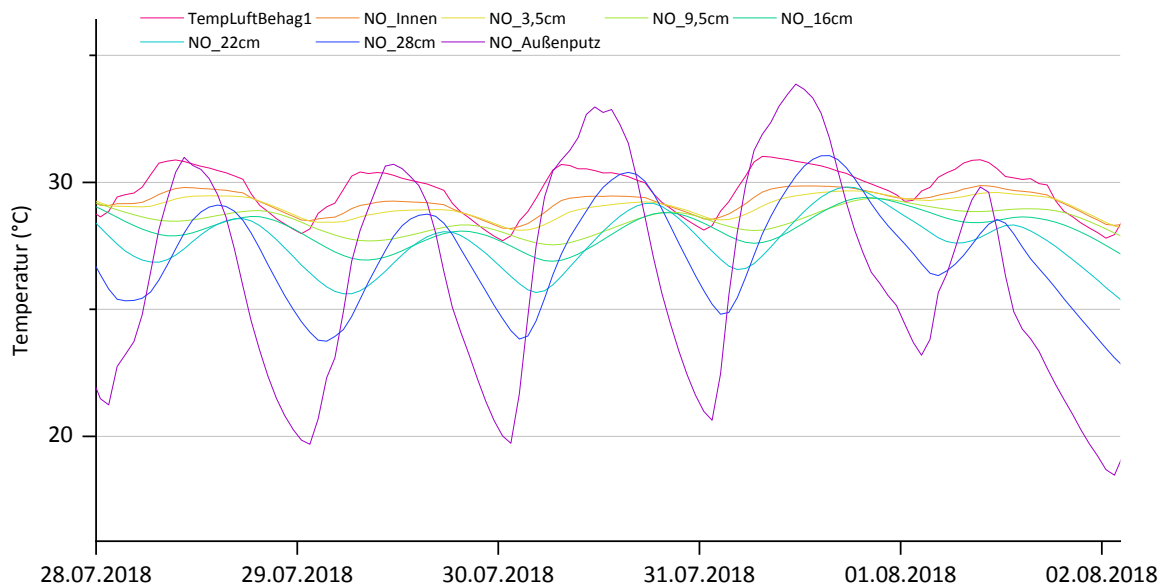


Abbildung 30: Bauteiltemperaturen der Nord-Ost-Wand im Sommer (28.07.2018 – 02.08.2018) bei erhöhter Nachtlüftung (2-facher Luftwechsel)

Tagsüber führen hohe Außenlufttemperaturen in Verbindung mit einem 0,5-fachem Luftwechsel zu einem Anstieg der Raumlufttemperatur. In der Folge steigen auch die Bauteiloberflächen- und Schichttemperaturen, wie Abbildung 30 und 32 beispielhaft zeigen. Durch das Einbringen der kühlen Nachtluft zwischen 23:00 und 05:00 Uhr ist dann ein Absinken der Raumlufttemperatur zu beobachten. Gleichzeitig wird die gespeicherte Wärmeenergie im Bauteil an die kühlere Raumluft abgegeben, was zu einem Absinken der raumseitigen Oberflächentemperatur führt.

Abbildung 30 und 32 zeigen dies exemplarisch für den 2-fachen und 5-fachen Luftwechsel. Erwartungsgemäß ist der Effekt bei 5-fachem Luftwechsel höher als beim 2-fachen. So bedingt ein 2-facher Luftwechsel ein Absinken der raumseitigen Oberflächentemperatur bis in 3,5 cm Tiefe um 0,5 bis 1 K, bei 5-fachem Luftwechsel sogar um 1 bis 1,5 K zu beobachten.

Auswertung von Messdaten

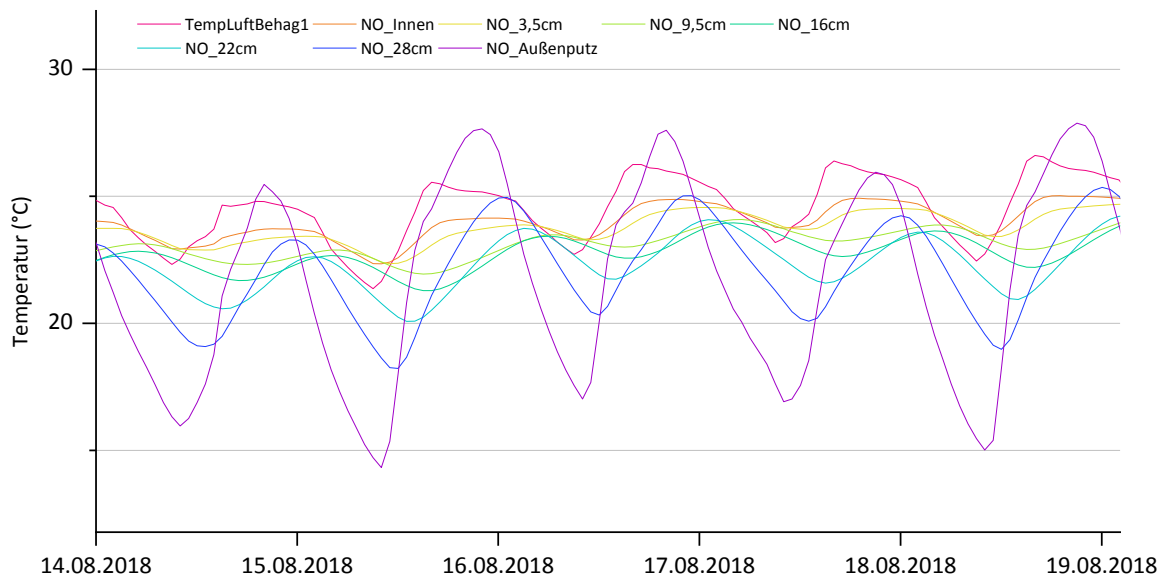


Abbildung 31: Bauteiltemperaturen der Nord-Ost-Wand im Sommer (14.08.2018 – 19.08.2018) bei erhöhter Nachtlüftung (5-facher Luftwechsel)

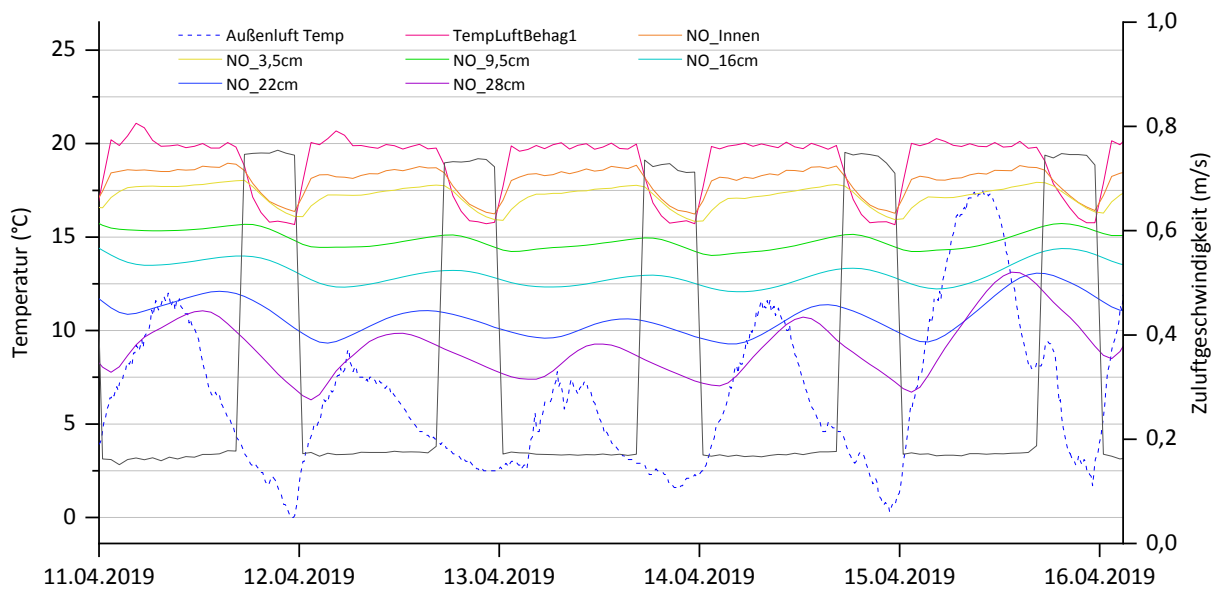


Abbildung 32: Bauteiltemperaturen der Nord-Ost-Wand im April bei Nachtlüftung mit 2-fachem Luftwechsel und Heizungsabsenkung (11.04.2019 - 16.04.2019)

6.3 Abkühlphase

Bei der Abkühlphase wurde untersucht, wie sich der Temperaturverlauf im Innern der Nord-Ost-Wand bei ausgeschalteter Heizung verhält, nachdem der Kubus zuvor auf 30 °C aufgeheizt wurde.

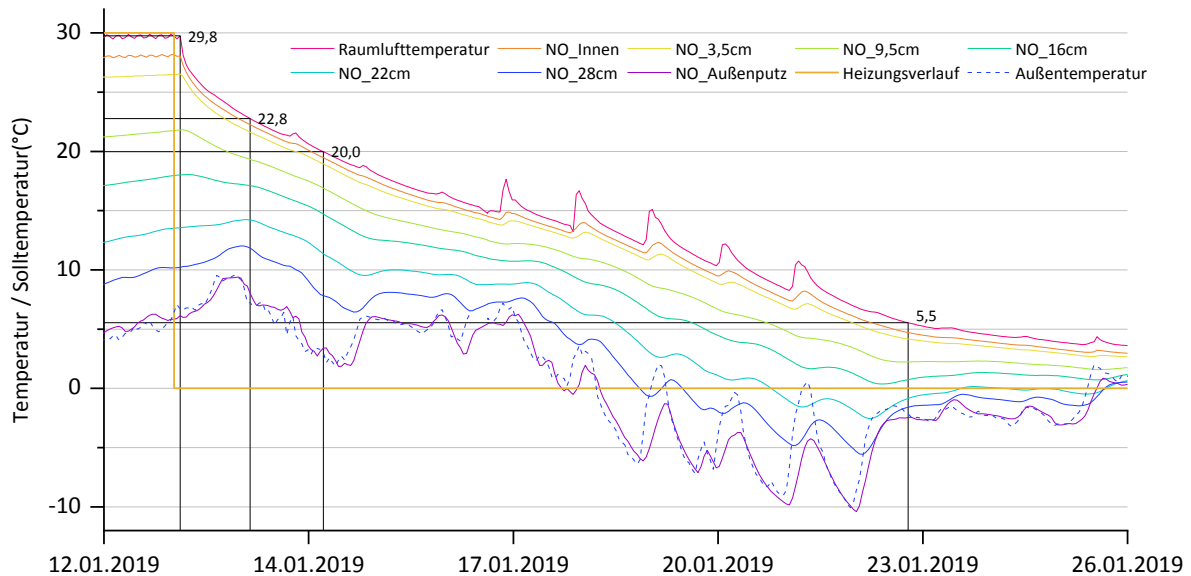


Abbildung 33: Innen- und Außenlufttemperatur sowie Temperaturverlauf in den Bauteilschichten der Nord-Ost-Wand während Abkühlphase (13.01.2019 – 26.01.2019)

Die Heizung wurde um 0 Uhr am 13.01.2019 abgeschaltet, bedingt durch die Trägheit des Systems wurde vom Heizkörper noch etwa eine Stunde Wärme an den Raum abgegeben. Innerhalb des ersten Tages nach Abschalten der Heizung fällt die Raumlufttemperatur im Kubus um ca. 8 K. Danach flacht die Temperaturkurve der Raumluft, wie in Abbildung 33 zu sehen, deutlich ab und verläuft danach annähernd linear. An den folgenden Tagen nach der Heizungsabschaltung verringert sich die Temperatur im Innern je um ca. 3 K. Dieses Verhalten ist mit dem veränderlichen Wärmestrom durch die Konstruktion zu erklären. Zu Beginn der Abkühlphase ist die Temperaturdifferenz zwischen der Innenseite und der Außenseite der Wand mit ca. 20 K am höchsten. In den darauffolgenden Tagen verringert sich die Temperaturdifferenz zunächst und schwankt dann für einige Tage um 10-15 K. Diese näherungsweise konstante Temperaturdifferenz hat einen annähernd konstanten Wärmestrom zur Folge, woraus der lineare Abfall der Temperaturen im Kubus und der Wand entsteht. Zum Ende der Abkühlphase stiegen die Außenlufttemperaturen im Mittel an womit die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft geringer wird.

Auswertung von Messdaten

Dies hat einen geringeren Wärmestrom durch die Wand und somit eine geringere Steigung der Temperaturkurve in der Wand zu Folge. Da die Temperatur insbesondere im Innern der Wand vergleichsweise träge auf Veränderungen der Äußeren Randbedingungen reagiert, zeigen die täglichen Schwankungen der Außenlufttemperatur keine Auswirkungen auf den Temperaturverlauf der Raumluft und Innenliegenden Bauteilschichten.

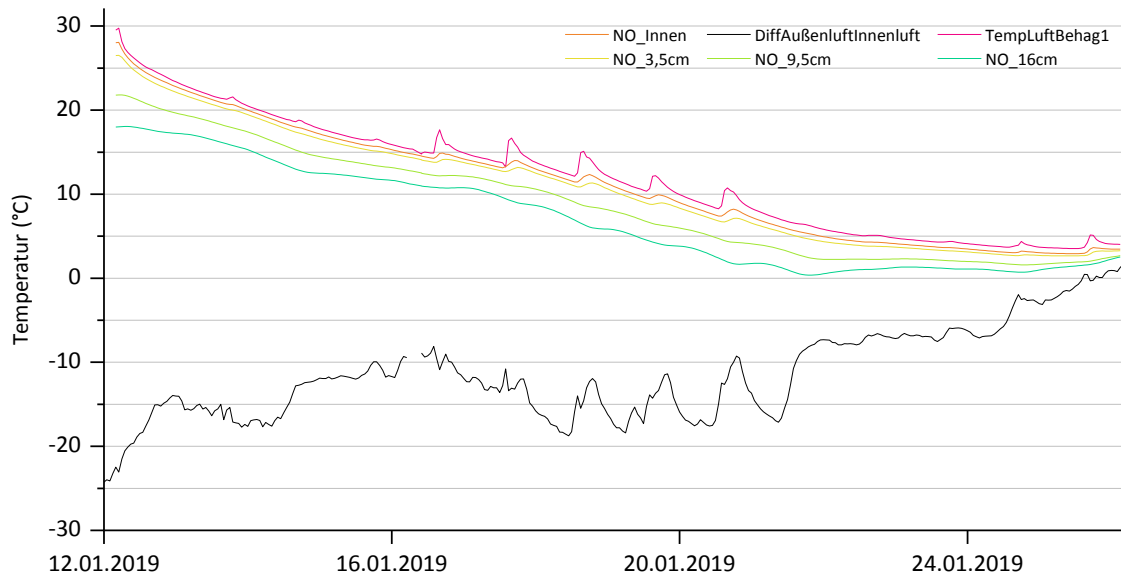


Abbildung 34: Differenz von Innen- und Außenlufttemperatur sowie Temperaturverlauf in der Nord-Ost-Wand bis 16cm Tiefe während der Abkühlphase (13.01.2019 – 26.01.2019)

Die kurzzeitigen Anstiege der Raumlufttemperatur und damit auch der oberflächennahen Bauteiltemperaturen ist durch Sonneneinträge an außergewöhnlich sonnige Tage verursacht.

In Abbildung 35 ist das Spektrum der Bauteiltemperaturen je Sensorposition zu sehen. Die innersten Schichten der Wand durchlaufen die größte Temperaturschwankung (25,2 K). Im Kern der Wand umfasst der Wertebereich 17,7 bis 16,7 K.

Auswertung von Messdaten

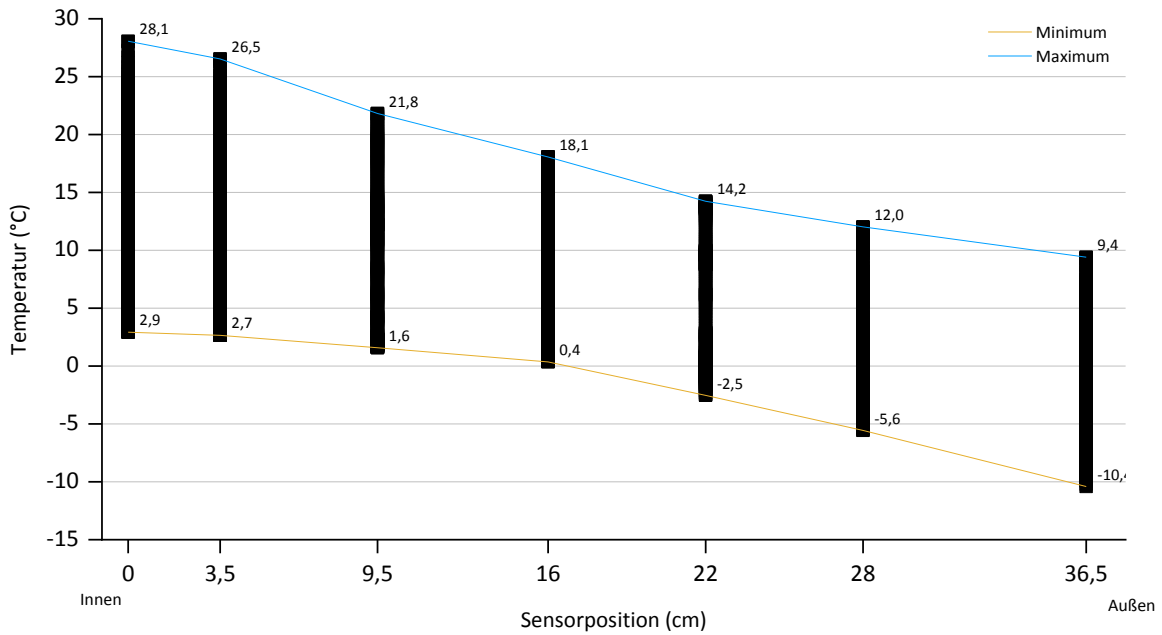


Abbildung 35: Bandbreite der Temperaturschwankungen im Profil der Nord-Ost-Wand in der Abkühlphase (13.01.2019 – 26.01.2019)

6.4 Aufheizphase

Nachdem der Kubus während der vorangegangenen Auskühlphase vollständig ausgekühlt war, wurde die Heizung am 27.01.2019 erneut eingeschaltet und auf eine Solltemperatur von 30 °C eingestellt.

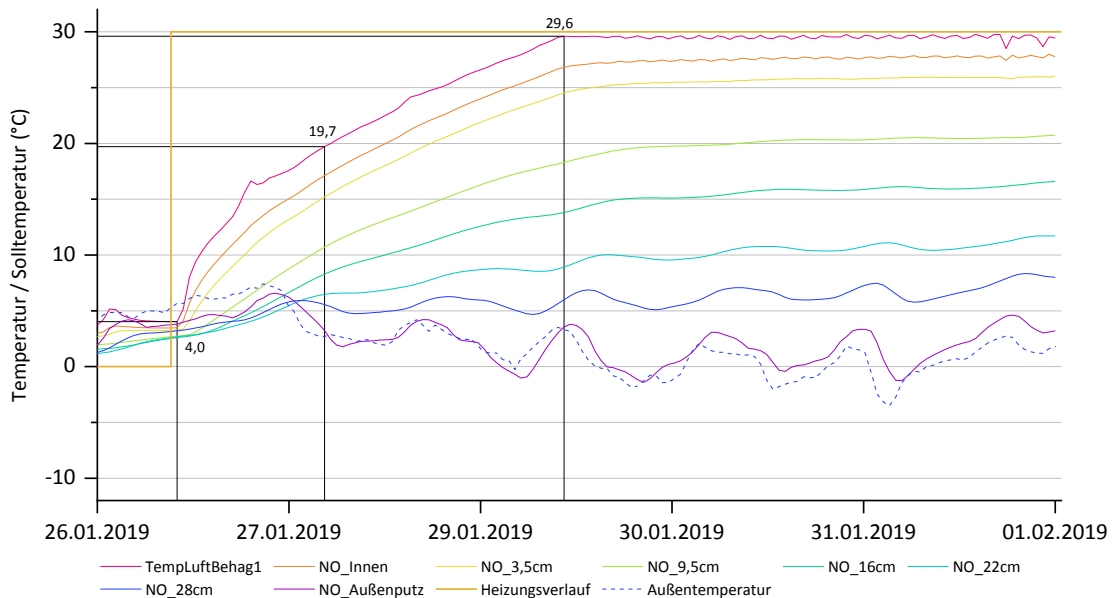


Abbildung 36: Temperaturverlauf als Stundenmittelwerte in den Bauteilschichten der NO-Wand während der Aufheizphase (27.01.2019 – 31.01.2019)

Auswertung von Messdaten

In Abbildung 36 sind die Temperaturverläufe der einzelnen Bauteilschichten der Nord-Ost-Wand dargestellt. Die Heizung wurde am 27.01.2019 um 00:00 automatisiert eingeschaltet.

Zu diesem Zeitpunkt betrug die Raumlufttemperatur im Kubus 4,0 °C. Innerhalb des ersten Tages nach Einschalten der Heizung stieg die Raumlufttemperatur auf 19,7 °C. Der Anstieg der Temperaturen der Raumluft sowie der Bauteilschichten verlief dabei zunächst steiler und flachte dann immer weiter ab. Die Soll-Raumlufttemperatur von 30°C wurde am 29.01.2019 um ca. 15:00 Uhr erreicht. Die Temperatur in den tieferliegenden Schichten stieg noch 12-24 Stunden weiter, bevor sie einen quasi-stationären Zustand erreichte.

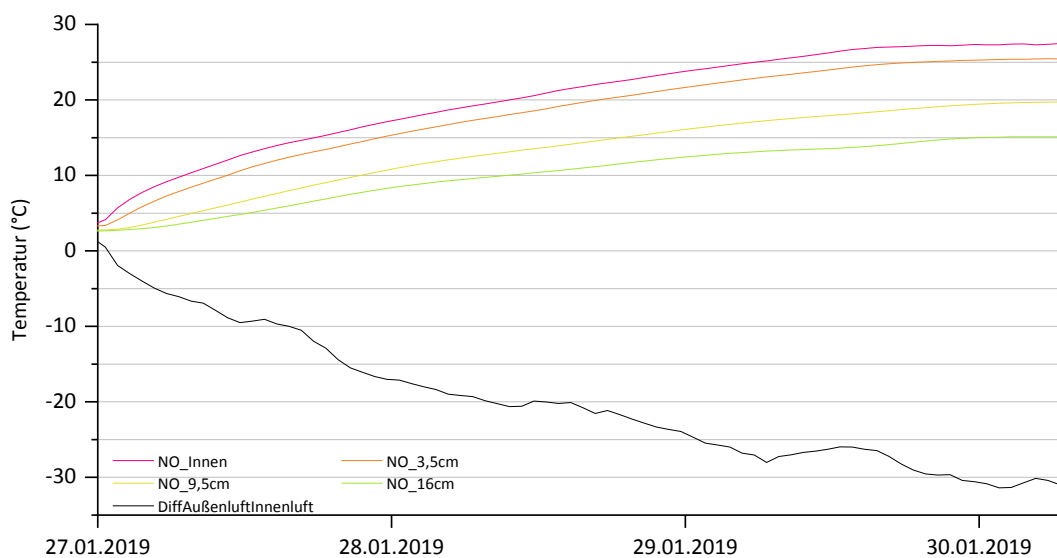


Abbildung 37: Differenz von Innen- und Außenlufttemperatur sowie Temperaturverlauf in der Nord-Ost-Wand bis 16cm Tiefe während der Aufheizphase (27.01.2019 – 31.01.2019)

Nach dem Auskühlen des Kubus herrscht eine nahezu konstante Temperatur über die gesamte Wandtiefe. Während der Aufheizphase fächern die Temperaturverläufe der unterschiedlichen Sensorpositionen auf und zeigen so die unterschiedlich starke Abhängigkeit der Temperatur in den Schichten von der Innentemperatur. Dies lässt sich analog zur Abkühlphase mit dem veränderlichen Wärmestrom erklären. Während das Außenklima näherungsweise konstant im Bereich 0-5°C bleibt, steigt die Raumlufttemperatur durch die Heizung an, und damit auch, wie in Abbildung 37 zu erkennen, die Differenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur. Da die Heizung mit konstanter Leistung Wärmeenergie in den Kubus bringt, der Wärmestrom durch die Wand nach außen aber mit steigender Temperaturdifferenz zunimmt, wird die Steigung der Temperaturkurve der Raumlufttemperatur sowie der Bauteiltemperaturen geringer.

Auswertung von Messdaten

In den tieferliegenden Bauteilschichten ist die Temperaturdifferenz geringer, weshalb die Steigung der Temperaturkurve auch geringer wird, je weiter Außen die Schicht liegt. Zusätzlich ist der direkte Einfluss des Außenklimas in diesen Schichten stärker. Dieser Zusammenhang wird auch in der folgenden Abbildung 38 deutlich. Die Inneren Bauteilschichten der Wand durchlaufen einen vergleichsweise großen Wertebereich von 24,2 K. Der Wertebereich verkleinert sich mit zunehmender tiefe der Sensorposition in der Wand.

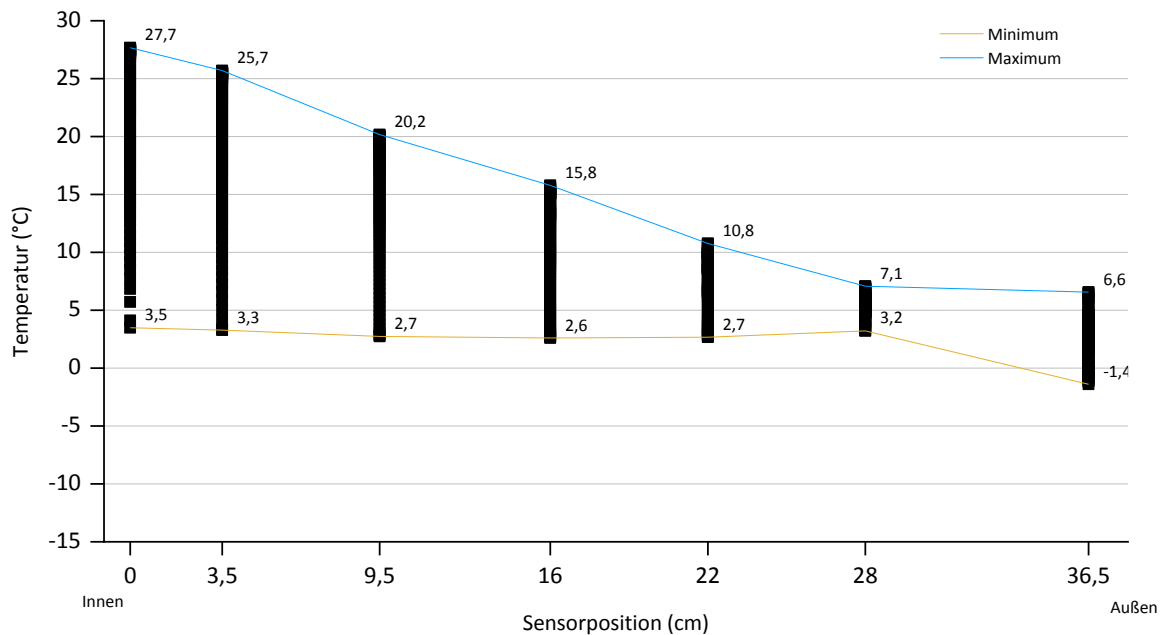


Abbildung 38: Bandbreite der Temperaturschwankungen als Stundenmittelwerte in allen Bauteilschichten in der Aufheizphase (27.1.2019-31.1.2019)

6.5 Nutzerabwesenheit

Um Veränderungen der Bauteiltemperaturen bei kurzen Abkühlphasen mit geringerem Temperaturunterschied nach Kap. 4.2.6 zu untersuchen wurde der Kubus zunächst auf 22°C aufgeheizt und die Heizung anschließend für eine Woche abgeschaltet. Die Lüftung war für den gesamten Messzeitraum auf 0,5-fachen Luftwechsel eingestellt.

In Abbildung 39 ist der Betrachtungszeitraum aufgetragen, in dem eine 1-Wöchige Nutzerabwesenheit simuliert wurde. Nach Ablauf der Woche wurde die Heizung auf 20°C Solltemperatur eingestellt.

Auswertung von Messdaten

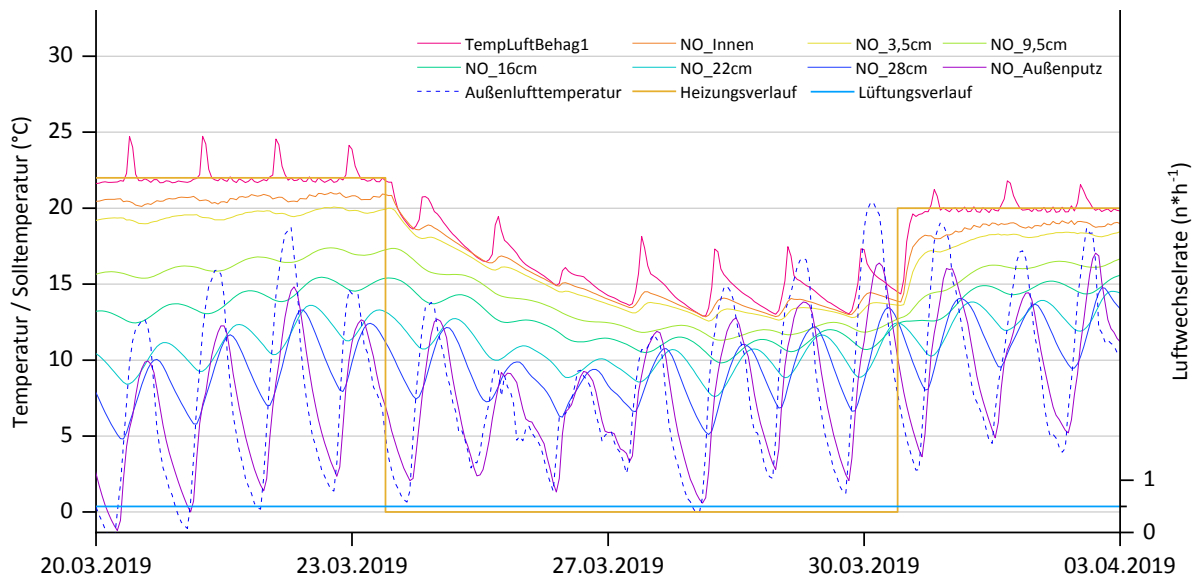


Abbildung 39: Temperaturverläufe in den Bauteilschichten der Nord-Ost-Wand vor und während einer simulierten 1-Wöchigen Nutzerabwesenheit (18.03.2019 - 31.03.2019)

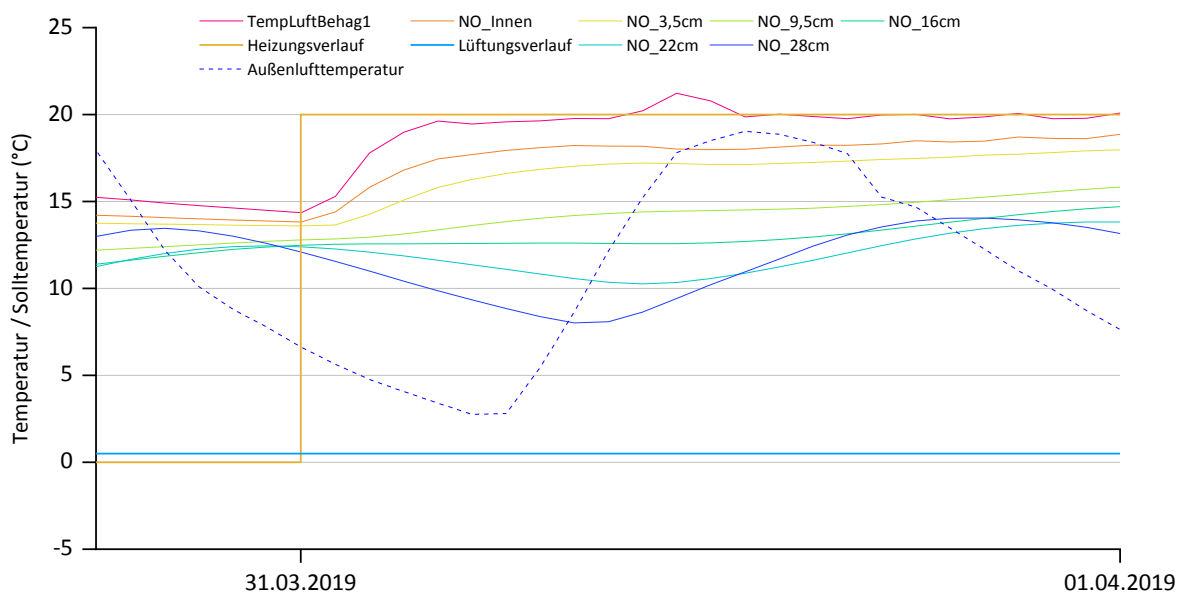


Abbildung 40: Innen- und Außenlufttemperatur, sowie Temperaturverlauf der Bauteilschichten in der Nord-Ost-Wand bis 28cm Tiefe während der Aufheizphase (30.03.2019 – 01.04.2019)

Auswertung von Messdaten

Wie zu erwarten war, verhalten sich die Raumluft- und Bauteiltemperaturen während der Nutzerabwesenheit analog zur längeren Abkühlphase im Januar. Zu Beginn der Abwesenheitsphase erzeugt eine vergleichsweise hohe Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft einen hohen Wärmestrom durch die Wand und somit einen größeren Abfall der Temperaturkurven.

Während des Aufheizens nach der Abwesenheitsphase zeigt sich in Abbildung 40 ein vergleichbares Ergebnis. Die Raumlufttemperatur erreichte nach Einschalten der Heizung innerhalb von vier Stunden die eingestellte Solltemperatur von 20°C. Nach 7-10 Stunden erreichen die Temperaturen der Wand bis in eine Tiefe von 16 cm Ihre Maximaltemperaturen. Die weiter außenliegenden Wandschichten benötigen 1-2 Tage, bis sie im Mittel ihre Maximaltemperaturen erreichen, allerdings ist hier der Einfluss der Außentemperatur auch deutlich stärker als der der Innentemperatur.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In einem Ziegelkubus wurden verschiedene Heiz- und Lüftungsszenarien messtechnisch durchgeführt. Neben der Simulation eines realitätsnahen Heiz- und Lüftungsverhaltens wurde unter anderem das Auskühl- und Aufheizverhalten in langfristigen Intervallen untersucht. Im Zeitraum 01.05.2018 – 30.04.2019 wurden das Innen- und Außenklima sowie die Bauteiltemperaturen an den Oberflächen und in drei verschiedenen Tiefen innerhalb der Wand eines Testkubus aus Ziegelmauerwerk monitort. Alle Messdaten wurden in einer Datenbank zusammengeführt.

Es konnten verschiedene Erkenntnisse zum Zusammenspiel von Innen- und Außenklima, sowie dem Bauteilverhalten gewonnen werden. Das Aufheiz- und Abkühlverhalten einer Wand wird maßgeblich von deren Eigenschaft bestimmt, Wärmeenergie aufzunehmen und zu speichern. Darüber hinaus ist die Aufnahme und Abgabe von Wärmeenergie in hohem Maße von der Temperaturdifferenz abhängig.

Während der Wintermonate fiel die raumseitige Oberflächentemperatur ohne Einfluss einer Lüftung bei Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft von 15 bis 20 K innerhalb von 24 Stunden um 6 K. Bei einer Temperaturdifferenz von 10 bis 15 K fiel die Oberflächentemperatur um rund 3 K pro Tag.

Ohne Lüftung des Kubus konnte im Vergleich zum Aufheizverhalten ein wesentlich langsames Abkühlen beobachtet werden. Bei kürzeren Nutzerabwesenheitszeiten von einigen Tagen kann das als Vorteil gesehen werden, da die Temperaturen im Rauminnern innerhalb einiger Tage nicht übermäßig stark abfallen, und gleichzeitig für ein erneutes Aufheizen des Raums wenig Zeit benötigt wird.

Für einen typischen Zeitraum in der Übergangszeit wurde eine einwöchige Nutzerabwesenheit bei dauerhaft 0,5-fachem Luftwechsel simuliert. An der raumseitigen Wandoberfläche wurde in dieser Zeitspanne ein Temperaturabfall von 6 K beobachtet. Bei einem erneuten Aufheizen des Kubus dauerte es weniger als einen Tag, um die Bauteiltemperaturen bis in eine Tiefe von 16 cm wieder auf einen quasistationären Temperaturverlauf zu erwärmen.

Je stärker die Oberflächen eines Raumes auskühlen, desto höher ist bei gleicher relativer Raumluftfeuchte das Risiko von Tauwasserausfall an den Oberflächen und somit von Schimmelpilzwachstum. Während der einwöchigen Auskühlphase blieben die Oberflä-

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

chentemperaturen die überwiegende Zeit über 13°C. Die für das Schimmelpilzwachstum kritische Temperatur von 12,7 °C, welche für normative raumklimatische Bedingungen gilt, wurde somit nicht erreicht. Die im Wandinnern gespeicherte Wärmeenergie verhindert hier ein stärkeres Auskühlen der Wandoberflächen. Dieser Effekt wirkt ganz erheblich dem Risiko einer Schimmelpilzbildung entgegen.

Weiterhin kann während der Übergangszeit und in den Wintermonaten durch regelmäßiges Stoßlüften die relative Raumluftfeuchte wirksam gesenkt werden. Stoßlüftungsvorgänge haben aufgrund ihrer geringen Dauer und der raumseitig höheren spezifischen Wärmekapazität des hier verwendeten Ziegels nur einen sehr geringen Einfluss auf die oberflächennahen Bauteiltemperaturen. Dieser Zusammenhang kann bewirken, dass sich im Anschluss eines Lüftungsvorganges in einem mit Ziegelmauerwerk erstellten Raum schneller wieder thermisch behagliche Zustände einstellen als in einem in Leichtbauweise errichteten Raum. Somit kann die schwere Bauweise auch als weniger empfindlich bezeichnet werden als leichtere Konstruktionen gegenüber einem fehlerhaften Lüften seitens des Nutzers.

Durch die Speicherfähigkeit des Ziegelmauerwerks reagiert der Raum träge auf veränderte thermische Bedingungen. Durch die Speicherfähigkeit des Ziegelmauerwerks und der so bedingten Oberflächentemperaturen an den Wandflächen wird eine Vergleichmäßigung der Temperatur im Raum ermöglicht. Das Gebäude regelt sich somit zu einem großen Teil selbst.

Die Untersuchungen im Sommer haben gezeigt, dass durch Nachtlüftung mit hohem Luftwechsel und einer ausreichend großen Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur die Bauteiltemperatur über Nacht bis in 3,5 cm Tiefe der Ziegelwand um 1 bis 2 K gesenkt wird. Hierbei ist es vorteilhaft, dass die zur Errichtung des Kubus verwendeten Ziegel an den Oberflächen eine höhere Masse und somit höhere spezifische Wärmekapazität als im Bauteilinnern besitzen. In den kurzzeitigen Temperaturabsenkungen durch die Nachtlüftung kann somit Wärmeenergie aus den oberflächennahen Schichten des Bauteils abgeführt werden. Dadurch können am Tag Temperaturspitzen durch erneute Aufnahme von Wärmeenergie dieser Schichten abgepuffert werden. Ziegelkonstruktionen mit einer hohen Wärmespeicherkapazität haben hier einen klaren Vorteil im Vergleich zu Holzrahmen- oder Leichtbaukonstruktionen mit niedrigerer Wärmekapazität.

Das Temperaturverhalten im Kubus und das damit verbundene Aufheiz- und Abkühlverhalten der Ziegelkonstruktion wird in hohem Maße durch das stark schwankende Außenklima beeinflusst. Um die vorhandenen Ergebnisse zu validieren und die statistische

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Belastbarkeit der Messwerte, insbesondere im Hinblick auf das wechselhafte Außenklima zu erhöhen, wären weitere Messungen notwendig.

Interessant wäre darüber hinaus eine Untersuchung weiterer Szenarien. Denkbar wären beispielsweise Szenarien, die eine kurzzeitige Abwesenheit des Nutzers simulieren, um spezifisch Aussagen treffen zu können, für welchen Zeitraum die Wärmespeicherfähigkeit des Ziegels einen Kälteeinbruch des Außenklimas überbrücken kann, ohne Einsatz der Heizungsanlage.

Nach der bisherigen Auswertung der Messergebnisse erscheint auch die detaillierte Untersuchung der teilweisen oder kompletten Verschattung des Fensters als sinnvolles, Szenario, um die Effektivität der Wärmespeicherfähigkeit genauer zu bestimmen.

8. Bildverzeichnis

Abbildung 1: (links) Aufstellort des Ziegelkubus in Wöllstein	11
Abbildung 2: (rechts) Fertig errichteter Ziegelkubus	11
Abbildung 3: Präparierter Ziegel-Mauerstein	13
Abbildung 4: Behaglichkeitsmesstand mit Sensoren in Strahlungsschilden; Rippenheizkörper und Zuluftrohr	14
Abbildung 5: Übersicht über durchgeführte Regelungsszenarien im Projektzeitraum (01.05.2018 – 30.04.2019)	16
Abbildung 6: Regelungsszenario Stoßlüften in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018).....	17
Abbildung 7: Regelungsszenario Nachtlüftung im Sommer (01.07.2018 – 01.09.2018) mit 2-fachem und 5-fachem Lüftungswechsel	18
Abbildung 8: Regelungsszenario Nachtabenkung der Heizung mit und ohne Nachtlüftung im Frühjahr (01.04.2019 - 30.04.2019)	18
Abbildung 9: Regelungsszenario Abkühlphase (13.01.2019 – 26.01.2019)	20
Abbildung 10: Regelungsszenario Aufheizphase (26.01.2019 – 03.02.2019)	20
Abbildung 11: Regelungsszenario Aufheiz-/Abkühlphasen "Urlaubsszenario" (05.03.2019 – 01.04.2019)	21
Abbildung 12: Innen –und Außenlufttemperatur und - feuchte über den gesamten Messzeitraum des Projektes (01.05.2018 – 30.04.2019) Das Außenklima wurde direkt am Standort gemessen. Für den eingegrenzten Zeitraum wurden Messwerte einer nahegelegenen Messstation verwendet.....	22
Abbildung 13: Innen- und Außenlufttemperatur in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei Stoßlüftungen und 20 °C Solltemperatur der Heizung.....	23
Abbildung 14: Relative Luftfeuchte innen und außen während der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei Stoßlüftungen und 20 °C Solltemperatur der Heizung	24
Abbildung 15: Innen- und Außenlufttemperaturen im Sommer (01.07.2018 – 01.09.2018) bei 2- fachem Luftwechsel bis zum 4.8.2018 und 5-fachem Luftwechsel ab 6.8.2019.....	25
Abbildung 16: Bauteiltemperaturen in verschiedenen Tiefen bis 16 cm der Nord-Ost-Wand im Sommer (01.07.2018 – 01.09.2018) bei 2-fachem Luftwechsel bis zum 4.8.2018 und 5-fachem Luftwechsel ab 6.8.2019.....	25
Abbildung 17: Bauteiltemperaturen in 28 cm Tiefe und im Außenputz der Nord-Ost-Wand im Sommer (01.07.2018 – 01.09.2018) bei 2-fachem Luftwechsel bis zum 4.8.2018 und 5-fachem Luftwechsel ab 6.8.2019.....	26
Abbildung 18: Innen- und Außenlufttemperaturen im April bei Nachtlüftung und Absenkung der Heizung (03.04.2019 – 30.04.2019)	27
Abbildung 19: Bauteiltemperaturen in verschiedenen Tiefen der Nord-Ost-Wand im April bei Nachtlüftung und Absenkung der Heizung (03.04.2019 – 29.04.2019).....	27
Abbildung 20: Innen- und Außenlufttemperaturen vor während der Abkühlphase im Januar (06.01.2019 – 21.01.2019)	28
Abbildung 21: Innen und Außenlufttemperaturen während der Aufheizphase im Januar (26.01.2019 – 31.01.2019)	29
Abbildung 22: Innen- und Außenlufttemperaturen bei einwöchiger "Nutzerabwesenheit" (20.03.2019 – 06.04.2019).....	29
Abbildung 23: Innen- und Außenlufttemperaturen sowie Bauteiltemperaturen in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei Stoßlüftung.....	31

Bildverzeichnis

Abbildung 24: Innen- und Außenlufttemperaturen sowie Bauteiltemperaturen in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei Stoßlüftung – Ausschnitt	33
Abbildung 25: Bandbreite der Temperaturschwankungen in allen Bauteilschichten der Nord-Ost-Wand in der Übergangszeit (12.10.2018 – 12.11.2018) bei täglichem Stoßlüften	33
Abbildung 26: Innen- und Außenlufttemperatur und –feuchte bei Stoßlüftungen - ohne Heizungseinsatz (14.10.2018 – 21.10.2018)	34
Abbildung 27: Innen- und Außenlufttemperatur und –feuchte bei Stoßlüftungen - ohne Heizungseinsatz (25.10.2018 – 31.10.2018)	35
Abbildung 28: Innen- und Außentemperatur sowie Zulufttemperatur in m/s im Sommer (28.07.2018 – 02.08.2018) bei erhöhter Nachtlüftung (2-facher Luftwechsel)	36
Abbildung 29: Innen- und Außenlufttemperatur sowie Zulufttemperatur in m/s im Sommer (14.8.2018 - 19.8.2018) bei hoher Nachtlüftung (5-Facher Luftwechsel).....	36
Abbildung 30: Bauteiltemperaturen der Nord-Ost-Wand im Sommer (28.07.2018 – 02.08.2018) bei erhöhter Nachtlüftung (2-facher Luftwechsel)	37
Abbildung 31: Bauteiltemperaturen der Nord-Ost-Wand im Sommer (14.08.2018 – 19.08.2018) bei erhöhter Nachtlüftung (5-facher Luftwechsel)	38
Abbildung 32: Bauteiltemperaturen der Nord-Ost-Wand im April bei Nachtlüftung mit 2-fachem Luftwechsel und Heizungsabsenkung (11.04.2019 - 16.04.2019).....	38
Abbildung 33: Innen- und Außenlufttemperatur sowie Temperaturverlauf in den Bauteilschichten der Nord-Ost-Wand während Abkühlphase (13.01.2019 – 26.01.2019)	39
Abbildung 34: Differenz von Innen- und Außenlufttemperatur sowie Temperaturverlauf in der Nord-Ost-Wand bis 16cm Tiefe während der Abkühlphase (13.01.2019 – 26.01.2019)	40
Abbildung 35: Bandbreite der Temperaturschwankungen im Profil der Nord-Ost-Wand in der Abkühlphase (13.01.209 – 26.01.2019)	41
Abbildung 36: Temperaturverlauf als Stundenmittelwerte in den Bauteilschichten der NO-Wand während der Aufheizphase (27.01.2019 – 31.01.2019)	41
Abbildung 37: Differenz von Innen- und Außenlufttemperatur sowie Temperaturverlauf in der Nord-Ost-Wand bis 16cm Tiefe während der Aufheizphase (27.01.2019 – 31.01.2019)	42
Abbildung 38: Bandbreite der Temperaturschwankungen als Stundenmittelwerte in allen Bauteilschichten in der Aufheizphase (27.1.2019-31.1.2019)	43
Abbildung 39: Temperaturverläufe in den Bauteilschichten der Nord-Ost-Wand vor und während einer simulierten 1-Wöchigen Nutzerabwesenheit (18.03.2019 - 31.03.2019)	44
Abbildung 40: Innen- und Außenlufttemperatur, sowie Temperaturverlauf der Bauteilschichten in der Nord-Ost-Wand bis 28cm Tiefe während der Aufheizphase (30.03.2019 – 01.04.2019)	44

9. Literatur

- [1] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Auswirkungen der Entwicklung zu Niedrigstenergiegebäuden auf die Gebäudehülle. In: Fouad, N. A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2017. Gebäudehülle und Fassaden, S. 45–76. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2017.
- [2] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Standard von Niedrigstenergiegebäuden in Deutschland. Mauerwerk 21 (2017), Heft 5, S. 273–286.
- [3] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Niedrigstenergiegebäude - Entwicklung eines Standards und einer Berechnungsmethode für die Gebäudeenergieeffizienz. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2017.
- [4] Schöndube, T.; Carrigan, S.; Schoch, T. et al.: Niedrigstenergiegebäude-Standard in Deutschland. In: Kornadt, O.; Carrigan, S.; Hoffmann, S. et al. (Hrsg.): Bauphysiktag Kaiserlautern 2017. Bauphysik in Forschung und Praxis. Bauphysiktag Kaiserlautern 2017, Kaiserslautern, 25.-26.10.2017, S. 115–120. Eigenverlag der Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2017.
- [5] Hofmann, M.; Geyer, C.; Kornadt, O.: Auswertung von Raumklimamessungen und Bestimmung typischer Taupunkttemperaturen in natürlich belüfteten Wohnzimmern. Bauphysik 39 (2017), Heft 3, S. 151–158.
- [6] Kornadt, O.; Carrigan, S.; Schöndube, T.: Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen. Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente, Wärmespeicherfähigkeit, SWD-10.08.18.7-15.26, 2018.
- [7] DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.
- [8] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [9] Schild, K.; Willems, W. M.: Wärmeschutz. Grundlagen - Berechnung - Bewertung. Detailwissen Bauphysik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [10] DIN EN ISO 13786:2018-04: Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren (ISO 13786:2017).
- [11] Deutscher Bundestag; Deutscher Bundesrat: Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. EnEV, Heft 2013, 2014.
- [12] DIN V 18599-2:2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- [13] DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.

- [14] 4108-8: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden.
- [15] Deutsche Energie-Agentur: So heizen und lüften Sie richtig! Tips und Tricks für wenig Geld, 2016.