

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

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

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

IBP-Bericht HTB-012/2022

Untersuchungen eines Sockelheizungssystems im Vergleich zu einem konventionellen Heizungssystem

Durchgeführt im Auftrag
SOKOTHERM GmbH
Dorothea-Twer-Str. 1
56370 Bremberg

Der Bericht umfasst
53 Seiten Text
37 Tabellen
37 Bilder

Dr.-Ing. Stefan Bichlmair
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Zegowitz
Dr.-Ing. Mohammad Aleya
Dipl.-Ing. (FH) Rainer Schübler

Valley, 5. Juli 2022

Abteilungsleiter

Dr.-Ing.
Simon Schmidt

Gruppenleiter

Dipl.-Ing. (FH)
Andreas Zegowitz

Gruppenleiter

Dr.-Ing.
Aleya Mohammad

Bearbeiter

Dr.-Ing.
Stefan Bichlmair

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

Inhalt

1	Hintergrund	3
2	Durchführung der Untersuchung	3
2.1	Messraum	3
2.2	Mess- und Regelungskonzept	4
2.3	Wärmeversorgung und Heizeinrichtung	7
2.4	Untersuchte Ausführungsvarianten und Versuchsreihen	9
2.5	Auswertung der Messdaten für den energetischen Vergleich	11
3	Messergebnisse	12
3.1	Heizkörper (Kurzbezeichnung HK)	12
3.2	Sockelheizung 4 Wände (Kurzbezeichnung SH 4W)	22
3.3	Sockelheizung 2 Wände (Kurzbezeichnung SH2)	32
4	Vergleich und Bewertung der Heizflächen	41
5	Zusammenfassung und Ausblick	50

1 Hintergrund

Das Fraunhofer IBP wurde zur Durchführung von Untersuchungen des Sockelheizungssystems der SOKOTHERM GmbH im Vergleich zu einem konventionellen Heizungssystem beauftragt.

Die Versuche am Fraunhofer-IBP werden im Klimasimulator durchgeführt, dessen Lufttemperatur zwischen -15°C und $+55^{\circ}\text{C}$ eingestellt werden kann. In diesem Bereich lässt sich jedes gewünschte Außenklima (Sommer, Winter, Tag, Nacht) abbilden. Innerhalb des Klimasimulators ist ein Testraum mit einem definierten Wärmebedarf errichtet worden. Er verfügt u.a. über mehr als 170 Thermoelemente, Sensoren zur Grenzschichtvermessung, Wärmestrommesser sowie Feuchte- und Widerstandssensoren. Zwei der Wände des Testraumes können mithilfe von Heizmatten auf der Außenseite als »Innenwände« betrachtet werden, während auf die beiden anderen »Außenwände« direkt die im Klimasimulator eingestellten Bedingungen einwirken. In diesen Testraum wird die Sockelheizung eingebaut.

2 Durchführung der Untersuchung

2.1 Messraum

Die Außenabmessungen des Messraumes im Klimasimulators betragen ca. $4,37 \times 3,87 \text{ m}^2$ (Länge x Breite), Bild 1. Die Innenraumabmessungen betragen $3,91 \times 3,40 \times 2,77$ (Länge x Breite x Höhe) mit einer Raumfläche von $13,28 \text{ m}^2$ und einem Raumvolumen von $36,8 \text{ m}^3$. In der längsseitigen Außenwand ist ein Fenster mit Wärmeschutzglas eingebaut ($1,23 \times 1,48 \text{ m}^2$). An der kurzen Innenwand befindet sich die Zugangstüre zum Messraum. Der Messraum besteht aus zwei Außenwänden (AW 1 und AW 2) sowie aus zwei Innenwänden (IW 1 und IW 2). Die zwei Innenwände des Testraumes werden mithilfe von Heizmatten auf der Außenseite auf 15°C beheizt. Dadurch werden angrenzende Räume mit 15°C Raumtemperatur nachgestellt.

Die Außenwände haben eine Wanddicke von 30 cm. Der Wandaufbau besteht aus massiven Gips-Wandbauplatten sowie einer 4 cm dicken Innendämmschicht mit Gipskartonbeplankung auf der Rauminnenseite. Der U-Wert der Außenwand beträgt $0,48 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Der Innenwandaufbau ist ähnlich wie die Außenwand aufgebaut jedoch mit einem U-Wert von rund $0,84 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die Decke besteht aus XPS Hartschaumplatten sowie der Deckenkonstruktion aus Holzbalken und begehbarer Holzplatte. Der mittlere U-Wert beträgt rund $0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Der Bodenaufbau besteht aus Fertigteilstrichelementen sowie einer Bodendämmung aus 16 cm dicken XPS Dämmplatten. Die Klimakammer steht auf einer Betondecke mit darunterliegendem Kellerraum.

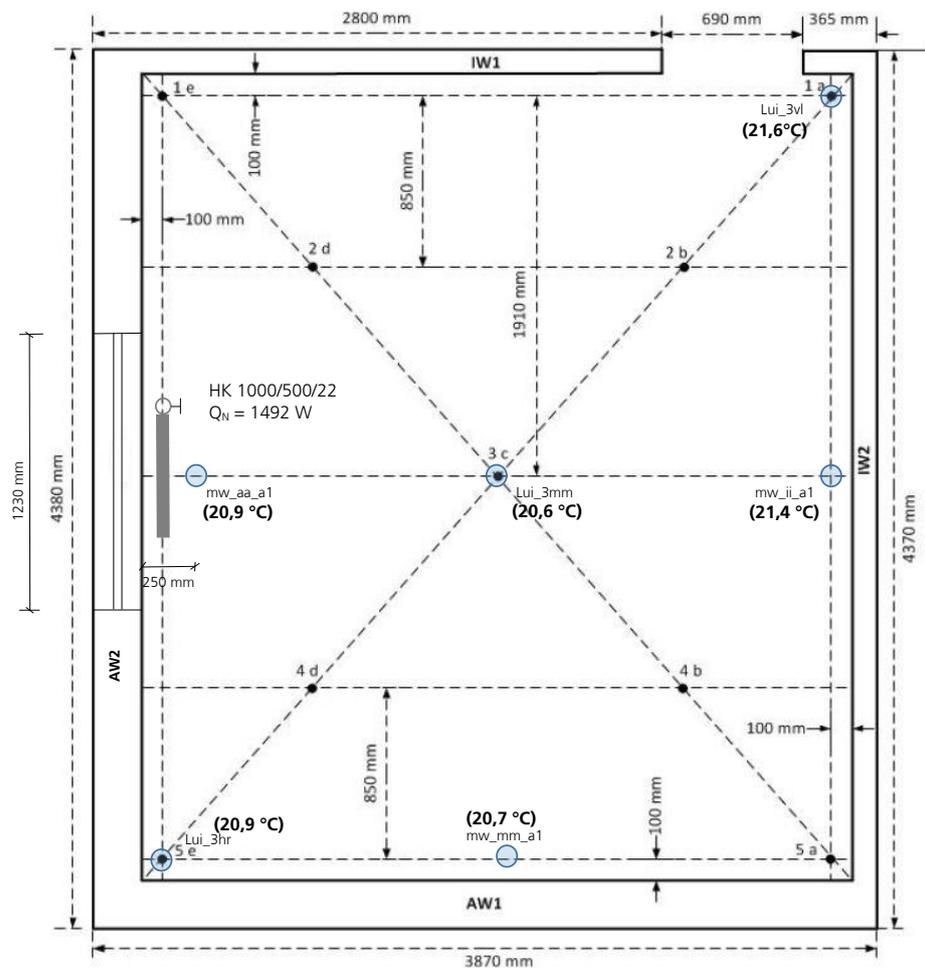


Bild 1:
Grundriss des Messraumes im Klimasimulator mit Abmessungen. Zusätzlich ist das Messnetz schematisch mit eingezeichnet (gestrichelte Linien).

2.2 Mess- und Regelungskonzept

Regelungskonzept und Versuchsablauf

Die Regelung der Raumtemperatur erfolgt über die Messung der Raumlufttemperatur an 24 Messstellen im Messraum in einer Höhe von 90 cm (Bild 2). Die Sensoren sind dabei in einem Abstand von ca. 45 cm zu den Wänden angeordnet. Die Sensoren verteilen sich in einem Raster mit vier Längsachsen und sechs Querachsen in einem Abstand von ca. 60 cm in Längsrichtung des Raumes und in ca. 80 cm in Querrichtung des Raumes.



Bild 2:
Innenansicht des Messraumes mit Heizkörper unter dem Fenster sowie Lattenkonstruktion zur Positionierung der Sensoren für die Regelung.

Der Versuchsdurchlauf lässt sich über die Visualisierung der Regelungssoftware starten. Der Versuch besteht aus drei Phasen, der Aufheizphase, der Beharrungsphase und der Abkühlphase. Die Aufheizphase dauert vom Starten des Versuchs bei 16 °C Raumtemperatur bis zu dem Erreichen der Sollwerttemperatur des Raums bei 21 °C. Die Beharrungsphase wurde im Rahmen der ersten Versuche auf zehn Stunden festgelegt. Danach folgt die Abkühlphase des Raumes bis wieder 16 °C Raumtemperatur erreicht sind.

Da es das Ziel des Versuches ist, die Zeit, Energie und Leistung zu messen, bis der komplette Raum die Solltemperatur erreicht hat, werden für die Ist-Temperatur der Regelung immer nur die Sensorwerte betrachtet, die die Solltemperatur noch nicht erreicht haben. Dabei wird zu Beginn noch über alle Sensorsignale ein Mittelwert gebildet und nach dem Überschreiten des Sollwertes der ersten Sensoren werden diese nicht mehr berücksichtigt. Zum Schluss gibt es nur noch einen einzelnen Sensor, der die Solltemperatur noch nicht erreicht hat. Nachdem alle Sensoren die Solltemperatur erreicht haben, wird die Pumpe abgeschaltet und der Raum kühlt ab. Dies geschieht so lange bis die Wiedereinschaltbedingungen erfüllt sind. Ein Verlassen eines einzelnen Sensors aus dem Behaglichkeitsbereich von 20 °C (untere Grenze des Behaglichkeitsbereichs) ist die hier definierte Bedingung. Im Anschluss startet die Pumpe erneut und es wird wieder so lange geheizt, bis alle Sensoren wieder oberhalb der Solltemperatur von 21 °C liegen. Der Versuch wird beendet, wenn die Versuchsdauer abgelaufen ist, unabhängig davon ob zu diesem Zeitpunkt geheizt wird oder nicht.

Die Soll-Vorlauftemperatur beträgt 70 °C und der Volumenstrom zwischen 4,3 und 5,8 l/min für alle Versuche. Die Regelung der Heizleistung erfolgt über den

Durchfluss mit An-/ Ausschaltung. In Bild 3 ist der Versuchsablauf mit Aufheizphase, Beharrungsphase und Abkühlphase schematisch dargestellt.

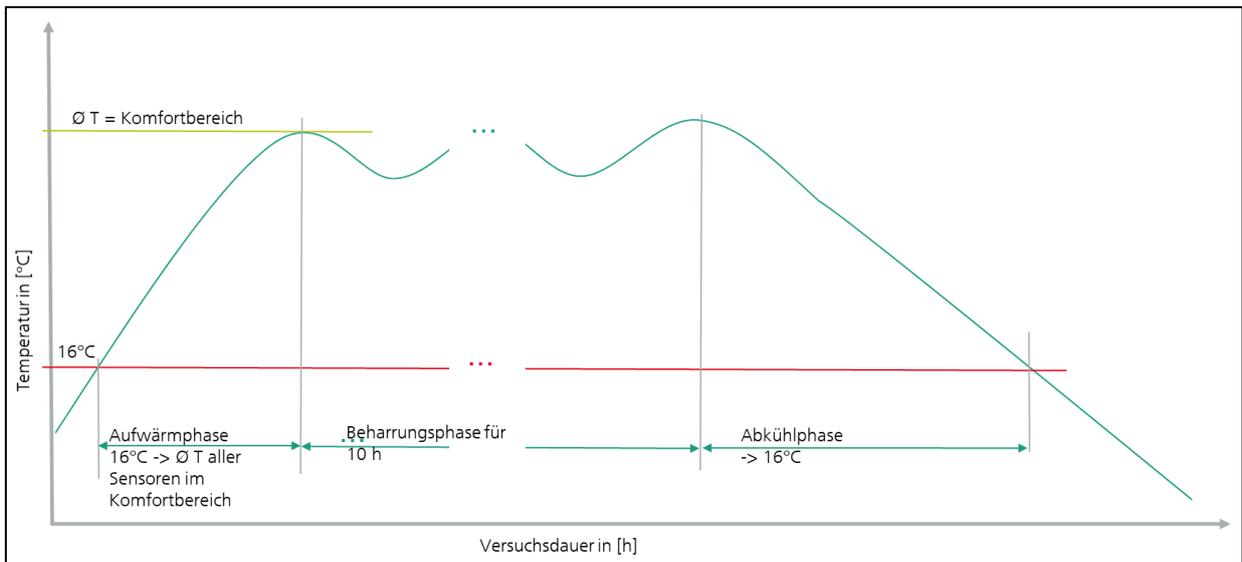


Bild 3:
Schematische Darstellung des Versuchsablaufs mit Aufwärmphase, Regelungsphase und Abkühlphase.

Messung Wärmeabgabe

Die Erfassung der Wärmeabgabe der warmwassergeführten Heizeinrichtung erfolgt über die Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen sowie des Volumenstromes des Heizmittels. Aus diesen Messwerten wird die Wärmeabgabe berechnet. Das Messintervall beträgt zehn Sekunden.

Horizontale Temperaturverteilung und Behaglichkeitsgrenzen

Anhand des gewählten Regelungskonzeptes wird zum einen sichergestellt, dass die Solltemperatur der Raumluft im gesamten Raum erreicht wird. Zum anderen können die Messdaten zusätzlich ausgewertet werden, um festzustellen, wie viele Sensoren über bzw. unter den Sollwerten liegen. Hierfür wird entsprechend der Anzahl und Aufteilung der Sensoren jedem Temperatursensor eine Raumfläche zugeordnet. Damit kann dann die zugeordnete Raumfläche mit zu warmen ($>22\text{ °C}$) oder zu kalten ($< 20\text{ °C}$) Temperaturen im zeitlichen Verlauf ausgewertet und die unterschiedlichen Heizeinrichtungen miteinander verglichen werden. Das Messintervall beträgt zehn Sekunden.

Vertikale Temperaturverteilung

Die vertikale Temperaturverteilung wird in der Raummitte und für Kontrollzwecke auch in der Wandnähe erfasst. Hierzu werden Temperatursensoren vom Boden bis zur Decke in folgenden Höhen erfasst und ausgewertet: 12 cm, 73 cm, 137 cm, 201 cm und 267 cm. Das Messintervall beträgt eine Minute.

Lüftung

Es erfolgt keine aktive Lüftung. Ein Luftaustausch erfolgt nur über Undichtigkeiten bzw. Leckagen als Infiltration. In einer zusätzlichen Versuchsreihe wird das Heizverhalten und Verlauf der Raumtemperaturen bei einer manuellen Lüftung über das Fenster untersucht. Hierzu wird nach Erreichen der Beharrungsphase das Fenster für zehn Minuten bei einem definierten Öffnungswinkel geöffnet und danach wieder verschlossen.

Messunsicherheit der verwendeten Sensoren

Die Temperaturmessungen der zur Regelung verwendeten horizontal angeordneten Sensoren erfolgen mit PT 1000-A Sensoren mit einer bekannten Grenzabweichung von $\pm (0,15 + 0,002 | t | \text{ } ^\circ\text{C})$ bzw. einer kalibrierten Messunsicherheit von $\pm 0,1$ bis $\pm 0,3$ K; die Messung der übrigen Temperaturen erfolgt mit Thermoelementen mit einer Unsicherheit ebenfalls von $\pm 0,1$ bis $\pm 0,3$ K. Die Messung des Wasservolumenstromes erfolgt mit einem kalibriertem Volumestrommesser Fabrikat IFM Elektronik GmbH, Typ SU8000 mit einer Genauigkeit von kleiner $\pm (3 \% \text{ Messwert} + 0,2 \% \text{ Messendwert})$, entspricht $\pm 0,12$ L/min bis $0,18$ L/min im Messbereich von 4 L/min bis 6 L/min. Für die Wärmemessung ergibt sich daraus eine Messgenauigkeit von ca. 75 W bis 113 W.

Aufgrund der relativen Bewertung der beiden untersuchten Heizsysteme (Sockelheizung im Vergleich zu den klassischen Heizkörpern) sollte die Messunsicherheit der verwendeten Messsensoren nur eine untergeordnete Rolle bei den Endergebnissen bzw. erreichten relativen Einsparungen spielen.

2.3 Wärmeversorgung und Heizeinrichtung

Wärmeversorgung

Die Bereitstellung des Heizwassers erfolgt über einen elektrischen Durchlauferhitzer System Sunset (Modell PSM 80). Das Heizwasser wird mit einer Übergabestation an die Zuleitungen zu den wärmeabgebende Heizflächen (Heizkörper bzw. Sockelheizsystem) weitergeleitet (Bild 4).



Bild 4:
Durchlauferhitzer System Sunset (Modell PSM 80) zur Bereitstellung der Heizenergie mit Wärmeübergabestation für die Heizwasserversorgung der wärmeabgebenden Heizflächen.

Heizeinrichtung wärmeabgebende Heizflächen

Für die Vergleichsmessung mit dem konventionellen Heizsystem erfolgt die Raumbeheizung mit einem warmwassergeführten Heizkörper Typ 22 mit einer Abmessung 100 cm x 50 cm (B x H). Die Anordnung des Heizkörpers erfolgt an der bautypischen Einbausituation unter dem Fenster. Die Heizleistung des Heizkörpers beträgt nach Normbedingungen 1492 W.

Die Sockelheizleisten der SOKOTHERM GmbH bestehen aus einem einteiligen weiß lackierten Aluminiumbauteil mit den Außenabmessungen 100 mm x 22 mm (H x T). In dieser Sockelheizleiste befinden sich zwei übereinander angeordnete Heizrohre mit einem Innendurchmesser von 16 mm und einem mittleren Achsabstand von 55 mm zueinander. Das Alu-Strangpressprofil wird an der Wand im Sockelbereich montiert. Die Montage erfolgt mit Abstandshaltern mit einem Abstand zwischen Sockelheizleiste und Wand von ca. 15 mm und ca. 10 mm zum Fußboden, so dass ein konvektiver Wärmetransport sichergestellt ist, siehe Bild 5 und Bild 6.

Die Länge der Sockelleiste (zwei Heizrohre) beträgt für die erste Versuchsanordnung an allen vier Wänden ca. 13,3 m (SH 4W) und für die zweite Versuchsanordnung nur an den zwei Außenwänden (SH 2W) ca. 7,1 m.

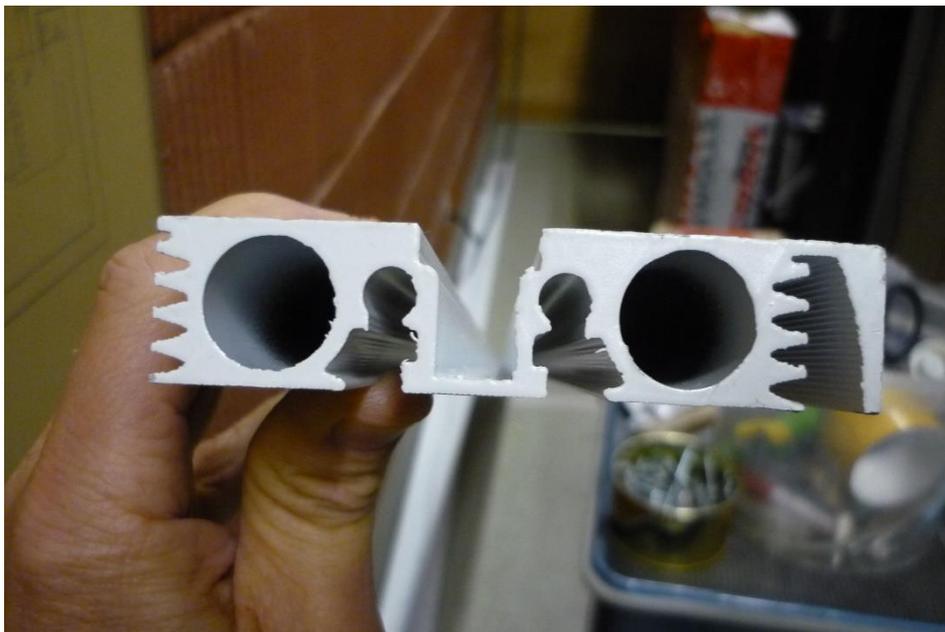


Bild 5:
Profil der Sockelheizleiste mit integrierten Heizrohren mit Innendurchmesser von 16 mm und äußeren Abmessungen von 100 mm x 22 mm (H x T).



Bild 6:
Anordnung der Sockelheizleiste im Messraum.

2.4 Untersuchte Ausführungsvarianten und Versuchsreihen

Es wird das Sockelheizungssystem der SOKOTHERM GmbH im Vergleich zu einem konventionellen Heizungssystem (Heizkörper) untersucht. Hierzu wird die

jeweilige Wärmeabgabe zur Raumbeheizung bei unterschiedlichen Außentemperaturen erfasst und miteinander verglichen. Zusätzlich erfolgt die Messung der Raumtemperaturen in unterschiedlichen Raumhöhen zum Vergleich der Temperaturschichtung sowie weitere Temperatur und Wärmestrommessungen gemäß Messkonzept.

In der ersten Messreihe wird die Wärmeabgabe des Heizkörpers zur Raumbeheizung bei unterschiedlichen Außentemperaturen als Vergleichswert erfasst.

In der zweiten Messreihe erfolgt der Einbau des Sockelheizungssystems an allen Wänden des Messraumes mit zwei Außenwänden sowie zwei Innenwänden. Es erfolgt die Messung der Wärmeabgabe und der Vergleich zum konventionellen System mit Heizkörper.

In der dritten Messreihe wird die Länge des Sockelheizungssystems angepasst bzw. von den Innenwänden rückgebaut, d.h. die Heizleisten befinden sich nur noch an den Außenwänden. Die Gesamtlänge der Heizleiste halbiert sich dadurch in etwa.

Für die Untersuchung der Auswirkung einer manuellen Fensterlüftung wird das im Messraum eingebaute Fenster verwendet. Hierzu wird eine gesonderte Versuchsreihe durchgeführt, bei der das Fenster nach Erreichen der Beharrungsphase (Zieltemperatur im Raum) manuell für zehn Minuten geöffnet wird. Der Versuch wird bei einer Außentemperatur von -10 °C durchgeführt.

In der Tabelle 1 sind die Versuchsreihen mit den Temperaturrandbedingungen außen aufgelistet.

Tabelle 1:
Aufbau der Versuchsreihen mit Umgebungstemperaturen bzw. Außentemperaturen.

Kurz-Bez.	Versuchs-anordnung	T außen [°C]	T außen [°C]	T außen [°C]
HK	Heizkörper	-10	-5	+5
SH 4W	Sockelheizung 4 Wände			
SH 2W	Sockelheizung 2 Wände		-	-
HK+L	Heizkörper + Lüftung			
SH4+L	Sockelheizung 4 Wände + Lüftung			

2.5 Auswertung der Messdaten für den energetischen Vergleich

Für den energetischen Vergleich wird die Wärmeabgabe im Beharrungszeitraum der jeweiligen Heizsysteme bzw. Anordnung miteinander verglichen. Dazu werden die einzelnen Heizzyklen in der Beharrungsphase (jeweiliger Start Heizen mit anschließender Abkühlphase) ausgewertet. Es wird die aufgewendete Energie zum Beheizen des Raumes je Zyklus auf die Zyklusdauer bezogen. Für den energetischen Vergleich wird der eingeschwungene Zustand im Beharrungszeitraum ausgewertet, d.h. es werden hierfür die letzten drei vollständigen Heizzyklen verwendet. Im Ergebnis erhält man den Durchschnittswert der Heizenergie von drei Heizzyklen auf eine Stunde bezogen, dargestellt in MJ/h bzw. kW/h.

Für die weitere Auswertung wird die Wärmeabgabe des Heizkörpers als Referenzwert verwendet. Die Wärmeabgabe der Sockelheizleiste an vier Wänden montiert (SH 4W) und an zwei Wänden montiert (SH 2W) wird auf die Wärmeabgabe des Heizkörpers bei der jeweiligen Außentemperatur bezogen.

3 Messergebnisse

Die Ergebnisse der Versuchsdurchführung sind nachfolgend für die unterschiedlichen Außentemperaturen (-10 °C, -5 °C und +5 °C) sowie für den Versuch Lüftung mit der jeweiligen Auswertung zu den Flächenanteilen mit zu warmen, zu kalten und innerhalb der Regelgrenzen befindlichen Bereichen grafisch dargestellt. Zu der grafischen Darstellung werden die ermittelten Zahlenwerte in Tabellen angegeben.

3.1 Heizkörper (Kurzbezeichnung HK)

Heizkörper bei -10 °C Außentemperatur

Der Heizkörper erwärmt den Raum, ausgehend von 16 °C, auf den Sollwert von >21 °C mit einer durchschnittlichen Leistung von 1,24 kW in 2,18 Stunden. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren eine mittlere Raumtemperatur von 21,3 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelungszyklus maximale Raumtemperaturen um 21,9 °C und minimale Raumtemperaturen um 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 7,04 kWh. Durch den Regelzyklus mit An-/ Ausregelung stellt sich beim Einschalten kurzfristig eine hohe Spitzenleistung ein, die dann in eine nahezu konstante Wärmeabgabe übergeht, bevor sich der Heizkörper abschaltet. Insgesamt werden im Beharrungszeitraum acht Heizzyklen zur Raumbeheizung benötigt (Bild 7 und Tabelle 2). Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die detaillierte Darstellung der Messwerte aller Temperatursensoren des Regelungsnetzes erfolgt exemplarisch nur für die Messung bei -10 °C (Bild 9).

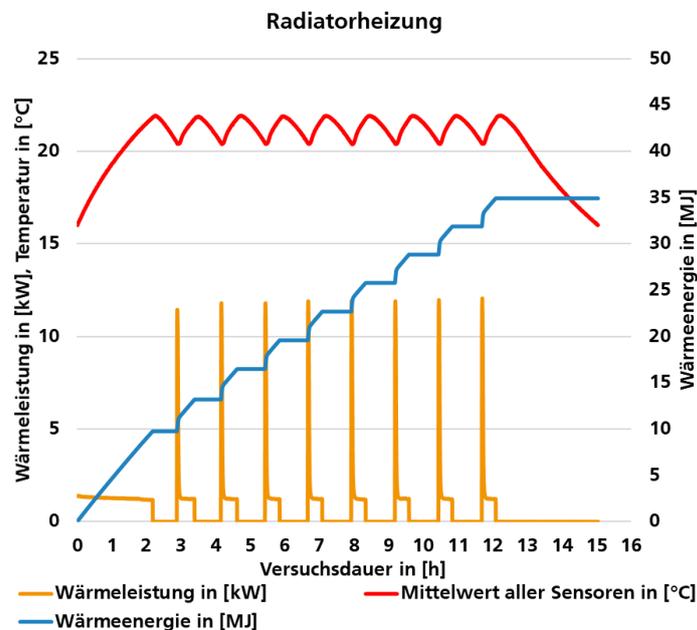


Bild 7:
Heizkörper bei -10 °C außen: Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Sensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 2:
Heizkörper: Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C.

Heizkörper T außen -10 °C	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
	[MJ]	[kWh]			
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	9,75	2,71	1,24	2,18	-
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	25,34	7,04	0,70	10,00	21,3
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	2,86	-

Tabelle 3:
Heizkörper: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C.

Heizkörper T außen -10 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
			[MJ]
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
5	1,26	3,10	2,46
6	1,26	3,06	2,44
7	1,24	3,03	2,43
Mittelwert			2,44

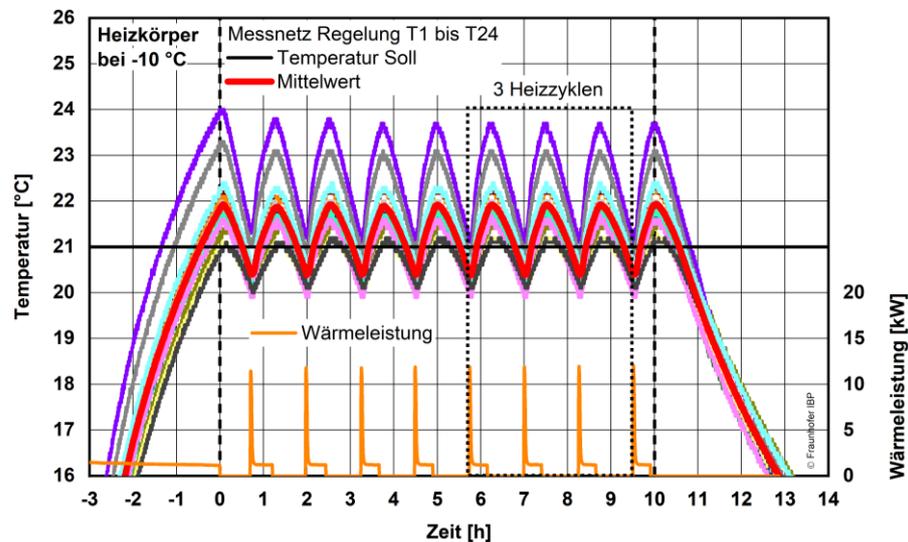


Bild 8:
Heizkörper bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperaturen (24 Regelungssensoren) mit Mittelwert sowie Wärmeleistung. Zusätzlich sind die letzten 3 Heizzyklen markiert.

In Bild 9 sind die zeitlichen Verläufe der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteile des Raumes während des Versuchszeitraums dargestellt. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen. Während des Aufheizvorgangs im Regelungszyklus der Beharrungszeit wird die Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C größer (meist um 3 m²), um dann in den Abkühlzeiten mit abgeschalteter Heizung sich wieder zu verkleinern.

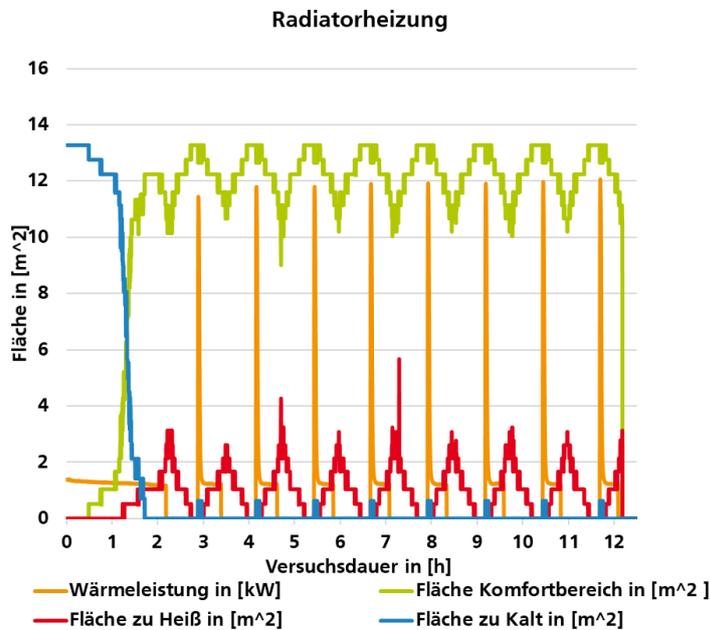


Bild 9:

Heizkörper bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteilen des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen.

Heizkörper bei -5 °C Außentemperatur

Der Heizkörper erwärmt den Raum auf den Sollwert von >21 °C mit einer durchschnittlichen Leistung von 1,26 kW in 2,01 Stunden. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren eine mittlere Raumtemperatur von 21,3 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelungszyklus maximale Raumtemperaturen etwas über 21,9 °C und minimale Raumtemperaturen um 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 6,48 kWh. Es werden ebenfalls acht Heizzyklen benötigt (Bild 10 bzw. Tabelle 4). Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 5 aufgelistet.

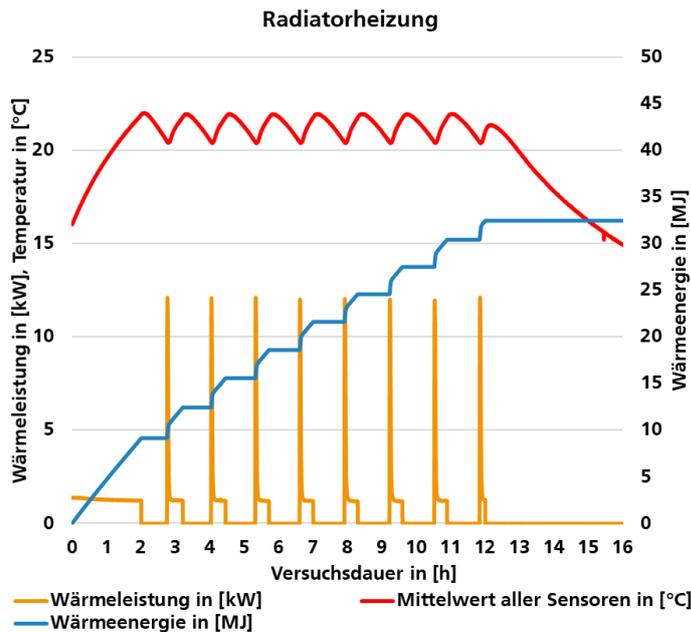


Bild 10:
Heizkörper bei -5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Sensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 4:
Heizkörper: Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -5 °C.

Radiator T außen -5 °C	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
	[MJ]	[kWh]			
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	9,13	2,54	1,26	2,01	-
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	23,31	6,47	0,65	10,00	21,3
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	3,15	-

Tabelle 5:
Heizkörper: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von -5 °C.

Heizkörper T außen -5 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
5	1,31	2,97	2,27
6	1,30	2,93	2,25
7	1,32	2,92	2,22
Mittelwert			2,25

In Bild 11 sind die zeitlichen Verläufe der Flächenanteile der Raumtemperaturen dargestellt. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen. Während des Aufheizvorgangs im Regelungszyklus der Beharrungszeit wird die Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C größer (bis ca. 4 m²), um dann in den Abkühlzeiten mit abgeschalteter Heizung sich wieder zu verkleinern.

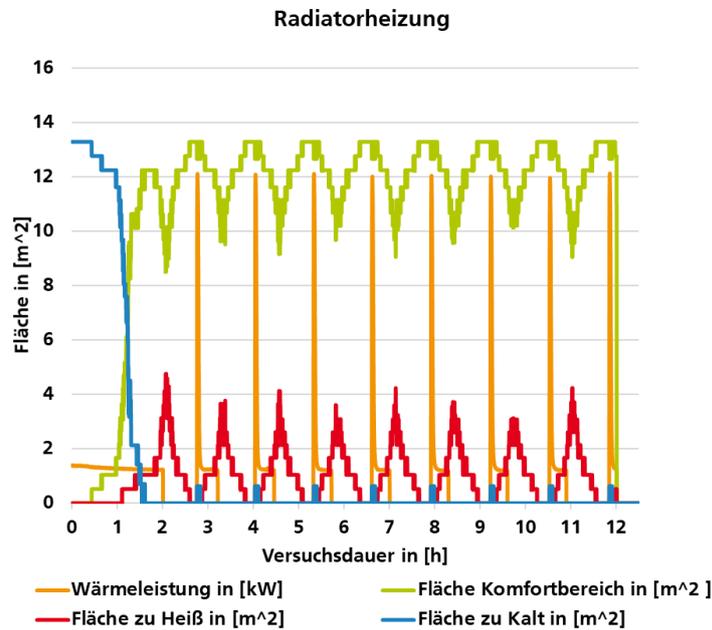


Bild 11:

Heizkörper bei -5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteilen des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen.

Heizkörper bei +5 °C Außentemperatur

Der Heizkörper erwärmt den Raum bei wärmeren Umgebungstemperaturen mit 1,56 Stunden etwas schneller, bei einer durchschnittlichen Leistung von 1,26 kW. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren eine mittlere Raumtemperatur von 21,4 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelungszyklus maximale Raumtemperaturen bis 22,1°C und minimale Raumtemperaturen um 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 4,69 kWh. Es werden nur noch sechs Heizzyklen benötigt (Bild 12 bzw. Tabelle 6). Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 7 aufgelistet.

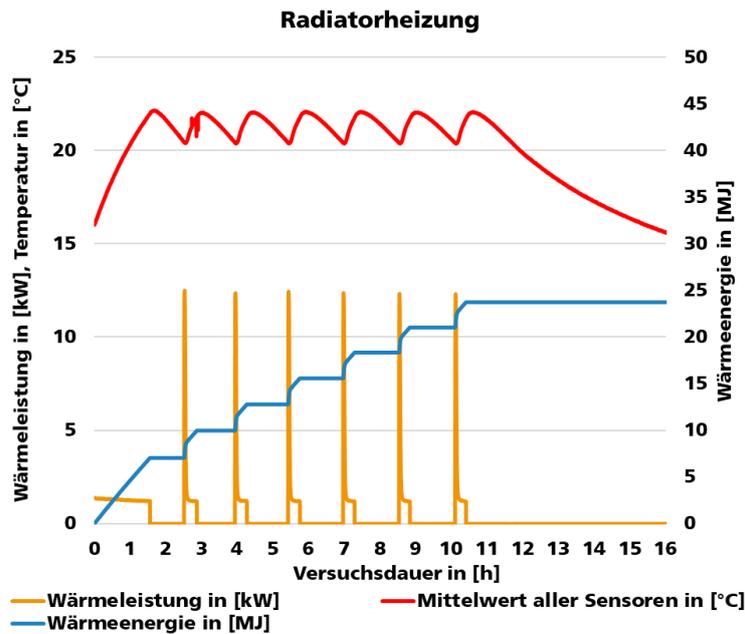


Bild 12:
Heizkörper bei +5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Sensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 6:
Heizkörper: Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von +5 °C.

Radiator T außen +5 °C	Wärmeenergie [MJ] [kWh]		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	7,04	1,96	1,26	1,56	
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	16,87	4,69	0,47	10,00	21,4
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	3,88	

Tabelle 7:
Heizkörper: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von +5 °C.

Heizkörper T außen +5 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
3	1,54	2,78	1,81
4	1,57	2,77	1,77
5	1,57	2,70	1,72
Mittelwert			1,76

In Bild 13 sind die zeitlichen Verläufe der Flächenanteile der Raumtemperaturen dargestellt. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen. Während des Aufheizvorgangs im Regelungszyklus der Beharrungszeit wird die Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C deutlich größer (bis ca. 6 m²), um dann in den Abkühlzeiten mit abgeschalteter Heizung sich wieder zu verkleinern.

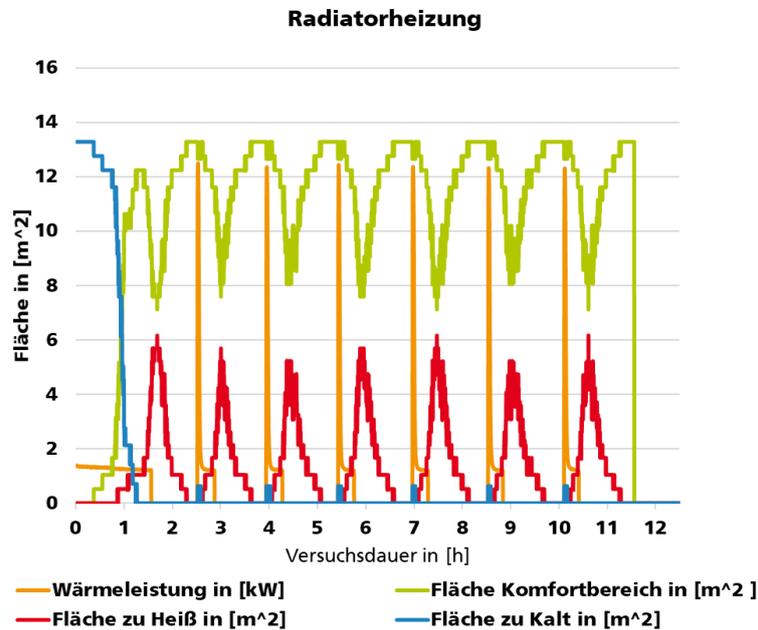


Bild 13:

Heizkörper bei +5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteilen des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen.

Heizkörper Lüften bei -10 °C Außentemperatur

Nach Erreichen der Solltemperatur wird der erste Heizzyklus abgebrochen und nach einer kurzen Heizpause für zehn Minuten das Fenster geöffnet. Die kalte Außenluft strömt in den Raum und die Raumtemperatur sinkt in der Folge auf 7,2 °C. Mit dem Öffnen des Fensters wird der Heizkörper aktiviert. Der Heizkörper benötigt inklusive Lüftungszeit 3,44 Stunden, um den Raum wieder auf den Sollwert von 21 °C aufzuheizen. In diesem Zeitraum werden 8,47 MJ Heizenergie aufgewendet. Im Gesamtzeitraum von zehn Stunden werden 29,62 MJ Heizenergie benötigt, Bild 14 und Tabelle 8.

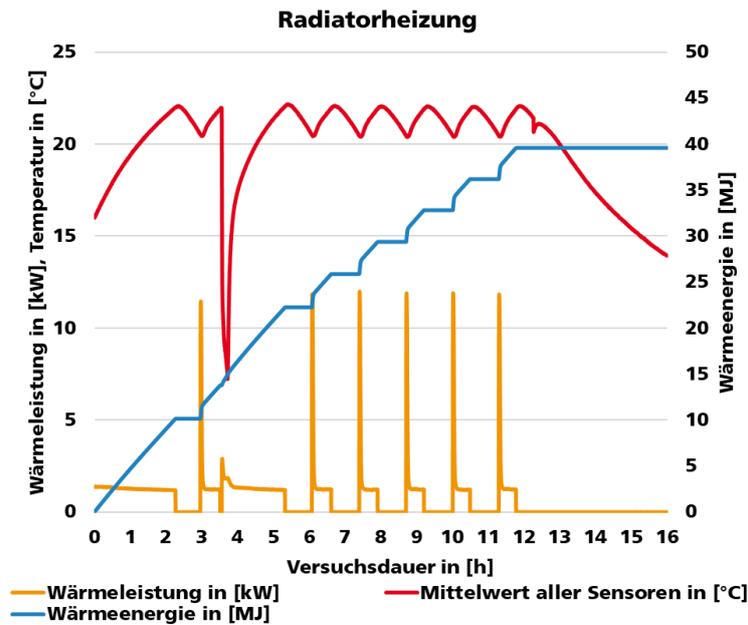


Bild 14:
Heizkörper Lüften bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Sensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 8:
Heizkörper: Zusammenfassung der Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C mit Lüftungsereignis.

Heizkörper T außen -10 °C; Lüften	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]
	[MJ]	[kWh]		
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	10,14	2,82	1,25	2,26
Lüften für 10 min Heizung bis T-Soll >21 °C	8,47	2,35	1,33	1,77
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	29,62	8,23	0,82	10
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	2,4

Durch den Lüftungsvorgang und dem damit verbundenen Abkühlen der Raumluft erhöht sich erwartungsgemäß der Flächenanteil mit zu kalten Raumtemperaturen auf der gesamten Raumfläche. Durch den Heizvorgang werden nach 0,46 Stunden an den ersten Sensoren wieder die Mindesttemperaturen des hier definierten Komfortbereichs von 20 °C erreicht. Der zu kalte Flächenanteil verringert sich zunächst langsam, um dann ab 0,87 Stunden zügig abzufallen.

Nach gesamt 1,4 Stunden sind alle Temperatursensoren wieder über der Mindesttemperatur von 20 °C. Parallel dazu überschreiten 0,92 Stunden nach dem Fensteröffnen die ersten Temperatursensoren die obere Grenze des Komfortbereichs, d.h. die Raumluft ist bereits an einigen Messtellen zu warm. Da die Sollwerttemperatur für die Raumluft 21 °C beträgt, dauert die Beheizung noch an. Im weiteren Verlauf steigt die zu warme Fläche auf knapp 7 m² an, Bild 15.

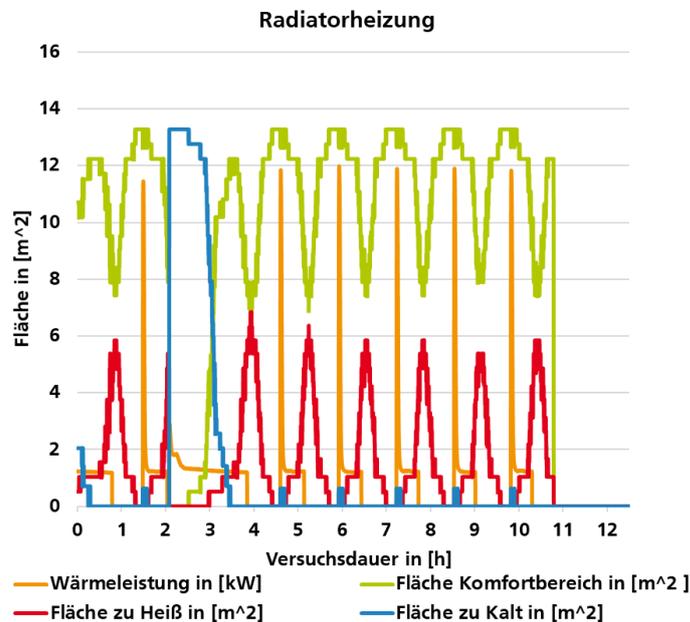


Bild 15:

Heizkörper Lüften bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteile des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen.

Fazit Heizkörper

In der Aufheizphase wird bei allen Außentemperaturen eine in etwa gleich hohe durchschnittliche Leistung von ca. 1,25 kW abgegeben. Entsprechend den Außentemperaturen ergibt sich eine Aufheizdauer von ca. 2,2 h bei -10 °C und nur noch rund 1,6 Stunden bei +5 °C Außentemperatur.

Erwartungsgemäß sinkt mit zunehmender Umgebungstemperatur auch die erforderliche durchschnittliche Heizleistung im Beharrungszustand. Die mittlere Raumtemperatur steigt geringfügig von 21,30 °C auf knapp 21,4 °C mit zunehmender Umgebungstemperaturen an, siehe Tabelle 9. Mit höheren Umgebungstemperaturen sinkt auch die Anzahl der erforderlichen Heizzyklen. Der Energieverbrauch sinkt mit höheren Umgebungstemperaturen bzw. abnehmender Temperaturdifferenz ΔT deutlich ab. Da sich die Boden- und Innenwandtemperatur jedoch nicht mit der Außenlufttemperatur ändert, entspricht die Abnahme der benötigten Wärmeenergie nicht der Abnahme von ΔT . Zusätzlich

sind in Tabelle 9 die Aufheizdauer und Abkühldauer der Heizzyklen im Beharrungszeitraum angegeben. Die Aufheizdauer verringert sich mit zunehmender Umgebungstemperatur. Entsprechend verlängert sich die Abkühldauer mit höheren Umgebungstemperaturen.

Tabelle 9:

Heizkörper: Wärmeenergie, mittlere Raumtemperatur und Temperaturdifferenz zwischen innen und außen sowie Aufheiz- und Abkühldauer der letzten drei Heizzyklen im Beharrungszeitraum.

Heizkörper, Beharrungszeitraum der letzten 3 Heizzyklen					
T außen [°C]	Ø T _{Raum} [°C]	Δ T [K]	Ø Wärmeenergie [MJ]	Ø Aufheizdauer [h]	Ø Abkühldauer [h]
-10	21,29	31,29	2,44	0,41	0,84
-5	21,30	26,30	2,25	0,38	0,93
5	21,36	16,36	1,76	0,32	1,24

Die moderate Wärmeabgabe im Regelungszyklus im Beharrungszeitraum führt bei allen untersuchten Umgebungstemperaturen zu mäßig großem Flächenanteil im Raum mit zu warmen Temperaturen im Aufheizvorgang. Dabei steigt der Flächenanteil von zu warmen Flächen mit wärmeren Umgebungstemperaturen im Mittelwert leicht an, Tabelle 10. Die Sensoren mit zu warmen Temperaturen befinden sich hauptsächlich in der Nähe des Heizkörpers.

Tabelle 10:

Heizkörper: Zuordnung der jeweiligen Temperatursensoren im Regelungsmessnetz mit zu warmen, zu kalten und im Komfortbereich liegenden Temperaturen zu Flächenanteilen des Raumes als Mittelwert über den Beharrungszeitraum.

Heizkörper	20 °C < »Komfort« < 22 °C	»zu kalt« T < 20 °C	»zu warm« T > 22 °C
	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]
T außen -10 °C	12,30	0,02	0,97
T außen -5 °C	12,19	0,02	1,07
T außen 5 °C	11,75	0,02	1,51

Die Untersuchung mit Fensterlüftung ergibt ausgehend von 22,0 °C mittlerer Raumtemperatur bis zum Ende der Fensterlüftung eine Abkühlung auf 7,2 °C. Bis zum Wiedererreichen der Solltemperatur von 21 °C werden 1,77 Stunden benötigt. In dieser Zeit werden 8,47 MJ Heizwärme abgeben.

3.2 Sockelheizung 4 Wände (Kurzbezeichnung SH 4W)

Sockelheizleiste (an 4 Wänden) bei -10 °C Außentemperatur

Die Sockelheizung erwärmt den Raum zügig auf den Sollwert von >21 °C mit einer durchschnittlichen Leistung von 1,63 kW in 1,03 Stunden. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren eine mittlere Raumtemperatur von 21,4 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelzyklus maximale Raumtemperaturen um 22 °C und minimale Raumtemperaturen um 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 6,53 kWh. Durch den Regelzyklus mit An-/ Ausregelung stellt sich beim Einschalten kurzfristig eine hohe Spitzenleistung ein (acht Heizzyklen), siehe Bild 16 und Tabelle 11. Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 12 aufgelistet. Die detaillierte Darstellung der Messwerte aller Temperatursensoren des Regelnetzes erfolgt exemplarisch nur für die Messung bei -10 °C (Bild 17).

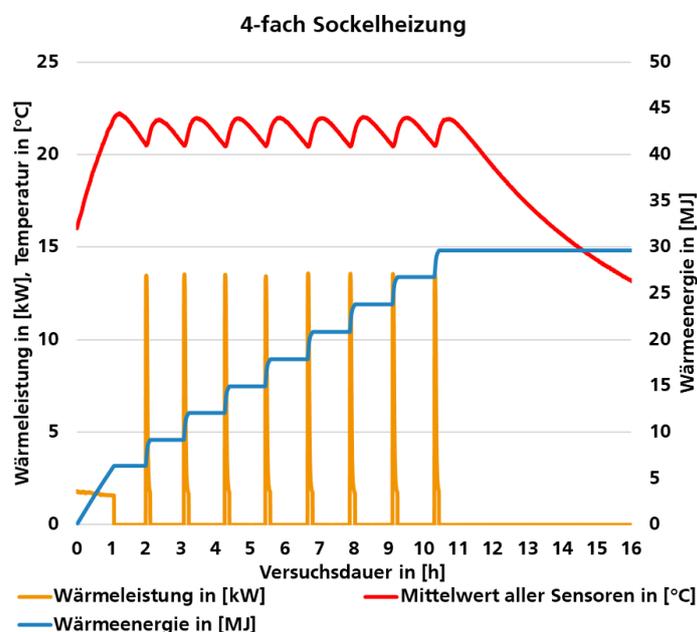


Bild 16: Sockelheizung (4 Wände) bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Regelungssensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 11:
Sockelheizung (4 Wände): Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten der drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C.

Sockelheizung (SH 4W) T außen -10 °C	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
	[MJ]	[kWh]			
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	6,08	1,68	1,63	1,03	
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	23,51	6,53	0,65	10,00	21,4
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	2,70	

Tabelle 12:
Sockelheizung an 4 Wänden: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C.

SH 4W T außen -10 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
5	1,22	2,95	2,42
6	1,23	2,99	2,42
7	1,21	2,96	2,45
Mittelwert			2,43

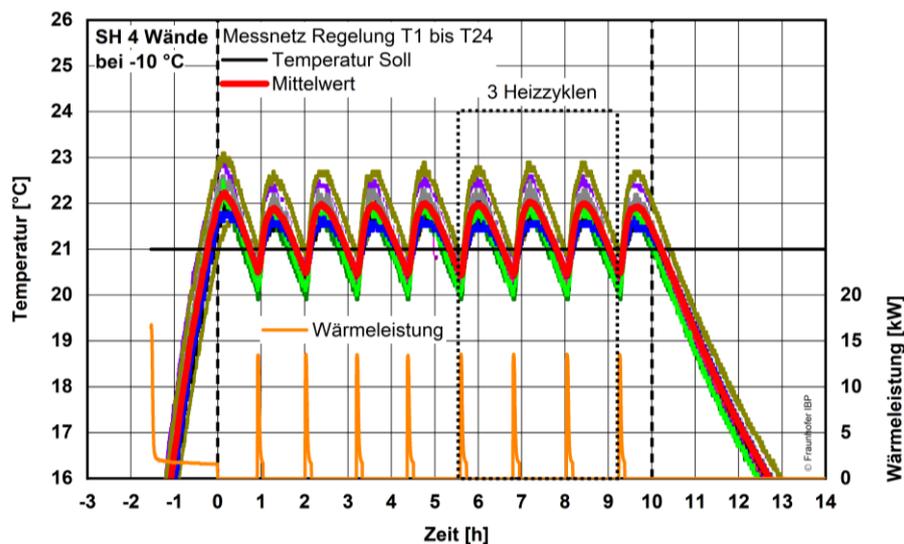


Bild 17:
Sockelheizleiste an 4 Wänden bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperaturen (24 Regelungssensoren) mit Mittelwert sowie Wärmeleistung. Zusätzlich sind die letzten 3 Heizzyklen markiert.

In Bild 18 sind die zeitlichen Verläufe der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteilen des Raumes während des Versuchszeitraums dargestellt. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen. Kurz nach dem Aufheizvorgang ist die zugeordnete Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C im Regelungszyklus der Beharrungszeit am höchsten. Durch den kurzfristigen hohen Wärmeeintrag variieren die Flächenanteile deutlich zwischen rund 3 m² und rund 6 m². Dies rührt daher, dass einige Temperatursensoren in den einzelnen Zyklen gerade noch oder knapp nicht den Grenzwert überschreiten.

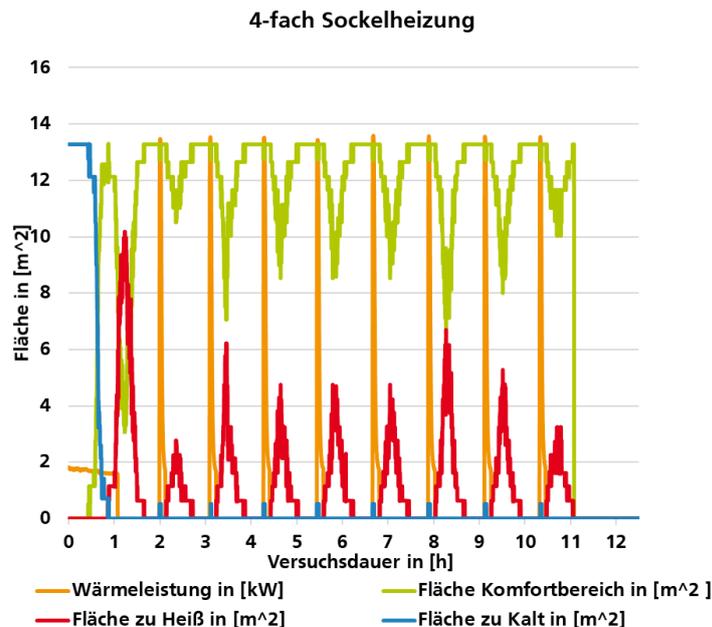


Bild 18:

Sockelheizung (4 Wände) bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteilen des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist Wärmeleistung mit eingetragen.

Sockelheizung (4 Wände) bei -5 °C Außentemperatur

Die Sockelheizung erwärmt den Raum zügig auf den Sollwert von >21 °C mit einer durchschnittlichen Leistung von 1,63 kW in 1,05 Stunden ähnlich schnell wie bei dem Versuch mit -10 °C. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren ebenfalls eine mittlere Raumtemperatur von 21,4 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelungszyklus maximale Raumtemperaturen um 22,1 °C und minimale Raumtemperaturen um 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 5,92 kWh. Die Anzahl der Heizzyklen verringert sich auf sieben (Bild 19 bzw. Tabelle 13). Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 12 aufgelistet.

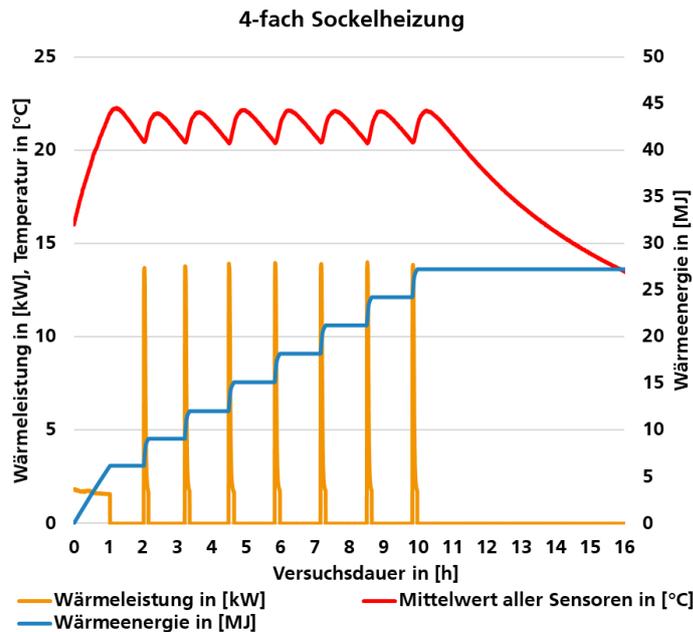


Bild 19:
SH 4W bei -5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert 24 Sensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 13:
SH 4W: Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -5 °C.

Sockelheizung (SH 4W) T außen -5 °C	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
	[MJ]	[kWh]			
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	6,17	1,71	1,63	1,05	
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	21,31	5,92	0,59	10,00	21,4
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	2,65	

Tabelle 14:
Sockelheizung an 4 Wänden: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von -5 °C.

SH 4W T außen -10 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
4	1,33	3,05	2,29
5	1,35	3,04	2,26
6	1,33	3,01	2,27
Mittelwert			2,28

In Bild 20 sind die zeitlichen Verläufe der zugeordneten Flächenanteile der Raumtemperaturen dargestellt. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen. Während des Aufheizvorgangs im Regelungszyklus der Beharrungszeit wird die Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C größer und variiert über dem Beharrungszeitraum auch hier deutlich zwischen rund 5 m² und 10 m². Ab der Hälfte des Beharrungszeitraums stabilisiert sich der Flächenanteil bei rund 8 m².

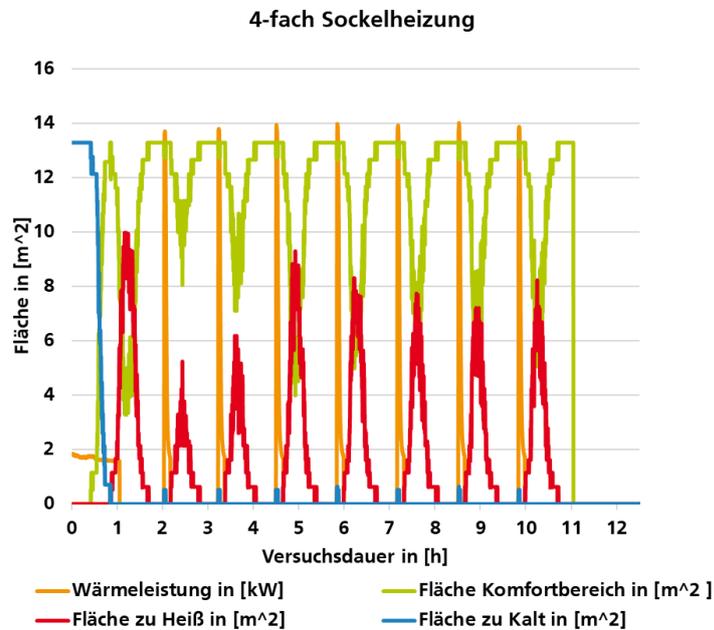


Bild 20:

Sockelheizung (4 Wände) bei -5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteilen des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist Wärmeleistung mit eingetragen.

Sockelheizung (4 Wände) bei +5 °C Außentemperatur

Die Sockelheizung (4 Wände) erwärmt den Raum zügig auf den Sollwert von >21 °C mit einer durchschnittlichen Leistung von 1,61 kW in 1,02 Stunden. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren eine mittlere Raumtemperatur von 21,5 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelungszyklus maximale Raumtemperaturen bis 22,1°C und minimale Raumtemperaturen um 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 4,49 kWh. Es fällt auf, dass nur noch fünf Heizzyklen erfolgen (Bild 21 bzw. Tabelle 15). Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 16 aufgelistet.

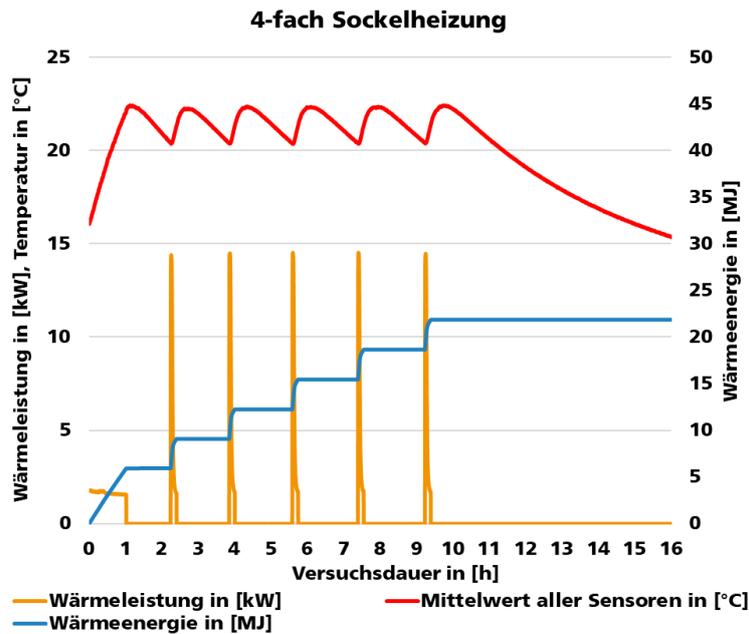


Bild 21:
SH 4W: bei +5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Sensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 15:
SH 4W: Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von +5 °C.

Sockelheizung (SH 4W) T außen +5 °C	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
	[MJ]	[kWh]			
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	5,91	1,64	1,61	1,02	
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	16,17	4,49	0,45	10,00	21,5
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	4,08	

Tabelle 16:
Sockelheizung an 4 Wänden: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von +5 °C.

SH 4W T außen -10 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
2	1,74	3,16	1,82
3	1,80	3,21	1,78
4	1,84	3,20	1,74
Mittelwert			1,78

In Bild 22 sind die zeitlichen Verläufe der Flächenanteile der Raumtemperaturen dargestellt. Während des Aufheizvorgangs im Regelungszyklus der Beharrungszeit wird die Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C erheblich größer und umfasst nahezu den ganzen Raum (bis ca. 12 m²).

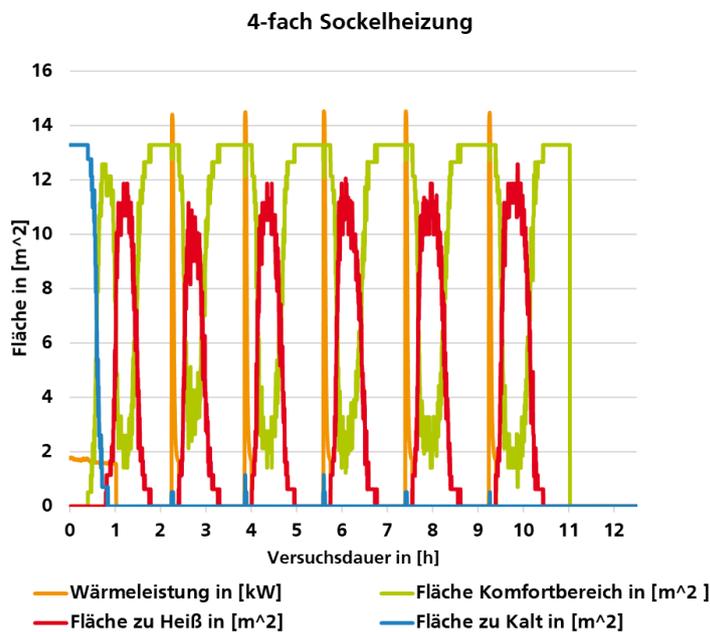


Bild 22:

Sockelheizung (4 Wände) bei +5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteilen des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist Wärmeleistung mit eingetragen.

Sockelheizung (4 Wände) Lüften bei -10 °C Außentemperatur

Nach Erreichen der Solltemperatur wird für zehn Minuten das im Messraum verbaute Fenster geöffnet. Die kalte Außenluft strömt in den Raum und die Raumtemperatur fällt dabei bis auf 6,8 °C ab. Durch die Regelung wird die Sockelheizleiste aktiviert und heizt den Raum in 1,06 Stunden wieder auf den Sollwertbereich auf. Es werden hierfür 7,89 MJ benötigt, Bild 23 und Tabelle 17. Die durchschnittliche Heizleistung ist während des Lüftungsvorgangs mit rund 2,1 kW deutlich höher als während des Aufheizvorgangs (1. Phase, Aufheizen von 16 °C auf T Soll) mit rund 1,6 kW. Dies wird auf den bereits einsetzenden Heizvorgang bei geöffnetem Fenster sowie die zeitweilig deutlich niedrigeren Raumtemperaturen zurückgeführt, da die Heizwärmeabgabe auf mit zunehmender Heizmittelübertemperatur (Differenz Heizmitteltemperatur zur Temperatur der Umgebungsluft) ansteigt.

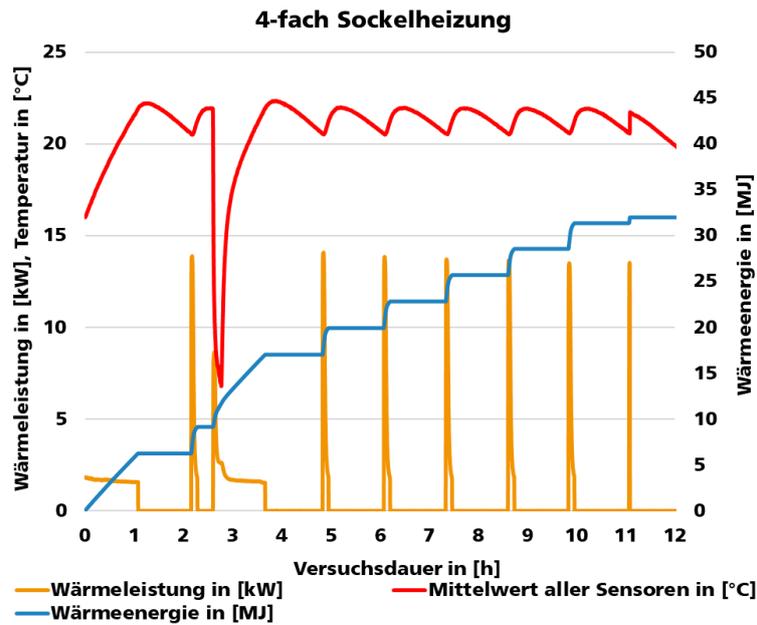


Bild 23:
Sockelheizung (4 Wände) Lüften bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Regelungssensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 17:
Sockelheizung (4 Wände): Zusammenfassung der Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C mit Lüftungsereignis.

Sockelheizung (SH 4W) T außen -10 °C; Lüften	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]
	[MJ]	[kWh]		
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	6,22	1,73	1,61	1,07
Lüften für 10 min Heizung bis T-Soll >21 °C	7,89	2,19	2,06	1,06
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	25,35	7,04	0,70	10
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	2,4

Durch den Lüftungsvorgang und das damit verbundene Abkühlen der Raumluft erhöht sich der Flächenanteil mit zu kalten Raumtemperaturen auf die gesamte Raumfläche. Durch den einsetzenden Heizvorgang mit hoher Wärmeabgabe wird bereits nach 0,55 Stunden an den ersten Sensoren wieder die untere Temperaturgrenze von 20 °C des Komfortbereichs erreicht. Der zu kalte Flächenanteil verringert sich zügig und nach gesamt 0,93 Stunden sind alle Temperatursensoren wieder im Komfortbereich. Mit dem Erreichen der Mindesttemperatur am letzten Temperatursensor überschreitet die Raumtemperatur an den ersten Sensoren die obere Temperaturgrenze des hier definierten Komfortbereichs

und »überheizt« nahezu den gesamten Raum mit ca. 11 m² zugeordnetem Flächenanteil. Mit den sich wiederholenden Heizzyklen verringert sich dieses »Überheizen« allmählich, um dann auf einem geringeren Niveau von rund 3 m² zugeordnetem Flächenanteil sich einzupendeln, siehe Bild 24.

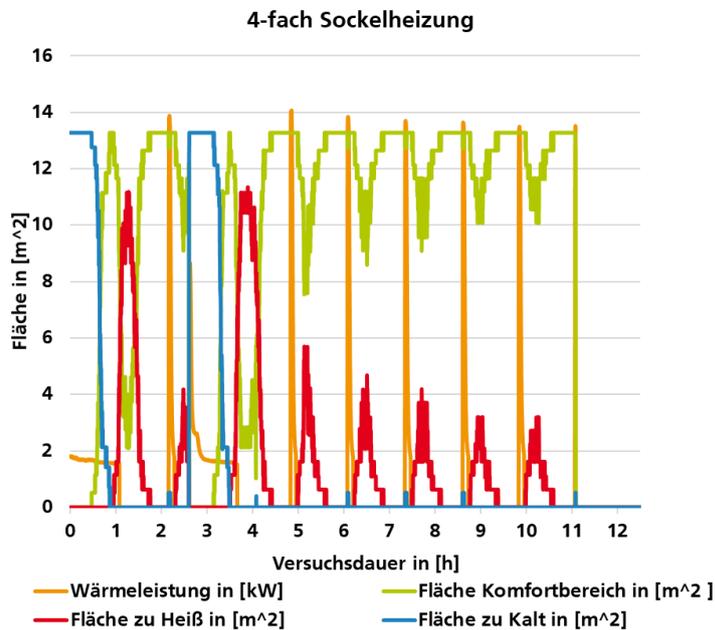


Bild 24:
Sockelheizung (4 Wände) Lüften bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteile des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist Wärmeleistung mit eingetragen.

Fazit Sockelheizung an 4 Wänden

In der Aufheizphase wird bei allen Außentemperaturen eine in etwa gleich hohe durchschnittliche Leistung von ca. 1,62 kW abgegeben. Entsprechend der hohen Wärmeleistung ergibt sich eine kurze durchschnittliche Aufheizdauer in Phase 1 von ca. 1,05 Stunden.

Erwartungsgemäß sinkt mit zunehmender Umgebungstemperatur auch die durchschnittliche Heizleistung im Beharrungszustand. Die mittlere Raumtemperatur steigt geringfügig von 21,4 °C auf rund 21,5 °C mit zunehmenden Umgebungstemperaturen an, siehe Tabelle 18. Mit höheren Umgebungstemperaturen sinkt auch die Anzahl der erforderlichen Heizzyklen, da der Versuchsraum entsprechend langsamer abkühlt. Der Energieverbrauch sinkt mit höheren Umgebungstemperaturen bzw. abnehmender Temperaturdifferenz ΔT deutlich ab. Da sich die Bodentemperatur jedoch nicht mit der Außenlufttemperatur ändert, entspricht die Abnahme der benötigten Wärmeenergie nicht der Abnahme von ΔT . Die Aufheizdauer bleibt bei zunehmender Umgebungstemperatur nahezu gleich. Dies wird auf die sehr kurze Aufheizdauer und dadurch sehr geringen Einfluss der Wärmeleitung über die Hüllfläche zurückgeführt. Die Abkühldauer

nimmt erwartungsgemäß bei höheren Umgebungstemperaturen zu, jedoch stellen sich bei allen Umgebungstemperaturen verhältnismäßig lange Abkühlzeiten ein.

Tabelle 18:

Sockelheizung (4 Wände): Wärmeenergie, mittlere Raumtemperatur und Temperaturdifferenz zwischen innen und außen sowie Aufheiz- und Abkühldauer der letzten drei Heizzyklen im Beharrungszeitraum.

Sockelheizung (4 Wände), Beharrungszeitraum der letzten 3 Zyklen					
T außen [°C]	Ø T _{Raum} [°C]	Δ T [K]	Ø Wärmeenergie [MJ]	Ø Aufheizdauer [h]	Ø Abkühldauer [h]
-10	21,37	31,37	2,43	0,15	1,07
-5	21,41	26,41	2,28	0,15	1,18
5	21,52	16,52	1,78	0,16	1,63

Die hohe kurzfristige Wärmeabgabe im Regelungszyklus im Beharrungszeitraum führt zu einem hohen Flächenanteil im Raum mit zu warmen Temperaturen im Aufheizvorgang bei allen untersuchten Umgebungstemperaturen. Es wird vermutet, dass durch die Trägheit der Heizrohre und miterwärmten Wandbereiche nach dem Abschalten der Heizung die weiterhin abgegebene Energie die Raumtemperaturen über den Grenzwert von 22 °C anheben. Mit höheren Umgebungstemperaturen steigt der den Temperaturen zugeordnete Flächenanteil von zu warmen Flächen im Mittelwert an. Die Raumtemperaturen unterschreiten bei den untersuchten Umgebungstemperaturen kaum die untere Regelgrenze von 20 °C, Tabelle 19.

Tabelle 19:

Sockelheizung (4 Wände): Zuordnung der jeweiligen Temperatursensoren im Regelungsmessnetz mit zu warmen, zu kalten und im Komfortbereich liegenden Temperaturen zu Flächenanteilen des Raumes als Mittelwert über den Beharrungszeitraum.

Sockelheizung (4 Wände)	20 °C < »Komfort« < 22 °C	»zu kalt« T < 20 °C	»zu warm« T > 22 °C
	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]
T außen -10 °C	12,09	0,01	1,18
T außen -5 °C	11,51	0,01	1,76
T außen 5 °C	9,71	0,01	3,56

Die Untersuchung mit Fensterlüftung ergibt ausgehend von 21,8 °C mittlerer Raumtemperatur eine Abkühlung auf 6,8 °C bis zum Ende des Lüftungsvorgangs. Bis zum Erreichen der Solltemperatur von 21 °C eine Gesamtdauer von 1,06 Stunden. In dieser Zeit werden 7,89 MJ Heizwärme abgeben. Die hohe Heizleistung bzw. Trägheit der Heizrohre und in die Wände eingespeicherte Energie sorgt aber auch für eine deutliches »Überschwingen« der oberen Grenze des Komfortbereichs von 22 °C. Dadurch ergeben sich entsprechend hohe zugeordnete Flächenanteile mit zu warmen Flächen, die fast den gesamten Raum einnehmen.

3.3 Sockelheizung 2 Wände (Kurzbezeichnung SH2)

Sockelheizleiste (an 2 Wänden) bei -10 °C Außentemperatur

Die Sockelheizung erwärmt den Raum nur langsam mit rund drei Stunden auf den Sollwert von >21 °C, bei einer durchschnittlichen Leistung von 0,85 kW. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren eine mittlere Raumtemperatur von 21,0 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelungszyklus maximale Raumtemperaturen etwas über 21,4 °C und minimale Raumtemperaturen knapp über 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 6,02 kWh. Durch den Regelungszyklus mit An-/ Ausregelung stellt sich beim Einschalten kurzfristig eine hohe Spitzenleistung ein (9 Heizzyklen), die dann in eine nahezu konstante Wärmeabgabe übergeht (Bild 25 und Tabelle 20). Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 21 aufgelistet. Die detaillierte Darstellung der Messwerte aller Temperatursensoren des Regelungsnetzes erfolgt exemplarisch nur für die Messung bei -10 °C (Bild 26).

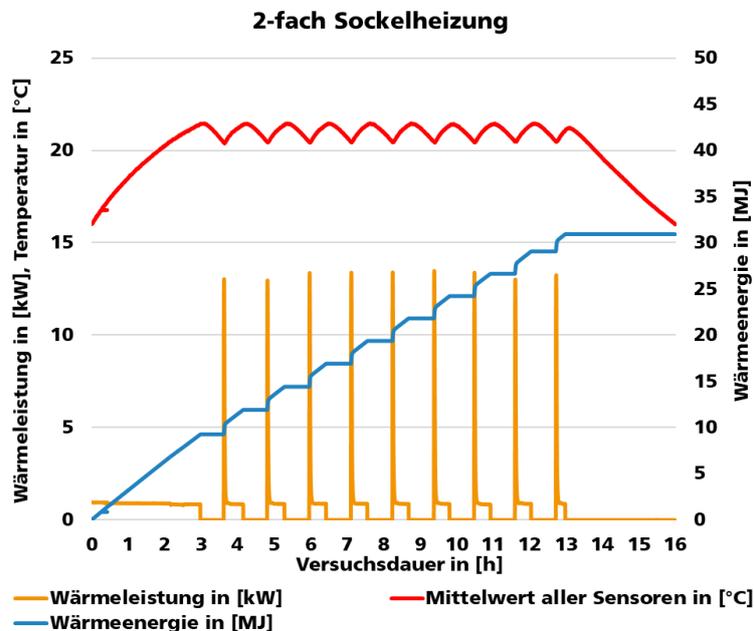


Bild 25:
Sockelheizung (2 Wände) bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Regelungssensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 20:
Sockelheizung (2 Wände): Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten der drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C.

Sockelheizung (SH 2W) T außen -10 °C	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
	[MJ]	[kWh]			
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	9,25	2,57	0,85	3,02	-
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	21,68	6,02	0,60	10,00	21,0
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	3,01	-

Tabelle 21:
Sockelheizung an 2 Wänden: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C.

SH 2W T außen -10 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
6	1,10	2,40	2,18
7	1,11	2,42	2,18
8	1,13	2,42	2,15
Mittelwert			2,17

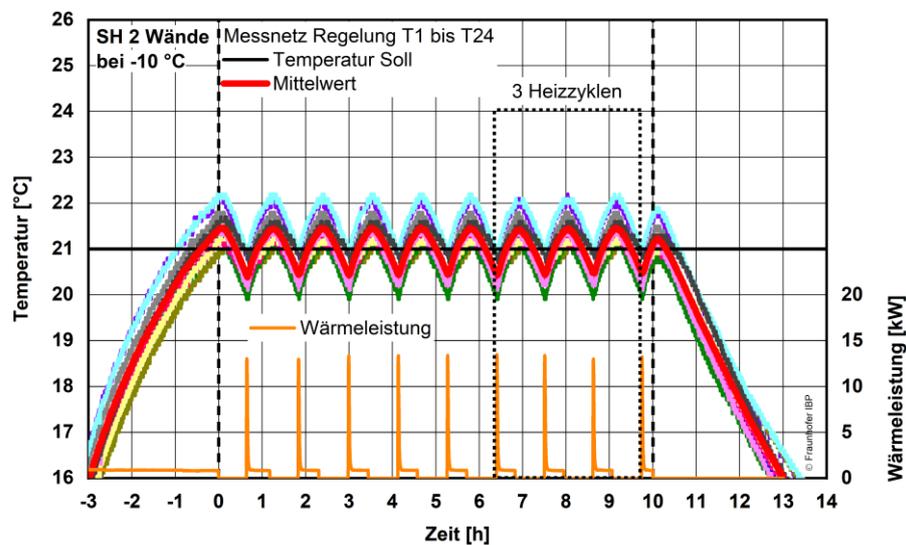


Bild 26:
Sockelheizleiste an 2 Wänden bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperaturen (24 Regelungssensoren) mit Mittelwert sowie Wärmeleistung. Zusätzlich sind die letzten 3 Heizzyklen markiert.

In Bild 27 sind die zeitlichen Verläufe der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteile des Raumes während des Versuchszeitraums dargestellt. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen. Während des Aufheizvorgangs im Regelungszyklus der Beharrungszeit steigt die Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C nur minimal auf rund 1m² an.

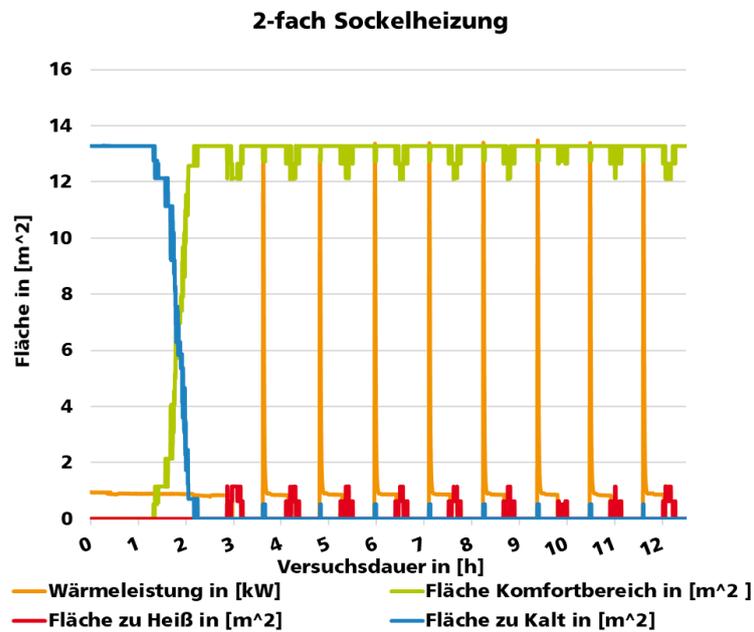


Bild 27:
 Sockelheizung (2 Wände) bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteile des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist Wärmeleistung mit eingetragen.

Sockelheizung (2 Wände) bei -5 °C Außentemperatur

Die Sockelheizung erwärmt den Raum in rund 2,3 Stunden auf den Sollwert von >21 °C mit einer durchschnittlichen Leistung von 0,87. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren eine mittlere Raumtemperatur von 21,1 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelungszyklus maximale Raumtemperaturen um 21,5 °C und minimale Raumtemperaturen um 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 5,13 kWh. Die Anzahl der Heizzyklen reduziert sich auf acht (Bild 28 bzw. Tabelle 22). Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 23 aufgelistet.

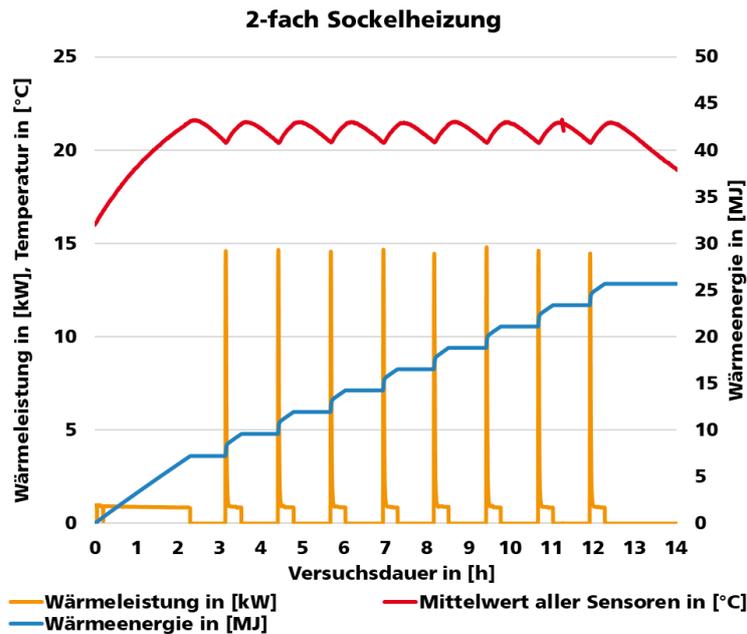


Bild 28:
SH 2W bei -5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Sensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 22:
SH 2W: Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -5 °C.

Sockelheizung (SH 2W) T außen -5 °C	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
	[MJ]	[kWh]			
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	7,21	2,00	0,87	2,3	-
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	18,46	5,13	0,51	10	21,1
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	3,87	-

Tabelle 23:
Sockelheizung an 2 Wänden: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C.

SH 2W T außen -5 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
5	1,26	2,28	1,81
6	1,25	2,28	1,83
7	1,25	2,30	1,84
Mittelwert			1,83

In Bild 29 sind die zeitlichen Verläufe der Flächenanteile der Raumtemperaturen dargestellt. Zusätzlich ist die Wärmeleistung mit eingetragen. Während des Aufheizvorgangs im Regelungszyklus der Beharrungszeit wird die Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C geringfügig größer, mit etwas über 1 m².

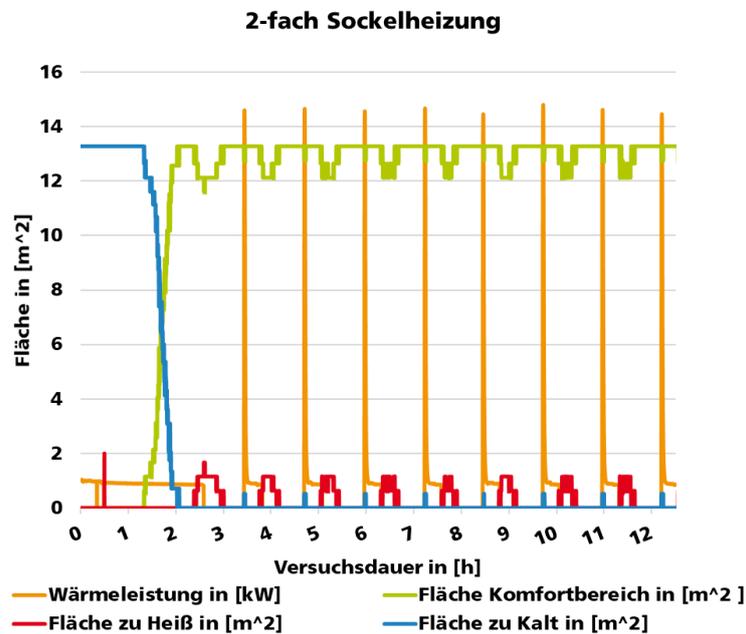


Bild 29:

Sockelheizung (2 Wände) bei -5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteile des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist Wärmeleistung mit eingetragen.

Sockelheizung (2 Wände) bei +5 °C Außentemperatur

Die Sockelheizung erwärmt den Raum auf den Sollwert von >21 °C mit einer durchschnittlichen Leistung von 0,85 kW in 2,28 Stunden. Im Beharrungszeitraum stellt sich über alle Regelungssensoren eine mittlere Raumtemperatur von 21,2 °C ein. Der Mittelwert der Regelungssensoren erreicht im Regelungszyklus maximale Raumtemperaturen bis 21,6°C und minimale Raumtemperaturen um 20,4 °C. Die im Beharrungszeitraum von zehn Stunden abgegebene Wärmeenergie beträgt 3,74 kWh. Es werden hierfür sechs Heizzyklen benötigt (Bild 30 bzw. Tabelle 24). Die Daten der Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen sind in Tabelle 25 aufgelistet.

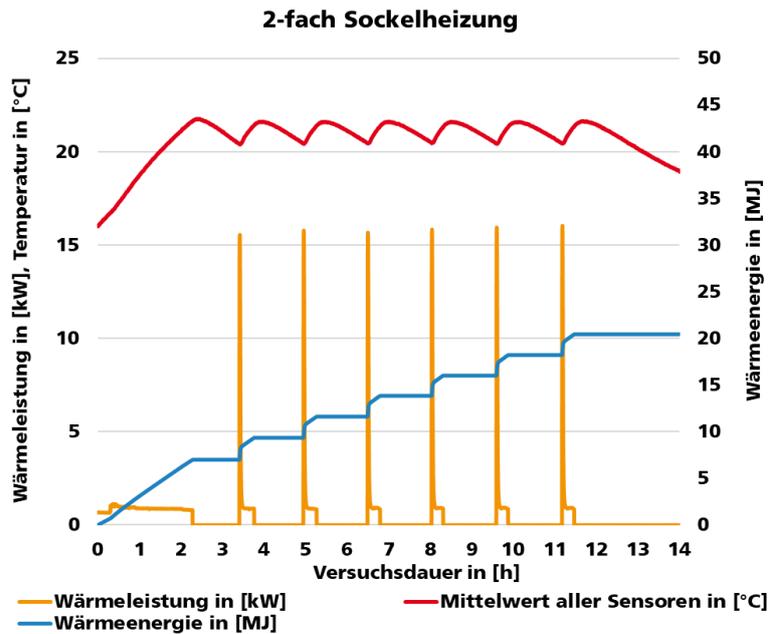


Bild 30:
SH 2W: bei +5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Sensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 24:
SH 2W: Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von +5 °C.

Sockelheizung (SH 2W) T außen +5 °C	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]	Ø T _{Raum} [°C]
	[MJ]	[kWh]			
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	6,98	1,94	0,85	2,28	-
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	13,45	3,74	0,37	10	21,2
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	5,52	-

Tabelle 25:
Sockelheizung an 2 Wänden: Auswertung der letzten drei vollständigen Heizzyklen (Heizen + Abkühlen) bei einer Umgebungstemperatur von +5 °C.

SH 2W T außen +5 °C	Zeit/Phase	Energie/Phase	Energie/Stunde
Zyklus	[h]	[MJ]	[MJ]
3	1,54	2,23	1,45
4	1,56	2,17	1,40
5	1,58	2,20	1,39
Mittelwert			1,41

In Bild 31 sind die zeitlichen Verläufe der Flächenanteile der Raumtemperaturen dargestellt. Während des Aufheizvorgangs im Regelungszyklus der Beharrungszeit ist die Fläche mit zu warmen Temperaturen von über 22 °C mit ca. 2 m² etwas größer als im weiteren Verlauf. Hier wird bei jedem Heizzyklus die Fläche jeweils ca. etwas über 1 m² groß.

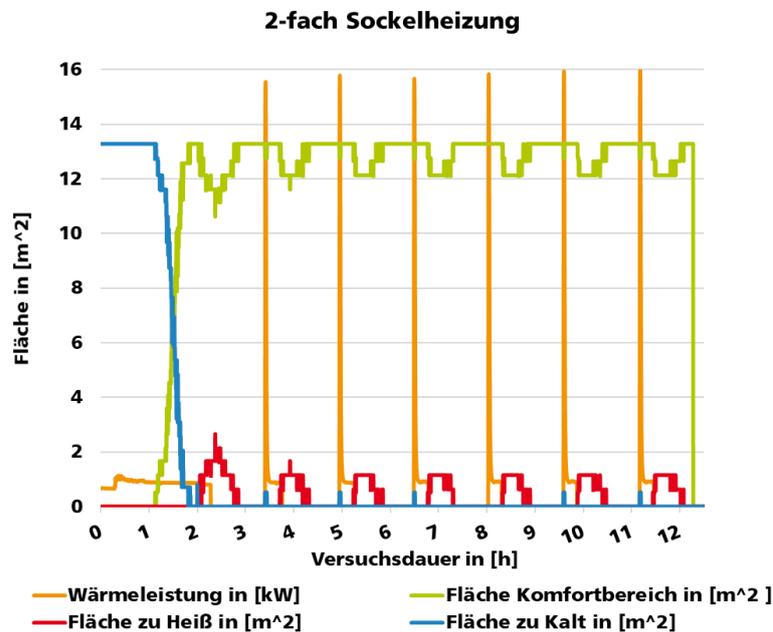


Bild 31:

Sockelheizung (2 Wände) bei +5 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteile des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist Wärmeleistung mit eingetragen.

Sockelheizung (2 Wände) Lüften bei -10 °C Außentemperatur

Nach Erreichen der Solltemperatur wird für zehn Minuten das im Messraum verbaute Fenster von außen geöffnet. Die kalte Außenluft strömt in den Raum und die Raumtemperatur fällt dabei bis auf 2,6 °C ab. Durch die Regelung wird die Sockelheizleiste aktiviert und heizt den Raum in 3,44 Stunden wieder auf den Sollwertbereich auf. Im betrachteten Zeitraum von zehn Stunden werden 24,72 MJ Heizenergie benötigt, Bild 32 und Tabelle 26.

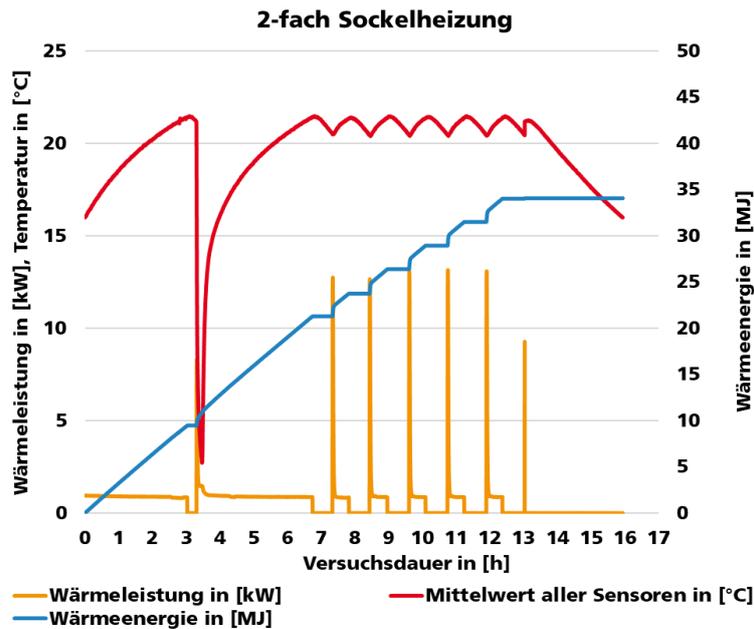


Bild 32:
Sockelheizung (2 Wände) Lüften bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Raumtemperatur (Mittelwert der 24 Regelungssensoren), der Wärmeleistung sowie der kumulierten Wärmeenergie.

Tabelle 26:
Sockelheizung (2 Wände): Zusammenfassung der Wärmeenergie, durchschnittliche Leistung und Zeiten in den drei Phasen des Versuchs bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C.

Sockelheizung (SH 2W) T außen -10 °C; Lüften	Wärmeenergie		Ø Leistung [kW]	Zeit Δt [h]
	[MJ]	[kWh]		
Phase 1: Aufheizen 16 °C bis T-Soll >21 °C	9,48	2,63	0,87	3,03
Lüften für 10 min Heizung bis T-Soll >21 °C	11,82	3,28	0,95	3,44
Phase 2: Beharrungszeitraum 10 h	24,72	6,87	0,69	10,00
Phase 3: Abkühlen T-Soll > 21 °C bis 16 °C	-	-	-	2,91

Durch den Lüftungsvorgang und das damit verbundene Abkühlen der Raumluft erhöht sich der Flächenanteil mit zu kalten Raumtemperaturen auf die gesamte Raumfläche. Durch den einsetzenden Heizvorgang werden erst nach 1,84 Stunden an den ersten Sensoren wieder die untere Temperaturgrenze von 20 °C des Komfortbereichs erreicht. Der zu kalte Flächenanteil verringert sich zügig und nach weiteren 0,87 Stunden sind alle Temperatursensoren wieder im Sollwertbereich, d.h. die Raumluft ist wieder vollständig in dem definierten Komfortbereich (>20 °C), Bild 33.

Die Heizdauer mit Fensterlüftung ergibt ausgehend von 21,2 °C mittlerer Raumtemperatur und Abkühlung auf 2,7 °C bis zum Erreichen der Solltemperatur von 21 °C eine Gesamtdauer von 3,44 Stunden. In dieser Zeit werden 11,82 MJ Heizwärme abgeben.

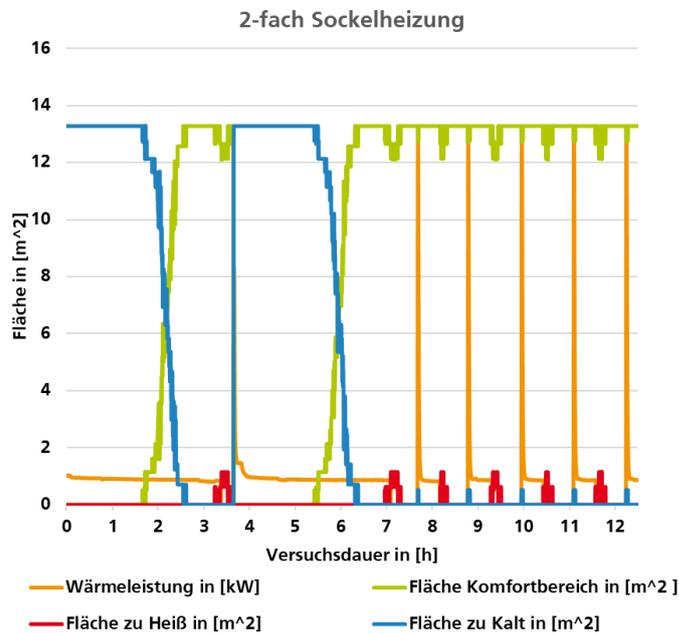


Bild 33:

Sockelheizung (2 Wände) Lüften bei -10 °C außen: Zeitlicher Verlauf der Zuordnung mit zu warmen, zu kalten und im Regelbereich liegenden Flächenanteile des Raumes während des Versuchszeitraums. Zusätzlich ist Wärmeleistung mit eingetragen.

Fazit Sockelheizung an 2 Wänden

In der Aufheizphase wird bei allen Außentemperaturen eine in etwa gleich hohe durchschnittliche Leistung von ca. 0,85 kW abgegeben. Entsprechend der geringen Wärmeleistung ergibt sich eine lange durchschnittliche Aufheizdauer von ca. 2,3 bis 3 Stunden.

Erwartungsgemäß sinkt mit zunehmender Umgebungstemperatur auch die erforderliche durchschnittliche Heizleistung im Beharrungszustand. Die mittlere Raumtemperatur steigt geringfügig von rund 21,0 °C auf rund 21,2 °C mit zunehmenden Umgebungstemperaturen an, siehe Tabelle 27. Mit höheren Umgebungstemperaturen sinkt auch die Anzahl der erforderlichen Heizzyklen.

Tabelle 27:

Sockelheizung (2 Wände): Wärmeenergie, mittlere Raumtemperatur und Temperaturdifferenz zwischen innen und außen sowie Aufheiz- und Abkühldauer der letzten drei Heizzyklen im Beharrungszeitraum.

Sockelheizung (2 Wände), Beharrungszeitraum der letzten 3 Zyklen					
T außen [°C]	Ø T _{Raum} [°C]	Δ T [K]	Ø Wärmeenergie [MJ]	Ø Aufheizdauer [h]	Ø Abkühldauer [h]
-10	21,04	31,04	2,17	0,45	0,67
-5	21,05	26,05	1,83	0,36	0,89
5	21,13	16,13	1,41	0,29	1,27

Die geringe Heizleistung im Regelungszyklus im Beharrungszeitraum führt zu einem sehr kleinen Flächenanteil im Raum mit zu warmen Temperaturen im Aufheizvorgang bei allen untersuchten Umgebungstemperaturen. Der Anteil mit zu warmen Flächen steigt etwas mit zunehmenden Umgebungstemperaturen an, Tabelle 28.

Tabelle 28:

Sockelheizung (2 Wände): Zuordnung der jeweiligen Temperatursensoren im Regelungsmessnetz mit zu warmen, zu kalten und im Komfortbereich liegenden Temperaturen zu Flächenanteilen des Raumes als Mittelwert über den Beharrungszeitraum.

Sockelheizung (2 Wände)	20 °C < »Komfort« < 22 °C	»zu kalt« T < 20 °C	»zu warm« T > 22 °C
	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]
T außen -10 °C	11,32	0,01	0,08
T außen -5 °C	13,05	0,01	0,22
T außen 5 °C	12,89	0,01	0,38

Bei der Untersuchung der Fensterlüftung ergibt sich ausgehend von einer Raumtemperatur von 21,2 °C eine tiefe Abkühlung der Raumtemperatur bis auf 2,7 °C während des Lüftungsvorgangs. Die installierte Heizleistung reicht nicht aus, um einer tiefen Abkühlung entgegenzuwirken. Es ergeben sich bis zum Wiedererreichen des Komfortbereichs bzw. bis zur Solltemperatur durch die niedrige Heizleistung und tiefe Abkühlung entsprechend lange Aufheizzeiten 2,71 h bzw. 3,44 h. Es findet aber keine nennenswerte Temperaturüberschreitung (»Überschwingen«) der oberen Komfortgrenze statt.

4 Vergleich und Bewertung der Heizflächen

Aufheizen des Messraumes

Für den Aufheizvorgang wird von 16 °C auf 21 °C Raumtemperatur geheizt. Die unterschiedlichen Heizsysteme benötigen dazu je nach Umgebungstemperatur eine unterschiedliche Energiemenge (Tabelle 29). Bei jedem Heizsystem wird bei höheren Umgebungstemperaturen weniger Energie für die Aufheizung

des Messraumes abgegeben, bis auf die Sockelheizleiste »4 Wände« (an Außenwänden und Innenwänden montiert).

Tabelle 29:
Energieverbrauch für den Aufheizvorgang je Heizsystem bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen.

Energieverbrauch Aufheizen von 16°C bis T-Soll >21°C	Radiator	SH 4W	SH 2W
	Wärmeenergie	Wärmeenergie	Wärmeenergie
	[MJ]	[MJ]	[MJ]
T außen -10 °C	9,75	6,08	9,25
T außen -5 °C	9,31	6,17	7,21
T außen +5 °C	7,04	5,91	6,98

Die Aufheizdauer sinkt bei der Heizkörperheizung (Radiator) sowie Sockelheizleiste »2 Wände« (nur an Außenwänden montiert) mit höheren Umgebungstemperaturen. Im Gegensatz dazu bleibt die Aufheizdauer mit der Sockelheizleiste »4 Wände« nahezu gleich, allerdings mit jeweils der kürzesten Aufheizdauer im Vergleich zu den anderen Heizsystemen.

Betrachtet man die abgebbare Heizleistung je System, fällt auf, dass die Sockelheizleiste »4 Wände« die höchste durchschnittliche Heizleistung hat, gefolgt vom Radiator. Die niedrigste Heizleistung hat die Sockelheizleiste »2 Wände«. Die Heizleistung ist mit in etwa halber Heizleistenlänge entsprechend in etwa nur halb so hoch wie die der Sockelheizung »4 Wände«, siehe Tabelle 30 rechte Spalte.

Aus der Messung der Sockelheizung »4 Wände« ergibt sich bei nahezu gleicher Aufheizdauer und Heizleistung ein näherungsweise gleich hoher Energieverbrauch für die drei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen. Durch die schnellen Aufheizzeiten haben wegen der thermischen Trägheit der Hüllfläche des Messraums die Umgebungstemperaturen keinen Einfluss auf den Energieverbrauch.

Tabelle 30:
Dauer für den Aufheizvorgang je Heizsystem bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen. Zusätzlich ist die durchschnittliche Heizleistung je Heizsystem im Beharrungszeitraum angegeben.

Aufheizdauer von 16°C bis T-Soll >21°C	Radiator	SH 4W	SH 2W
Dauer bei T außen -10 °C [h]	2,18	1,03	3,02
Dauer bei T außen -5 °C [h]	2,01	1,05	2,3
Dauer bei T außen +5 °C [h]	1,56	1,02	2,28
Ø Leistung Heizsystem [kW]	1,25	1,62	0,86

Die unterschiedlichen Heizleistungen wirken sich auf die Dauer des Aufheizvorganges aus. Der Energieverbrauch der Heizsysteme wird durch die unterschiedliche Dauer und den Einfluss der Wärmespeicherkapazitäten der Wände im instationären Aufheizvorgang beeinflusst. Ein energetischer Vergleich der Heizsysteme untereinander wird daher bei den hier vorliegenden unterschiedlichen Aufheizzeiten nicht durchgeführt.

Heizenergieverbrauch im Beharrungszeitraum

Im quasi-stationären Zustand der Raumbeheizung mit engem Regelintervall wird der Heizenergieverbrauch der unterschiedlichen Heizsysteme verglichen. Die Raumtemperatur schwankt im Regelintervall je nach Heizsystem (mit verschiedener Heizleistung) unterschiedlich. Die Mitteltemperatur im Raum weicht zwischen den Heizsystemen gering voneinander ab. So ist die mittlere Raumtemperatur bei der Heizleiste »4 Wände« geringfügig um 0,1 K höher im Vergleich zur mittleren Raumtemperatur mit Heizkörperheizung. Die mittlere Raumtemperatur bei der Heizleiste »2 Wände« ist im Vergleich zur Heizkörperheizung um rund 0,3 K niedriger. Die Auswirkungen der geringen Unterschiede der Raumtemperatur sind bei Temperaturdifferenzen ΔT (Raumtemperatur – Außentemperatur) zwischen rund 16 K und 31 K auf den Energieverbrauch gering, und liegen bei maximal 0,8 - 1,5 %, siehe Tabelle 31.

Tabelle 31:

Mittlere Raumtemperaturen (über alle Regelungssensoren) und Temperaturdifferenzen ΔT zwischen Raum- und Außentemperaturen der letzten 3 Heizzyklen im Beharrungszeitraum.

Durchschnittstemperatur und Temperaturdifferenz der letzten 3 Heizzyklen	Radiator		SH 4W		SH 2W	
	Ø T Raum [°C]	ΔT [K]	Ø T Raum [°C]	ΔT [K]	Ø T Raum [°C]	ΔT [K]
T außen -10 °C	21,29	31,29	21,37	31,37	21,04	31,04
T außen -5 °C	21,30	26,30	21,41	26,41	21,05	26,05
T außen +5 °C	21,36	16,36	21,52	16,52	21,13	16,13

Je Heizzyklus wird nach Unterschreiten der Solltemperatur wieder geheizt, bis die Solltemperatur wieder erreicht wird. Die Heizung schaltet danach ab. Der Raum kühlt langsam wieder aus, bis die Beheizung nach Unterschreiten der Solltemperatur erneut aktiviert wird. Die mittlere Heizdauer der letzten drei Heizzyklen sowie die Abkühldauer sind in Tabelle 32 aufgelistet.

Die Heizdauer nimmt beim Heizkörper und bei der Sockelheizleiste an zwei Wänden mit wärmeren Umgebungstemperaturen ab. Bei der Sockelheizleiste an vier Wänden sind die Heizdauern bei den unterschiedlichen Umgebungstemperaturen nahezu gleich lang. Dies wird auf die hohe Heizleistung zurückgeführt.

Die Abkühldauer nimmt mit wärmeren Umgebungstemperaturen erwartungsgemäß zu. Nach der Beheizung mit Heizkörper und Sockelheizung an zwei

Wänden stellen sich bei der jeweiligen Umgebungstemperatur in etwa gleich lange Abkühlzeiten ein. Es fällt auf, dass die Abkühldauer bei der Sockelheizleiste »4 Wände« bei allen Umgebungstemperaturen deutlich länger ist im Vergleich zu den beiden anderen Heizsystemen. Da die Verlegung der Sockelheizleiste »4 Wände« auch an den Innenwänden erfolgt, wird dadurch die doppelte Wandfläche im unmittelbaren Nahbereich der Sockelheizleiste erwärmt und damit Wärme eingespeichert. Die zusätzlich eingespeicherte Wärme wird nach dem Abschalten der Heizung teilweise wieder in den Raum abgegeben. Dadurch können sich längere Abkühlzeiten ergeben.

Tabelle 32:
Mittlere Heiz- und Abkühlzeiten der letzten drei Heizzyklen im Beharrungszeitraum je Heizsystem und Umgebungstemperatur.

Ø Heiz- und Abkühl- dauer (letzten 3 Zyklen)	Heizkörper		SH 4W		SH 2W	
	Ø Heizd. [h]	Ø Abkühl- [h]	Ø Heizd. [h]	Ø Abkühl- [h]	Ø Heizd. [h]	Ø Abkühl- [h]
T außen -10 °C	0,41	0,84	0,15	1,07	0,45	0,67
T außen -5 °C	0,38	0,93	0,15	1,18	0,36	0,89
T außen +5 °C	0,32	1,24	0,16	1,63	0,29	1,27

Die Energieverbräuche zur Beheizung des Messraumes bei verschiedenen Umgebungstemperaturen sind in Tabelle 33 für die unterschiedlichen Heizsysteme zusammengeführt. In Bild 34 sind die Werte grafisch als Liniendiagramm (linkes Diagramm) und als Säulendiagramm (rechtes Diagramm) in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz bzw. Außentemperatur dargestellt. Der Radiator sowie die Sockelheizleiste benötigen bei jeder Außentemperatur in etwa gleich viel Energie zur Raumbeheizung. Die Sockelheizleiste »2 Wände« hingegen benötigt demnach am wenigsten Energie für die Beheizung im Beharrungszeitraum bzw. der letzten drei vollständigen Heizzyklen.

Tabelle 33:
Aufgewendete Heizenergie der unterschiedlichen Heizsysteme der letzten 3 Heizzyklen im Beharrungszeitraum pro Stunde bei Außentemperaturen -10, -5 und +5 °C.

Ø Wärmeabgabe im Be- harrungszeitraum (letzten 3 Zyklen)	T außen -10 °C	T außen -5 °C	T außen +5 °C
	Wärmeenergie [MJ]	Wärmeenergie [MJ]	Wärmeenergie [MJ]
Radiator	2,44	2,25	1,76
Sockelheizung (SH 4W)	2,43	2,28	1,78
Sockelheizung (SH 2W)	2,17	1,83	1,41

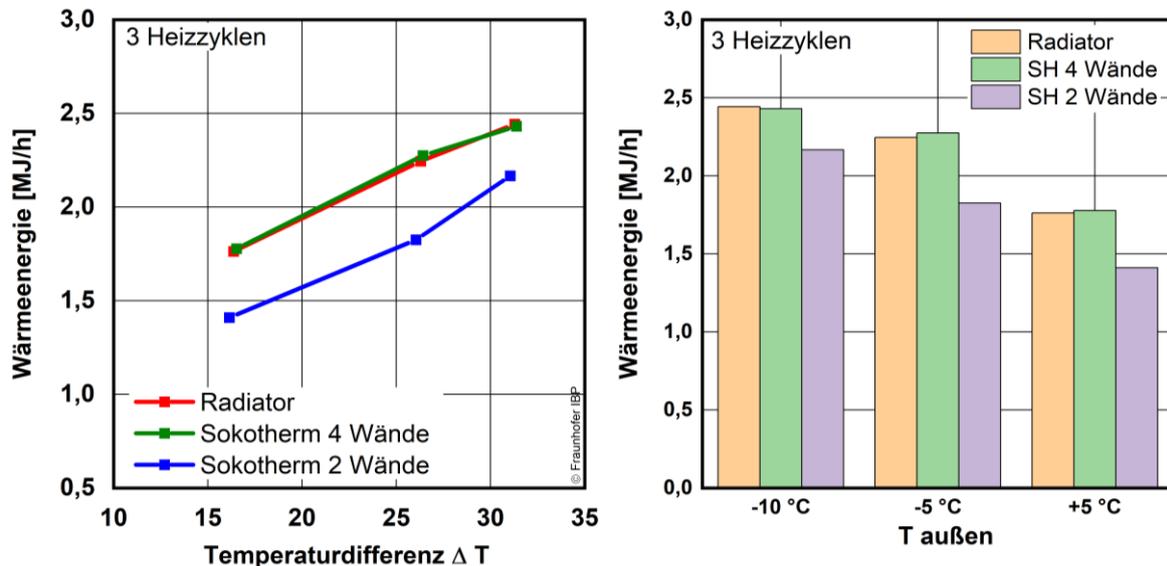


Bild 34:

Aufgewendete Heizenergie der unterschiedlichen Heizsysteme im jeweiligen Beharrungszeitraum bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen zwischen Außentemperaturen (-10, -5 und +5 °C) und Raumtemperatur T Innen > 20°C.

Setzt man den Energieverbrauch des Heizkörpers auf 100 %, verbraucht die Sockelheizleiste »4 Wände« in etwa gleich viel Energie. Die Sockelheizung »2 Wände« benötigt jedoch nur zwischen 80 % und rund 89 % Energie im Vergleich zum Heizkörper, siehe Bild 35 und Tabelle 34. Der geringfügig niedrigeren Raumtemperaturen bei den Versuchen mit der Sockelheizung »2 Wände« begünstigen einen geringeren Energieverbrauch. Temperaturbereinigt, d.h. bei genauer gleicher Raumtemperatur, würde der Energieverbrauch um ca. 0,8 % – 1,5 % höher sein im Vergleich zum o.g. Messergebnis.

Der Unterschied zwischen den beiden Sockelheizleisten »2 Wände« und »4 Wände« ist die zusätzliche Verlegung der Sockelheizleiste an den Innenwänden und äußert sich zunächst in einer deutlich höheren Heizleistung bei der Sockelheizleiste »4 Wände«. Es wird aber auch Wärme direkt in das angrenzende Mauerwerk der Innenwände abgegeben. Dies führt zu zusätzlichen Wärmeverlusten an den Innenwänden, da die Außenoberfläche der Innenwände lediglich eine Temperatur von 15 °C aufweist, bei einer Heizwassertemperatur von in etwa 70 °C. Durch diese zusätzlichen Wärmeverluste bei der Sockelheizleiste »4 Wände« gegenüber der Sockelheizleiste »2 Wände« erhöht sich die benötigte Wärmeenergie und führt hier zu einem Wärmeverbrauch ähnlich der des Heizkörpers. Dieser zusätzliche Wärmeverbrauch durch die angrenzenden Innenwände würde bei einer normalen Beheizung der angrenzenden Räume entsprechend dem Versuchsraum jedoch entfallen, da die eingespeicherte Energie die angrenzenden Räume mitbeheizt und dadurch keine Wärmeverluste nach außen darstellen.

Wärmeenergie für die Raumbeheizung mit Sockelheizleiste im Vergleich zur Heizkörperbeheizung

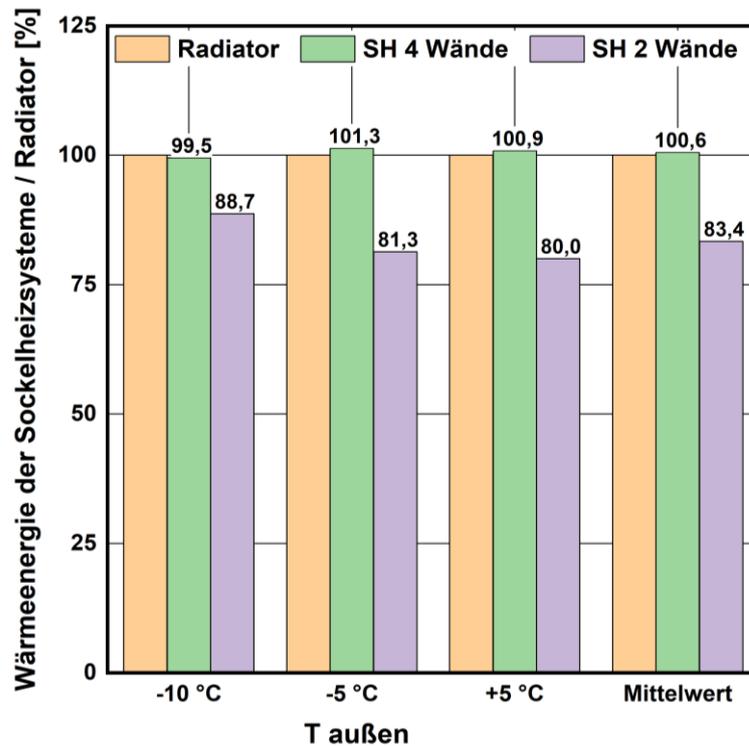


Bild 35: Vergleich der abgegebenen Wärmeenergie der letzten drei Heizzyklen im Beharrungszeitraum der Heizsysteme untereinander, bezogen auf die Heizkörperheizung (100 %).

Tabelle 34: Vergleich abgegebene Wärmeenergie im Beharrungszeitraum der Heizsysteme untereinander, bezogen auf die Heizkörperheizung (100 %).

Heizenergie Vergleich Beharrungszeitraum 10 h	T außen -10 °C	T außen -5 °C	T außen +5 °C	Mittelwert
Radiator	100%	100%	100%	100%
Sockelheizung (SH 4W)	99,5%	101,3%	100,9%	100,6%
Sockelheizung (SH 2W)	88,7%	81,3%	80,0%	83,4%

Horizontale Temperaturverteilung

Die horizontale Temperaturverteilung der Heizsysteme wird anhand der Temperatursensoren der Regelungssensoren verglichen. Dabei wird den gleichmäßig im Raum verteilten Sensoren ein Flächenanteil des Raumes zugeordnet. Bei den zugeordneten »zu warmen« Flächenanteilen scheint die durchschnittliche zu warme Fläche von der Heizleistung abzuhängen. Mit größerer Heizleistung geht eine größere Trägheit bzw. Wärmespeicherfähigkeit des Heizsystems einher und sorgt daher für eine längere Wärmeabgabe nach Abschalten der Heizung. Mit zunehmender Umgebungstemperatur erhöht sich bei allen Heizsystemen der Anteil der »zu warmen« Flächen, Tabelle 35. Die Sockelheizleiste

»2 Wände« hat die geringsten »zu warmen« Flächenanteile. Bei den »zu kalten« Flächenanteilen hingegen ist nur bei der Beheizung mit Heizkörper eine geringfügig größere zugeordnete Fläche »zu kalt«.

Tabelle 35:

Vergleich der Heizungssysteme mit den zu den Temperatursensoren im Regelmessnetz »zu warmen« Temperaturen ($T > 22 \text{ °C}$) zugeordneten Flächenanteilen des Raumes, als Mittelwert über den Beharrungszeitraums.

zugeordneter Flächenanteil »zu warm« ($T > 22 \text{ °C}$)	T außen -10 °C	T außen -5 °C	T außen 5 °C	Ø Heizleistung
	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]	[kW]
Radiator	0,97	1,07	1,51	1,25
Sockelheizung 4 Wände	1,18	1,76	3,56	1,62
Sockelheizung 2 Wände	0,08	0,22	0,38	0,86

Tabelle 36:

Vergleich der Heizungssysteme mit den zu den Temperatursensoren im Regelmessnetz »zu kalten« Temperaturen ($T < 20 \text{ °C}$) zugeordneten Flächenanteilen des Raumes, als Mittelwert über den Beharrungszeitraums.

zugeordneter Flächenanteil »zu kalt« ($T < 20 \text{ °C}$)	T außen -10 °C	T außen -5 °C	T außen 5 °C	Ø Heizleistung
	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]	Ø Fläche [m ²]	[kW]
Radiator	0,02	0,02	0,02	1,25
Sockelheizung 4 Wände	0,01	0,01	0,01	1,62
Sockelheizung 2 Wände	0,01	0,01	0,01	0,86

Vertikale Temperaturverteilung im Raum

Die Schichtung der Raumtemperatur über die Raumhöhe ist in Bild 36 für das jeweilige untersuchte Heizsystem und Umgebungstemperatur dargestellt. Die Temperaturschichtung ist mit Beheizung durch einen Radiator stark ausgeprägt. Der Temperaturunterschied beträgt dabei zwischen rund 3,1 K und rund 3,9 K entsprechend einem Temperaturgradienten zwischen rund 1,3 K/m und 1,5 K/m über die Raumhöhe. Im Gegensatz dazu ergibt die Beheizung mit Sockelheizleiste bei allen Varianten eine ausgeprägt homogene Temperaturverteilung mit nur sehr geringen Temperaturunterschieden über die Raumhöhe mit einem Temperaturgradienten $< 0,1 \text{ K/m}$.

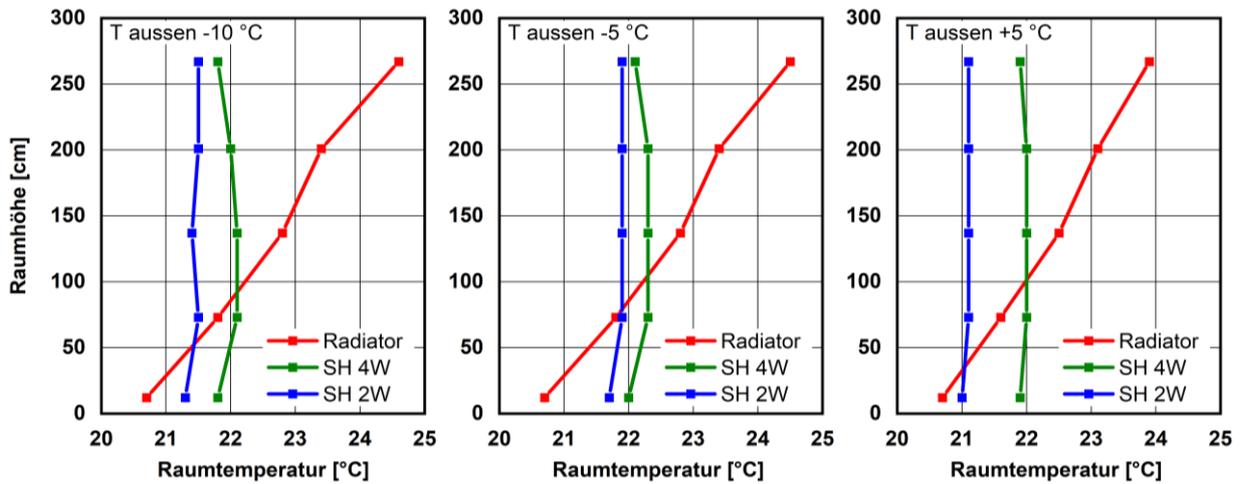


Bild 36:
Schichtung der Raumtemperaturen über die Raumhöhe der unterschiedlichen Heizsysteme bei den drei untersuchten Umgebungstemperaturen.

Vertikale Temperaturverteilung an der Außenwand

Die vertikale Temperaturverteilungen an der Außenwand (ohne Fenster) sind in Bild 37 abgebildet. Bei der Beheizung mit Radiator sinken die Wandoberflächentemperaturen in den unteren Wandbereichen etwas ab. Im Gegensatz dazu steigen die Wandoberflächentemperaturen mit Betrieb der Sockelheizleisten im unteren Wandbereich, beeinflusst durch die Sockelheizleisten, deutlich an. Im oberen Wandbereich gleichen sich die Wandtemperaturen aller Heizsysteme an. Mit der Beheizung durch den Radiator sind die Oberflächentemperaturen ab ca. Raummitte sogar etwas höher im Vergleich mit der Beheizung mit Sockelheizleiste.

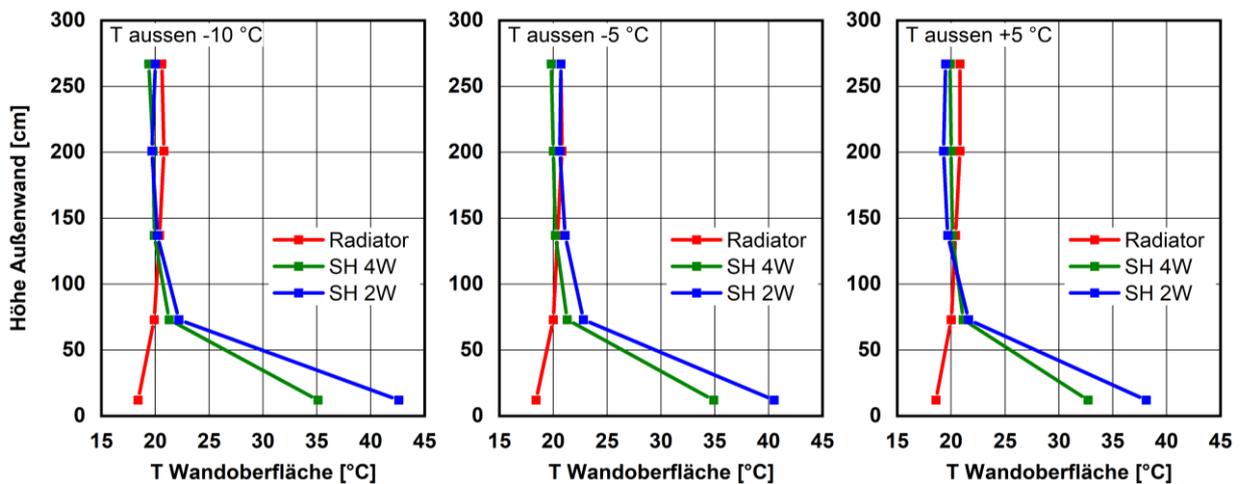


Bild 37:
Schichtung der Wandtemperaturen über die Wandhöhe der unterschiedlichen Heizsysteme bei den drei untersuchten Umgebungstemperaturen.

Auswirkung der Fensterlüftung für 10 min

Die Fensterlüftung für zehn Minuten bewirkt zunächst eine Abkühlung der Raumluft bzw. einen Austausch der Raumluft mit der Außenluft mit -10 °C . Bei Beginn der Lüftung bei Raumtemperaturen oberhalb $T_{\text{Soll}} > 21\text{ °C}$ sind die Heizflächen inaktiv, d.h. diese geben zum Zeitpunkt der Fensteröffnung keine Wärme ab. Mit Öffnen des Fensters wird die Heizung angestellt und beginnt bereits während der Lüftung zu heizen. Nach zehn Minuten wird das Fenster wieder geschlossen. Das jeweilige Heizsystem gibt Wärme ab, bis wieder $T_{\text{Soll}} > 21\text{ °C}$ erreicht wird, Tabelle 37. Die Aufheizdauer hängt stark von der Leistung der wärmeabgebenden Heizflächen ab. So wird durch die Sockelheizleiste SH 4W mit einer festgestellten Heizleistung von rund 2 kW den Raum in der kürzesten Zeit mit rund 1,1 Stunden erwärmt. Die Sockelheizleiste »2 Wände« mit in etwa halber Leistung von rund 1 kW benötigt zum Aufheizen des Raumes hingegen rund 3,4 Stunden. Die etwas niedrigere Ausgangstemperatur bei der Variante »2 Wände« begünstigt eine etwas tiefere Abkühlung der Raumtemperatur. Ebenso wirkt eine deutliche niedrigere Heizleistung weniger der Abkühlung entgegen. Die Ermittlung der Luftwechselrate war nicht Gegenstand der Untersuchung.

Tabelle 37:

Vergleich abgegebene Wärmeenergie, Aufheizdauer und Raumtemperaturen mit Beginn der Lüftung bis zum Erreichen von $T_{\text{Soll}} > 21\text{ °C}$

Lüftung $T_{\text{außen}} -10\text{ °C}$	Lüften für 10 min, Heizung bis $T_{\text{Soll}} > 21\text{ °C}$					
	Wärmeenergie		Ø Leistung	Zeit Δt	T Raum Start Lüft.	T Raum Minimum
	[MJ]	[kWh]	[kW]	[h]	[°C]	[°C]
Heizkörper	8,47	2,35	1,33	1,77	22,0	7,2
SH 4W	7,89	2,19	2,06	1,06	21,8	6,8
SH 2W	11,82	3,28	0,95	3,44	21,2	2,7

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Fraunhofer IBP wurde zur Durchführung von Untersuchungen des Sockelheizungssystems der SOKOTHERM GmbH im Vergleich zu einem konventionellen Heizungssystem beauftragt. Die Messungen wurden in der Messeinrichtung »Klimasimulator« durchgeführt. Hierzu erfolgte die vergleichende Messung mit einer Beheizung des Messraumes auf den Sollwert von 21 °C durch einen Heizkörper (Radiator) sowie durch zwei unterschiedliche Konfigurationen mit Sockelheizleisten; zum einen mit der Verlegung der Sockelheizleiste an allen vier Wänden (zwei Außenwände und zwei Innenwände) zum anderen mit der Verlegung nur an den zwei Außenwänden. Die Versuchsreihen wurden jeweils bei drei unterschiedliche Außenlufttemperaturen (-10 °C, -5 °C und +5 °C) durchgeführt. Die zwei Innenwände werden auf der Außenseite auf 15 °C beheizt.

Bei allen Versuchsreihen verbraucht die Sockelheizleiste »2 Wände« (Verlegung an den zwei Außenwänden) für die Raumbeheizung weniger Heizenergie im Vergleich zur Beheizung mit einem konventionellen Heizkörper. Im Mittel ergibt sich aus den drei Einzelmessungen ein geringerer Verbrauch von rund 17 %.

Die mittlere Raumtemperatur ist bei der Sockelheizleiste »2 Wände« um rund 0,3 K niedriger als bei dem Heizkörper. Dieser Temperaturunterschied begründet aber nur einen um 0,8 – 1,5 % geringeren Energieverbrauch und nicht die festgestellte Größenordnung. Der niedrigere Verbrauch wird im Wesentlichen auf die unterschiedliche Temperaturschichtung über die Raumhöhe im Vergleich zur Heizkörperbeheizung zurückgeführt. Bei beiden Anordnungen der Sockelheizleisten wird ein äußerst stabiles Raumklima erreicht mit sehr geringen Temperaturunterschieden über die Raumhöhe. Teilt man die Temperaturdifferenz durch die Raumhöhe, ergibt sich ein Temperaturgradient für die Sockelheizleiste von $< 0,1$ K/m. Demgegenüber stellt sich bei dem Heizkörper ein Temperaturgradient über die Raumhöhe, je nach Umgebungstemperatur, zwischen rund 1,3 und 1,5 K/m ein.

Die ausgeprägte Temperaturschichtung bei einer Beheizung mit Heizkörper führt zu höheren Raumtemperaturen in der oberen Raumhälfte und damit auch zu einem höheren Temperaturgradienten zwischen der Raumluft und Außenluft. Zudem liegen nicht nur auf der Außenseite der Außenwände Außenluftbedingungen an, sondern auch an der Außenseite der Raumdecke. Zusätzlich ist die Außentemperatur an den Innenwänden etwas niedriger als die Raumtemperatur. Dadurch wird der Energieverbrauch durch einen hohen Flächenanteil des Raumes beeinflusst.

Die Sockelheizleiste »4 Wände« (Verlegung zusätzlich an den Innenwänden) hingegen weist bei allen drei Einzelmessungen einen zum Heizkörper nahezu gleich hohen Verbrauch auf. Der Unterschied zwischen den beiden Sockelheizleisten »2 Wände« und »4 Wände« ist die zusätzliche Verlegung der Sockelheizleiste an den Innenwänden und äußert sich zunächst in einer deutlich höheren Heizleistung bei der Sockelheizleiste »4 Wände«. Es wird aber auch im

Montagebereich der Sockelheizleiste Wärme direkt in das angrenzende Mauerwerk der Innenwände abgegeben. Dies führt zu zusätzlichen Wärmeverlusten an den Innenwänden, da zwischen Heizmedium mit rund 70 °C Vorlauftemperatur und Temperatur der Außenoberfläche der Innenwände von 15 °C eine Temperaturdifferenz von rund 55 °C besteht. Durch diese zusätzlichen Wärmeverluste bei der Sockelheizleiste »4 Wände« gegenüber der Sockelheizleiste »2 Wände« erhöht sich die benötigte Wärmeenergie und führt hier zu einem höheren Wärmeverbrauch, der ähnlich dem des Heizkörpers ist.

Ersichtlich wird dies durch die längere Abkühldauer des Messraums bei einer Beheizung mit Sockelheizleiste an vier Wänden. Da die Verlegung der Sockelheizleiste »4 Wände« auch an den Innenwänden erfolgt, wird dadurch die doppelte Wandfläche im unmittelbaren Nahbereich der Sockelheizleiste erwärmt und damit Wärme eingespeichert. Die zusätzlich eingespeicherte Wärme wird nach dem Abschalten der Heizung teilweise wieder in den Raum abgegeben. Dadurch ergeben sich längere Abkühlzeiten.

Die Untersuchungen zeigen einen deutlich geringeren Energieverbrauch durch die Anwendung der Sockelheizleiste bei einer günstigen Anordnung im Vergleich zur Raumbeheizung mit einem konventionellen Heizkörper bei konstantem Raumklima. Dies wird auf eine homogenere Temperaturverteilung über die Raumhöhe im Vergleich zum Heizkörper zurückgeführt. Dies bedeutet aber auch, dass die Höhe des Minderverbrauchs von den Umgebungsbedingungen des Raumes abhängt. In Räumen mit nur einer Außenwand, anderen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) und Raumgeometrie werden daher eher geringere Unterschiede im Energieverbrauch erwartet.

Je nach Anwendungsfall kann die gezielte Erwärmung des Sockelbereichs aber auch Vorteile hinsichtlich Raumlufthygiene haben. Durch die Temperaturanhebung im Sockelbereich z.B. bei erdberührten Außenwänden im ungedämmten Altbau kann eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur oder mögliches Schimmelpilzwachstum vermieden werden.

Auf der anderen Seite könnte auch ein Optimierungspotential hinsichtlich der Montage der Sockelheizleiste bestehen. Durch Anordnung einer wärmedämmenden Schicht oder Oberflächenbeschichtung mit einem niedrigen Emissionskoeffizienten zwischen Sockelheizleiste und Außenwand könnte der Wärmeeintrag in die Wand etwas reduziert werden und so ähnlich wie bei der Wärmedämmung der Heizkörpernische der Energieverbrauch eventuell gesenkt werden. Hieran wird ersichtlich, dass der Vergleich mit einem Heizkörper auch von der Geometrie, Typ des Heizkörpers und Anordnung an der Außenwand [1] abhängig ist.

Ein weiterer Vorteil der homogenen Temperaturverteilung über die Raumhöhe bei der Sockelheizleiste ist die positive Auswirkung auf das lokale Behaglichkeitsempfinden. Gemäß [2] verringert sich die Anzahl der unzufriedenen Personen bei geringerem Temperaturgradienten über die Raumhöhe.

Zur Verifizierung des niedrigeren Wärmeverbrauchs mit Sockelheizleiste im Vergleich zu einem Heizkörper werden weitere Untersuchungen mit realen Außenklimarandbedingungen in realer Anwendung aber unter laborähnlichen Bedingungen empfohlen [3, 4]. Hierbei sollten auch der Infiltrationsluftwechsel bzw. die Lüftungswärmeverluste in die Untersuchung mit aufgenommen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] König, N. (1980): Der Einfluss von wärmereflektierenden Folien in Heizkörpernischen auf den Heizenergieverbrauch eines Hauses. IPB Mitteilung 58, Fraunhofer IBP.
- [2] DIN EN ISO 7730 (2006): 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. Beuth Verlag.
- [3] Bichlmair, S.: Die Temperierung und die Erhaltung von Gebäuden in traditioneller Bauweise – Wirkung auf Raumklima und Baukonstruktion. Dissertation, TU München, 2020.
- [4] Kilian, R.; Krus, M.; Milch, C.; Bichlmair, S. et. al. (2015): ENOB – Innovative Wandheizungssysteme. IBP-Bericht RK 013/2014/294. Fraunhofer IBP Holzkirchen.