

Ermittlung der Wärmeströme an einer elektrischen Teilspeicherheizung

Auftraggeber Lucht LHZ Elektroheizung GmbH & Co. KG

Reinhard-Schmidt-Straße 1

D-09217 Burgstädt

Ansprechpartner:

Herr U. Lucht

Herr S. Lucht

Herr R. Frommhold



Ausführende Technische Universität Dresden

Stelle

Institut für Energietechnik

Helmholtzstraße 14

D - 01062 Dresden

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. L. Schinke

Prof. Dr.-Ing. habil. J. Seifert



Bearbeiter Dipl.-Ing. L. Schinke

Dipl.-Ing. M. Beyer

Datum 28.03.2024

Inhalt

1	Aufgabenstellung	3
2	Versuchsraum, Messtechnik und Randbedingungen	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Messkonzept, Versuchsaufbau und Sensorik.....	4
2.3	Versuchsablauf.....	7
2.4	Auswertemethodik zur Bestimmung des Strahlungs- und Konvektionsanteil.....	8
3	Ergebnisse	10
3.1	Detailbetrachtungen.....	10
3.1.1	Temperaturverteilung Vorderseite	10
3.1.2	Mittlere Oberflächentemperatur der Vorder- und Rückseite.....	11
3.2	Bestimmung des Strahlungs- und Konvektionsanteils.....	12
4	Zusammenfassung und Fazit.....	14
5	Literaturverzeichnis	15
6	Symbolverzeichnis	16

1 Aufgabenstellung

Die Fa. Lucht LHZ Elektroheizung GmbH & Co. KG aus Burgstädt ist ein innovativer Hersteller von elektrischen Heizsystemen. Diese Heizsysteme können auf Grund ihrer Eigenschaften ein Baustein bei der angestrebten Wärmewende in Deutschland sein. Aus diesem Grund ist die Kenntnis der Wirkung im Raum (Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung) entscheidend, um die Produkte detailliert charakterisieren zu können und Weiterentwicklungspotenziale aufzeigen zu können. Daher sollen im Rahmen des Projektes im Combined Energy Lab der TU Dresden umfangreiche messtechnische Analysen für eine elektrische Teilspeicherheizung durchgeführt werden.

Dazu sind folgende Aufgaben durchzuführen:

- Definition einer geeigneten Versuchsanordnung im Combined Energy Lab der TU Dresden sowie Festlegung der notwendigen Messstellen
- Installation und Inbetriebnahme der Versuchsanordnung
- Durchführung von Messreihen unter Berücksichtigung verschiedener Leistungen der elektrischen Teilspeicherheizung und Umgebungstemperaturen
- Auswertung der Messdaten
- Rechnerische Bestimmung der Wärmeströme anhand der Messdaten

2 Versuchsraum, Messtechnik und Randbedingungen

2.1 Allgemeines

Für die durchzuführenden Versuche wird der Innenklimaraum der TU Dresden (Combined Energy Lab 2.0 [1]) verwendet. Dieser zeichnet sich durch eine vollständige Temperierbarkeit aller Umfassungsflächen aus. Der Bereich der möglichen Oberflächentemperaturen liegt bei $5^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_W \leq 50^{\circ}\text{C}$. Auf der Luftseite können Temperaturen von $10^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_L \leq 35^{\circ}\text{C}$ sichergestellt werden. Abbildung 1 zeigt eine Außenansicht des Versuchsraumes¹. Die Innenmaße betragen $B \times L \times H = (4 \times 5 \times 2,5) \text{ m}^3$.



Abbildung 1: Klimaraum der TU Dresden

2.2 Messkonzept, Versuchsaufbau und Sensorik

Der messtechnische Aufbau wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber erarbeitet und umgesetzt. Die elektrische Teilspeicherheizung mit einer elektrischen Leistung von $P_{el} = 1500 \text{ W}$ wurde mittig vor der 4-m-langen Seitenwand installiert, Anordnung siehe Abbildung 2. Die Abbildung 3 zeigt die Teilspeicherheizung im Innenklimaraum mit installierter Messtechnik.

Für die Analysen werden folgende Sensoren und Messgerätegeräte im Innenklimaraum installiert:

- Geschwindigkeitssensoren zur Messung der Auftriebsströmung oberhalb der elektrischen Teilspeicherheizung

¹ Detaillierte Informationen sind in [1] zu finden.

- Lufttemperatur an Unterseite und Oberseite der elektrischen Teilspeicherheizung und Raummitte
- NTC-Anlegefühler an Rückseite der elektrischen Teilspeicherheizung
- Thermografiekamera zur Messung der mittleren Oberflächentemperatur der Vorderseite der elektrischen Teilspeicherheizung
- One-Wire-Temperatur Sensoren in den temperierbaren Wänden zur Regelung und Steuerung verschiedener Lastzustände
- SICAM Messumformer zur Messung der elektrischen Größen Spannung, Stromstärke, Leistung

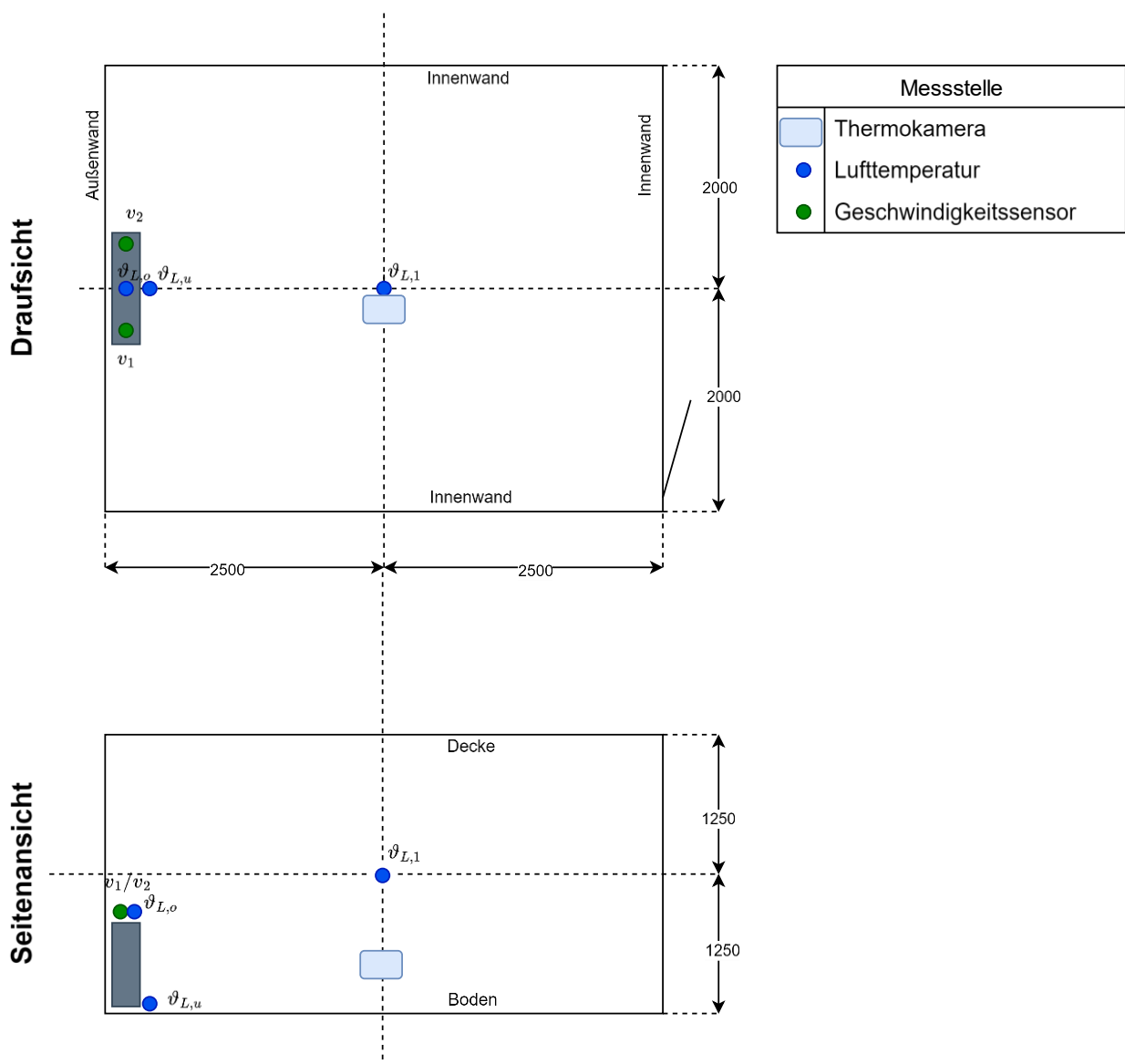


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau

Die Positionen der Lufttemperatur-, NTC- und Geschwindigkeitssensoren sind in Abbildung 2 zu entnehmen.



Abbildung 3: Detailansicht Teilspeicherheizung mit installierter Messtechnik

Zusammenfassend zur Messtechnik sind die verwendeten Sensoren und deren Toleranzen der Tabelle 1 zu entnehmen:

Tabelle 1: Zusammenfassung der Messtechnik und deren Genauigkeit

Bezeichnung / Messstelle	Typ / Hersteller	Genauigkeit
Lufttemperatursensor Unterseite und Oberseite Teilspeicherheizung	NTC	$\pm (0,2 \text{ K})$
Kombinierter Feuchte-/Temperatursensor Raumluft in Raummitte	kapazitiver digitaler Sensor	$\pm (2,0 \text{ \% rel. Feuchte vom Messwert})$ $\pm (0,2 \text{ K Temperatur vom Messwert})$
Temperatur Wandtemperatur	One-Wire-Temperatur- sensor	$\pm (0,5 \text{ K})$
Siemens SICAM Messumformer elektrische Leistung	Siemens SICAM	$\pm (0,2 \text{ \% vom Messwert})$
Geschwindigkeitssensor Luftgeschwindigkeit	Hitzdrahtanemometer Fa. Ahlborn	$\pm (3\% \text{ vom Messwert} + 1 \text{ \% vom Endwert} + 2 \text{ Digit})$
Thermografiekamera inkl. IRBIS-Software	Variocam HD 1024 x 786 Pixel	$\pm (1,5 \text{ K})$

Alle Messwerte werden mit einem Datenlogger und der dazugehörigen Software der Fa. Ahlborn aufgezeichnet und gespeichert.

Die Ansteuerung der elektrischen Teilspeicherheizung erfolgt über einen dazugehörigen Raumthermostat, welche auf der gegenüberliegenden Raumseite der elektrischen Teilspeicherheizung neben der Tür positioniert ist, siehe Abbildung 4.



Abbildung 4: Installation des Raumthermostat neben der Tür des Innenklimaraums

2.3 Versuchsablauf

Die Analysen erfolgen bei stationären Bedingungen. Es wurden mehrere Messpunkte durch Variation der Temperatur der Raumumfassungsflächen und der Sollwertvorgabe definiert. Dadurch können verschiedene Lastzustände im Raum erzielt werden, welche die Leistungsabgabe und somit die Wirkung in den Raum beeinflussen. Alle Wände mit der Bezeichnung Innenwand (siehe Abbildung 2) sowie Decke und Boden hatten bei allen Versuchen eine Temperatur von 21°C. Die Temperatur der Außenwand wurde zwischen 17°C und 19°C variiert. Die Sollwertvorgabe war während der Versuche 21°C / 22°C. Durch Kombination dieser Parameter entsteht eine Messmatrix von 5 Messpunkten. Die Tabelle 2 fasst die Messpunkte und die dazugehörigen Randbedingungen zusammen.

Tabelle 2: Zusammenfassung des Versuchsablaufs

Bezeichnung Messpunkt	Temperatur Innenwand, Decke, Boden	Temperatur Außenwand	Temperatur Raumthermos- tat
A19_I21_S22	21°C	19°C	22°C
A17_I21_S22		17°C	22°C
A17_I21_S21		17°C	21°C

2.4 Auswertemethodik zur Bestimmung des Strahlungs- und Konvektionsanteil

Für die Bestimmung des Strahlungs- und Konvektionsanteil bei der Wärmeabgabe im Raum werden die nachfolgenden Energiebilanzen bestimmt. Die Effekte über die Stirn-/Randseiten der Teilspeicherheizung können auf Grund der deutlich größeren Flächen der Vorder- und Rückseite näherungsweise vernachlässigt werden. Alle folgenden Berechnungsgleichungen wurden [2] oder [3] entnommen.

Konvektionswärmestrom Vorderseite

Auf der Vorderseite der Teilspeicherheizung tritt aufgrund des Temperaturunterschieds der Vorderseite zur Raumtemperatur eine freie Konvektion an einer senkrechten Platte auf.

$$\dot{Q}_{Kon,VS} = \alpha_{VS} \cdot A_{VS} \cdot (\vartheta_{m,VS} - \vartheta_{L,1})$$

Konvektionswärmestrom Rückseite

Im Luftspalt zwischen der Außenwand und der Teilspeicherheizung wird sich ein konvektiver Wärmestrom einstellen. Auf Grund des geringen Abstands und der schwer messbaren Luftgeschwindigkeit wird dieser Wärmestrom nicht separat ermittelt, sondern dem gesamten Konvektiven Wärmestrom mit zugeordnet.

Strahlungswärmestrom Vorderseite

Die Vorderseite der Teilspeicherheizung tritt in einen Strahlungsaustausch mit den Innenwänden sowie Decke und Boden. Mit dem Ansatz des eingeschlossenen Körpers kann dieser Wärmestrom wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_{Str,VS} = C_{1,2} \cdot A_{VS} \cdot \left(\left(\frac{T_{m,VS}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{IW}}{100} \right)^4 \right)$$

mit $C_{1,2} = C_s \cdot \varepsilon_{TSP}$

Strahlungswärmestrom Rückseite

Die Rückseite der Teilspeicherheizung tritt in einen Strahlungsaustausch mit der Außenwand. Dieser kann mit dem Ansatz zweier unendlich paralleler Flächen mit folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\dot{Q}_{Str,RS} = C_{1,2} \cdot A_{RS} \cdot \left(\left(\frac{T_{m,RS}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{AW}}{100} \right)^4 \right)$$

mit
$$C_{1,2} = \frac{C_S}{\frac{1}{\varepsilon_{TSP}} + \frac{1}{\varepsilon_{AW}} - 1}$$

Kalorischer Wärmestrom der Luft während der Durchströmung der Teilspeicherheizung

Durch die hohen Oberflächentemperaturen und der Bauweise der Teilspeicherheizung wird zwischen der Vorder- und Rückseite ein konvektiver Luftvolumenstrom aufsteigen. Durch Bestimmung der kalorischen Bilanz, kann dieser Wärmetransport wie folgt ermittelt werden:

$$\dot{Q}_{Kon} = \dot{m}_L \cdot c_{p,L} \cdot (\vartheta_{L,u} - \vartheta_{L,o})$$

mit
$$\dot{m}_L = \dot{V}_L \cdot \rho_L \quad \text{und} \quad \dot{V}_L = c_L \cdot A_L$$

Die mittlere Luftgeschwindigkeit wird arithmetisch über die beiden Messpunkte ermittelt und die Strömungsfläche setzt sich näherungsweise als Summe aller Lüftungsschlitze an der Oberkante der Teilspeicherheizung zusammen.

Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung P_{el} ist ein Messwert und muss nicht berechnet werden.

Gesamtenergiebilanz

Da die Teilspeicherheizung die aufgenommene elektrische Energie komplett in Wärme umwandelt, gilt folgende Energiebilanz:

$$P_{el} = \dot{Q}_{Kon,VS} + \dot{Q}_{Str,VS} + \dot{Q}_{Str,RS} + \dot{Q}_{Kon}$$

Für die Fläche der Vorder- und Rückseite wird für die Strahlungswärmeströme die ebene Ansichtsfläche über die Gerätebreite und -höhe ermittelt. Für die Konvektionswärmeströme wird auf Grund des profilierten Aufbaus der Vorder- und Rückseite die Flächenvergrößerung durch das Profil berücksichtigt.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

3.1 Detailbetrachtungen

Im Folgenden wird zum einen auf die Temperaturverteilung der Vorderseite sowie auf die mittlere Oberflächentemperatur der Vorder- und Rückseite näher eingegangen.

3.1.1 Temperaturverteilung Vorderseite

Die mittlere Oberflächentemperatur der Vorderseite ist für die Bestimmung der Wärmeströme auf der Vorderseite notwendig. Durch den Einsatz der Thermografiekamera musste vorab der Emissionsgrad der Vorderseite der Teilspeicherheizung ermittelt werden. Dazu fanden zwei normativ anerkannte Verfahren Anwendung: das Temperaturreferenzverfahren und das Abdeckband-Referenzverfahren, siehe DIN EN ICE 60675-3 [4]. Im Ergebnis wurde ein Emissionsgrad von 0,98 ermittelt, auf Basis dessen die Abbildung 5 zur exemplarischen Darstellung der Oberflächentemperaturverteilung im stationären Zustand bei maximaler elektrischer Leistung entstanden ist.

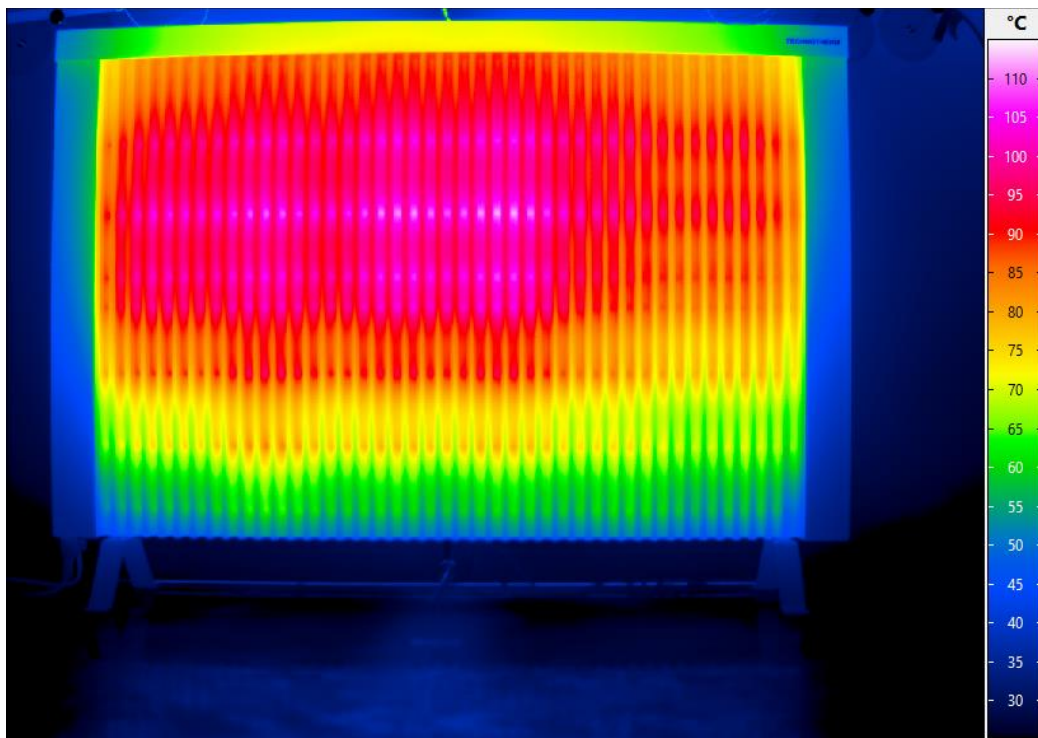


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung der Oberflächentemperatur auf der Vorderseite der Teilspeicherheizung mittels Thermografieaufnahme

3.1.2 Mittlere Oberflächentemperatur der Vorder- und Rückseite

Die Bestimmung der mittleren Oberflächentemperatur der Vorderseite erfolgt durch den Einsatz der Thermografiekamera. Die Temperatur der Rückseite kann auf Grund des schmalen Abstands zwischen Teilspeicherheizung und Außenwand nicht mit Hilfe der Thermografie bestimmt werden. Aus diesem Grund wurden über die Rückseite verteilt mehrere NTC-Sensoren geklebt, siehe Abbildung 6. Die Auswertung hat ergeben, dass die Rückseite näherungsweise die gleiche mittlere Temperatur wie die Vorderseite hat. In Abbildung 7 ist exemplarisch für eine Messung der Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur der Vorder- und Rückseite dargestellt. Es ist sehr gut erkennbar, dass beide Oberflächentemperaturen über der Zeit nahezu gleich groß sind. Dies ist auch auf Grund des symmetrischen Aufbaus der Teilspeicherheizung zu erwarten. Für die Auswertung bzw. Bestimmung der Wärmeströme wurden die Messdaten der Thermografiekamera daher für beide Seiten der Teilspeicherheizung zu Grunde gelegt.



Abbildung 6: Temperatursensoren auf der Rückseite der Teilspeicherheizung (exemplarisch)

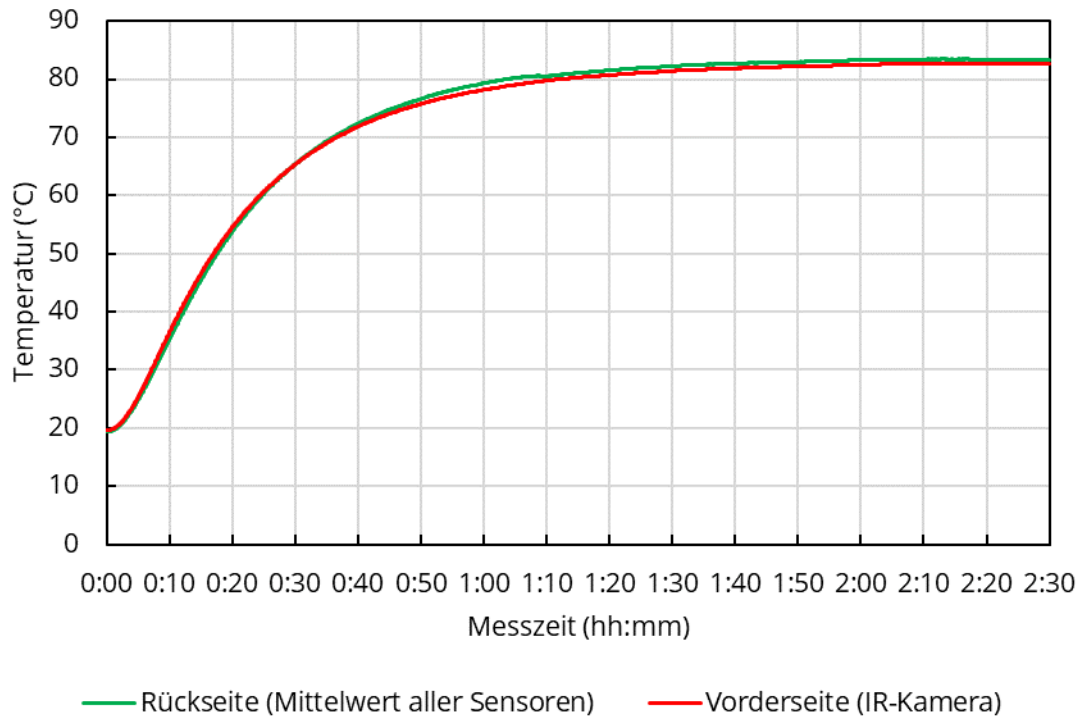


Abbildung 7: Exemplarischer Verlauf der mittleren Oberflächentemperatur auf der Vorder- und Rückseite der Teilspeicherheizung während eines Versuchs

3.2 Bestimmung des Strahlungs- und Konvektionsanteils

Mit Hilfe der im Abschnitt 2.4 genannten Berechnungsgleichungen und -ansätzen sowie den gewonnenen Messdaten bei unterschiedlichen Lastbedingungen für die Teilspeicherheizung können die in Tabelle 3 zusammengefasst dargestellten Anteile für die Strahlung und Konvektion ermittelt werden.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Anteile Strahlung und Konvektion für die verschiedenen Messpunkte

Bezeichnung Messpunkt	Anteil Strahlung	Anteil Konvektion
A19_I21_S22	42,0 %	58,0 %
A17_I21_S22	40,4 %	59,6 %
A17_I21_S21	41,9 %	58,1 %
Mittelwert	41,4 %	58,6 %

Es zeigt sich über alle Messpunkte ein relativ gleichmäßiges Verhältnis von ca. 41% Strahlung und 59% Konvektion.

4 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein Versuchsstandskonzept für die messtechnische Bestimmung der Anteile der Wärmeabgabe in Form von Strahlung und Konvektion einer Teilspeicherheizung entworfen und im Innenklimaraum des Combined Energy Lab umgesetzt. Dabei wurden unter verschiedenen Lastbedingungen stationäre Versuche durchgeführt. Mit Hilfe der gewonnenen Messdaten konnten anschließend die Strahlungs- und Konvektionswärmeströme berechnet werden.

Es ist festzuhalten, dass unabhängig der Lastbedingungen der Teilspeicherheizung die Wärmeabgabe in den gesamten Raum zu ca. 41 % durch Strahlung und ca. 59 % durch Konvektion erfolgt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] J. Seifert, B. Oschatz, L. Schinke, A. Buchheim, S. Paulick, M. Beyer und B. Mailach, Instationäre, gekoppelte, energetische und wärmephysiologische Bewertung von Regelungsstrategien für HLK-Systeme, Berlin: VDE Verlag, 2017.
- [2] H. Recknagel, E. Sprenger und K.-J. Albers, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH, 2023.
- [3] A. Dittman, S. Fischer, J. Huhn und J. Klinger, Repetitorium der Technischen Thermodynamik, Stuttgart: Teubner Verlag, 1995.
- [4] DIN EN ICE 60675-3, „Elektrische Haushalt-Direktheizgeräte – Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaft,“ VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. und DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2021.

6 Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	m ²
B	Breite	m
c	Geschwindigkeit	m/s
c _p	spezifische Wärmekapazität	J/kgK
C _{1,2}	Strahlungskoeffizient des schwarzen Strahlers	5,67 W/m ² K ⁴
H	Höhe	m
L	Länge	m
P	Leistung	W
\dot{Q}	Wärmestrom	W
T	Kelvintemperatur	K
\dot{V}	Volumenstrom	l/min
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
ε	Emissionsgrad	-
ρ	Dichte	kg/m ³
ϑ	Celsiustemperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperaturspreizung	K

Index	Beschreibung
1	Index 1
2	Index 2
el	elektrisch
IW	Innenwand
Kon	Konvektion
L	Luft
m	Mittelwert
o	oben
RS	Rückseite
TSP	Teilspeicherheizung

u	unten
VS	Vorderseite
W	Wasser