

UNTERSUCHUNG DES RAUMSEITIGEN WÄRMEÜBERGANGS VON BAUTEILEN: EIN VERGLEICH DER ERGEBNISSE VON CFD- UND WÄRMETRANSPORT-SIMULATIONEN

Zhenming Peng¹, Svenja Carrigan¹, Oliver Kornadt¹

¹ Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Deutschland, E-Mail: zhenming.peng@rptu.de / svenja.carrigan@rptu.de / oliver.kornadt@rptu.de

Kurzfassung

In dieser Studie wurde die Oberflächentemperatur in Räumen mit Fußbodenheizung durch CFD- und Wärmetransport-Simulationen untersucht. Verschiedene Randbedingungen wurden in den Wärmetransport-Simulationen berücksichtigt. Der lokale Wärmeübergangskoeffizient wurde aus CFD-Simulationen ermittelt, über einzelne Wandbereiche von $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ sowie $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ auf den gesamten Bauteilflächen gemittelt und dann in den Wärmetransport-Simulationen verwendet. Des Weiteren wurde der Einfluss der Verwendung des normativen pauschalen Werts des Wärmeübergangskoeffizienten für den Feuchteschutz und für energetische Berechnungen untersucht. Die Studie zeigt, dass die Wahl der Referenztemperatur zur Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten entscheidend ist, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Die Ergebnisse weisen außerdem die Bedeutung der durchschnittlichen Raumlufttemperatur bei der normativen Bewertung von Schimmelpilz- und Tauwasserbildung hin. Diese Ergebnisse können zur Entwicklung eines präzisen Modells für den Wärmeübergangskoeffizienten beitragen, welches die niedrigste Oberflächentemperatur und die Temperaturverteilung der Oberfläche voraussagen kann.

Einleitung

Die Temperatur an der inneren Oberfläche der Bauteile ist eine wichtige Größe zur Beurteilung der Tauwasser- und Schimmelpilzfreiheit. Des Weiteren ist diese Temperatur eine wichtige Größe zur Auswertung der Behaglichkeit und zur energetischen Berechnung von Gebäuden. Die Oberflächentemperatur wird vom raumseitigen Wärmeübergang beeinflusst. Der Wärmeübergang kann durch den Wärmeübergangskoeffizienten quantifiziert werden.

Die gesamte Wärmestromdichte q_t aufgrund des konvektiven und radiativen innenseitigen Wärmeübergangs aufgrund des Unterschieds zwischen der Temperatur der Innenoberfläche T_s und der Referenztemperatur T_{ref} sowie dem gesamten

Wärmeübergangskoeffizient h_t kann nach Gleichung 1 bestimmt werden.

$$q_t = h_t * (T_s - T_{ref}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

Gemäß DIN EN ISO 6946 (DIN, 2018) wird im bauphysikalischen Kontext die Raumlufttemperatur als Referenztemperatur angesetzt.

Der Vorteil der Anwendung des Wärmeübergangskoeffizienten liegt darin, dass nur die Energieerhaltungsgleichung in Kombination mit Gleichung 1 für die Simulation der Temperaturverteilung auf den Bauteilflächen und des Wärmestroms durch die Bauteile gelöst werden muss. Dieser Ansatz wird in dieser Studie als Wärmetransport-Simulation bezeichnet, und ist in den meisten Gebäudesimulationsprogrammen, wie z. B. TRNSYS, WUFI, EnergyPlus zu finden.

Der Wärmeübergangskoeffizient ist nicht nur von der Baukonstruktion, sondern auch von dem Raumkonditionierungssystem und der Geometrie des Raums abhängig (Blum et al., 2023; Peng et al., 2022; Peng et al., 2023). Er wird generell empirisch durch experimentelle Untersuchungen oder CFD (Computational Fluid Dynamics) – Simulationen ermittelt, wobei nicht nur die Energieerhaltung, sondern auch die Masse- und Impulserhaltung der Luftströmung berücksichtigt werden.

In der Praxis wird der Wärmeübergangskoeffizient nach Norm als ein pauschaler Wert angenommen. Zur Ermittlung der Wärmestromdichte durch die Gebäudehülle für energetische Berechnungen beträgt der Wert $7,69 \text{ W/m}^2\text{K}$ für die raumseitige Oberfläche der Außenwand gemäß DIN EN ISO 6946 (DIN, 2018). Zum Nachweis der Tauwasser- und Schimmelpilzfreiheit an raumseitigen Oberflächen gilt ein reduzierter Wert von $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ gemäß DIN 4108-2 (DIN, 2013) und DIN EN ISO 13788 (DIN, 2013). Dieser Wert fungiert als eine der Randbedingungen, um die niedrigste Oberflächentemperatur rechnerisch oder simulativ mit Wärmetransport-Simulationen zu ermitteln. Die anderen Randbedingungen sind:

- Außenlufttemperatur: $-5 \text{ }^\circ\text{C}$

- Wärmeübergangskoeffizient für die Außenoberfläche der Wand: $25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Raumlufttemperatur: $20 \text{ }^\circ\text{C}$

In dieser Studie wird der gesamte Wärmeübergangskoeffizient der raumseitigen Oberflächen mittels CFD-Simulationen für einen Raum mit einer Fußbodenheizung bestimmt und die Ergebnisse anschließend für die Wärmetransport-Simulationen verwendet. Die aus unterschiedlichen Ansätzen (z. B. lokaler oder flächengemittelter Wärmeübergangskoeffizient) ermittelte niedrigste Oberflächentemperatur und Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen im Bereich einer Wärmebrücke wurden untereinander und mit der Wärmetransport-Simulation anhand des normativen Ansatzes verglichen. Basierend auf diesen Untersuchungen soll ein effizienter Ansatz für die Ermittlung der niedrigsten Temperatur und der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen gefunden werden.

Methoden

CFD-Simulation

Für die CFD-Simulation wurde die Software ANSYS Fluent verwendet (ANSYS Inc). Die Geometrie des simulierten Raums ist in Abbildung 1 dargestellt.

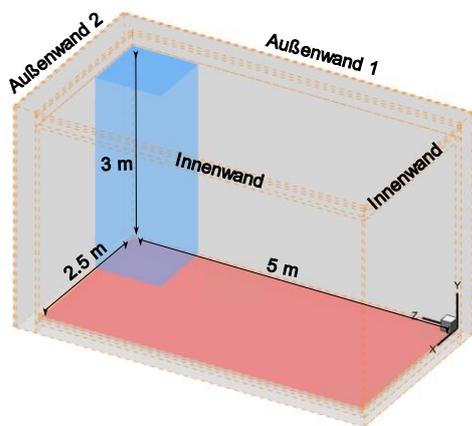


Abbildung 1: Raumgeometrie mit dem beheizten Fußboden (rot) für die CFD-Simulationen und die berücksichtigten Bereiche für die Wärmetransport-Simulationen (blau)

Der Raum hat innere Abmessungen von 5 m Länge, 3 m Höhe und 3 m Breite. Ein schlechterer U-Wert führt zu einer höheren Inhomogenität der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Flächen im Bereich der geometrischen Wärmebrücken, was dabei helfen könnte, die Abweichung zwischen unterschiedlichen Ansätzen zur Ermittlung der Oberflächentemperatur zu veranschaulichen. Daher wurde ein U-Wert für die Außenwand von $0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgewählt. Der Aufbau der Außenwand besteht von innen nach außen aus 15 mm Putz, 300 mm Beton, 29 mm Dämmung und 15 mm Putz. Die

Innenwände bestehen aus 15 mm Putz, 175 mm Beton und 15 mm Putz. Boden und Decke sind mit 45 mm Estrich, 40 mm Dämmung und 150 mm Beton ausgeführt.

Die Innenbauteile des Raumes wurden als adiabatische Bauteile angenommen. Für die Außenwände 1 und 2 wurde eine konstante Außenlufttemperatur von $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ und ein äußerer Wärmeübergangskoeffizient von $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ festgelegt. Die Bodentemperatur wurde so angepasst, dass die durchschnittliche Raumlufttemperatur bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$, die der normativen Randbedingung für den Feuchtschutz entspricht, gehalten wurde. Zwei zusätzliche Situationen bei zwei anderen Bodentemperaturen, deren durchschnittliche Raumlufttemperatur von $19 \text{ }^\circ\text{C}$ und $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$ von den normativen Randbedingungen abweichen, wurden ebenfalls durchgeführt.

Die Turbulenz wurde mit dem $k-\omega$ -SST Modell modelliert. Der Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen wurde mithilfe des Surface-to-Surface (S2S) Modells berücksichtigt.

Basierend auf den CFD-Ergebnissen wurden sowohl der flächengemittelte Wärmeübergangskoeffizient als auch der lokale (in Gitterelementen der Größe $0,02 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$ ermittelte) gesamte Wärmeübergangskoeffizient berechnet.

Wärmetransport-Simulation

Für die Wärmetransport-Simulation wird die Energieerhaltungsgleichung in ANSYS gelöst. Für den Boden entsprach die Oberflächentemperatur der Bodentemperatur aus den CFD-Simulationen. Für die anderen raumseitigen Oberflächen wurde Gleichung 1 als Randbedingung gesetzt. Die folgenden Ansätze für diese Randbedingung wurden verfolgt:

Ansatz 1 (A1, Referenzvariante): Verwendung der lokalen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten $h_{t,local}$ aus den CFD-Simulationen. Das Simulationsgitter entspricht dem Gitter der CFD-Simulationen mit einer Elementgröße von $0,02 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$.

Ansatz 2 (A2): Verwendung der 1 % Quantile der Wärmeübergangskoeffizienten $h_t^{1\%}$ an dem Wärmebrückenbereich aus den CFD-Simulationen für die gesamten Flächen.

Ansatz 3 (A3): Verwendung des flächengemittelten Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{h}_{t,1}$. Die Größe jeder Einzelfläche für die Mittelung beträgt $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$.

Ansatz 4 (A4): Verwendung des flächengemittelten Wärmeübergangskoeffizienten $\bar{h}_{t,2}$. Die Größe jeder Einzelfläche für die Mittelung beträgt $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$.

Ansatz 5 (A5): Verwendung des normativen pauschalen Wertes zum Feuchtschutz $h_{t,n1}$.

Ansatz 6 (A6): Verwendung des normativen pauschalen Wertes zu energetischen Berechnungen $h_{t,n2}$.

Die Referenztemperatur für die einzelnen Ansätze ist in Tabelle 1 zusammengefasst. $\bar{h}_{t,1}$ und $\bar{h}_{t,2}$ für Ansätze A3 und A4 wurden anhand des Temperaturunterschiedes zwischen der Oberfläche und der durchschnittlichen Raumlufitemperatur und der durchschnittlichen Wärmestromdichte bestimmt. Bei der Ermittlung des $h_t^{1\%}$ für Ansatz A2 wurde ebenfalls die durchschnittliche Raumlufitemperatur \bar{T}_{air} als T_{ref} verwendet. Es wurde festgestellt, dass $h_{t,local}$ negativ ausgewiesen wurde, wenn die lokale Oberflächentemperatur höher als die durchschnittliche Raumlufitemperatur ist. Dies geschah vor allem in den Bereichen an den Wänden in der Nähe des beheizten Bodens. Der Einsatz eines negativen Wärmeübergangskoeffizienten als Randbedingung in die Wärmetransport-Simulation führte zur Divergenz. Daher wurde die Fußbodentemperatur T_{boden} , die die höchste Temperatur im Raum ist, als T_{ref} für die Berechnung des $h_{t,local}$ verwendet. In der Wärmetransport-Simulation mit den normativen pauschalen Werten wurden die normative Raumlufitemperatur von 20 °C und \bar{T}_{air} als T_{ref} jeweils für Ansätze A5 und A6 eingesetzt.

Tabelle 1: Referenztemperatur für die Ansätze zur Anwendung des Wärmeübergangskoeffizienten als Randbedingung: T_{boden} , \bar{T}_{air} sind jeweils die Bodentemperatur und die durchschnittliche Raumlufitemperatur

A1	A2	A3	A4	A5	A6
T_{boden}	\bar{T}_{air}	\bar{T}_{air}	\bar{T}_{air}	20°C	\bar{T}_{air}

Die Ergebnisse aus den Wärmetransport-Simulationen, nämlich die niedrigste lokale Temperatur und die Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen wurden für den blau markierten Flächen in der Abbildung 1 ausgewertet. Die berücksichtigten Bereiche wurden so ausgewählt, dass sie dem Bereich in der Norm DIN EN ISO 10211 (DIN, 2018) zur Berechnung der Oberflächentemperaturen im Bereich der Wärmebrücke entspricht. Bei den beiden Außenwänden beginnt die Fläche an der Kante zwischen diesen und erstreckt sich über eine horizontale Länge von 1 m. Bei der Decke und dem Boden beginnen die Flächen jeweils an der Kante zu ihren angrenzenden Außenwänden, sowohl die Breite als auch die Länge dieser Flächen betragen jeweils 1 m.

Tabelle 2: Niedrigste lokale Oberflächentemperatur aus den CFD-Simulationen bei durchschnittlichen Raumlufitemperaturen von 19,0 °C, 20,0 °C, 24,8 °C, und den Wärmetransport-Simulationen mit den Ansätzen A1-A6, dazu deren prozentuale relativen Abweichungen zur Referenzvariante A1.

T_{min} [°C]		\bar{T}_{air} [°C]		
		19,0	20,0	24,8
CFD-SIMULATIONEN		11,8	12,6	16,2
WÄRMETRANSPORT-SIMULATIONEN	A1 (REF.)	11,8	12,6	16,2
	A2	8,1 (-31,87 %)	8,8 (-30,48 %)	12,2 (-24,46 %)
	A3	12,2 (3,30 %)	13,0 (3,17 %)	16,7 (3,09 %)
	A4	12,3 (4,06 %)	13,1 (3,89 %)	16,8 (3,77 %)
	A5	12,4 (4,48 %)	12,4 (-1,83 %)	12,4 (-23,66 %)
	A6	14,0 (17,92 %)	14,7 (16,98 %)	18,5 (14,45 %)

Tabelle 3: Mittlere absolute Fehler (MAE) [K] und die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Prognosefehler (RMSE) [K] der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen von den Wärmetransport-Simulationen mit den Ansätzen A2-A6 zur Referenzvariante A1 bei durchschnittlichen Raumlufitemperaturen von 19,0 °C, 20,0 °C, 24,8 °C.

		\bar{T}_{air} [°C]					
		19,0		20,0		24,8	
		MAE [K]	RMSE [K]	MAE [K]	RMSE [K]	MAE [K]	RMSE [K]
WÄRMETRANSPORT-SIMULATIONEN	A2	3,8	4,2	3,9	4,3	4,1	4,6
	A3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	A4	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2
	A5	0,8	1,0	0,9	1,1	4,4	4,8
	A6	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,1

Simulationsergebnisse

Niedrigste Oberflächentemperatur

Tabelle 2 stellt die Ergebnisse der niedrigsten Oberflächentemperatur aus den CFD-Simulationen und den Wärmetransport-Simulationen mit A1-A6 vor. Die prozentuale relative Abweichung der niedrigsten Oberflächentemperatur zu der Referenzvariante A1 (Verwendung der lokalen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten $h_{t,local}$ aus den CFD-Simulationen) wird ebenfalls dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die Verwendung des $h_{t,local}$ in den Wärmetransportsimulationen (A1) keine Abweichung zu den Ergebnissen der CFD-Simulationen aufweist, daher wird A1 als Referenzvariante für die Wärmetransportsimulationen verwendet. Durch die Verwendung von der $h_t^{1\%}$ (A2) wurden konservative Werte, d. h. Werte der niedrigsten Oberflächentemperatur, die niedriger als die in der Referenzvariante sind, mit einer Abweichung von bis zu -31,87 % ermittelt. Je niedriger die durchschnittliche Raumlufttemperatur ist, desto konservativer ist die mittels A2 ermittelte niedrigste Oberflächentemperatur.

Die Verwendung von $\bar{h}_{t,1}$ (A3) und $\bar{h}_{t,2}$ (A4) zeigt, dass ein um 3 % bis 4 % höherer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur im Vergleich zur Referenzvariante auftritt. Des Weiteren erhöht eine feinere Flächengröße für den flächengemittelten gesamten Wärmeübergangskoeffizienten die Genauigkeit.

Die Simulationsergebnisse mit dem pauschalen normativen Wert $h_{t,n1}$ (A5) für den Feuchteschutz deutet darauf hin, dass ein leicht konservativer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur mit einer Abweichung von -1,83 % in dem Fall auftritt, in dem die tatsächliche durchschnittliche Raumlufttemperatur der normativen Randbedingung mit 20 °C entspricht. Bei einer höheren durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 24,8 °C ist die niedrigste Oberflächentemperatur noch konservativer mit einer Abweichung von -23,46 %. Auffällig ist die Abweichung bei einer durchschnittlichen Raumlufttemperatur unter 20 °C. In diesem Fall ist die niedrigste Oberflächentemperatur höher als die in der Referenzvariante, mit einer Abweichung von 4,48 % bei der durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 19 °C. Die Verwendung des pauschalen normativen Wertes $h_{t,n2}$ (A6) zu energetischen Berechnungen zeigt, dass im Allgemeinen ein um 14,45 % bis 17,92 % höherer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur auftritt.

Alle Wärmetransport-Simulationen A1-A6 haben außerdem gezeigt, dass die Vorhersage der Position der Stelle mit der niedrigsten Oberflächentemperatur mit der in den CFD-Simulationen vorhergesagten Position übereinstimmt. Diese Stelle liegt auf der Höhe von 3 m an der dreidimensionalen Wärmebrücke.

Oberflächentemperaturverteilung

Neben der Ermittlung der niedrigsten Oberflächentemperatur ist die Ermittlung der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen ebenfalls sinnvoll. Sie ist wichtig für die Auswertung der thermischen Behaglichkeit, z. B. der Strahlungstemperatur.

Die Wärmetransport-Simulationen mit $h_{t,local}$ (A1) weisen wiederum keine Abweichung der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen zu den CFD-Simulationen auf. Tabelle 3 stellt die mittleren absoluten Fehler (MAE) und Wurzel aus dem mittleren quadratischen Prognosefehler (RMSE) der Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen von den Wärmetransport-Simulationen der Ansätze A2-A6 im Vergleich zur Referenzvariante A1 vor.

Die Wärmetransport-Simulationen mit $\bar{h}_{t,1}$ (A3) und $\bar{h}_{t,2}$ (A4) zeigen jeweils ein maximales MAE und RMSE von 0,1 K und 0,1 K bei A3 und von 0,2 K bzw. 0,2 K bei A4 auf. D. h. die Genauigkeit erhöht sich mit einer feineren Flächengröße für den flächengemittelten gesamten Wärmeübergangskoeffizienten. Gemäß VDI 6020 (VDI, 2022) liegen die Genauigkeiten unter dem Richtwert für MAE und RMSE jeweils von 1,5 K bzw. 1 K für thermisch-energetische Simulationen. Die Verwendung von $h_t^{1\%}$ (A2) hingegen zeigt eine generell schlechte Voraussage über die Temperaturverteilung auf den Oberflächen.

Die Wärmetransport-Simulationen mit dem pauschalen normativen Wert $h_{t,n1}$ (A5) für den Feuchteschutz zeigen, dass bei den durchschnittlichen Raumlufttemperaturen von 19 °C und 20 °C die MAE und RMSE jeweils unter 1 K bzw. 1 K betragen. Sobald die durchschnittliche Raumlufttemperatur deutlich von dem normativen Wert von 20 °C abweicht, nehmen MAE und RMSE deutlich zu, auf jeweils 4,4 K und 4,8 K bei einer durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 24,8 °C. Die Verwendung des pauschalen normativen Wertes $h_{t,n2}$ (A6) zu energetischen Berechnungen zeigt, dass MAE und RMSE bei allen drei durchschnittlichen Raumlufttemperaturen jeweils unter 1 K bzw. rund bei 1 K liegen.

Diskussion

Die Verwendung des lokalen (0,02 m × 0,02 m) Wärmeübergangskoeffizienten aus der CFD-Simulation in den Wärmetransport-Simulationen ergibt eine sehr gute Übereinstimmung mit der niedrigsten Oberflächentemperaturen und Temperaturverteilungen auf den raumseitigen Oberflächen mit denjenigen, die aus den CFD-Simulationen ermittelt wurden, weshalb diese Variante als Referenzvariante verwendet wurde (A1).

Die Verwendung des 1 %-Perzils des lokalen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten führt zu einer deutlichen niedrigen Oberflächentemperatur im Vergleich zur Referenzvariante. Die dabei ermittelte niedrigste Oberflächentemperatur könnte für praktische

Anwendungen zu konservativ sein, d. h. die daraus resultierende erforderliche Dämmschicht könnte überdimensioniert werden. Außerdem wurde eine starke Abweichung in der Temperaturverteilung im Vergleich zur Referenzvariante festgestellt.

Ein um bis zu 4 % höherer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur wurde durch die Verwendung der flächengemittelten gesamten Wärmeübergangskoeffizienten festgestellt, bei einzelnen Flächengrößen von 0,5 m*0,5 m sowie 1 m*1 m. Da in der Praxis solche Abweichung auch aufgrund von Variationen durch Ausführung und in den Materialeigenschaften vorkommen kann, wird eine vierprozentige Abweichung als unkritisch angesehen.

Es wird ersichtlich, dass der normative pauschale Wert des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für den Feuchteschutz nur geeignet für die Ermittlung der niedrigsten Oberflächentemperatur bei einer tatsächlichen durchschnittlichen Raumlufthtemperatur von 20 °C ist. Die Verwendung des normativen pauschalen Wertes des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für energetische Berechnungen kann aufgrund des niedrigen MAE und RMSE unter 1 K zur Voraussage der Temperaturverteilung für die Auswertung der Behaglichkeit sowie für energetische Berechnungen herangezogen werden. Jedoch resultiert dies in einer bis zu 17,92 % höheren Differenz der niedrigsten Oberflächentemperatur im Vergleich zur Referenzvariante.

Fazit

In dieser Studie wurden die niedrigste Oberflächentemperatur und die Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen in CFD-Simulationen ermittelt und in unterschiedlichen Varianten in Wärmetransport-Simulationen für einen Raum mit Fußbodenheizung miteinander verglichen. Dabei wurden verschiedene Ansätze für die Randbedingungen in den Wärmetransport-Simulationen berücksichtigt. Basierend auf den CFD-Simulationen wurde der gesamte Wärmeübergangskoeffizient lokal ermittelt sowie über Flächen mit Größen von 0,5 m × 0,5 m sowie 1 m × 1 m gemittelt. Diese Werte wurden anschließend in den Wärmetransport-Simulationen als Randbedingungen verwendet. Zusätzlich wurden Simulationen durchgeführt, in denen der normative pauschale Wert des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für den Feuchteschutz sowie für energetische Berechnungen als Randbedingungen eingesetzt wurde.

Der Ansatz, den lokalen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten aus CFD-Simulationen als Randbedingung für Wärmetransport-Simulationen zu verwenden, liefert eine präzise Voraussage zur niedrigsten Temperatur und Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen (Referenzvariante). Dabei ist es wichtig, dass bei der Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten die Referenztemperatur sorgfältig ausgewählt wird, um sicherzustellen, dass der ermittelte lokale Wärmeübergangskoeffizient positiv

bleibt. Der Ansatz mit dem flächengemittelten Wärmeübergangskoeffizienten kann für die Auswertung der Behaglichkeit eingesetzt werden. Eine Mittelung des Wärmeübergangskoeffizienten über eine Fläche von 1 m × 1 m ist dafür ausreichend. Dieser Ansatz kann gleichzeitig zur Ermittlung der niedrigsten Oberflächentemperatur verwendet werden, wobei eine durchschnittliche Abweichung von unter 4 % erzielt wird. Dieser Vorschlag beschränkt sich jedoch auf den Fall in einem Raum mit Fußbodenheizung.

Der Genauigkeit der ermittelten niedrigsten Oberflächentemperatur mit dem normativen pauschalen Wert des gesamten Wärmeübergangskoeffizienten für den Feuchteschutz hängt stark von der tatsächlichen durchschnittlichen Raumlufthtemperatur ab. Ein leicht konservativer Wert der niedrigsten Oberflächentemperatur, mit einer Abweichung von -1,83 % im Vergleich zur Referenzvariante, wurde bei einer durchschnittlichen Raumlufthtemperatur von 20 °C festgestellt. Kritisch wird es für die Validierung der Schimmelpilz- und Tauwasserbildung, wenn die durchschnittliche Raumlufthtemperatur unter die normative Bedingung von 20 °C fällt. In diesem Fall wird ein höherer Wert der niedrigsten Temperatur im Vergleich zur Referenzvariante ermittelt und die Differenz würde weiter mit sinkender Raumlufthtemperatur zunehmen.

Die Ergebnisse dieser Studie können als Grundlage für die weitere Entwicklung eines Modells des Wärmeübergangskoeffizienten dienen, um die niedrigste Temperatur und die Temperaturverteilung auf den raumseitigen Oberflächen genau zu ermitteln.

Danksagung

Diese Forschung wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert. Wir danken herzlich für ihre Unterstützung.

Literatur

- ANSYS Inc. Ansys Academic Research Fluent. Release 21.2.
- Blum, T., Carrigan, S., Platzek, D., & Kornadt, O. (2023). Evaluation of the energy efficiency of an active thermoelectric façade. *Energy and Buildings*, 292, 113–128.
- DIN 4108-2 (02.2013). Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 13788 (05.2013). Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 10211 (03.2018). Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface

temperatures - Detailed calculations. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN ISO 6946 (05.2018). Bauteile –
Wärmedurchlasswiderstand und
Wärmedurchgangskoeffizient –
Berechnungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag
GmbH.

Peng, Z., Carrigan, S., & Kornadt, O. (2022). Local
room-side heat transfer of an office room with
different heating strategies. *Bauphysik*, 44(6),
317–322.

Peng, Z., Carrigan, S., & Kornadt, O. (2023).
Numerical investigation of the heat transfer in
realistic rooms with a two-panel radiator. In :
*Building Simulation Conference Proceedings,
Proceedings of the 18th International IBPSA
Building Simulation Conference and Exhibition*,
751–758.

VDI 6020 (12.2022). Anforderungen an thermisch-
energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und
Anlagensimulation. Berlin: Beuth Verlag GmbH.