

Energetische Berechnungen für Flächenheizungen mit besonderer Berücksichtigung der Fixierung des Bodenbelags

Abschlussbericht

(inkl. energetischer Abschätzung für ein EFH)

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

Datum: Dresden, 8. Juni 2023

Die Autoren haben alle Aufgabenpunkte mit großer wissenschaftlicher Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Deshalb übernehmen die Autoren keine Garantien für die gegebenen Informationen. In keinem Fall haften die Autoren für irgendwelche direkten oder indirekten Schäden, die aus der Auswertung dieser Informationen folgen.

Copyright liegt bei den Autoren

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Berechnungsmodell	5
3	Berechnungen	9
3.1	Analysen Designfußboden	9
3.1.1	Geklebte Verlegung	9
3.1.2	Schwimmende Verlegung	10
3.2	Analysen Pakettfußboden	11
3.2.1	Geklebte Verlegung	11
3.2.2	Schwimmende Verlegung	12
4	Energetische Berechnungen	13
4.1	Basisbetrachtung	13
4.2	Energetische Hochrechnung (Einfamilienhaus)	16
5	Fazit / Ausblick	19
	Literatur	20

Symbolverzeichnis

Lateinische / Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
A	Konstante der Berechnung	–
AZR	Anzahl der Rohre	–
b	Konstante der Berechnung	–
b	Breite	m
c_p	spezifische Wärmekapazität	$kJ/(kg \cdot K)$
d	Dicke	m
d_a	Außendurchmesser Rohr	m
d_i	Innendurchmesser Rohr	m
G	Gradient	h/K
G_a	Konstante der Berechnung	–
g_a	Konstante der Berechnung	–
G_i	Konstante der Berechnung	m
g_i	Konstante der Berechnung	–
Gr	Grashof-Zahl	–
h	Höhe	m
h'_a	Konstante der Berechnung	m^{-1}
h'_i	Konstante der Berechnung	m^{-1}
l	Länge	m
l	Rohrabstand	m
L	charakteristische Länge	m
L_R	Registerlänge	m
N_1	Konstante der Berechnung	–
N_2	Konstante der Berechnung	–
\dot{q}	spezifischer Wärmestrom (allgemein)	W/m^2
\dot{q}_a	spezifischer Wärmestrom nach außen	W/m^2
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{Q}_a	Wärmestrom nach außen	W
\dot{q}_i	spezifischer Wärmestrom nach innen	W/m^2
\dot{Q}_i	Wärmestrom nach innen	W
R	Konstante der Berechnung	–
R	Wärmeleitwiderstand	$(m^2 \cdot K)/W$
s	Länge der Lamelle	–
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$
α_a	Wärmeübergangskoeffizient (außen)	$W/(m^2 \cdot K)$
α_i	Wärmeübergangskoeffizient (innen)	$W/(m^2 \cdot K)$
δ	Dicke	m
$\delta_{a,1..x}$	Dicke der Deckschichten nach Außen	m
$\delta_{i,1..x}$	Dicke der Deckschichten nach Innen	m
κ_a	Teilwärme.-Koeff. außen	$W/(m^2 \cdot K)$
$\bar{\kappa}_a$	Teilwärme.-Koeff. außen-Bezug Rohrebene	$W/(m^2 \cdot K)$
κ_i	Teilwärme.-Koeff. innen	$W/(m^2 \cdot K)$
$\bar{\kappa}_i$	Teilwärme.-Koeff. innen-Bezug Rohrebene	$W/(m^2 \cdot K)$

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung aus vorheriger Seite

Symbol	Bedeutung	Einheit
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)
$\bar{\lambda}$	mittlere Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)
$\lambda_{a,1..x}$	Wärmeleitfähigkeit Deckschichten außen	W/(m · K)
$\lambda_{i,1..x}$	Wärmeleitfähigkeit Deckschichten innen	W/(m · K)
λ_L	Wärmeleitfähigkeit Wärmeleitschicht	W/(m · K)
λ_R	Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand	W/(m · K)
$\lambda_{1..x}$	Konstante der Berechnung	
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ϑ_a	Raumtemperatur auf der Außenseite	°C
ϑ_F	mittlere Fluidtemperatur	°C
ϑ_i	Raumtemperatur auf der Innenseite	°C
ϑ_m	mittlere Temperatur	°C
ϑ_{\max}	max. Oberflächentemperatur innen	°C
ϑ_{\min}	min. Oberflächentemperatur innen	°C
$\vartheta_{m,a}$	mittlere Oberflächentemperatur außen	°C
$\vartheta_{m,i}$	mittlere Oberflächentemperatur innen	°C
$\vartheta_{m,i,P}$	mittlere Oberflächentemp. Massivplatte (innen)	°C
$\vartheta_{m,a,P}$	mittlere Oberflächentemp. Massivplatte (außen)	°C
ϑ	Temperatur	°C
$\vartheta_{2,u}$	Übertemperatur Rohrwand	°C
ρ	Dichte	kg/m ³
Δ_a	Schichtdicke nach außen	m
Δ_i	Schichtdicke nach innen	m
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
$\Delta\vartheta_m$	Übertemperatur	K

Tief- und hochgestellte Zeichen

Index	Bedeutung
a	außen
D	bezogen auf die Rohrgeometrie
FB	bezogen auf den Fußboden
i	innen
i	Laufindex
j	Laufindex
M	Laufindex
op	operativ
OF	Oberfläche

1 Aufgabenstellung

Auftraggeber:

Industrieverband Klebstoff e.V. (IVK)
Dr. Nobert Arnold (Vorsitzender Technik)
Völklinger Str. 4
40094 Düsseldorf

Auftragnehmer:

Forschungsinstitut für Gebäudeenergie-technik
Altcoschütz 8
01189 Dresden

Aufgabenstellung:

Der Industrieverband Klebstoff e.V. möchte Produktentwicklungen bei Flächenheizsystemen mit der speziellen Orientierung "Fußboden" forcieren. Hierzu sind die wärmetechnischen Auswirkungen von verklebten und schwimmend verlegten Systemen bisher nicht hinreichend analysiert. Im Rahmen einer Konzeptstudie soll ein wärmetechnischer Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Verlegearten des Fußbodenbelags bestimmt werden. Es sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Kurzbeschreibung des verwendeten Berechnungsverfahrens
- Erstellung des numerischen Modelles für die beiden zu vergleichenden Verlegeverfahren
- Energetische Berechnung der unter Punkt 2 erstellten Modelle und Hochrechnung auf einen spezifischen Jahresenergieverbrauch
- Erstellung eines Abschlussberichtes

Bearbeitungszeitraum:

Der geplante Bearbeitungszeitraum beträgt 2 Monate. Der Beginn des Projektes startet am 05.12.2022 und endet am 05.02.2023.

2 Berechnungsmodell

Ausgangspunkt der Berechnungen für die Fußbodenheizung stellt das von GLÜCK in [4, 5] sowie von HANEL in [6] dokumentierte Berechnungsverfahren für Fußbodenheizungen dar, welches zunächst für Systeme mit einem Wärmeleitblech erstellt wurden. Grundsätzlich eignet sich das Berechnungsprogramm jedoch auch für alle anderen Systeme von Fußbodenheizungen, wenn die Eingabeparameter entsprechend angepasst werden. Nachfolgend sollen die Grundzüge dieses Verfahrens beschrieben werden. Die Ausführungen orientieren sich dabei an der Abb. 2.1.

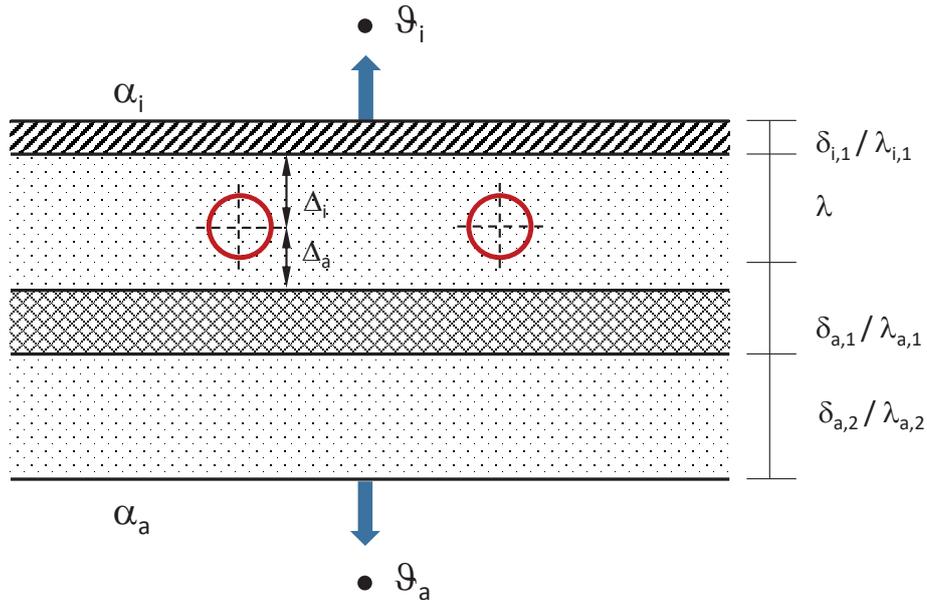


Abb. 2.1: Schnittdarstellung des Modells der Fußbodenheizung

Die Berechnung beruht auf einer zweidimensionalen Wärmeleitung in der Rohrschicht, sowie in einer möglichen Wärmeleitschicht. In den weiteren Deckschichten wird eine eindimensionale Wärmeleitung angesetzt. Die Teilwärmehduregangskoeffizienten der jeweiligen Wärmeströme können entsprechend der Gl. 2.1 und Gl. 2.2 ermittelt werden.

$$\kappa_i = \left[\frac{1}{\alpha_i} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right]^{-1} \quad (2.1)$$

$$\kappa_a = \left[\frac{1}{\alpha_a} + \sum_a \frac{\delta_a}{\lambda_a} \right]^{-1} \quad (2.2)$$

Bezieht man die Gl. 2.1 sowie Gl. 2.2 auf die Rohrebene, so ergeben sich Gl. 2.3 und Gl. 2.4.

$$\bar{\kappa}_i = \left[\frac{1}{\kappa_i} + \frac{\Delta_i}{\lambda} \right]^{-1} \quad (2.3)$$

$$\bar{\kappa}_a = \left[\frac{1}{\kappa_a} + \frac{\Delta_a}{\lambda} + \frac{\delta_L}{\lambda_L} \right]^{-1} \quad (2.4)$$

Als mittlere Temperaturdifferenz soll zwischen dem inneren und äußeren Zustand gelten $\Delta\vartheta = \vartheta_a - \vartheta_i$. Aus den genannten Beziehungen ergibt sich die mittlere Übertemperatur an der Innenoberfläche der Massivplatte bezogen auf ϑ_i zu:

$$\vartheta_{m,i,P} = \frac{A \cdot \pi \cdot \lambda}{l \cdot \kappa_i} \cdot (l - G_a) + \Delta\vartheta \cdot \frac{\frac{l}{\kappa_i}}{\frac{l}{\kappa_a} + \frac{l}{\kappa_i}} \quad (2.5)$$

Mit Bezug auf die Außentemperatur ergibt sich die mittlere Temperatur an der Außenseite entsprechend Gl. 2.6

$$\vartheta_{m,a,P} = \frac{A \cdot \pi \cdot \lambda}{l \cdot \kappa_a} \cdot (G_a - l) + \Delta\vartheta \cdot \frac{\frac{l}{\kappa_a}}{\frac{l}{\kappa_a} + \frac{l}{\kappa_i}} \quad (2.6)$$

Die Übertemperatur am Heizrohrtrand ergibt sich zu:

$$\vartheta_{2,u} = \vartheta_2 - \vartheta_i - \Delta\vartheta \cdot \frac{\bar{\kappa}_a}{\bar{\kappa}_i + \bar{\kappa}_a} \quad (2.7)$$

Als Konstanten werden für die Berechnung die nachfolgenden Beziehungen verwendet.

$$A = \frac{\vartheta_{2,u}}{\ln \frac{l}{\pi \cdot d_2} - \frac{\pi}{l} \cdot G_i + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{g_a(s) + g_i(s)}{s}} \quad (2.8)$$

$$G_a = \frac{\bar{\kappa}_a - \bar{\kappa}_i}{\bar{\kappa}_a + \bar{\kappa}_i} \quad (2.9)$$

$$G_i = \frac{-2 \cdot \lambda}{\bar{\kappa}_a + \bar{\kappa}_i} \quad (2.10)$$

$$g_i(s) = \frac{\left(\lambda + \frac{\lambda_L}{N_1} - \frac{\lambda_L}{N_2} \right) \cdot \left(e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot s}{l} \cdot \Delta_a} - R \right)}{\lambda \cdot (l + R) + \left(\frac{\lambda_L}{N_2} - \frac{\lambda_L}{N_1} \right) \cdot (l - R)} \quad (2.11)$$

$$g_a(s) = -\frac{h'_i \cdot l - 2 \cdot \pi \cdot s}{h'_i \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot s} \cdot e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot s}{l} \cdot \Delta_i} \cdot (1 + g_i(s)) \quad (2.12)$$

Die Gl. 2.11 sowie Gl. 2.12 können wesentlich vereinfacht werden, wenn $\delta_L = 0$ und $\lambda_L = \lambda$ gesetzt wird. In diesem Fall entfällt die Wärmeleitschicht. In den vorliegenden Untersuchungen wurde dies programmtechnisch umgesetzt. Nachfolgend soll jedoch der gesamte Berechnungsgang nach [5] dokumentiert werden. Die hierfür notwendigen Randbedingungen lauten:

$$N_1 = 1 - \frac{h'_a \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot s}{h'_a \cdot l - 2 \cdot \pi \cdot s} \cdot e^{\frac{4 \cdot \pi \cdot s}{l} \cdot \delta_L} \quad (2.13)$$

$$N_2 = 1 - \frac{h'_a \cdot l - 2 \cdot \pi \cdot s}{h'_a \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot s} \cdot e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot s}{l} \cdot \delta_L} \quad (2.14)$$

$$R = 1 - \frac{h'_i \cdot l - 2 \cdot \pi \cdot s}{h'_i \cdot l + 2 \cdot \pi \cdot s} \cdot e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot s}{l} \cdot (\Delta_a - \Delta_i)} \quad (2.15)$$

$$h'_i = \frac{\kappa_i}{\lambda} \quad (2.16)$$

$$h'_a = \frac{\kappa_a}{\lambda_L} \quad (2.17)$$

Die Wärmeströme auf der Innen- und Außenseite ergeben sich zu:

$$\dot{q}_i = \kappa_i \cdot \vartheta_{m,i,P} \quad (2.18)$$

$$\dot{q}_a = \kappa_a \cdot \vartheta_{m,a,P} \quad (2.19)$$

Aus den Ergebnissen der Gl. 2.18 und Gl. 2.19 lassen sich die mittleren Oberflächentemperaturen ermitteln. Die entsprechenden Beziehungen lauten:

$$\vartheta_{m,i} = \frac{\dot{q}_i}{\alpha_i} + \vartheta_i \quad (2.20)$$

$$\vartheta_{m,a} = \frac{\dot{q}_a}{\alpha_a} + \vartheta_a \quad (2.21)$$

Für die Berechnung der mittleren Oberflächentemperaturen müssen dabei die Wärmeübergangskoeffizienten bekannt sein. Im Sinne der hier aufgeführten Berechnung stellen diese einen Gesamtwärmeübergangskoeffizient aus Strahlung und Konvektion dar. Als Berechnungsbeziehungen können die beiden nachfolgenden Gleichungen verwendet werden.

$$\alpha_i = 8,92 \cdot |(\vartheta_{m,i} - \vartheta_i)|^{-0,1} \quad (2.22)$$

$$\alpha_a = 5,7 + 0,09 \cdot (\vartheta_{m,a} - \vartheta_a) \quad (2.23)$$

Zur Lösung der dokumentierten Berechnungsgleichungen ist ein iteratives Verfahren notwendig.

Erweiterungen - Wärmeübergang

Für die Betrachtung der verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten (Heizen/Kühlen) bzw. der Orientierungen (Fußboden/Wand/Decke) wurde der Wärmeübergangskoeffizient wie folgt angepasst¹:

¹Die Nummerierung entspricht dem Eingabewert im Berechnungsprogramm

1. Fußbodenheizung

$$\alpha_i = 8,92 \cdot |(\vartheta_{m,i} - \vartheta_i)|^{0,1} \quad (2.24)$$

2. Fußbodenkühlung

$$\alpha_i = 0,25 \cdot |(\vartheta_{m,i} - \vartheta_i)|^{0,31} + 6,12 \quad (2.25)$$

3. Wandheizung / Wandkühlung

$$\alpha_i = 8 \cdot |(\vartheta_{m,i} - \vartheta_i)| \quad (2.26)$$

4. Deckenheizung

$$\alpha_i = 0,25 \cdot |(\vartheta_{m,i} - \vartheta_i)|^{0,31} + 6,12 \quad (2.27)$$

3 Berechnungen

Für die Berechnung wird der im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Berechnungsalgorithmus verwendet.

3.1 Analysen Designfußboden

3.1.1 Geklebte Verlegung

Für die Analysen des Designfußbodens "geklebte Verlegung" kommen die in Tab. 3.1 dokumentierten Kennwerte zur Anwendung. Die energetischen Berechnungsergebnisse für diese Variante sind der Tab. 3.2 zu entnehmen.

Tab. 3.1: Randbedingungen für die Modellierung - Berechnungsbeispiel 1

Beschreibung	Symbol	Einheit	Wert
Abstand der Heizrohrachse von der Deckschicht	Δ_i	m	0,052
Abstand der Heizrohrachse von der Unterschicht	Δ_a	m	0,007
Wärmeleitfähigkeit der Stoffschicht in der die Rohre liegen	λ	W/(m · K)	1,4
Dicke der Wärmeleitschicht	δ_L	m	-
Wärmeleitfähigkeit der Wärmeleitschicht	λ_L	W/(m · K)	-
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 1)	$\delta_{i,1}$	m	0,0003
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 2)	$\delta_{i,2}$	m	0,002
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 3)	$\delta_{i,3}$	m	-
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 1)	$\lambda_{i,1}$	W/(m · K)	0,40
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 2)	$\lambda_{i,2}$	W/(m · K)	0,25
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 3)	$\lambda_{i,3}$	W/(m · K)	-
Dicke der Deckschicht nach außen (Schicht 1)	$\delta_{a,1}$	m	0,04
Dicke der Deckschicht nach außen (Schicht 2)	$\delta_{a,2}$	m	0,200
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach außen (Schicht 1)	$\lambda_{a,1}$	W/(m · K)	0,04
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach außen (Schicht 2)	$\lambda_{a,2}$	W/(m · K)	2,1

Tab. 3.2: Ergebnisse der Berechnung - Berechnungsbeispiel 1

Beschreibung	Symbol	Einheit	Wert
			$\vartheta_F = 38,85 \text{ °C}$
mittlere Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{m,i}$	°C	28,1
mittlere Oberflächentemperatur (außen)	$\vartheta_{m,a}$	°C	21,5
maximale Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{\max,i}$	°C	28,7
minimale Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{\min,i}$	°C	27,5
Temperaturdifferenz	$\vartheta_{\min,i} - \vartheta_F$	K	-10,8
Rohraußentemperatur	ϑ_2	°C	36,3
Wärmestrom nach innen	\dot{q}_i	W/m ²	89,5
Wärmestrom nach außen	\dot{q}_a	W/m ²	9,7
Gesamtwärmeabgabe	\dot{q}_{ges}	W/m ²	99,2

Die Ergebnisse der Tab. 3.2 ergeben bei $\vartheta_F = 38,85 \text{ °C}$ eine Wärmeabgabe von $\dot{q}_i = 89,5 \text{ W/m}^2$. Diese Wärmeabgabe besitzt eine sehr hohe Übereinstimmung mit dem vom HLK-Stuttgart gemessenen Wert von $\dot{q}_i = 91,1 \text{ W/m}^2$. Die Differenz zwischen berechnetem und gemessenem Wert

beträgt $\Delta q_i = 1,76 \%$. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Messung des HLK-Stuttgart ebenfalls fehlerbehaftet ist. Die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens wird als ausreichend für die weiteren Untersuchungen angesehen.

3.1.2 Schwimmende Verlegung

Für die Berechnungen mit schwimmender Verlegung wurden die in der Tab. 3.3 dokumentierten Kennwerte verwendet.

Tab. 3.3: Randbedingungen für die Modellierung - Berechnungsbeispiel 2

Beschreibung	Symbol	Einheit	Wert
Abstand der Heizrohrachse von der Deckschicht	Δ_i	m	0,052
Abstand der Heizrohrachse von der Unterschicht	Δ_a	m	0,007
Wärmeleitfähigkeit der Stoffschicht in der die Rohre liegen	λ	W/(m · K)	1,4
Dicke der Wärmeleitschicht	δ_L	m	-
Wärmeleitfähigkeit der Wärmeleitschicht	λ_L	W/(m · K)	-
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 1)	$\delta_{i,1}$	m	0,001
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 2)	$\delta_{i,2}$	m	0,005
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 3)	$\delta_{i,3}$	m	-
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 1)	$\lambda_{i,1}$	W/(m · K)	0,033
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 2)	$\lambda_{i,2}$	W/(m · K)	0,25
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 3)	$\lambda_{i,3}$	W/(m · K)	-
Dicke der Deckschicht nach außen (Schicht 1)	$\delta_{a,1}$	m	0,04
Dicke der Deckschicht nach außen (Schicht 2)	$\delta_{a,2}$	m	0,200
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach außen (Schicht 1)	$\lambda_{a,1}$	W/(m · K)	0,04
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach außen (Schicht 2)	$\lambda_{a,2}$	W/(m · K)	2,1

Tab. 3.4: Ergebnisse der Berechnung - Berechnungsbeispiel 2

Beschreibung	Symbol	Einheit	Wert
			$\vartheta_F = 42,16 \text{ °C}$
mittlere Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{m,i}$	°C	27,9
mittlere Oberflächentemperatur (außen)	$\vartheta_{m,a}$	°C	21,9
maximale Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{\max,i}$	°C	28,4
minimale Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{\min,i}$	°C	27,5
Temperaturdifferenz	$\vartheta_{\min,i} - \vartheta_F$	K	-14,3
Rohraußentemperatur	ϑ_2	°C	39,6
Wärmestrom nach innen	\dot{q}_i	W/m ²	87,1
Wärmestrom nach außen	\dot{q}_a	W/m ²	12,3
Gesamtwärmeabgabe	\dot{q}_{ges}	W/m ²	99,4

Die energetischen Kennwerte der schwimmenden Verlegung sind der Tab. 3.4 zu entnehmen. Festzustellen ist, dass auch bei dieser Variante eine hohe Übereinstimmung mit den gemessenen Kennwerten des HLK-Stuttgart zu verzeichnen ist. HLK-Stuttgart weist bei den gegebenen Systemtemperaturen einen Wärmestrom von $\dot{q}_i = 93,4 \text{ W/m}^2$ aus. Dies stellt zu den hier berechneten Werten eine Differenz von $\Delta \dot{q}_i = 6,7 \%$ dar. Die Abweichungen sind somit höher als bei der geklebten Variante. Zu berücksichtigen hierbei ist jedoch, dass eine hohe Unsicherheit bei

der wirklichen Dicke der "Unterschicht" vorliegt. Diese Unterschicht wird durch die Masse des Oberbodenbelages zusammengedrückt, wodurch die reale Dicke der Unterschicht sich gegenüber der Produktausführung (Underlay 3 mm) deutlich verringert. In Absprache mit dem Auftraggeber wurde eine resultierende Schichtdicke von 1mm in den Berechnungen verwendet.

3.2 Analysen Pakettfußboden

3.2.1 Geklebte Verlegung

Für die geklebte Variante mit Parkett sind die Randbedingungen der Berechnung der Tab. 3.5 zu entnehmen.

Tab. 3.5: Randbedingungen für die Modellierung - Berechnungsbeispiel 3

Beschreibung	Symbol	Einheit	Wert
Abstand der Heizrohrachse von der Deckschicht	Δ_i	m	0,052
Abstand der Heizrohrachse von der Unterschicht	Δ_a	m	0,007
Wärmeleitfähigkeit der Stoffschicht in der die Rohre liegen	λ	W/(m · K)	1,4
Dicke der Wärmeleitschicht	δ_L	m	-
Wärmeleitfähigkeit der Wärmeleitschicht	λ_L	W/(m · K)	-
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 1)	$\delta_{i,1}$	m	0,001
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 2)	$\delta_{i,2}$	m	0,013
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 3)	$\delta_{i,3}$	m	-
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 1)	$\lambda_{i,1}$	W/(m · K)	0,4
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 2)	$\lambda_{i,2}$	W/(m · K)	0,127
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 3)	$\lambda_{i,3}$	W/(m · K)	-
Dicke der Deckschicht nach außen (Schicht 1)	$\delta_{a,1}$	m	0,04
Dicke der Deckschicht nach außen (Schicht 2)	$\delta_{a,2}$	m	0,200
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach außen (Schicht 1)	$\lambda_{a,1}$	W/(m · K)	0,04
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach außen (Schicht 2)	$\lambda_{a,2}$	W/(m · K)	2,1

Tab. 3.6: Ergebnisse der Berechnung - Berechnungsbeispiel 3

Beschreibung	Symbol	Einheit	Wert
			$\vartheta_F = 49,425 \text{ °C}$
mittlere Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{m,i}$	°C	28,5
mittlere Oberflächentemperatur (außen)	$\vartheta_{m,a}$	°C	22,7
maximale Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{\max,i}$	°C	28,9
minimale Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{\min,i}$	°C	28,1
Temperaturdifferenz	$\vartheta_{\min,i} - \vartheta_F$	K	-21,0
Rohraußentemperatur	ϑ_2	°C	46,5
Wärmestrom nach innen	\dot{q}_i	W/m ²	94,5
Wärmestrom nach außen	\dot{q}_a	W/m ²	17,4
Gesamtwärmeabgabe	\dot{q}_{ges}	W/m ²	111,9

Der Prüfbericht des HLK-Stuttgart weist für Parkett, bei den in der Tab. 3.6 hinterlegten Systemtemperaturen, einen Wert von $\dot{q}_i = 94,8 \text{ W/m}^2$ aus. Die Abweichung zum Rechenwert beträgt $\Delta\dot{q}_i = 0,3\%$.

3.2.2 Schwimmende Verlegung

Für die Analysen mit schwimmender Verlegung sind die Kennwerte der Tab. 3.7 sowie 3.8 zu entnehmen.

Tab. 3.7: Randbedingungen für die Modellierung - Berechnungsbeispiel 4

Beschreibung	Symbol	Einheit	Wert
Abstand der Heizrohrachse von der Deckschicht	Δ_i	m	0,052
Abstand der Heizrohrachse von der Unterschicht	Δ_a	m	0,007
Wärmeleitfähigkeit der Stoffschicht in der die Rohre liegen	λ	W/(m · K)	1,4
Dicke der Wärmeleitschicht	δ_L	m	-
Wärmeleitfähigkeit der Wärmeleitschicht	λ_L	W/(m · K)	-
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 1)	$\delta_{i,1}$	m	0,001
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 2)	$\delta_{i,2}$	m	0,013
Dicke der Deckschicht nach innen (Schicht 3)	$\delta_{i,3}$	m	-
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 1)	$\lambda_{i,1}$	W/(m · K)	0,033
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 2)	$\lambda_{i,2}$	W/(m · K)	0,127
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach innen (Schicht 3)	$\lambda_{i,3}$	W/(m · K)	-
Dicke der Deckschicht nach außen (Schicht 1)	$\delta_{a,1}$	m	0,04
Dicke der Deckschicht nach außen (Schicht 2)	$\delta_{a,2}$	m	0,200
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach außen (Schicht 1)	$\lambda_{a,1}$	W/(m · K)	0,04
Wärmeleitfähigkeit der Deckschicht nach außen (Schicht 2)	$\lambda_{a,2}$	W/(m · K)	2,1

Tab. 3.8: Ergebnisse der Berechnung - Berechnungsbeispiel 4

Beschreibung	Symbol	Einheit	Wert
			$\vartheta_F = 51,12 \text{ °C}$
mittlere Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{m,i}$	°C	28,2
mittlere Oberflächentemperatur (außen)	$\vartheta_{m,a}$	°C	23,0
maximale Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{\max,i}$	°C	28,6
minimale Oberflächentemperatur (innen)	$\vartheta_{\min,i}$	°C	27,9
Temperaturdifferenz	$\vartheta_{\min,i} - \vartheta_F$	K	-22,9
Rohraußentemperatur	ϑ_2	°C	48,2
Wärmestrom nach innen	\dot{q}_i	W/m ²	91,3
Wärmestrom nach außen	\dot{q}_a	W/m ²	18,9
Gesamtwärmeabgabe	\dot{q}_{ges}	W/m ²	110,2

Der Prüfbericht des HLK-Stuttgart weist für die Variante einen Wert von $\dot{q}_i = 93,7 \text{ W//m}^2$ aus.

4 Energetische Berechnungen

4.1 Basisbetrachtung

Für die energetischen Untersuchungen wird ein Raum mit den in Abb. 4.1 dokumentierten Abmessungen verwendet [10]². Der Raum hat eine Grundfläche von $A = 20 \text{ m}^2$. Angenommen wird eine wärmetechnische Ausstattung des Raumes nach EnEV04. Die Kenndaten hierfür sind der Tab. 4.1 zu entnehmen.

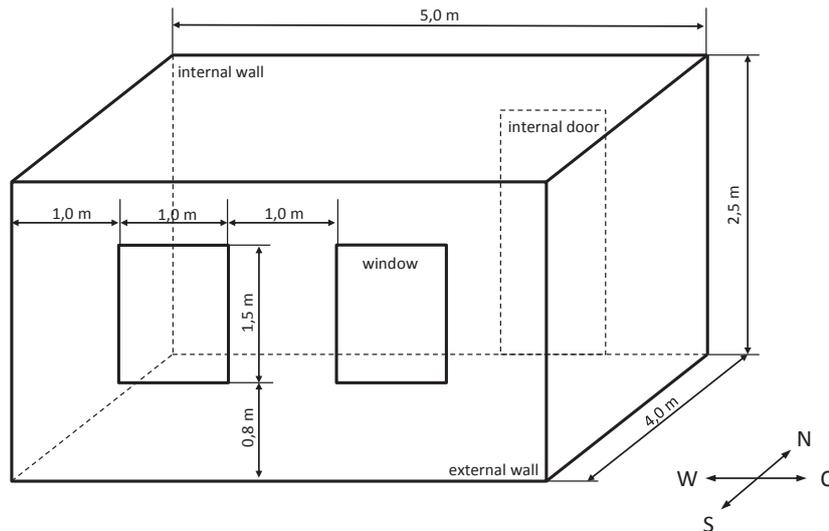


Abb. 4.1: Abmessungen des für die Analysen verwendeten Raumes

Tab. 4.1: Randbedingungen für den Modellraum

ϑ_N °C	λ_N 1/h	k_W W/(m ² ·K)	A_W m ²	k_F W/(m ² ·K)	A_F m ²	V m ³	c_p J/(kg·K)	ρ kg/m ³	\dot{Q}_i W	\dot{Q}_N W
-14	0,5	0,25	9,5	1,08	3	50	1000	1,2	0	474

Die Normheizlast des Raumes beträgt $\dot{Q}_N = 474 \text{ W}$. Anzumerken ist jedoch, dass die Normheizlast innerhalb der Heizperiode sehr selten auftritt. Betrachtet man die für Deutschland und Mitteleuropa repräsentative Außentemperaturverteilung, so können die in Tab. 4.2 sowie 4.3 dokumentieren Kennwerte bestimmt werden. Für die Stadt Potsdam wurden die monatlichen Außentemperaturen und der Mittelwert der monatlichen Außentemperaturen für einen Zeitraum von 30 Jahren dokumentiert. Für die folgenden Analysen wurde die mittlere Außentemperatur für den 30-jährigen Zeitraum gerechnet. Je nach Gebäudeart kann die Dauer der Heizperiode leicht variieren. Um jedoch eine gewisse Vergleichbarkeit in den Berechnungen zu erreichen, wird eine gleiche Heizperiode der Gebäude angenommen und die durchschnittliche, repräsentative Außentemperatur von $\bar{\vartheta}_{a,HP} = 3,6 \text{ °C}$ verwendet.

²Der Modellraum wurde in der Vergangenheit für viele unterschiedliche Betrachtungen eingesetzt. Exemplarisch sind die Untersuchungen in [1, 7] und [3]

Tab. 4.2: Auslegungs- und durchschnittliche Außentemperatur für unterschiedliche europäische Städte

Stadt	$\vartheta_{a,N}$ in °C	$\vartheta_{a,HP}$ in °C
London	-4	7,6
Paris	-7	6,9
Warschau	-20	3,5
Rom	-1	9,8
Potsdam	-14	3,6

Tab. 4.3: Außentemperatur während der Heizperiode - Potsdam

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Mittel HP
Heizperiode (HP)	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	-
ϑ_a in °C- TRY	1,8	0,4	2,3	6,9	14,5	16,2	17,9	17,5	13,2	9,1	4,8	0,6	3,7
ϑ_a in °C- 30 a	-0,9	0,2	3,7	8,0	13,2	16,6	17,9	17,5	13,9	9,4	4,2	0,7	3,6

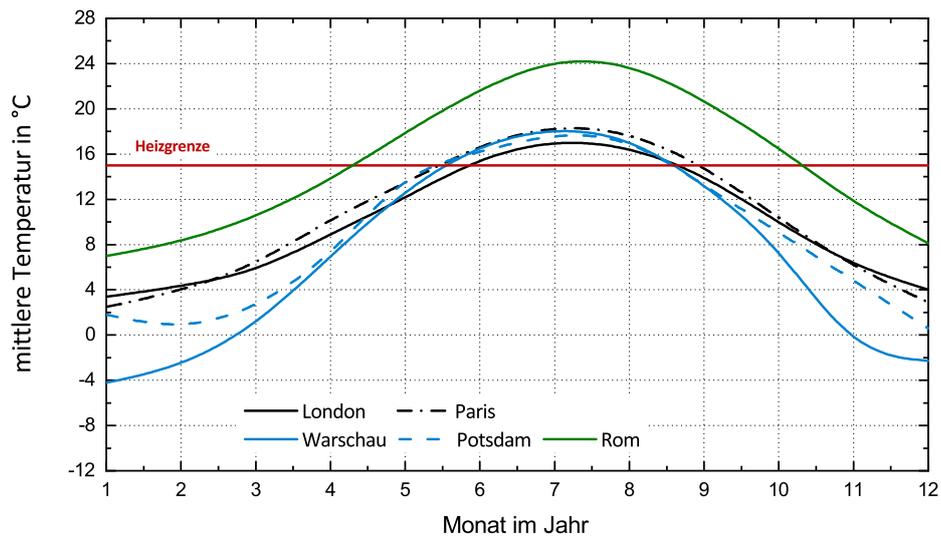


Abb. 4.2: Mittlere Temperatur für die Heizperiode unterschiedlicher europäischer Städte nach [8]

Wie den Daten der Tabellen und Abbildungen zu entnehmen ist, kann für die Repräsentanzstation Potsdam eine mittlere Außentemperatur von $\vartheta_{a,HP} = 3,6 \text{ °C}$ angenommen werden. Betrachtet man diese durchschnittliche Temperatur, so ergibt sich für den betrachteten Raum eine Heizlast von $\dot{Q}_i = 229 \text{ W}$. Bezogen auf eine Grundfläche von $A = 20 \text{ m}^2$ resultiert eine spezifische Heizleistung von $\dot{q}_i = 11,45 \text{ W/m}^2$. Diese Heizleistung muss im Raum bei $\vartheta_i = 20 \text{ °C}$ gedeckt werden. Durch den unterschiedlichen Systemaufbau ergeben sich hierfür unterschiedliche Systemtemperaturen. Tab. 4.4 zeigt die unterschiedlichen Systemtemperaturen.

Tab. 4.4: Systemtemperaturen zur Deckung der mittleren Heizlast

Bezeichnung	Systemtemperatur ϑ_F in °C	$\Delta\vartheta$ in K	$\Delta\vartheta_{gek.}$ in K	$\Delta\vartheta_{sch.}$ in K	ϵ_c	JAZ _{LWWP}
Designfußboden (geklebt)	22,68	-	-		14,50	5,25
Designfußboden (schwimmend)	23,176	0,5		-	14,14	5,18
Parkettfußboden (geklebt)	23,84	-	1,16		13,67	5,09
Parkettfußboden (schwimmend)	24,172	0,33		1,0	13,45	5,05

Kommt zur Wärmeerzeugung eine Wärmepumpe zur Anwendung, dann haben die unterschiedlichen Systemtemperaturen einen Einfluss auf die Effizienz des Systems. Zur Beschreibung der Effizienz dient hierbei der Carnot-Wirkungsgrad

$$\epsilon_c = \frac{T_0}{T_1 - T_0} \quad (4.1)$$

wobei T_0 die Verdampfungstemperatur und T_1 die Verflüssigungstemperatur ist.

Für die betrachteten Varianten sind die Carnot-Zahlen der Tab. 4.4 zu entnehmen. Energetisch kann durch eine geklebte Verlegung im Vergleich zu einer schwimmenden Verlegung eine energetische Reduktion von 2,6 % bei einem Designfußboden und 1,64 % bei einem Parkettfußboden bestimmt werden. Betrachtet man die Varianten "geklebt" und "schwimmend" so kann aufgrund des Oberbodenbelages folgende energetische Differenzen bestimmt werden:

- "geklebte"- Verlegeart: $\Delta\epsilon_c = 5,7 \text{ %}$
- "schwimmende" - Verlegeart: $\Delta\epsilon_c = 4,9 \text{ %}$

Hierbei weist die Variante mit Parkett, aufgrund des höheren thermischen Widerstandes, die geringeren Effizienzkennwerte auf.

Die Betrachtungen mit dem Carnotfaktor sind theoretische Grenz betrachtungen. In [2]³ wird eine Korrelation von JAZ in Abhängigkeit der Systemtemperatur gegeben. Die angegebenen Gleichungen lauten⁴:

$$JAZ = 3,62 - 0,132 \cdot (\Delta\vartheta_F - 35) \quad (4.2)$$

$$JAZ = 4,43 - 0,103 \cdot (\Delta\vartheta_F - 35) \quad (4.3)$$

³Die Korrelationsgleichungen repräsentieren JAZ von gemessenen Objekten und beinhalten hierbei alle Umwandlungsketten im technischen System.

⁴Die Korrelationsgleichungen gelten für eine Mehrfamilienhaus.

Für das System mit LWWP sind die JAZ ebenfalls in Tab. 4.4 dokumentiert. Hinsichtlich der Verlegeart sind Differenzen in der JAZ von $\Delta JAZ = 0,04 \dots 0,07$ zu verzeichnen. Für den Vergleich des Oberbodenmaterials ergeben sich Differenzen von $\Delta JAZ = 0,13 \dots 0,15$.

4.2 Energetische Hochrechnung (Einfamilienhaus)

Die vorangegangene Untersuchungen haben den Einfluss der Verlegeart auf die Jahresarbeitszahl eines Systems mit Fußbodenheizung aufgezeigt. Im nachfolgenden Kapitel soll der Versuch einer Hochrechnung auf ein Einfamilienhaus unternommen werden. Hierzu wird ein Gebäude nach Abb. 4.3 verwendet, welches ein aus statistischen Daten abgeleitetes, freistehendes Einfamilienhaus darstellt⁵.

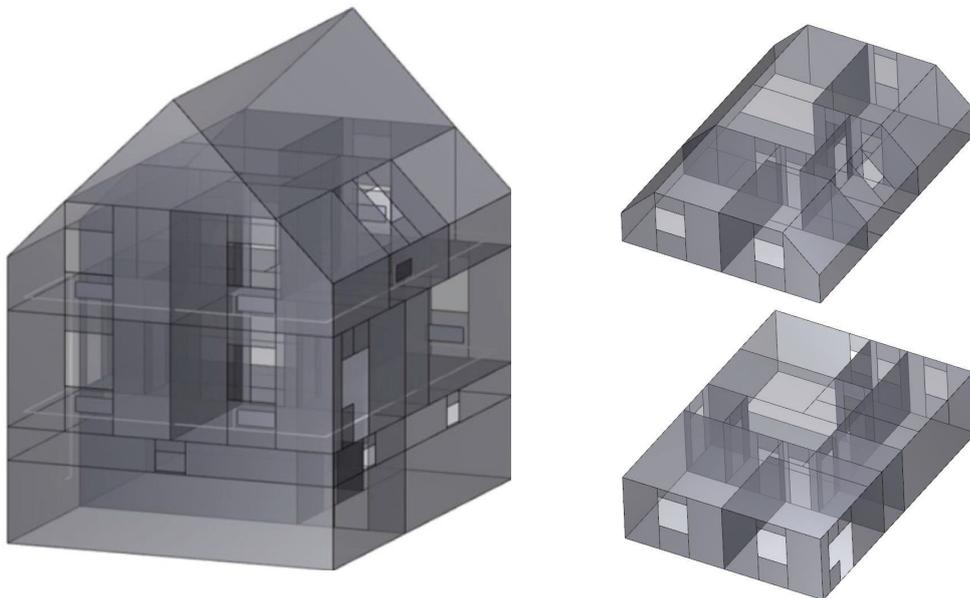


Abb. 4.3: Statistisches Einfamilienhaus nach [9] - Gesamtansicht / Erdgeschoss + 1. Obergeschoss

Der Keller des Gebäudes ist nicht beheizt, wodurch er nachfolgend nicht weiter betrachtet werden soll. Das Gebäude besitzt eine beheizte Wohnfläche von $A = 160 \text{ m}^2$ (Referenzwert). Der Baukörper dieses statistischen Einfamilienhauses kann in unterschiedlichen Ausführungen gestaltet werden. Für eine Auswahl an wärmetechnischen Ausstattungen sind die resultierenden Heizlasten der Tab. 4.5 zu entnehmen.

Tab. 4.5: Heizlasten des statistischen Einfamilienhaus

Wärmeschutzniveau	Heizlast in kW
WSVO 77	13,6
WSVO 82	10,5
EnEV 04	5,8

⁵Detaillierte Ausführungen zur Herleitung des Gebäudes sind [9] zu entnehmen.

Die Kennwerte aus Tab. 4.5 sind hierbei leicht höher als eine direkte Hochrechnung der Kennwerte des Modellraumes mit $A = 20\text{m}^2$ Grundfläche. Zu berücksichtigen hierbei ist jedoch, dass der Modellraum ideale Randbedingungen zu den Nachbarräumen aufweist (adiabate Randbedingung), was in der Praxis nicht gegeben ist. Dies spiegelt sich in der erhöhten Heizlast des EFH wider. Als weitere Randbedingungen für das Einfamilienhaus ist eine Nutzung durch einen 4-Personen Haushalt zu nennen. Luftwechsel und innere Wärmegewinne sind an diese Randbedingungen angepasst und können ebenfalls [9] entnommen werden. Für ein System mit Parallelpufferspeicher sind die energetischen Kennwerte für diese Einfamilienhaus nach ENEV04 der Tab. 4.6 zu entnehmen.

Tab. 4.6: Energetische Kenndaten für die Analyse des Verbrauchssystem mit Fußbodenheizung (Speichergröße 200 l (Parallelpufferspeicher), ϑ_V -Regelung)

$Q_{h,s}$ in kWh	$Q_{h,d,u}$ in kWh	Q'_h		Q_{ges} in kWh
		$Q_{h,d,b}$ in kWh	Q_{HF} in kWh	
167	93	806	6078	6977

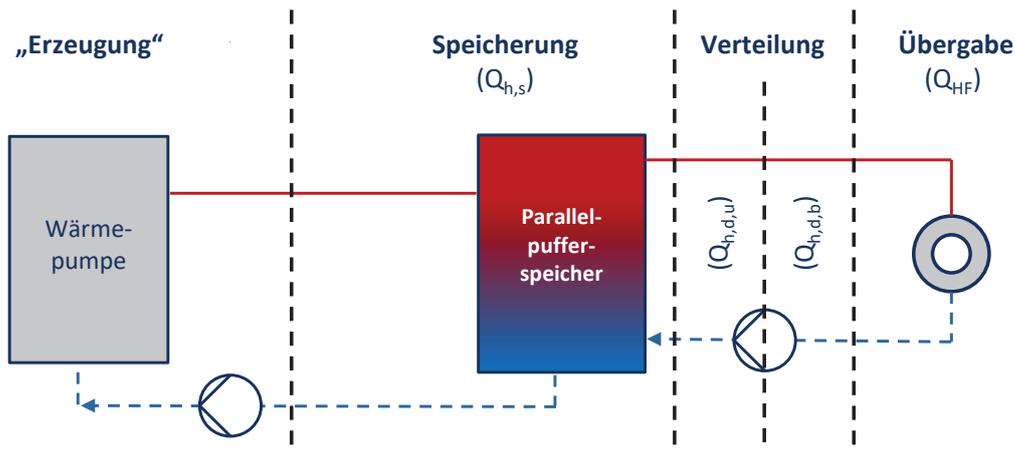


Abb. 4.4: Bilanzgrößen von der Wandlung bis zur Übergabe

Abb. 4.4 zeigt die Kenngrößen von der Wandlung bis zur Übergabe. Hierbei stellen $Q_{h,s}$ die Wärmeverluste des Speicher, $Q_{h,d,u}$ die Wärmeverluste der Rohrleitungen im unbeheizten Bereich (z.B. Keller), $Q_{h,d,b}$ die Wärmeverluste der Rohrleitungen im beheizten Bereich (sogenannter nicht regelbarer Wärmeeintrag) und Q_{HF} die über die Wärmeübergabeeinrichtung in den Raum abgegebene Wärme dar.

Mit Basis dieser Daten kann eine energetische Hochrechnung vorgenommen werden. Benötigt wird hierzu jedoch eine Jahresarbeitszahl (Heizperiodenarbeitszahl) für den Betrieb der Wärmepumpe. Grundsätzlich wird hierfür eine Korrelationsgleichung nach Gl. 4.2 verwendet⁶. Als Basisvariante wird jeweils die schwimmende Verlegung verwendet. Tab. 4.7 dokumentiert die sich

⁶ Ausdrücklich verwiesen sei an dieser Stelle, dass in [2] der Zusammenhang von Gl. 4.2 für ein Mehrfamilienhaus aufgestellt wurde. Da aktuell jedoch keine Messwerte für Einfamilienhäuser in der Art von Gl. 4.2 vorliegen und ein relativer Vergleich vorgenommen wird, soll dieser Zusammenhang auch hier Anwendung finden.

ergebenden Endenergie unter Berücksichtigung der mittleren JAZ nach Tab. 4.4.

Tab. 4.7: Endenergie in Abhängigkeit der JAZ - Ansatz nach [2] (Szenario 1)

Bezeichnung	JAZ_{LWVP}	$W_{el,a}$ in kWh	$\Delta W_{el,a}$ in kWh	$\Delta W_{el,10a}$ in kWh	$\Delta W_{el,20a}$ in kWh
Designfußboden (geklebt)	5,25	1329			
Designfußboden (schwimmend)	5,18	1347	18	180	360
Parkettfußboden (geklebt)	5,09	1371			
Parkettfußboden (schwimmend)	5,05	1382	11	110	220

Tab. 4.8: Endenergie in Abhängigkeit der JAZ - korrigierter Ansatz nach [2] (Szenario 2)

Bezeichnung	JAZ_{LWVP}	$W_{el,a}$ in kWh	$\Delta W_{el,a}$ in kWh	$\Delta W_{el,10a}$ in kWh	$\Delta W_{el,20a}$ in kWh
Designfußboden (geklebt)	4,25	1329			
Designfußboden (schwimmend)	4,18	1347	27	270	540
Parkettfußboden (geklebt)	4,09	1371			
Parkettfußboden (schwimmend)	4,05	1382	17	170	340

Zusätzlich werden in Tab. 4.8 Energiekennwerte dokumentiert, bei der ein um 1,0-Punkte korrigierter Ansatz der JAZ zur Anwendung kommt. Mit diesem Ansatz soll Rechnung getragen werden, dass Klein-Wärmepumpen einen schlechteren COP-Wert aufweisen als größere Wärmepumpen.

Aufgrund der geringeren JAZ-Kennwerte weist die schwimmende Verlegung gegenüber der geklebten Verlegung höhere Kennwerte für die bereitzustellende Elektroenergie auf. Im Szenario 1 kann dies je nach Bodenbelag für einen Betrachtungszeitraum von 20a bis zu $\Delta W_{el,20a} = 360$ kWh sein. Im Szenario 2 können Unterschiede bis zu $\Delta W_{el,20a} = 540$ kWh dokumentiert werden.

5 Fazit / Ausblick

Die Ausführungen der vorangegangenen Abschnitte zeigen deutlich, dass zunächst das verwendete Berechnungsprogramm sehr gut die Ergebnisse des Prüfberichts bestimmen kann. Die Differenzen in den Ergebnissen hinsichtlich der Leistungsbestimmung sind gering und maßgeblich von den Randbedingungen abhängig. In diesem Zusammenhang ist die "wahre" Schichtdicke des Unterbodens bei einer schwimmenden Verlegung zu benennen.

Thermodynamisch zu detektieren ist, dass mit der schwimmenden Verlegung ein größerer Widerstand zur raumorientierten Seite vorliegt, als bei der geklebten Variante. Gleichfalls weist die Systemvariante mit Designfußboden kleinere Systemtemperaturen auf, als die Variante mit Parkettfußboden.

Betrachtet man die Effizienzkennwerte für durchschnittliche Verhältnisse, so zeigen die Varianten mit geklebten Systemen einen energetischen Vorteil von 1,64 ... 2,6 % gegenüber den Varianten mit schwimmend-verlegtem Oberbodenbelag. Die Analysen mittels Carnot-Wirkungsgrad sind jedoch als theoretische Grenzwertbetrachtungen einzuordnen. Aus diesem Grunde wurden in einem zweiten Schritt Analysen mit einer Korrelationsgleichung zu Jahresarbeitszahlen vorgenommen. Hierbei konnten zwischen den Verlegearten Differenzen von $\Delta JAZ = 0,04 \dots 0,07$ und in Hinblick auf das Oberbodenmaterials von $\Delta JAZ = 0,13 \dots 0,15$ bestimmt werden.

Literatur

- [1] BAUER, M.: *Methode zur Berechnung und Bewertung des Energieaufwandes für die Nutzenübergabe bei Warmwasserheizanlagen*, Universität Stuttgart, Dissertation, 1999
- [2] BONGS, C. ; ET AL.: LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden ("LowEx-Bestand Analyse") / Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, KIT. 2022. – Forschungsbericht
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN V 4701-T10 : Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung*. 2006. – Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [4] GLÜCK, B.: *Strahlungsheizung - Theorie und Praxis*. VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1981
- [5] GLÜCK, B.: *Wärmetechnisches Raummodell*. C.F. Müller Verlag Heidelberg, 1997
- [6] HANEL, B.: Wärmeströme von Rohrleitungen in Fußboden und Wandkonstruktionen - Teil 1. **In:** *HLH* 54 (2003), Nr. 6, S. 45–48
- [7] KREMONKE, A. ; RICHTER, W.: Grundlage für die weitere Novellierung der Wärmeschutzverordnung - Einbezug von Wärmepumpen und Blockheizkraftwerken (BHKW) in die Rechenmethode zur Ermittlung des Energiebedarfs Teil 1: Energetische Kennwerte von Heizungsanlagen für die Wärmeübergabe im Raum / TU Dresden Forschungsbericht. 1997. – Forschungsbericht
- [8] RECKNAGEL, H. ; SPRENGER, E. ; ALBERS, K. (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. München : 77. Auflage, R. Oldenbourg Verlag GmbH, 2015. – ISBN 978-3-8356-3301-8
- [9] SEIFERT, J.: *Ein Beitrag zur Einschätzung der energetischen und exergetischen Einsparpotentiale von Regelverfahren in der Heizungstechnik*. TUDpress Verlag Dresden, Habilitationsschrift, 2009. – ISBN 978 3 941298 54 5
- [10] SEIFERT, J. ; KNORR, M. ; MEINZENBACH, A.: Investigation of influencing factors for energetic evaluation of thermostatic valves / FGE - Forschungsinstitut für Gebäudeenergie-technik. 2014. – Forschungsbericht