

Jan Heider

Infrarot-Heizsysteme zur Wärmeversorgung

Untersuchungen zu Wirkungsweise und Effizienz



Universität Stuttgart

Universität Stuttgart
Fakultät 1 - Architektur und Stadtplanung
Institut für Baustofflehre, Bauphysik,
Gebäudetechnologie und Entwerfen

**H T
W
G**

Hochschule Konstanz
Technik, Wirtschaft und Gestaltung

Hochschule Konstanz (HTWG)
Fakultät - Architektur und Gestaltung
Fachgebiet Energieeffizientes Bauen

Infrarot-Heizsysteme zur Wärmeversorgung

Untersuchungen zu Wirkungsweise und Effizienz

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Jan Heider M.A.

aus Berlin

Hauptberichter: Prof. Dipl.-Ing. Jürgen Schreiber
Universität Stuttgart

Mitberichter: Prof. Dr.- Ing. Thomas Stark
HTWG Konstanz

Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2021

Institut für Baustofflehre, Bauphysik, Gebäudetechnologie und Entwerfen (IBBTE)
der Universität Stuttgart

Erscheinungsjahr 2022

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Liste der Abkürzungen	11
Zusammenfassung / Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 These	19
1.2 Stand der Forschung	21
1.3 Untersuchte Aspekte zum Thema Infrarotheizung	26
2 Methodik	29
2.1 Begleitforschung K76	30
2.1.1 Beschreibung Gebäude K76	30
2.1.2 Energiekonzept K76	31
2.1.3 Konzeption Begleitforschung K76	34
2.2 Laborräume Ehoch4	36
2.2.1 Beschreibung der Laborräume	37
2.2.2 Beschreibung der eingesetzten Wärmeerzeuger	39
2.2.3 Beschreibung der eingesetzten Messtechnik	43
2.3 Simulationen / Berechnungen	46
2.3.1 Eingesetzte Software zur Simulation / Energetischen Bilanzierung	46
2.3.2 Ökobilanzanalyse / LCA (Life Cycle Assessment) Betrachtung	47
2.3.3 Lebenszykluskostenberechnung / LCC (Life Cycle Costing) Betrachtung	48
3 Grundlagen	51
3.1 Grundlagen Infrarotheizung	51
3.1.1 Thermodynamische Grundlagen zur Infrarotstrahlung	51
3.1.2 Strahlungsleistung einer IR-Heizung	53
3.1.3 Strahlungswirkungsgrad einer IR-Heizung	54
3.1.4 Abstrahlverhalten und Strahlungsintensität über die Entfernung	55
3.1.5 Elektrische Widerstände in Infrarotheizungen	57
3.2 Thermische Behaglichkeit und operative Temperatur	59
3.2.1 PMV / PPD	59
3.2.2 Operative Temperatur	61
3.3 Energetische Bilanzierung von Wärmepumpen	63
3.3.1 Leistungszahl / COP	63
3.3.2 Jahresarbeitszahl JAZ	63

3.4 Grundlagen der Mess- und Regeltechnik	66
3.4.1 Messdatenerfassung	66
3.4.2 Sensoren - Temperaturmessung	67
3.4.3 Sensoren - Luftfeuchtemessung	73
3.4.4 Sensoren - Stromverbrauchsmessung	74
3.4.5 Sensoren - Wärmemengenzähler	74
3.4.6 Sensoren - Solare Einstrahlung	75
3.4.7 Regelungstechnik	76

4 Detailuntersuchungen zur Wirkungsweise und Effizienz von IR-Heizungen 79

4.1 Effizienzunterschiede IR-Heizung / Wärmepumpe im Betrieb unter Laborbedingungen	79
4.1.1 Messergebnisse Heizperiode 2017 / 2018	81
4.1.2 Interpretation der Messergebnisse Heizperiode 2017 / 2018	84
4.1.3 Messergebnisse Heizperiode 2018 / 2019	87
4.1.4 Interpretation der Messergebnisse Heizperiode 2018 / 2019	93
4.1.5 Berechnung der Effizienzunterschiede im Wärmeverbrauch	99
4.1.6 Hinweise zu den Messungen und Berechnungen	104
4.1.7 Fazit Vergleichsmessungen Laborräume	106
4.2 Rauminnenoberflächentemperatur bei IR-Heizungen	107
4.2.1 Untersuchungsergebnisse Laborräume Ehoch4	107
4.2.2 Untersuchungsergebnisse Begleitforschung K76	109
4.2.3 Fazit Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	109
4.3 Lufttemperatur bei IR-Heizung	111
4.3.1 Untersuchungsergebnisse Laborräume Ehoch4	111
4.3.2 Untersuchungsergebnisse Begleitforschung K76	112
4.3.3 Fazit Lufttemperaturen bei IR-Heizungen	112
4.4 Übergabeverluste bei IR-Heizungen	113
4.4.1 Erstellung Simulationsmodell / Validierung der Simulationen	114
4.4.2 Untersuchung der Übergabeverluste der IR-Heizung	126
4.4.3 Vergleich simulierte Übergabeverluste / Berechnung nach DIN 18599	127
4.4.4 Berechnungen der Laborräume nach DIN 18599	130
4.4.5 Mögliche Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen	132
4.4.6 Fazit Untersuchung der Übergabeverluste	135
4.5 Strahlungswirkungsgrad, Aufheizzeit und Abstrahlwinkel von IR-Heizungen	137
4.5.1 Strahlungswirkungsgrade verschiedener IR-Heizungen	137
4.5.2 Aufheizzeiten verschiedener IR-Heizungen	141
4.5.3 Einfluss von Strahlungswirkungsgrad und Aufheizzeit auf die Effizienz	142
4.5.4 Kriterien zur Optimierung einer IR-Heizung	143
4.5.5 Abstrahlwinkel einer plattenförmigen Infrarotheizung	144
4.5.6 Fazit Strahlungswirkungsgrad, Aufheizzeit und Abstrahlwinkel	147

5 Effizienz und Behaglichkeit von IR-Heizungen im realen Gebäudebetrieb 149

5.1 Effizienz der IR-Heizung im Wohngebäude K76	149
5.1.1 Messergebnisse K76 Heizperiode 2017 / 2018	149
5.1.2 Interpretation der Messergebnisse 2017 / 2018	151
5.1.3 Messergebnisse Heizperiode 2018 / 2019	153

5.1.4 Interpretation Messergebnisse 2018 / 2019	156
5.1.5 Lastkurven und Eigenverbrauchsrate im K76	158
5.1.6 Fazit Effizienz der IR-Heizung im Wohngebäude K76	161
5.2 Behaglichkeit der IR-Heizung im Wohngebäude K76	162
5.2.1 Fragestellungen zu Behaglichkeit und Bedienbarkeit von IR-Heizungen	162
5.2.2 Beschreibung der Untersuchungsmethode	162
5.2.3 Eingesetzte Messinstrumente	163
5.2.4 Ergebnisse der Befragung	163
5.2.5 Fazit Behaglichkeit K76	165
6 Ökologische und ökonomische Betrachtungen zum Projekt K76	167
6.1 Gesamtökologische Bewertung über 50 Jahre	167
6.1.1 Randbedingungen für die ökologische Bewertung	167
6.1.2 Ökologische Bewertung über 50 Jahre, IR-Variante ohne PV	168
6.1.3 Ökologische Bewertung über 50 Jahre, IR-Variante mit PV	169
6.1.4 Fazit ökologische Bewertung über über 50 Jahre	170
6.2 Ökonomische Bewertung der Energiekonzepte am K76 über 50 Jahre	171
6.2.1 Randbedingungen für die ökonomische Bewertung	171
6.2.2 Ökonomische Bewertung der Energiekonzepte, IR-Variante ohne PV	172
6.2.3 Ökonomische Bewertung der Energiekonzepte, IR-Variante mit PV	173
6.2.4 Ökonomische Bewertung Variante 600 m ² / 20kW	174
6.2.5 Fazit ökonomische Bewertung über 50 Jahre	175
7 Optimierung der Rahmenbedingungen für IR-Heizungen in der Planung	177
7.1 Vorteilhafte Rahmenbedingungen für IR-Heizungen	177
7.1.1 Parameterstudie veränderte Rahmenbedingung	177
7.1.2 Bewertung der Parameter nach wirtschaftlichen Auswirkungen	183
7.1.3 Bewertung der Parameter nach ökologischen Auswirkungen	184
7.1.4 Auswirkungen der Änderungen der Gebäudegröße	184
7.1.5 Zubau von Photovoltaik auch bei der Wärmepumpenvariante	186
7.1.6 Fazit Rahmenbedingungen für IR-Heizungen	187
7.2 Optimierung eines IR-Heizsystems durch PV, Regelung und Speicher	188
7.2.1 Optimierung mithilfe von Photovoltaik	188
7.2.2 Optimierung mithilfe einer optimierten Regelung	190
7.2.3 Optimierung mithilfe eines Stromspeichers	190
7.2.4 Mögliche Bilanzräume bei der Restenergiebezugsbetrachtung	190
7.2.5 Fazit Optimierung	191
8 Zusammenfassung / Weiterer Forschungsbedarf	192
8.1 Zusammenfassung	192
8.2 Weiterer Forschungsbedarf	193

Literaturverzeichnis	197
Abbildungsverzeichnis	203
Tabellenverzeichnis	209
Anhang	211

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule Konstanz im „Fachgebiet Energieeffizientes Bauen“ und in Kooperation mit der Universität Stuttgart, Herrn Prof. Dipl.-Ing. Jürgen Schreiber.

Das Dissertationsvorhaben war in das Forschungsprojekt „IR-Bau - Potenzial von Infrarotheizsystemen für hocheffiziente Wohngebäude“ (Aktenzeichen: SWD-10.08.18:7-17.11) mit Start zum 01.04.2017 eingegliedert. Das Projekt wurde im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ gefördert und unterstützt vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Es hatte zum Ziel, die Infrarotheizungstechnik ganzheitlich für den Einsatz im Bauwesen zu bewerten. Federführend wurde es von Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark, HTWG Konstanz, geleitet. Zusätzlich bestand das Projektteam aus Partnern aus Forschung, Industrie und Gewerbe.

Zur erfolgreichen Durchführung der Arbeit haben zahlreiche Personen beigetragen, bei denen ich mich herzlich bedanken möchte. Insbesondere danke ich:

- Herrn Professor Dipl.-Ing. Jürgen Schreiber für die Bereitschaft, mich als Doktorand aufzunehmen und zu betreuen.
- Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Stark für die Anregung zu dieser Arbeit und deren Betreuung sowie für die Möglichkeit zur Bearbeitung des Themas im Rahmen des Projekts „IR-Bau“ im Fachgebiet.
- Meinen/-r Kollegen/-in Aleksej Abduganiev, Nicole Conrad und Johannes Kimmerle, die mich bei der Umsetzung des Forschungsprojekts „IR-BAU“ unterstützt haben.
- Allen am Forschungsprojeket „IR-BAU“ beteiligten Forschungseinrichtungen, Firmen und Personen für deren wertvolle inhaltliche und materielle Unterstützung, ohne die die Durchführung nicht möglich gewesen wäre.
- Meinen Eltern für ihre Unterstützung.
- Lisa und unserer Tochter Leonie dafür, dass sie die Zeit während des Forschungsprojekts und der Doktorarbeit mit mir zusammen durchgestanden und mich unterstützt haben.

Liste der Abkürzungen

A/D Wandler:	Analog / Digital Wandler
E-FBH:	Elektrische Fußbodenheizung
FBH:	Fußbodenheizung
GWP:	Global warming potential
HP:	Heizperiode
IR:	Infrarot
JAZ:	Jahresarbeitszahl
KG:	Kostengruppe
LCC:	Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung)
LCA:	Life Cycle Costing (Lebenszykluskostenberechnung)
MP:	Messphase
PV:	Photovoltaik
PMV:	Predicted Mean Vote (Vorausgesagtes mittleres Votum)
PPD:	Predicted Percentage of Dissatisfied (Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen)
T1-T4:	Laborraum T1-T4
Uf:	U-Wert Fensterrahmen
Ug:	U-Wert Glas
VP:	Validierungsphase
WMZ:	Wärmemengenzähler
WRG:	Wärmerückgewinnung
WP:	Wärmepumpe

Zusammenfassung / Abstract

Gegenüber einer direkten Beheizung durch Strom können bei Wärmepumpensystemen Jahresarbeitszahlwerte zwischen 3 und 5 erzielt werden. Dies erfordert jedoch einen nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand. Demgegenüber bilden Infrarot-Heizelemente (IR-Heizung) im Raum die denkbar einfachste Art der Wärmeversorgung, jedoch mit höherem Strombedarf. Auch haben sich die Rahmenbedingungen zur Gebäudebeheizung in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert:

- Der Heizenergiebedarf für neu errichtete Gebäude ist dank Energieeinsparverordnungen und besserer Gebäudedämmung massiv gesunken.
- Durch die stark gesunkenen Kosten von Photovoltaikanlagen kann heute wirtschaftlich und langfristig Strom lokal am Gebäude regenerativ erzeugt werden.

Ein geringer Heizwärmebedarf trifft also mittlerweile auf eine wirtschaftliche und lokale regenerative Stromerzeugung. Insbesondere bei Gebäuden mit geringem Wärmeumsatz ist daher die Frage interessant, welche Potentiale Infrarot-Systeme für die Wärmeversorgung von Gebäuden haben.

Bisherige Studien zu IR-Heizungen haben bislang keine belastbaren Grundlagen für die Planung in der Baupraxis gebildet. Vor diesem Hintergrund wurde von der Hochschule Konstanz, Fachgebiet Energieeffizientes Bauen / Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark, das Forschungsprojekt „IR-Bau“ durchgeführt. Dieses wurde mit Mitteln des Innovationsprogramms „Zukunft Bau“ des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die wesentlichen Inhalte der vorliegenden Dissertation wurde im Rahmen dieses Projekts erarbeitet.

In der Untersuchung konnte mit Hilfe von vergleichenden Laborraummessungen aufgezeigt werden, dass im Hinblick auf die Wärmeübergabe das Infrarotheizungssystem gegenüber optimal ausgeführten und geregelten Fußbodenheizungssystemen circa 5 – 10 % Effizienzvorteil beim Nutzwärmebedarf hat. Gegenüber einer Fußbodenheizung in Kombination mit einer optimal ausgeführten Luft-Wärmepumpe, benötigt eine Infrarotheizung jedoch einen etwa dreifach höheren Endenergieverbrauch im Betrieb.

In der Begleitforschung des mit IR-Heizungen beheizten Mehrgeschosswohnungsbaus „K76“ mit 16 Wohneinheiten konnte gezeigt werden, dass die durch die EnEV-Berechnung prognostizierten Verbrauchswerte bereits in der zweiten Heizperiode erreicht wurden. Gleichzeitig stellte sich bei der begleitenden Nutzerbefragung heraus, dass die Bewohner das IR-Heizungssystem als behaglich und gut bedienbar empfinden.

Die Betrachtung im Rahmen einer Ökobilanzierung am Gebäude K76 über 50 Jahre ergab, dass die Herstellungsenergie für den CO₂ Bilanzvergleich zwischen Wärmepumpe und IR-Heizung nur geringe Relevanz hat. Der CO₂ Ausstoß bei einer IR-Heizung und Energiequelle Strom-Mix erweist sich als etwa doppelt so hoch wie der Ausstoß bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpen-Lösung. Um die ökologische Bilanz der IR-Heizung zu verbessern, muss der Anteil an regenerativ erzeugtem Strom, gegenüber dem Wärmepumpensystem drastisch erhöht werden.

Die Betrachtung im Rahmen der Lebenszykluskostenbilanzierung über 50 Jahre im Falle des Wohngebäudes K76 legt dar, dass ein Wärmepumpensystem, trotz deutlich höherer Anfangsinvestitionskosten, durch die geringeren Betriebskosten im Gesamten gegenüber einem IR-Heizsystem ohne PV-Anlage ökonomisch von Vorteil ist.

Wird jedoch die Differenz in den Anfangsinvestitionskosten genutzt, um bei der Infrarotheizung eine Photovoltaikanlage zuzubauen, erhält man ein System, das zu gleichen Anfangsinvestitionskosten zwar ineffizienter Wärme erzeugt, jedoch dafür eine große Menge regenerativ erzeugten Stroms produzieren kann. Diese lokal erzeugte Umweltenergie kann in Teilen direkt von der IR-Heizung genutzt werden. In Kombination mit einer Photovoltaikanlage können Infrarotheizungssysteme in kleinen und gut gedämmten Wohngebäuden so deutliche ökologische sowie ökonomische Vorteile gegenüber Wärmepumpensystemen aufweisen.

Ob der Einsatz von Infrarotheizungen zur Gebäudebeheizung sinnvoll ist, ist immer von den genauen projektspezifischen Rahmenbedingungen abhängig. Jedoch gilt: je kleiner und besser gedämmt, also je geringer der Wärmeumsatz eines Gebäudes ist, desto größer können die wirtschaftlichen Vorteile eines IR-Heizsystems gegenüber einem Wärmepumpensystem sein. Die Ausstattung von sehr gut gedämmten neu gebauten Ein- und Mehrfamilienhäusern mit IR-PV-Systemen kann so dazu beitragen, den Ausbau der regenerativ erzeugten Energie in Deutschland massiv voranzutreiben. Die finanzielle Belastung wäre für die Gebäudeeigentümer bei den Investitionskosten nicht höher und - über den gesamten Lebenszyklus gesehen - sogar geringer, als bei der Umstellung auf Wärmepumpensysteme.

Abstract

Compared to direct heating by electricity, JAZ values between 3 and 5 can be achieved with heat pump systems. However, this requires a considerable technical and financial effort. On the other hand, infrared heating elements (IR heating) are the simplest way of supplying heat in a room, but with a higher electricity requirement. The general conditions for heating buildings have also changed fundamentally in recent decades:

- The heating energy requirement for newly constructed buildings has fallen massively thanks to energy-saving regulations and better building insulation.
- Thanks to the greatly reduced costs of photovoltaic systems, electricity can now be generated economically and in the long term locally at the building in a regenerative way.

Thus, a low heating demand now meets an economic and local renewable electricity generation. Particularly in buildings with low heat turnover, the question of the potential of infrared systems for the heat supply of buildings is therefore interesting.

Previous studies on IR heating systems have not yet provided a sound basis for planning in construction practice. Against this background, the research project „IR Construction“ was carried out by Prof. Dr. Thomas Stark of the Energy Efficient Building Department at the University of Applied Sciences in Constance. The project was funded by the Innovation Programme Future Construction of the Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development. The present dissertation was written within the framework of this project.

In the project, comparative laboratory room measurements were used to show that the infrared heating system has an efficiency advantage of approx. 5 - 10 % in terms of useful heat demand compared to optimally designed and controlled underfloor heating systems. Compared to an underfloor heating system in combination with an optimally designed air heat pump, however, an

infrared heating system has an approx. three-fold higher power consumption during operation.

In the accompanying research of the multi-storey residential building K76 with 16 residential units heated with IR-heaters it could be shown that the consumption values predicted by the EnEV calculation were already met in the second heating period. At the same time, the accompanying user survey in K76 showed that the residents perceive the IR heating system as comfortable and easy to operate.

The ecological consideration over 50 years has shown that the grey energy has only little relevance for the CO₂ balance comparison between heat pump and IR heating. The CO₂ emission of a heating with IR-heaters and energy source electricity mix from the power grid is about twice as high as the emission of an air heat pump solution. In order to improve the ecological balance of IR-heating, the proportion of regeneratively produced electricity must be drastically increased when supplying the heating system.

The economic consideration over 50 years in the case of the K76 project shows that, despite significantly higher initial investment costs, a heat pump system is economically advantageous overall due to the lower operating costs compared to an IR heating system without a PV system.

If, however, the difference in the initial investment costs is used to add a photovoltaic system for infrared heating, a system is obtained that generates inefficient heat at the same initial investment costs, but can produce a large amount of renewable electricity. This locally generated environmental energy can be used in parts directly by the IR-heating system. In combination with a photovoltaic system, infrared heating systems can thus offer significant ecological and economic advantages over heat pump systems in small and well-insulated residential buildings.

The application limit of infrared heating systems always depends on the exact project-specific conditions. However, the smaller and better insulated, i.e. the lower the heat turnover of a house, the greater the economic advantages of an IR heating system can be compared to a heat pump system. The equipping of very well-insulated newly built single and multi-family houses with IR-PV systems can thus contribute to the massive expansion of regeneratively generated energy in Germany. The financial burden on building owners in terms of investment costs would not be any higher and over the entire life cycle would even be lower than when switching to heat pump systems.

1 Einleitung

In einer Mehrzahl der heute neu gebauten Gebäude mit hocheffizienten Energiekonzepten werden Wärmepumpen - und damit Strom als Energieträger für Wärmeerzeugung - verwendet. Dies lässt sich zum einen aus den im Rahmen der EffizienzhausPlus-Initiative realisierten Pilotprojekten ableiten, die zu über 80 % Wärmepumpen zur Wärmebereitstellung nutzen.¹ Zum anderen ermittelte das Statistische Landesamt Baden-Württemberg einen über 60% -igen Anteil von Wärmepumpen bei allen im Jahr 2018 neu gebauten Wohngebäuden im Land Baden-Württemberg.²

Wärmepumpen erreichen durch Nutzung der Umweltwärme eine hohe Effizienz bei der Wärmeerzeugung. Bei einer JAZ (Jahresarbeitszahl) von 3 - 5 können mit einem Teil Strom, 3 - 5 Teile Wärme erzeugt werden. Dieser Effizienzgewinn geht allerdings mit einem nicht unerheblichen materiellen und finanziellen Aufwand einher. Zudem erhöht sich mit steigender Effizienz oft auch die Komplexität des Systems und damit auch die Fehleranfälligkeit beim Zusammenspiel der Komponenten, wie:

- Wärmeerzeuger (Wärmepumpe)
- Wärmequellenerschließung (Erdsonde, Erdkollektor, Luftwärmetauscher, Eisspeicher, etc...)
- Wärmeverteilung wasserbasiert (Verteilleitungen, Pumpen, Ventile, Druckausgleichsgefäß)
- Wärmespeicherung (Pufferspeicher)
- Wärmeübergabe (Fußbodenheizung, Heizkreisverteiler)
- Regelung (Raumthermostate, Stellventile, WP-Regelung)
- Messdatenerfassung zur Überprüfung der Effizienz und der Abrechnung
- Haustechnikraum

Im Vergleich zu WP-Systemen ist das IR-Heizungssystem denkbar einfach:

- Wärmeerzeugung / Übergabe (IR-Heizung, Installation direkt durch Bewohner möglich)
- Regelung (Raumthermostat)

Durch die geringe Komplexität (Low-Tech) bietet die IR-Heizung gegenüber klassischen Wärmepumpenvarianten einige Vorteile, die sich positiv auf die ökologische und ökonomische Gesamtbilanz der IR-Heizung auswirken können:

- Vergleichsweise sehr geringe Anfangsinvestitionskosten
- Vergleichsweise sehr geringer Materialaufwand (graue Energie)
- Keine Leitungs- und Speicherverluste, kein Hilfsenergiebedarf
- Geringer Energieaufwand für Installation, Wartung, Instandhaltung und Entsorgung
- Geringe Störanfälligkeit (Resilienz)
- Lange Lebensdauer
- Einfache Umbau- / Nachrüstbarkeit
- Sehr flexible, schnelle und unmittelbare raum- oder zonenweise Kontrolle der Funktion und Leistung des Systems durch den Nutzer

¹ [Erhorn, Bergmann, 2015]

² [SLBW, 2019, S.9]

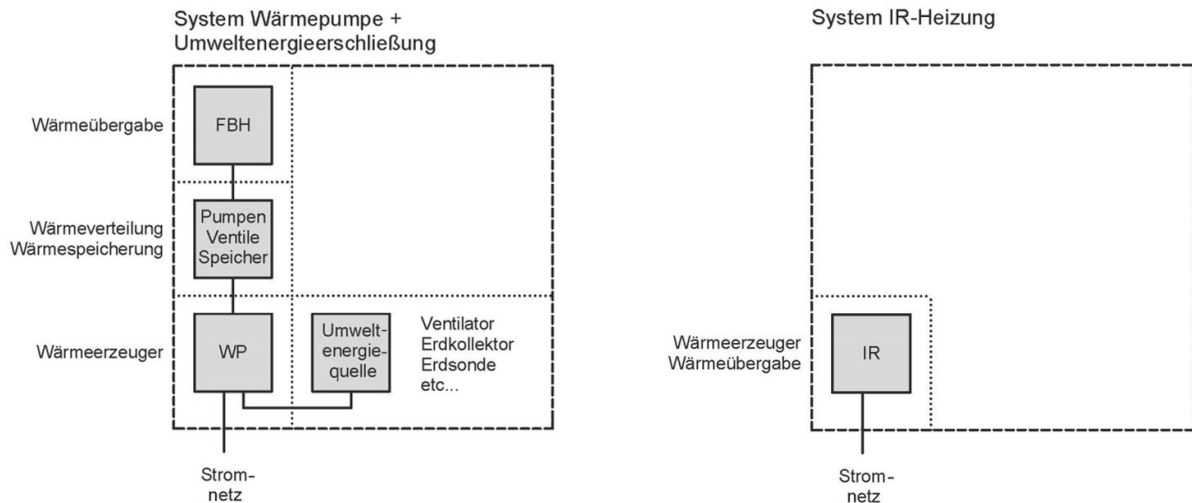


Abb. 1 Vergleich der notwendigen Systemkomponenten bei Wärmepumpen- und Infrarotheizungs-Systemen

Zusätzlich haben sich die Rahmenbedingungen bei der Gebäudebeheizung in den letzten Jahrzehnten grundlegend verändert:

- Der Heizenergiebedarf für neu errichtete Gebäude ist dank Energieeinsparverordnungen und damit einhergehender besserer Gebäudedämmung massiv gesunken.
- Durch die stark gesunkenen Kosten von Photovoltaikanlagen kann heute wirtschaftlich und langfristig Strom lokal am Gebäude regenerativ erzeugt werden.

Ein geringer Heizwärmebedarf trifft also mittlerweile auf eine wirtschaftliche und lokale regenerative Stromzeugung. Bei Wärmepumpensystemen stehen diesem gesunkenen Energieumsatz eine zunehmende Komplexität und zunehmende Kosten für Gebäudetechnik gegenüber. Daher ist insbesondere bei Gebäuden mit geringem Wärmeumsatz die Frage interessant, welche Potentiale einfache, kostengünstige Infrarot-Systeme - in Kombination mit lokaler Stromerzeugung über Photovoltaik - für die Wärmeversorgung von Gebäuden haben.

1.1 These

Die Grundthese der Arbeit besteht in folgender Annahme:

Infrarot-Heizsysteme können gegenüber konventionellen, konvektionsdominierten Heizsystemen auf wasserbasierten Verteil- und Übergabesystemen (im speziellen Wärmepumpensystemen) bei energetisch hocheffizienten Wohngebäuden Vorteile in ökonomischer und ökologischer Hinsicht aufweisen.

In ökonomischer Hinsicht bieten IR-Systeme aufgrund ihrer geringen Komplexität ein deutliches Einsparpotential bei den Anfangsinvestitionen. In Kombination mit Photovoltaikanlagen können IR-Heizungen zusätzlich direkt von den mittlerweile geringen Stromgestehungskosten der PV-Anlagen profitieren. Auf die Lebenszykluskosten eines Heizsystems können diese beiden Punkte somit positive Auswirkungen haben. Die Arbeit verfolgt die Absicht, zu klären, bis zu welcher Gebäudegröße und absolutem Energieumsatz IR-Systeme gegenüber wassergeführten Wärmepumpenanlagen wirtschaftlich von Vorteil sein können.

In ökologischer Hinsicht wirkt sich die geringe Komplexität des IR-Systems ebenso positiv aus. Bei energieeffizienten Wohngebäuden mit Wärmepumpen beträgt der Anteil der Gebäudetechnik an der gesamten Herstellungenergie des Gebäudes in der Regel über 20 Prozent.³ Hier lässt sich der Energieaufwand eines IR-Systems für Herstellung, Installation, Wartung und Entsorgung gegenüber einem Wärmepumpensystem erheblich reduzieren. Dies kann sich auf den sogenannten „grauen Energiebedarf“ in der ökologischen Bilanz auswirken. Ebenso kann die Kombination aus IR-Heizung und lokaler Stromerzeugung über eine PV-Anlage, zusammen mit einer auf Eigenverbrauch des lokal erzeugten Stroms optimierten Regelung, die ökologische Bilanz verbessern. Damit lässt sich eventuell der zu erwartende höhere Strombedarf der IR-Heizung gegenüber der Wärmepumpe kompensieren. Durch diese Arbeit soll hierfür eine verbesserte Datengrundlage geschaffen werden.

Weiterhin werden in Fachkreisen Wirkweisen diskutiert, die besagen, dass sich durch die strahlungsdominierte Form der Wärmeübergabe bei IR-Heizungen Effekte einstellen, die sich positiv auf den erforderlichen Nutzwärmebedarf und die Übergabeverluste auswirken und damit der Endenergieverbrauch gegenüber konvektionsdominierten Heizsystemen sinkt. Gründe hierfür können sein:

1. Verringerung der Wärmeverluste durch Konvektion

Die strahlungsdominierte Form der Wärmeübertragung bei der IR-Heizung soll dazu führen, dass in erster Linie die Oberflächen der raumumschließenden Bauteile erwärmt werden. Durch die erhöhten Oberflächentemperaturen kann die thermische Behaglichkeit bereits bei geringerer Lufttemperatur erreicht werden. Beim Lüften könnte daher, im Vergleich zu konvektionsdominierten Heizsystemen, weniger Energie beim Austausch der Raumluft mit der Außenluft verloren gehen.

2. Verringerung der Wärmeverluste durch Transmission

Das Erhöhen der Oberflächentemperaturen soll zu einer Verminderung der Feuchte in den bestrahlten Bauteilen führen. Dadurch könnte die Wärmeleitfähigkeit reduziert werden, was zu einer Verbesserung des U-Wertes der Wand führen könnte.

3. Verringerung der Übergabeverluste

Durch die gezielte Wärmeabgabe und die geringe Trägheit könnte das IR-System opti-

³ [von Euw, Alimpic, Hildebrand, 2012]

mal auf jegliche Art von solaren oder internen Wärmegewinnen reagieren. Die geringere Trägheit der Wärmeerzeuger würde dem Nutzer zudem die Möglichkeit geben, größeren Einfluss auf die Regelung der Heizung zu nehmen.

Die Untersuchung und Bewertung dieser Wirkweisen bildet die Basis, auf der alle weiteren Bewertungen zu Lebenszykluskosten und Ökobilanz erst aufbauen können.

Infrartheizungen sind bereits seit Jahren am Markt verfügbar und es gibt zahlreiche Hersteller, die eine breite Palette an Produkten anbieten. Die Heizungen einiger Hersteller lassen sich sogar direkt im Baumarkt vor Ort vom Endkunden kaufen. Der Einbau und Betrieb der Heizungen kann sich so jeglicher fachlichen Kontrolle entziehen. Damit es hier in Zukunft keine ökologischen und ökonomischen Fehlentwicklungen gibt, bedarf es einer objektiven Auseinandersetzung mit dem Thema mit dem Ziel, allen am Bau Beteiligten aufzuzeigen, ob und wie der Einsatz der IR-Heizungen ein sinnvoller Baustein für die anstehende Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien sein kann.

1.2 Stand der Forschung

In der Vergangenheit wurden bereits in mehreren Studien Behaglichkeit und Effizienz von IR-Systemen untersucht und Vergleiche zu Wärmepumpensystemen angestellt. Nachfolgend werden die Studien kurz vorgestellt und es wird zusammenfassend dargestellt, inwieweit die Arbeiten zur Beantwortung der aufgestellten These hilfreich sind bzw. warum sie die Fragestellung nicht ausreichend beantworten.

2006 / „Infra-Heat“ - Gutachten über die thermische Behaglichkeit in Wohnräumen hinsichtlich elektrischer Heizflächen ⁴

In dem Gutachten für die Firma „Infra-Heat“, einem Hersteller von IR-Heizungssystemen, werden vier verschiedene IR-Heizungsmodelle der Firma hinsichtlich ihrer thermischen Behaglichkeit untersucht: Heizbild, Keramikheizung, Keramik-Standheizung und Heizspiegel. Anhand eines selbstentwickelten Simulationstools werden in einem Standardraum die Strahlungsasymmetrien (als Indikator der Behaglichkeit) für verschiedene Positionen der IR-Elemente im Raum berechnet. Das Gutachten kommt zu dem Ergebnis, dass eine behagliche Wärmeversorgung eines Raums mit IR-Heizelementen möglich ist. Es werden unter anderem folgende Empfehlungen gegeben: Die Heizflächen sollten gleichmäßig im Raum verteilt werden. Optimal ist eine Positionierung unmittelbar neben einem Fenster. Die Temperatur der Heizfläche sollte 80 °C nicht überschreiten.

Das Gutachten gibt gute Hinweise zur Positionierung von IR-Heizungen. Es trifft aber keine Aussage zur Effizienz von IR-Systemen gegenüber anderen Heizungssystemen nach Stand der Technik. Sämtliche Aussagen werden aus den Berechnungen eines selbst erstellten Berechnungstools abgeleitet und nicht aus tatsächlichen Messungen. Da das Gutachten von einer Firma beauftragt wurde, die selbst IR-Heizungen herstellt, ist eine Neutralität der Ergebnisse nicht gewährleistet.

2009 / Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich ⁵

In dem einjährigen Projekt der TU Kaiserslautern in der Heizperiode 2008/09 wurde in einem zweigeschossigen Wohnhaus aus dem Baujahr 1930 die untere Wohnung (102 m²) mit IR-Heizkörpern ausgestattet. Die obere Wohnung (160 m²) wurde mit der bestehenden Niedertemperatur-Gasheizung beheizt. Von Mitte November 2008 bis Ende April 09 wurden die Endenergieverbräuche für die Beheizung in beiden Wohnungen gemessen. Nach Ende der Messungen konnte ein Verbrauch von 71 kWh/m² in der unteren Wohnung und 208 kWh/m² in der oberen Wohnung ermittelt werden. Die drastischen Unterschiede im Verbrauch von Gas- zu IR-Heizung wurden auf die geringeren Übertragungs- und Verteilverluste der IR-Heizung und Effekte wie geringere Lüftungsverluste durch niedrigere Raumlufttemperatur sowie geringere Transmissionswärmeverluste durch trockenere Wände zurückgeführt. Abschließend wurden die beiden Varianten hinsichtlich ihrer ökonomischen, ökologischen und physiologischen Eigenschaften miteinander verglichen.

Die Studie kommt auf Grundlage der gemessenen Verbräuche zu dem Ergebnis, „dass die Infrarotheizung eine sinnvolle Alternative zu herkömmlichen Heizsystemen darstellt“. Sie

⁴ [Gräf, 2006]

⁵ [Kosack, 2009]

bemängelt, dass die EnEV die IR-Heizungen bislang wie normale Elektrodirektheizungen behandelt, ohne ihre spezifischen Effizienzvorteile zu berücksichtigen.

Die Studie bietet eine sehr gute Einführung in das Thema der IR-Heizungen. Ob der gewählte Versuchsaufbau in der Lage ist, die Unterschiede zwischen Gas- und IR-Heizung tatsächlich genau abzubilden, ist jedoch fraglich. Die untere Wohnung sollte - schon alleine durch ihre Lage im Haus (weniger Hüllflächen gegen Außenluft) und ihres A/V-Verhältnisses - im Vergleich zur oberen Wohnung einen geringeren Jahresheizwärmebedarf aufweisen. Auch kann nicht garantiert werden, dass das Nutzerverhalten tatsächlich in beiden Wohnungen gleich war. Wie es sich mit den Unterschieden bei den solaren Gewinnen und den internen Wärmequellen verhält, lässt sich aus der Studie auch nicht ablesen. Außerdem spiegelt der Vergleich IR- / Gasheizung nicht den aktuellen Stand der Technik wieder. Ein WP-System wäre z.B. bei gleichem Versuchsaufbau im Endenergieverbrauch deutlich effizienter als die Variante mit Gas. Um also eine Aussage darüber treffen zu können, ob eine IR-Heizung für die zukünftige Wärmeversorgung von Wohngebäuden sinnvoll ist, sollte sie mit der Technik verglichen werden, die aktuell den besten Kosten- / Effizienzgewinn verspricht.

2010 / Redwell Vergleichsstudie 2010 - Redwell Infrarot-Heizgeräte im Vergleich zu konventionellen Heizgeräten ⁶

Die Vergleichsstudie wurde von der Firma Redwell 2009 in Auftrag gegeben und vom Labor für „Wärmeübertragung und Umwelttechnik“ der Fakultät Maschinenbauwesen an der Aristotelischen Universität Thessaloniki bearbeitet. Die Studie soll die Vorteile von IR-Systemen von Redwell gegenüber anderen gängigen Systemen zur Gebäudebeheizung darstellen. Auf Basis der EnEV 2009 wurde nach DIN 4108 ein fiktives Gebäude in Frankfurt a/M in Varianten mit verschiedenen Heizungssystemen simuliert und die Varianten anschließend miteinander bezüglich Primärenergie, Wirtschaftlichkeit und Behaglichkeit verglichen. Resümee der Verfasser: „Die Studie zeigt klar auf, dass Redwell Infrarot-Heizgeräte sämtlichen sonstigen Heizsystemen wie Elektrischen Direktheizungen, Öl- und Gasheizungen und Luft- /Wasser-Wärmepumpen unter Berücksichtigung aller wirtschaftlichen, ökologischen und ökonomischen Aspekte eindeutig überlegen sind.“ ⁷

In der Studie wurden lediglich Simulationen durchgeführt. Die für die Simulationen verwendeten Kennwerte beruhen dabei auf Annahmen, zu denen keinerlei Nachweise durch tatsächliche Messergebnisse geliefert werden. Da die Studie von einer Firma beauftragt wurde, die selbst IR-Heizungen herstellt, ist eine Neutralität der Ergebnisse nicht gewährleistet.

2011 / Vergleich Energieeffizienz: Infrarot-Heizung vs. Wärmepumpen-Heizung ⁸

Die Studie der Hochschule Luzern untersucht den Unterschied im Nutz-, End- und Primärenergieverbrauch zwischen einem WP- und IR-System anhand von Simulationen mit dem dynamischen Simulationsprogramm IDA-ICE 4.0. Grundlage bildet dabei ein Wohnhaus in Kreuzlingen TG / CH. Es wird in einer unsanierten (1960) und einer sanierten Variante (2010) untersucht. Im Detail werden die Einflüsse von Regelstrategie, Wärmeabgabesystem, Raumtemperaturabsenkung und thermischer Speicherfähigkeit des Gebäudes untersucht und verglichen. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die genannten Einflüsse minimale

⁶ [Papadopoulos, 2010]

⁷ [Papadopoulos, 2010, S.22]

⁸ [Klauz, Plüss, Menti, 2011]

bis keine Unterschiede bei den verschiedenen Heizungssystemen bewirken. Lediglich der Nutzenergiebedarf der IR-Heizung lässt sich aufgrund der niedrigeren Raumlufttemperatur und der wegfallenden Leitungsverluste beim Einsatz von IR-Heizungen um circa 5 % reduzieren. Beim End- / Primärenergieverbrauch liegt die IR-Heizung der Studie nach circa 60% über der WP-Variante.

Die Studie basiert auf sehr detaillierten Simulationsberechnungen. Jedoch bildet sie die Realität damit nur in der Art ab, wie wir sie kennen. Eventuelle Effekte (reduzierter Energiebedarf beim Lüften durch niedrigere Raumtemperatur, Verbesserung der thermischen Hüllqualität durch Reduzierung der Bauteilfeuchte) können hier nicht umfassend abgebildet werden.

2014 / „smartEXT“ - Erweiterung der Einsatzgrenzen bewährter Passivhaustechnik ⁹

Die Firma „Drexler und Weiss“ ist ein österreichischer Hersteller von Wärmepumpen, die unter anderem für den Einsatz in Passivhäusern konzipiert sind. Da bei Passivhäusern die Heizlast bei maximal 10 W/m² liegen sollte, um das Gebäude auf Grundlage des hygienisch notwendigen Luftwechsels über die Zuluft mit Wärme zu versorgen, ergibt sich damit eine Einsatzgrenze für Lüftungskompaktgeräte von D&W. Um den Einsatzbereich der Geräte zu erweitern, untersuchte der Hersteller in der Studie eine Kombination aus zentralem Lüftungskompaktgerät zur „Grundlastabdeckung“ der Raumwärme auf 19 °C und dezentralen IR-Elementen zur „Spitzenlastabdeckung“. In der Studie wurden drei Passivhaus-Reihen Häuser auf dem ehemaligen Werksgelände von D&W mit den technischen Komponenten ausgestattet und anschließend vermessen. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass eine Kombination der beiden Systeme bei diszipliniertem Nutzerverhalten zu einer Effizienzsteigerung gegenüber einer reinen Wärmepumpenlösung führt. Die Strahlungswärme wurde jedoch von den Nutzern im Bad (beheizter Spiegel) teilweise als unangenehm empfunden.

Die Studie zeigt eine interessante Kombinationsmöglichkeit der IR- mit WP-Technik auf. Es ist jedoch fraglich, ob es wirtschaftlich sinnvoll ist, zwei Systeme zur Raumbeheizung in ein hochgedämmtes Passivhaus zu integrieren. Zur Klärung der Frage, ob die IR-Heizung alleine eine sinnvolle Möglichkeit darstellt Wohngebäude zu beheizen, trägt die Studie nicht bei.

2015 / Ökonomische und ökologische Lebenszyklusanalyse eines Plus-Energie-Gebäudes mit elektrischem Beheizungssystem ¹⁰

Grundlage für diese Untersuchung der TU Darmstadt bildet das energetische Monitoring eines im Jahr 2012 in Lüneburg errichteten Einfamilienhauses (130 m²) in Passivhausbauweise, das mit IR-Heizungen und Direktdurchlauferhitzern mit Wärme versorgt wird. Es wurde eine Ökobilanzierung (LCA) und Lebenszykluskostenrechnung (LCC) nach DGNB für das oben genannte Haus in zwei Varianten (IR-Heizung / WP) erstellt. Zusätzlich wurden die Auswirkungen auf LCA und LCC bei Einsatz einer PV-Anlage untersucht und der Unterschied in der Baukonstruktion - Holzbau gegenüber Massivbau - verglichen. Die Untersuchung kommt zu dem Ergebnis, dass eine IR-Heizung im untersuchten Fall wirtschaftliche Vorteile bietet. Ökologisch ist jedoch die Wärmepumpenlösung von Vorteil.

Die Untersuchung bietet einen weit gefassten Ansatz zur Beantwortung der aufgestellten These. Sowohl das Monitoring eines realen Projektes, als auch die Betrachtung der Ökobi-

9 [Drexel, Eberle, Kaltheier, 2014]

10 [Weißmann, Graubner, 2015]

lanz und der Lebenszykluskosten folgen in weiten Teilen den auch in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungsansätzen. Der größte Unterschied zur vorliegenden Arbeit besteht jedoch darin, dass zwar die IR-Heizungsdaten gemessen wurden, die Wärmepumpen-Daten dazu aber „nur“ berechnet wurden. Eine tatsächliche Vergleichsmessung zur Ermittlung der genauen Effizienzunterschiede wurde nicht durchgeführt. Diese Kernuntersuchung ist jedoch notwendig, um die tatsächlichen Effizienzunterschiede der zwei Systeme ermitteln und darauf aufbauend die ökologische und ökonomische Effizienz vergleichen zu können.

2018 / „InfraMess“, Begleituntersuchung für ein Infrarot-Heizsystem und ein fernwärmebasiertes Radiatorensystem, Wohnanlage Kaindorf a.d. Sulm ¹¹

In der Begleituntersuchung, durchgeführt von „AEE INTEC“ und beauftragt durch das „Amt der Steiermärkischen Landesregierung - FA Energie und Wohnbau“, wurden zwei annähernd identische Wohngebäude mit jeweils sechs Wohneinheiten mit einer Gesamtwohnfläche von je 438 m² über eine Heizperiode messtechnisch begleitet. Der berechnete Jahresheizwärmebedarf beider Gebäude liegt bei 28 kWh/m². Ein Gebäude wurde dabei mit IR-Heizungen, dezentralen Elektro-Warmwasserspeichern und einer PV-Anlage mit Wärme versorgt. Das zweite wurde über einen Fernwärmeanschluss in Kombination mit Radiatoren und Warmwasserspeichern mit Wärme versorgt. Die beiden Gebäude wurden hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Effizienz, Umweltauswirkungen und Behaglichkeit miteinander verglichen. Für den Vergleich der Behaglichkeit wurden Nutzerbefragungen und detaillierte Messungen und Simulationen durchgeführt.

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die IR-/ PV-Variante minimal wirtschaftlicher ist als die Fernwärme-Variante. Beim Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser schneidet die IR-/ PV-Variante deutlich besser ab. Da die Fernwärme in dem untersuchten Fall jedoch aus Biomasse (Holz) gewonnen wird, wird der Primärenergiebedarf und der CO₂ Ausstoß der Fernwärme-Variante deutlich besser bewertet. Auch die Behaglichkeit der Fernwärme-Variante wird von den Nutzern deutlich besser bewertet als die der IR-Heizungsvariante.

Da die Wohnungen in beiden Varianten deutlich unterschiedlich belegt waren - 12 Personen in dem mit Fernwärme beheizten Gebäude / 8 Personen in dem mit IR-Heizung beheizten Gebäude - und auch die Anwesenheiten der Bewohner deutlich verschieden waren, ist der energetische Vergleich der beiden Systeme in der Studie nur bedingt aussagekräftig und nicht auf andere Gebäude übertragbar. Der Vergleich eines IR-/ PV-Systems mit einer Fernwärmeversorgung mit Holz als Energieträger ist eine Möglichkeit. Auf die breite Anwendung gesehen ist dies jedoch eher ein Spezialfall, der nicht immer und überall zum Einsatz kommen kann. Auf eventuelle Vorteile der IR-Heizung bei der Wärmeübergabe an den Raum wurde in der Studie nicht eingegangen.

2019 / Energetische Effizienz und Wirtschaftlichkeit der elektrischen Direktheizung ¹²

Das Gutachten wurde vom „Bundesverband Flächenheizungen und Flächenkühlungen e.V.“ in Auftrag gegeben und vom „Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH“ erstellt. Das Gutachten hat zum Ziel aufzuzeigen, dass Elektrodirektheizungen in Kombination mit lokal installierten PV-Anlagen in gut gedämmten

¹¹ [Rüdiger et al., 2018]

¹² [Winiewska, Mailach, Oschatz, 2019]

Gebäuden eine sinnvolle Alternative zu Gasbrennwertkesseln oder Wärmepumpensystemen sein können. Dies vor dem Hintergrund, dass in einer ersten Fassung des GEG die Anrechenbarkeit von PV-Strom bei Elektrodirektheizungen untersagt werden sollte. Das Gutachten kommt zu dem Schluss, dass Gebäude mit einem System aus Elektrodirektheizung und PV-Anlage die EnEV einhalten und sogar deutlich unterschreiten können. In den Vergleichsrechnungen des Gutachtens wird gezeigt, dass solare Systeme auch ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber anderen gängigen Systemen zur Wärmeerzeugung haben können. Es wird empfohlen, die Anrechenbarkeit von PV-Strom bei Elektrodirektheizungen zuzulassen.

Das Gutachten behandelt Elektrodirektheizungen im Allgemeinen, nicht aber die systembedingten Eigenschaften von IR-Heizungen. Es werden allein Berechnungen auf Grundlage der DIN 18599 durchgeführt, jedoch keine Messungen. Bei den vorgenommenen Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden bei der Elektrodirektheizung nicht die vollen Differenzkosten in den Anfangsinvestitionen in den Ausbau einer PV-Anlage investiert. Das Gutachten zeigt grundlegend, dass eine Wärmeversorgung mit Elektrodirektheizungen in gut gedämmten Gebäuden sinnvoll sein kann.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Studien bislang:

- entweder spezifische Komponenten einzelner Hersteller betrachten,
- bei Messungen keine wirklich vergleichbaren Untersuchungsräume aufweisen, die ausschließen, dass Unterschiede bei den Messungen nicht auch durch andere Ursachen zu begründen wären,
- sich auf Simulationen stützen, die Kennwerte zur Grundlage haben, die nicht durch reale Messungen validiert wurden,
- Elektroheizungen nur im Allgemeinen behandeln.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen lassen daher zahlreiche Fragen offen, deren Beantwortung für eine detaillierte objektive Bewertung von Infrarotheizungssystemen erforderlich sind. Keine der Studien hat bislang die speziellen Eigenschaften von IR-Heizungen im Hinblick auf ihre eventuellen Effizienzvorteile durch die strahlungsdominierte Wärmeübertragung messtechnisch untersucht. Auch eine reale Vergleichsmessung der energetischen Effizienz im Betrieb zwischen IR-Heizung und Wärmepumpensystem unter Laborbedingungen - und damit tatsächlich vergleichbaren bauphysikalischen Randbedingungen - wurde bislang noch nicht durchgeführt.

Diese beiden Punkte sind jedoch als Ausgangsbasis für alle weitergehenden Berechnungen der ökologischen und ökonomischen Effizienz der IR-Heizungen im Vergleich zu anderen Wärmeversorgern erforderlich. Mit der vorliegenden Arbeit wird somit eine wichtige Wissenslücke geschlossen, um die Potentiale von IR-Heizungen bewerten zu können. Damit wird auch eine belastbare Basis für die Planung und Umsetzung von IR-Systemen in der Baupraxis geschaffen.

1.3 Untersuchte Aspekte zum Thema Infrarotheizung

Ausgehend von der beschriebenen These und den ergänzenden Forschungsfragen werden folgende Aspekte zum Thema Infrarotheizung in der Arbeit untersucht:

Detailuntersuchungen zu Wirkweise und Effizienz von IR-Heizungen

- Wie groß ist die effektive Differenz des Strombedarfs im Betrieb für die Wärmeversorgung von Räumen im realen Betrieb inklusive Hilfsenergie zwischen A: Infrarotheizsystem, B: Integriertem Direktstrom-Heizelement (Niedertemperatur) und C: Luftwärmepumpe und Fußbodenheizung im Nassestrich?
- Welche effektiven Rauminnenoberflächentemperaturen stellen sich im Betrieb bei IR-Heizsystemen ein?
- Welche Reduktion der Lufttemperatur lässt sich durch erhöhte Oberflächentemperaturen bei Infrarot-Heizelementen realisieren, um dieselben operativen Temperaturen zu erreichen?
- Welche effektiven Übergabeverluste können bei Infrarotheizungen zur Berechnung angesetzt werden?
- Welche Bedeutung hat der Strahlungswirkungsgrad und die Aufheizzeit einer IR-Heizung für die Effizienz eines IR-Heizsystems und wie hoch ist der Strahlungswirkungsgrad bei IR-Modulen?

Effizienz und Behaglichkeit von IR-Heizungen im realen Gebäudebetrieb

- Welche Verbrauchswerte bei der Endenergie ergeben sich für die IR-Heizung in einem realen Gebäudebetrieb in der Jahresbilanz?
- Wie wird die Behaglichkeit einer IR-Heizung im realen Betrieb bewertet?

Ökologischer und ökonomischer Vergleich IR-Heizung / Wärmepumpe

- Wie stellt sich der Vergleich der **ökologischen** Bewertung in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für Herstellung, Instandhaltung und Betrieb dar?
- Wie stellt sich der Vergleich der **ökonomischen** Bewertung in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für Herstellung, Instandhaltung und Betrieb dar?

Optimierung der Rahmenbedingungen für IR-Heizungen in der Baupraxis

- Bei welchen Randbedingungen bezüglich spezifischem Heizwärmebedarf, Gesamtwärmeumsatz und Stromkosten können IR-Heizsysteme Vorteile aufweisen?
- Wie lässt sich das Infrarot-Heizsystem durch Einbindung von Photovoltaiksystemen und dezentralen Stromspeichern in ökologischer und ökonomischer Hinsicht optimieren?

2 Methodik

Die Fragestellungen wurden mit Hilfe von drei wissenschaftlichen Methoden bearbeitet, die parallel über den gesamten Zeitraum der Arbeit angewandt wurden:

- **Begleitforschung:** Im ersten Forschungsstrang erfolgte die wissenschaftliche Begleitung eines Pilotprojekts über zwei Heizperioden mit messtechnischer Auswertung und Nutzerbefragung zur Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit (Geschosswohnungsbau K76 mit IR-Heizung, Darmstadt).
- **Messungen im Labor:** Im zweiten Forschungsstrang wurden unter Laborbedingungen anhand von definierten, bauphysikalisch identischen Testräumen ein WP- und ein IR-System im Realbetrieb verglichen und weitere Messungen zu spezifischen Fragestellungen bezüglich IR-Heizung durchgeführt (Laborräume auf dem Gelände der Ehoch4 GmbH in der Nähe von Mengen / Hohentengen).
- **Simulationen / Berechnungen:** Im dritten Forschungsstrang wurden in Simulationsmodellen sowohl das Gebäude K76 als auch die Testräume abgebildet. Anhand der Messungen wurden diese Modelle mit empirischen Daten abgeglichen und so validiert. Auf dieser Grundlage konnten weitere mögliche Szenarien untersucht sowie Lebenszykluskosten und Ökobilanz berechnet werden.

Nachfolgend werden die Untersuchungsmethoden genauer beschrieben.

2.1 Begleitforschung K76

Das Gebäude K76 wurde von „werk.um architekten“ aus Darmstadt als „Direktstromgebäude“ geplant und 2017 fertiggestellt. Die Beheizung erfolgt über Infrartheizungen, das Trinkwarmwasser wird über dezentrale wohnungsweise Direktdurchlauferhitzer erwärmt, jede der 16 Wohnungen verfügt über eine dezentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, auf dem Dach befindet sich eine 36,2 kWp PV-Anlage.

Da auch von Seiten der Bewohner ein großes Interesse vorhanden war, zu überprüfen, ob das Direktstromkonzept aus ökonomischer, ökologischer und aus Sicht der Behaglichkeit sinnvoll ist, bot sich die Möglichkeit, das Gebäude über zwei Heizperioden messtechnisch zu begleiten und auszuwerten. Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht darüber, welche Fragestellungen am Gebäude K76 im laufenden Betrieb untersucht werden konnten:

Untersuchte Aspekte zum Thema IR-Heizung	Pilotprojekt K76	Laborräume Ehoch4	Simula- tionen
Detailuntersuchungen zu Wirkweise und Effizienz			
Stromverbrauchsdifferenzen im realen Betrieb		x	x
Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	x	x	
Verhalten der Lufttemperatur bei IR-Heizungen	x	x	
Übergabeverluste bei IR-Heizungen			x
Strahlungswirkungsgrad von IR-Heizungen		x	
Effizienz und Behaglichkeit im realen Gebäudebetrieb			
Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude	x		
Bewertung der Behaglichkeit im realen Wohngebäude	x		
Ökologischer und ökonomischer Vergleich			
Gesamt ökologische Bewertung über 50 Jahre (LCC)			x
Gesamt ökonomische Bewertung über 50 Jahre (LCA)			x
Optimierung der Rahmenbedingungen			
Vorteilhafte Randbedingungen für IR-Heizsysteme			x
Optimierung eines IR-Heizsystems durch PV und Speicher	x		x

Tabelle 1 Fragestellungen Forschungsstrang wissenschaftliche Begleitforschung K76

Im Folgenden werden das Gebäude, dessen Energiekonzept und die Konzeption der Begleitforschung genauer beschrieben.

2.1.1 Beschreibung Gebäude K76

Das Mehrfamilienhaus K76 befindet sich am südöstlichen Rand der Innenstadt von Darmstadt. Bauherr ist die „Baugenossenschaft K76“. Die Planung und Umsetzung wurde von „werk.um architekten“ aus Darmstadt übernommen, fertiggestellt wurde das Haus im Sommer 2017. Es ersetzt, im Sinne der Nachverdichtung, ein Wohnhaus mit zwei Wohneinheiten aus den 1960er Jahren. Das neue Gebäude hat vier Geschosse und ist teilweise unterkellert. Es bietet auf ca. 1360 m² Wohnfläche Platz für etwa 40 Bewohner in 15 Wohneinheiten zwischen 50 und 120 m². Zusätzlich gibt es eine Gemeinschaftswohnung, die von allen Bewohnern des Hauses genutzt

werden kann. Die L-förmige Struktur des Gebäudes bildet einen kleinen Innenhof. Das Gebäude wird über ein innenliegendes Treppenhaus mit Aufzug und eine außenliegende einläufige Treppe an den Laubengängen (3,70 m Breite) auf der Nordseite erschlossen. Durch die Größe der Laubengänge ergibt sich dabei eine Begegnungsfläche vor den Wohnungseingängen zum Austausch zwischen den Bewohnern. Gleichzeitig erhalten alle Wohnungen über die Laubengänge Zugang zu dem im Osten angrenzenden Garten.



Abb. 2 Süd / West Ansicht K76

2.1.2 Energiekonzept K76

Der Baugenossenschaft war es wichtig, ein Gebäude mit einem einfachen und resilienten Gebäudetechniksystem zu erstellen. Das System sollte einen geringen Materialaufwand und Platzbedarf haben, dezentral, wartungsarm, flexibel und langlebig sein und jedem Bewohner maximale Kontrolle über seine Verbräuche ermöglichen.

Für die Wärmeversorgung fiel daher die Wahl auf ein dezentrales Infrarotheizungssystem. Je nach Größe der Wohnung wurden IR-Module der Firma Vitramo mit insgesamt 2,2 – 3,7 kW Heizleistung installiert. Die einzelnen Module haben eine Leistung von 550 Watt und sind Aufputz an der Decke montiert. Sie erreichen eine Oberflächentemperatur von maximal 180 °C. Über ein raumweise angebrachtes Thermostat kann die Raumtemperatur flexibel geregelt werden. Neben dem Anschluss der Module an die Thermostate und an das Wohnungsstromnetz war für den Betrieb der Heizungen keine weitere Infrastruktur nötig. Die Abrechnung erfolgt über den Wohnungstromzähler im Keller. Die Investitionskosten sowie der Aufwand an grauer Energie für Heizraum, zentralen Wärmeerzeuger, Wärmequellenerschließung, Pufferspeicher, Pumpen, Ventile, Leitungen samt Leitungsdämmung, Wärmemengenzähler und dessen Ablesung, Heizkreisverteiler, Fußbodenheizung und Heizestrich entfielen somit.

Für große Wohnungen (ab 120 m² und Anschlussleistung > 16 A) braucht es nach Vorgabe der Bundesnetzagentur ein Lastabwurfrelais. Um dies zu vermeiden, hätte eine separate Zuleitung

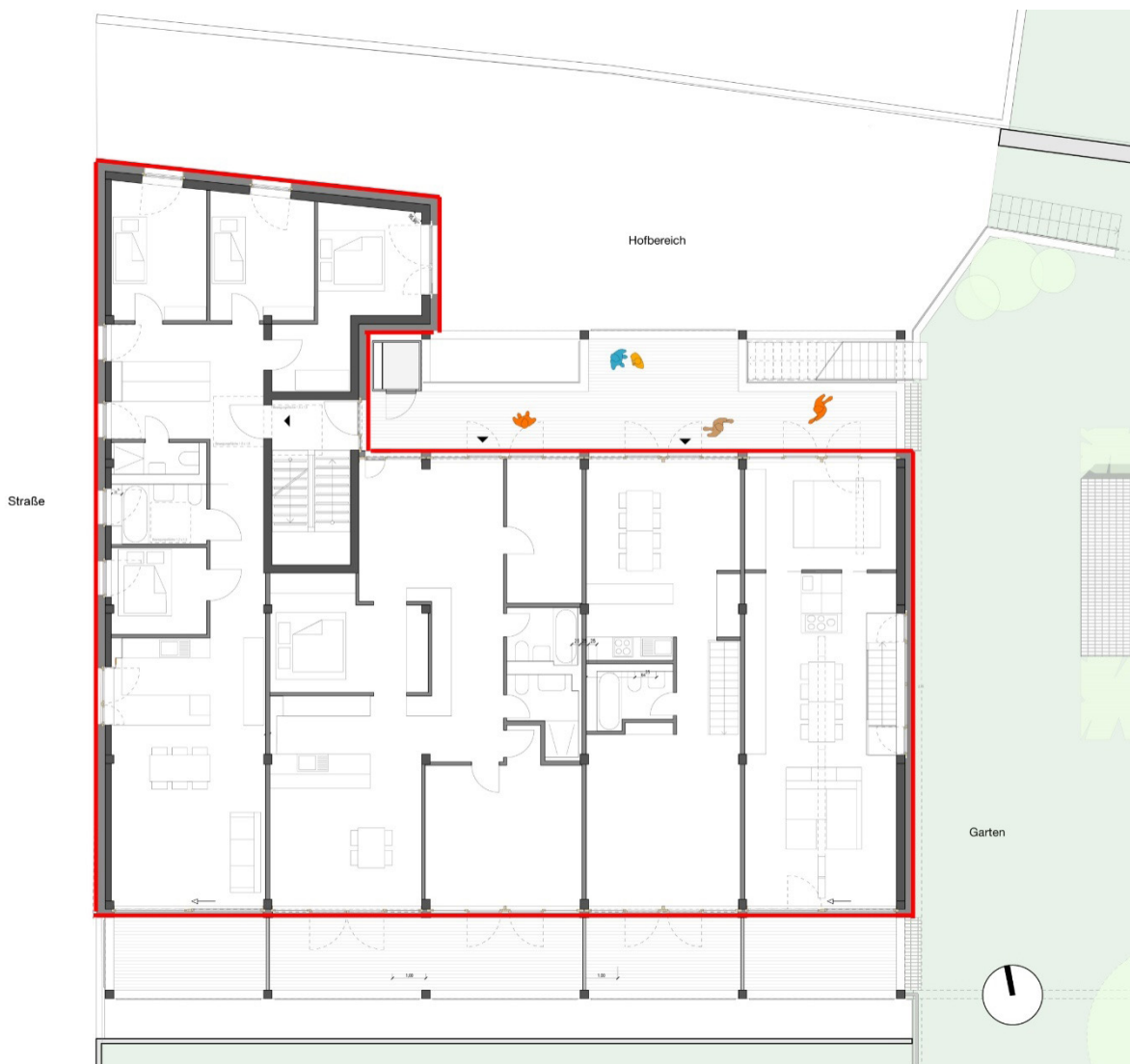


Abb. 3 Grundriss K76, thermische Hülle ¹³

für die IR-Heizung gelegt werden müssen. In künftigen Projekten wäre dieses Vorgehen zu bevorzugen.

Die Warmwasserbereitung erfolgt dezentral und wohnungsweise über Durchlauferhitzer mit 21 kW Leistung von Stiebel Eltron. In einzelnen Wohnungen werden diese durch 5 Liter fassende Warmwasserboiler in den Küchen unterstützt. Somit entfallen auch hier ein zentraler Warmwasserspeicher und alle Leitungen inklusive deren Dämmung sowie Verluste, die durch Speicherung, Verteilung und Zirkulationsleitungen entstehen würden. Der Stromverbrauch für die Warmwassererzeugung wird wieder vom Wohnungsstromzähler erfasst und direkt über den Stromanbieter abgerechnet. Der Abrechnungsaufwand reduziert sich somit auf das Ablesen der Kaltwasserverbräuche. Maßnahmen gegen Legionellen, wie z.B. das regelmäßige Aufheizen von Speichern auf über 60 °C entfallen ebenso.

Die hohen Einzelleistungen der Durchlauferhitzer erfordern jedoch eine sehr hohe Gesamtanschlussleistung ($16 \times 21 \text{ kW} \times 0,4 \text{ GF} = 130 \text{ kW}$). Es musste daher zur Sicherstellung der Versorgung eine vergrößerte Anschlussleitung zum Haus verlegt werden. Durch Einsatz eines Stromspeichers mit entsprechend großer Leistungsabgabe hätte man auf die vergrößerte Anschlussleitung verzichten können. Dies wurde jedoch erst im fortgeschrittenen Planungsablauf

¹³ [werk.um architekten]



Abb. 4 Infrartheizungen K76 links und rechts sowie Lüftungsleitung

erkannt. In künftigen Projekten wäre die Speichervariante, auch wegen der positiven Auswirkungen auf den Eigenverbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten Stroms, zu bevorzugen. Ein geplanter Stromspeicher von BMW als „Second Life“ Speicher mit 30-60 kWh Speicherkapazität wurde aus Kostengründen zurückgestellt.

Um den Energieverbrauch zu reduzieren, wurde neben einer gut gedämmten Hülle pro Wohnung eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut. Unterstützt wird das somit rein elektrische System von einer 36,2 kWp Photovoltaikanlage auf dem Flachdach.

Parameter / Randbedingungen EnEV-Berechnung

Innentemperatur (nach EnEV):	19 °C
Gebäudevolumen beheizt:	5125,42 m ³
Nutzfläche An (Energiebezugsfläche):	1640,10 m ²
A/V Verhältnis:	0,4
Fensteranteil:	42%
Luftwechselrate (1/h):	0,7
Wärmerückgewinnung:	80%
Bauweise: Schweres Gebäude / C_wirk:	50Wh/m ² K*Ve
Außenwände:	U = 0,14 W/m ² K
Außenwände Straßenseite:	U = 0,17 W/m ² K
Dach gegen Außenluft:	U = 0,14 W/m ² K
Boden gegen unbeheizten Keller:	U = 0,13 W/m ² K
Fenster: Dreifachverglasung (Ug=0,6); Holzrahmen Uf=1,0)	U = 0,7 – 1,0 W/m ² K
Wärmebrückenzuschlag (pauschal):	0,100 W/m ² K
Durchschnittlicher U-Wert HT':	0,402 W/m²K

Tabelle 2 Randbedingungen zur EnEV-Berechnung

Die EnEV-Berechnung wurde von einem externen Planungsbüro nach DIN 4701 mit der Software EVA durchgeführt. Es wurden die Parameter / Randbedingungen entsprechend Tabelle 2 auf S. 33 verwendet. Die EnEV-Berechnung nach Fertigstellung des Gebäudes kam zu nachfolgenden Ergebnissen:

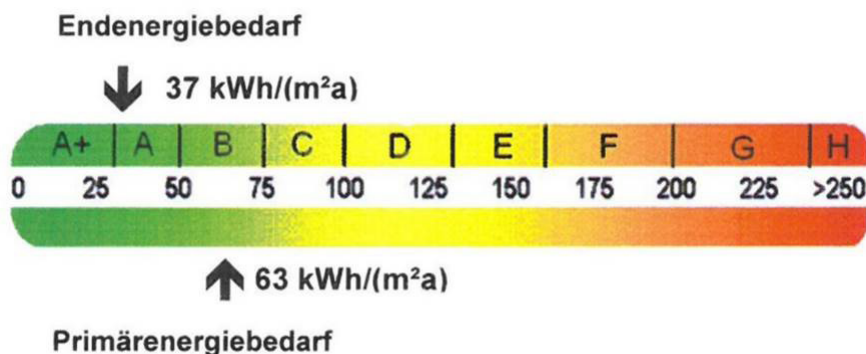


Abb. 5 Ergebnisse der EnEV-Berechnung nach Fertigstellung¹⁴

Aufgegliedert nach Verbrauchern ergibt sich nachfolgender Endenergiebedarf ohne Anrechnung des PV-Ertrags:

Jahresverbräuche:	EnEV-Berechnung:
Lüftung:	2,6 kWh/(m²a)
Warmwasser:	14,0 kWh/(m²a)
Heizung:	20,3 kWh/(m²a)
Summe:	36,9 kWh/(m²a)

Tabelle 3 Endenergiebedarf K76 nach EnEV- Berechnung¹⁵

Im Laufe der Arbeit wurde eine eigene EnEV-Berechnung des Gebäudes K76 vorgenommen. Die Berechnung kam zu annähernd gleichen Ergebnissen.

2.1.3 Konzeption Begleitforschung K76

Für die differenzierte Messung der Stromverbräuche von IR-Heizung, Durchlauferhitzer und Lüftung wurden für die Begleitforschung pro Wohnung MID-geeichte Stromzähler von Eltako in die jeweiligen Sicherungskästen der Wohnungen nachträglich eingebaut. Diese messen seit dem 14.10.2017 die Stromverbräuche. Um den Zugriff auf die Daten zu vereinfachen, wurden alle 48 Zähler über die S0-Schnittstelle mit einem zentralen Datenlogger (Loxone Miniserver) im Keller verbunden. Hier werden die Verbräuche und die aktuelle Leistung im Minutenintervall aufgezeichnet. Der Zugriff auf die Daten kann Online erfolgen. Zur Sicherung der Daten erfolgt täglich ein Backup über eine Kombination aus Raspberry PI und der Loxberry Software.

¹⁴ [Ingenieurbüro Seelbach]

¹⁵ [ebd.]

Die Nutzerbefragung zu Behaglichkeit und Einfluss des Nutzers auf die Heizungssteuerung erfolgte mit Hilfe eines Onlinefragebogens, der monatlich in der Heizphase von Oktober bis April an die teilnehmenden Bewohner verschickt wurde. In der ersten Heizperiode 2017/18 haben 6 von 15 Wohnungen an der detaillierten Befragung teilgenommen, in der zweiten Periode 9 von 15 Wohnungen. Der Fragebogen gliedert sich in einen aktuellen Teil, der jeden Monat ausgefüllt werden soll (Ausfülldauer ca. 5 -10 min) und einen konstanten Teil, der nur einmal am Anfang der Befragung ausgefüllt werden muss (Ausfülldauer ca. 20-30 min).

Im ersten Teil wurden die Bewohner aufgefordert, jeweils Fragen zur aktuellen Behaglichkeit, Bedienbarkeit der Heizungen, der aktuellen Tätigkeit, der aktuellen Bekleidung, der jeweiligen Wetterlage usw. zu beantworten. Zudem sollten sie, mithilfe von durch die HTWG bereitgestellten mobilen Messinstrumenten, die aktuelle Außen- und Innentemperatur, die relative Luftfeuchte, den CO₂-Gehalt der Raumluft und die aktuellen Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen angeben.

Im zweiten Teil wurden Daten abgefragt, die Einfluss auf das subjektive Temperaturempfinden haben. So zum Beispiel Alter, Geschlecht, Konstitution, kultureller Hintergrund bzw. Herkunft der Bewohner, übliche Art der Bekleidung und die persönliche Relevanz des Themas Energiesparen. Zusätzlich wurden allgemeine raum- und gebäudebezogene Daten erfasst, zum Beispiel: Häufigkeit der Raumnutzung, Lüftungsverhalten, Lage und Größe der Fenster, Fußbodenmaterial, Raumausstattung, Farben der Umschließungsflächen, Position der Heizkörper usw.

Die befragten Personen waren dabei angehalten, den Fragebogen immer im gleichen Raum und an der gleichen Stelle im Raum auszufüllen. Die Befragungen fanden anonymisiert statt. Die für das Projekt bereitgestellten Messinstrumente konnten die Daten von Außen- und Innentemperatur und CO₂ Gehalt der Raumluft aufzeichnen. Anhand der aufgezeichneten Daten waren Rückschlüsse auf eventuell auftretende Verbrauchsunterschiede bei den Heizungen der unterschiedlichen Wohnungen möglich.

Die Ergebnisse der Begleitforschung am Gebäude K76 werden in Kapitel 5 ab Seite 149 vorgestellt.

2.2 Laborräume Ehoch4

Um einzelne Parameter wie z.B. Lufttemperatur oder Stromverbrauch von zwei unterschiedlichen Heizsystemen über einen gewissen Zeitraum miteinander vergleichen zu können, muss sichergestellt werden, dass die Randbedingungen bei beiden Systemen zu jeder Zeit die gleichen sind um auszuschließen, dass sekundäre Faktoren für z.B. Verbrauchsunterschiede verantwortlich sind. Zu diesen Randbedingungen zählen:

- Die klimatischen Einflüsse (Umgebungstemperatur, solare Einstrahlung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit)
- Bauliche Einflüsse (thermische Qualität der Gebäudehülle, Fensterfläche und Orientierung, Verschattung)
- Einflüsse durch den Nutzer (Anwesenheit / Abwesenheit, Wärmebedarf, Lüftungsverhalten, interne Wärmegevinne)

Um dies zu gewährleisten, ist es notwendig, dass sich die Räume, in denen die Heizsysteme miteinander verglichen werden, am selben Standort befinden. Darüberhinaus müssen sie die gleiche Größe, gleiche Orientierung, die gleiche Fensterfläche und die gleiche Baukonstruktion aufweisen und dürfen nicht bewohnt sein. Nur so kann sichergestellt werden, dass die beispielsweise gemessenen Verbrauchsunterschiede tatsächlich von den unterschiedlichen Heizungssystemen verursacht worden sind.

Zu diesem Zweck wurden an einem geeigneten Standort bauphysikalisch gleiche Laborräume eingerichtet, in denen nachfolgende Fragestellungen untersucht werden konnten:

Untersuchte Aspekte zum Thema IR-Heizung	Pilotprojekt K76	Laborräume Ehoch4	Simula- tionen
Detailuntersuchungen zu Wirkweise und Effizienz			
Stromverbrauchsdifferenzen im realen Betrieb		x	x
Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	x	x	
Verhalten der Lufttemperatur bei IR-Heizungen	x	x	
Übergabeverluste bei IR-Heizungen			x
Strahlungswirkungsgrad von IR-Heizungen		x	
Effizienz und Behaglichkeit im realen Gebäudebetrieb			
Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude	x		
Bewertung der Behaglichkeit im realen Wohngebäude	x		
Ökologischer und ökonomischer Vergleich			
Gesamt ökologische Bewertung über 50 Jahre (LCC)			x
Gesamt ökonomische Bewertung über 50 Jahre (LCA)			x
Optimierung der Rahmbedingungen			
Vorteilhafte Randbedingungen für IR-Heizsysteme			x
Optimierung eines IR-Heizsystems durch PV und Speicher	x		x

Tabelle 4 Fragestellungen Forschungsstrang Wissenschaftliche Begleitforschung K76

Im Folgenden werden die Laborräume, die eingesetzten Wärmeerzeuger und die eingesetzte Messtechnik genauer beschrieben.

2.2.1 Beschreibung der Laborräume

Das Gelände der Ehoch4 GmbH befindet sich auf dem Areal der ehemaligen „Oberschwaben-Kaserne“ der Bundeswehr zwischen Mengen und Hohentengen im Landkreis Sigmaringen. Die Hochschule Konstanz erhielt die Möglichkeit, im Rahmen des Forschungsprojekts „IR-Bau“ Räume eines Gebäudes für Labormessungen zu nutzen.



Abb. 6 Südansicht Gebäude 6

Das Gebäude 6 ist ein ehemaliges Mannschaftsgebäude der Bundeswehr, ein langgestreckter, zweigeschossiger Riegel von 64 Meter Länge und 14 Meter Breite mit Nord / Süd Orientierung.

Das Gebäude wurde in den 1960er Jahren errichtet. Der Keller sowie die Geschossdecken bestehen aus Stahlbeton, die Wände sind größtenteils aus Betonhochlochziegeln gemauert. Die Außenwände, die Decke gegen den kalten Dachraum im OG und die Fenster wurden im Rahmen einer Sanierung vor einigen Jahren energetisch ertüchtigt. Die Wände wurden um ein Wärmedämmverbundsystem mit 80 mm EPS Dämmung ergänzt, die Decke gegen den kalten Dachraum wurde mit 150 mm EPS Dämmung versehen. Die Außenwände kommen so auf einen U-Wert von ca. $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$, die oberste Geschossdecke auf ca. $0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Austausch der Fenster erfolgte vermutlich bereits in den 1990er Jahren. Daher sind hier noch relativ schlecht gedämmte Fenster mit Kunststoffrahmen (U_f ca. $2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$) und Zweifachverglasung (U_g ca. $2,8 \text{ W/m}^2\text{K}$) verbaut.

Die Laborräume befinden sich auf der Südseite des Gebäudes im Obergeschoss. Alle Räume haben die gleiche Orientierung, Fensterfläche und Fassadenfläche gegen die Außenluft. Im Inneren grenzen alle Räume an Nachbarflächen, die auf die gleiche Temperatur wie die Laborräume temperiert werden. Somit wird sichergestellt, dass alle Räume die gleichen bauphysikalischen Rahmenbedingungen und damit die gleichen Wärmeverluste haben.

Die Bestandsräume wurden durch den Einbau zweier neuer Wände in vier gleich große Räume mit 6,38 m Breite und 5,13 m Tiefe und damit $32,80 \text{ m}^2$ Größe unterteilt. Die Räume haben eine lichte Höhe von 3,03 Metern. Bei der Materialwahl für die Wände wurde darauf geachtet, Material mit den gleichen bauphysikalischen Eigenschaften wie das der Bestandswände zu verwenden.

2.2.2 Beschreibung der eingesetzten Wärmeerzeuger

Die vier Laborräume wurden für das Projekt mit unterschiedlichen Wärmeerzeugern bzw. Wärmeübergabesystemen ausgestattet.

In **Laborraum T1** wurde als Referenzsystem für Vergleichsmessungen eine Fußbodenheizung in zwei Heizkreisen im Nassestrich (60 mm Anhydrit Fließestrich) mit einem Rohrabstand von 10 cm auf 25 mm starken EPS-Faltplatten (Buderus / Logafix) mit 8 mm Randdämmstreifen verlegt.

Die Fußbodenheizung bezieht ihre Wärme von einer vor der Westfassade im Außenraum aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpe (Buderus Logaplus WLW196 iAR-1), ergänzt durch einen 200-Liter-Pufferspeicher mit Nachheizregister, der im Innenraum installiert ist. Die Wärmepumpe erreicht bei A2/W35 eine Leistung von 7,6 kW. Da ein einzelner Laborraum mit ca. 2 kW Heizlast die Wärmepumpe nicht ausgelastet hätte, wurden in den Räumen neben Laborraum T1 weitere 100 m² Fußbodenheizung ohne Estrichüberdeckung als „Auslastungsfläche“ verlegt.

Alle hydraulischen Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Komponenten wurden in 1 Zoll Geberit Mapress C-Stahl und im Außenbereich aus Rohren und Fittings in Edelstahl erstellt. Die Verbindungsleitungen sind im beheizten Bereich mit 50 % Rohrdämmung, im Außenbereich mit 200 % Mineralfaser-Rohrdämmung isoliert.



Abb. 9 Laborraum T1 mit wassergeführter Fußbodenheizung

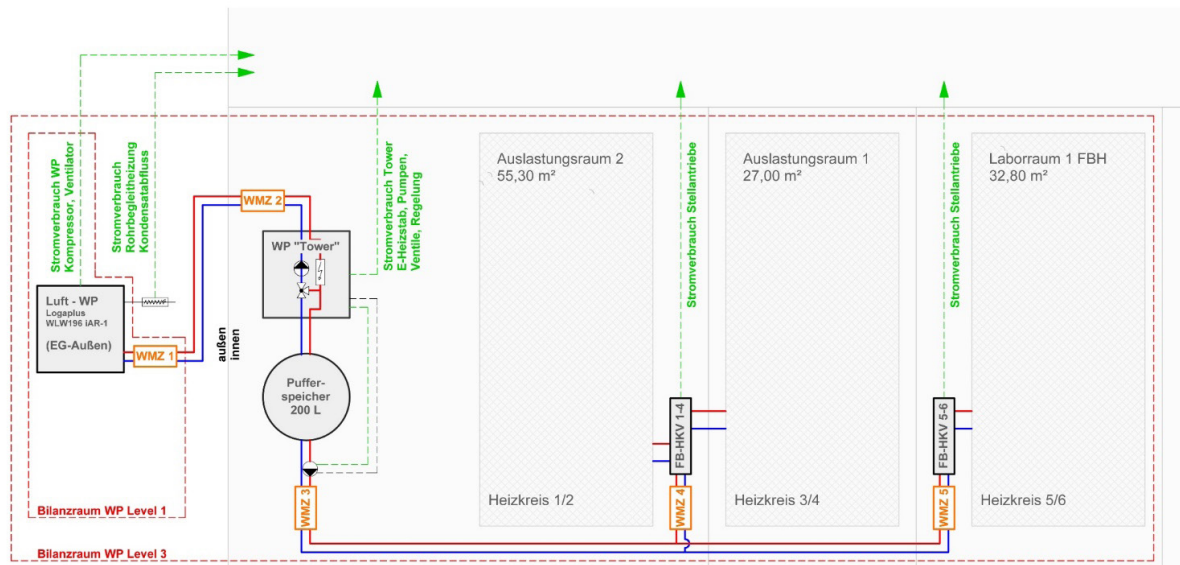


Abb. 10 Hydraulikschema Wärmepumpen-System Laborräume Ehoch4



Abb. 11 Luft/Wasser-Wärmepumpe



Abb. 12 Technikraum für Wärmepumpe mit Pufferspeicher

Laborraum T2 wurde, als direktelektrisches Pendant zur „klassischen“ Fußbodenheizung, mit einer elektrischen Fußbodenheizung ausgestattet („Devicell Dry“ / Devi Danfoss). Die Heizschlangen sind in zwei Heizkreisen vollflächig über den Raum auf 12 mm starken alukaschierten EPS Platten verlegt. Die Heizung hat eine Leistung von 2,8 kW.



Abb. 13 Laborraum T2 mit elektrischer Fußbodenheizung

In **Laborraum T3** wurden zwei Infrarot Paneele („WE 1300“ / Redwell) mit je 1,3kW Leistung mittig mit ca. 1,30 m Abstand zueinander an die Decke montiert. Die Paneele sind jeweils 1,80 m lang und 0,70 m breit.



Abb. 14 Laborraum T3 mit IR-Heizung an der Decke

In **Laborraum T4** wurden die gleichen Infrarot Paneele („WE 1300“ / Redwell) installiert, jedoch seitlich auf die Innenseite der Außenwand im Süden.



Abb. 15 Laborraum T4 mit IR-Heizung an der Wand

Die Böden aller Laborräume sind einheitlich mit 6 mm starkem Laminat belegt. Da die Räume unbewohnt sind, wurden in jeden Raum zwei dezentrale Einzellüfter mit WRG (Inventer iV14R) eingebaut, um einen realistischen Luftwechsel zu erhalten.



Abb. 16 Südfassade Gebäude 6 mit Einzellüfern

2.2.3 Beschreibung der eingesetzten Messtechnik

Um die Effizienz der verschiedenen Wärmeerzeuger während der Heizphase im realen Betrieb miteinander vergleichen, aber auch um die Wirkungsweisen der IR-Heizungen untersuchen zu können, wurde ein umfangreiches Mess- und Regelungssystem in und um die Laborräume realisiert.

Herzstück des Messsystems bildet ein sogenannter „Minisever“ von Loxone. Der Miniserver ermöglicht die Einbindung einer Vielzahl von Sensoren und die Aufzeichnung aller eingehenden Messdaten in frei wählbaren Zeitintervallen mit einheitlichem Zeitstempel. Gleichzeitig ist auch die Regelung von Verbrauchern möglich. Zum Überprüfen der Messdaten und zum Einstellen von Regelgrößen gibt es eine Weboberfläche, mit der man von jedem beliebigen Standort aus auf die Messdaten zugreifen und die Laborräume steuern kann.

Über das Programm „Loxone Config“ erfolgt die Einrichtung des Miniservers. Das Programm bietet die Möglichkeit virtuelle Messpunkte anzulegen, durch die eine Vielzahl von Sensordaten miteinander verrechnet und aufgezeichnet werden können.

Der Miniserver hat eine begrenzte Anzahl von Anschlussmöglichkeiten für Sensoren, bietet aber sogenannte „Extensions“ an, um die Anschlussvielfalt zu erhöhen. Zudem besteht die Möglichkeit, externe Datenquellen über Modbus TCP mit in den Miniserver einzubinden.

- Mit MID geeichten Wechsel- und Drehstromzählern werden die Verbräuche aller elektrischen Komponenten der Wärmeerzeuger erfasst und im minütlichen Intervall aufgezeichnet. Die Datenübertragung erfolgt dabei über die S0 Schnittstelle der Stromzähler an eine „digitale Extension“ des Miniservers. Diese empfängt die Impulse, im Miniserver werden daraus der Verbrauch und die Leistung errechnet.
- Alle Wärmeströme im hydraulischen Kreislauf des Wärmepumpen- / Fußbodenheizungssystems wurden mit insgesamt fünf hochgenauen Ultraschall-Wärmemengenzählern (Ultramess 602 / WDV Molline) erfasst. Ein WMZ ist dabei direkt an der Wärmepumpe angebracht. So kann die von der Wärmepumpe gelieferte Wärme und damit, zusammen mit den Stromverbräuchen der Wärmepumpe, die Arbeitszahl bzw. Jahres-Arbeitszahl berechnet werden. Ein weiterer WMZ befindet sich am Eingang von Vor- und Rücklauf in den Innenraum. Die Leitungsverluste können so beim Transport des Warmwassers durch den Außenraum ermittelt werden. Der nächste WMZ ist im Anschluss an den Pufferspeicher, das Nachheizregister und die Heizkreispumpe angebracht. Zwei weitere WMZ sind direkt vor den Heizkreisverteilern zu Laborraum T1 und den „Auslastungsflächen“ angebracht, so dass der Energieverbrauch des Laborraums gemessen werden kann. Aus dem Verhältnis von an den Laborraum und an die „Ausgleichsflächen“ gelieferter Wärme kann der Anteil an elektrischer Energie ermittelt werden, der für den Betrieb von Laborraum T1 notwendig ist. Die WMZ sind über Modbus an „Modbus Extensions“ von Loxone angeschlossen, die wiederum die Messwerte an den Miniserver weiterleiten.
- In allen Laborräumen werden die Lufttemperaturen in Raummitte in drei Höhen, die Oberflächentemperaturen aller Umschließungsflächen (Wände, Decke, Boden, Fenster, IR-Heizungen) und die Wandschichttemperaturen in der nach Süden orientierten Außenwand am Übergang von Putz zu Mauerwerk, Mauerwerk zu Dämmung und auf der Außenfassade gemessen. Mit einer Globesonde wird die operative Raumtemperatur in Raummitte auf 1,5 m Höhe ermittelt. Zusätzlich werden die Außentemperatur auf der Nordseite und die Temperaturen aller Umgebungsräume gemessen. Die Temperaturmessungen in den Laborräumen erfolgen dabei mit hochgenauen Pt-100 Temperatursensoren, die eine hohe

Genauigkeit von 1/3 DIN bzw. teilweise 1/10 DIN haben. Die analogen Signale der Pt-100 Sensoren werden von A/D Wandlern (DMB 96500 - Universal AI/DI Modul / Drago) in digitale Signale übersetzt. Die A/D Wandler sind wiederum per Modbus mit der Modbus Extension verbunden, die die Signale an den Miniserver weiterleitet. Alle Sensoren wurden samt Messtechnik mit Hilfe eines Kalibrierbades vor Ort kalibriert und erreichen dadurch eine Messgenauigkeit von unter einem Zehntel Grad.

- Zur Überprüfung des Einflusses der Heizsysteme auf die relative Luftfeuchtigkeit wurde in jedem Laborraum ein Luftfeuchtesensor vom Typ DHT22 eingebaut. Die Sensoren wurden über das zusätzliche PoKeys Modul angebunden, das wiederum über Modbus TCP mit dem Miniserver kommuniziert.
- Zur Erfassung der realen Solarstrahlungsdaten für die Simulation der Laborräume in IDA ICE, wurde auf der Südfassade ein Pyranometer (SMP 10-A / Kipp und Zonen) in Fenster-ebene aufgehängt. Das Pyranometer kommuniziert über Modbus und Modbus- Extension mit dem Miniserver.
- Um die Genauigkeit der Oberflächentemperaturmessungen zu überprüfen und zu verbessern, wurde für die Heizperiode 2018/19 in den Laborräumen T1, T2 und T3 je ein System aus 16 Infrarotsensoren (MLX90614ESF-BAA / Melexis) aufgebaut. Jeder Sensor misst dabei die eintreffende IR-Strahlung in einem Sichtwinkel von 90°. Es sind für Decke und Boden jeweils vier Sensoren, für jede Wandseite zwei Sensoren installiert (s. Abb. 18 auf S. 45). Alle Sensoren sind in einem Abstand von 1,5 m von der Wand positioniert. Mit dieser Anordnung kann die Temperatur der kompletten Raumbooberfläche berührungslos erfasst werden. Ebenso ist es nun möglich, zusammen mit der gemessenen Lufttemperatur, die durchschnittliche operative Raumtemperatur zu berechnen und als Regelgröße einzusetzen. Die Sensoren sind über I2C Bus an einen „Arduino Nano“ angeschlossen. Mittels der „Arduino ETH Shield“ Erweiterung findet die Kommunikation über Modbus TCP mit dem Miniserver statt.

Alle vier Laborräume werden zentral durch den Miniserver geregelt. Es kommt für alle Räume ein Zweipunktregler zum Einsatz. Als Regelgröße dient die operative Raumtemperatur von 20 °C. Für die Hysterese der Regelung wurde bei der Fußbodenheizung der Standardwert von 0,5 K gewählt. Bei den anderen Heizungen wurden in verschiedenen Messphasen Werte von 0,1 K und 0,5 K verwendet, um die Auswirkungen auf die Effizienz zu untersuchen. Die direktelektrischen Wärmeerzeuger werden über die Relay Extension geschaltet. Die Stellventile an den Heizkreisverteilern der FBH werden über den 0-10 Volt Ausgang des Miniservers angesprochen.

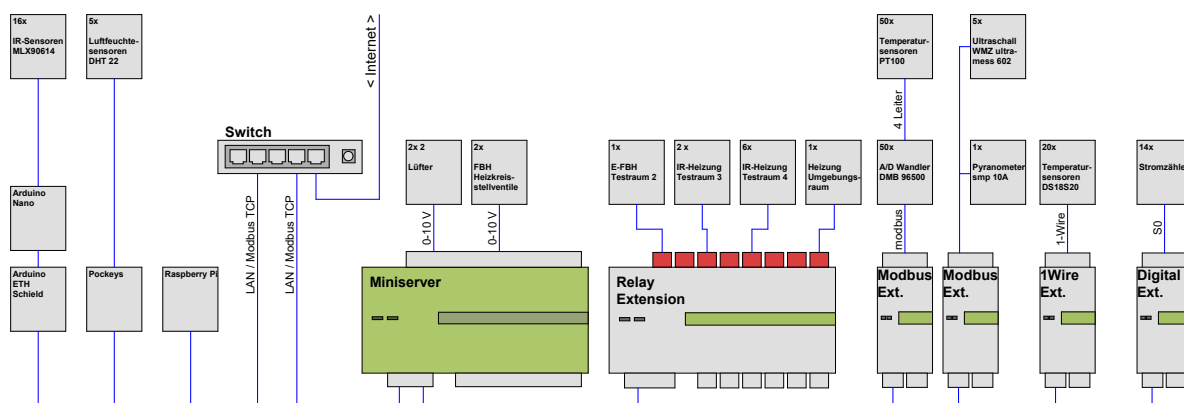


Abb. 17 Messtechnikschema Laborräume Ehoch 4

Auf die interne Regellogik der Wärmepumpe besteht nur manueller Zugriff an der Wärmepumpe selbst. Hier wurden die Einstellungen bei Inbetriebnahme durch einen Techniker von Buderus vorgenommen. Da sich die Einstellungen als effizient erwiesen haben, wurden hier keine Änderungen vorgenommen.

Das Einstellen der verschiedenen Modi der Lüftungsanlage ist ebenfalls über einen 0-10 Volt Ausgang des Miniservers möglich.

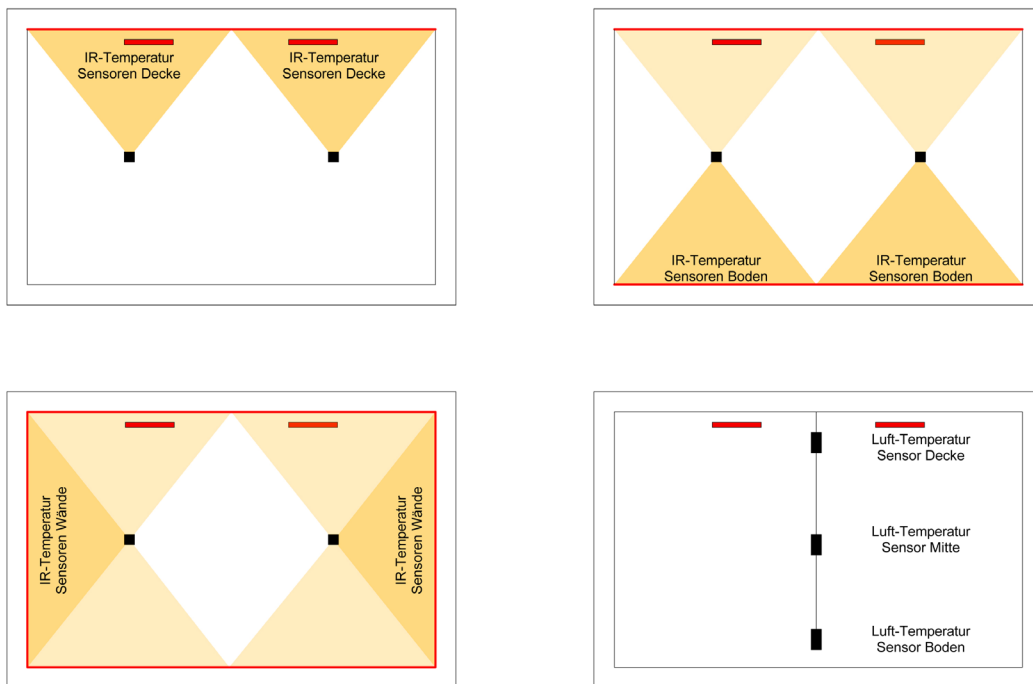


Abb. 18 Anordnung der IR- und Lufttemperatursensoren im Schnitt zur Messung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur und zur Berechnung der operativen Raumtemperatur



Abb. 19 Anordnung der 16 IR-Sensoren in Laborraum T3

2.3 Simulationen / Berechnungen

Die Untersuchungsmethodik der Simulationen und Berechnungen bildet den dritten Forschungsstrang. Mit Hilfe dieser, in Kapitel 2.3.1. bis 2.3.3. beschriebenen Methodiken, können so nachfolgende in der Tabelle dargestellte Forschungsaspekte untersucht werden:

Untersuchte Aspekte zum Thema IR-Heizung	Pilotprojekt K76	Laborräume Ehoch4	Simula- tionen
Detailuntersuchungen zu Wirkweise und Effizienz			
Stromverbrauchsdifferenzen im realen Betrieb		x	x
Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	x	x	
Verhalten der Lufttemperatur bei IR-Heizungen	x	x	
Übergabeverluste bei IR-Heizungen			x
Strahlungswirkungsgrad von IR-Heizungen		x	
Effizienz und Behaglichkeit im realen Gebäudebetrieb			
Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude	x		
Bewertung der Behaglichkeit im realen Wohngebäude	x		
Ökologischer und ökonomischer Vergleich			
Gesamt ökologische Bewertung über 50 Jahre (LCC)			x
Gesamt ökonomische Bewertung über 50 Jahre (LCA)			x
Optimierung der Rahmenbedingungen			
Vorteilhafte Randbedingungen für IR-Heizsysteme			x
Optimierung eines IR-Heizsystems durch PV und Speicher	x		x

Tabelle 5 Fragestellungen Forschungsstrang Berechnungen / Simulationen

2.3.1 Eingesetzte Software zur Simulation / Energetischen Bilanzierung

Mithilfe des dynamischen Gebäudesimulationsprogramms „IDA ICE“ wurden die Laborräume aus dem zweiten Forschungsstrang als digitales Simulationsmodell nachgebildet. Ein dynamisches Gebäudesimulationsmodell bietet, gegenüber tabellenbasierten Bilanzierungsprogrammen wie sie zur EnEV-Berechnung verwendet werden, Vorteile. Alle Eingangsparameter für die Simulation können frei bestimmt werden und durch die zeitliche hohe Auflösung ist es möglich, die tatsächlichen Prozesse im Modell sichtbar zu machen und zu untersuchen. So können in dem digitalen Simulationsmodell alle technischen, klimatischen und bauphysikalischen Rahmenbedingungen der realen Laborräume berücksichtigt werden:

- Die thermische Qualität aller umgebenen Bauteile.
- Die real gemessenen klimatischen Rahmenbedingungen (Außentemperatur, solare Einstrahlung, Temperaturen der Umgebungsräume, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit).
- Die spezifischen Eigenschaften der verbauten Wärmeerzeuger (Luft WP + FBH, IR-Heizungen, elektrische Fußbodenheizung). Für die Simulation der IR-Heizung wurde von IDA ICE Software ein spezielles IR-Heizungs-Plugin bereitgestellt, das die realen Eigenschaften einer IR-Heizung in der Simulation bestmöglich abbilden soll.

- Die Regelung der Wärmeerzeuger nach operativer Raumtemperatur, entsprechend der Regelung in den Laborräumen.

Mithilfe der real gemessenen Daten aus den Laborräumen ist es möglich, das digitale Modell zu validieren. Im Anschluss können einzelne oder mehrere Parameter im Modell verändert und die Auswirkungen dieser Parameteränderung nachvollzogen werden. So kann aus dem spezifischen thermischen und energetischen Verhalten der Testräume auf das Verhalten beliebig gebauter Gebäude geschlossen werden.

Sind die Effizienzunterschiede bekannt, können die Ökobilanz und die Lebenszykluskosten am Beispiel eines beliebigen Gebäudes berechnet werden. Mittels Parameterstudien kann anschließend gezeigt werden, welche Randbedingungen die entscheidenden Auswirkungen auf Ökobilanz und Lebenszykluskosten haben und wann der Einsatz einer IR-Heizung aus ökologischer und ökonomischer Sicht Vorteile bieten kann.

Die Energetische Bilanzierung bzw. EnEV-Berechnung nach DIN 18599 kann z.B. mit dem „BKI Energieplaner“ erfolgen. Anders als die dynamische Simulation wird die Energetische Bilanzierung anhand von in der DIN 18599 beschriebenen Rechenwegen und Tabellenwerten auf Monatsbasis vorgenommen. Detaillierte bauphysikalische Prozesse in hoher zeitlicher Auflösung, zusammen mit individuellen Anlagenspezifikationen und Standortfaktoren, lassen sich hiermit nicht abbilden.

2.3.2 Ökobilanzanalyse / LCA (Life Cycle Assessment) Betrachtung

Eine Ökobilanzanalyse ermittelt die gesamten energetischen Aufwendungen und Umweltauswirkungen, die im Laufe des „Lebens“ eines hergestellten Produkts entstehen. Der Lebenszyklus eines Bauteils wird dabei nach DIN 15804 in folgende Module unterteilt:

„A1-A3, Herstellungsphase, Informationsmodule

- A1: Rohstoffbereitstellung
- A2: Transport zum Hersteller
- A3: Herstellung

A4-A5, Errichtungsphase, Informationsmodule

- A4: Transport zur Baustelle
- A5: Montage

B1-B5, Nutzungsphase, Informationsmodule, die sich auf die Bausubstanz beziehen

- B1: Nutzung oder Anwendung des eingebauten Produkts
- B2: Inspektion, Wartung, Reinigung
- B3: Reparatur
- B4: Austausch, Ersatz

B6-B7, Nutzungsphase, Informationsmodule, die sich auf den Betrieb des Gebäudes beziehen

- B6: Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes (z.B. Betrieb eines Heizsystems und anderer technischer Gebäudeausrüstungen)
- B7: Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes

C1-C4 Entsorgungsphase, Informationsmodule

- C2: Transport zur Abfallbehandlung
- C4: Entsorgung

D, Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze, Informationsmodule
- *D: Wiederverwendungs-, Verwertungs- oder Recyclingpotential“¹⁶*

Je nach beabsichtigter Aussage, kann die Ökobilanz alle oder auch nur bestimmte Modulgruppen enthalten.

Für die Berechnung der Ökobilanz wurde als Datenquelle die Ökobaudat genutzt. Die Ökobaudat ist eine digitale, öffentlich zugängliche Datenbank, in der Ökobilanz-Datensätze für Baustoffe, Bauteile und Materialien Online abrufbar sind. Die Plattform wird vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) bereitgestellt. Die Datenbank beinhaltet zertifizierte Datensätze (EPDs) und einfache Ökobilanzdatensätze. Zertifizierte Datensätze werden nochmals von einer unabhängigen Stelle geprüft.

Mit dem vom BBSR bereitgestellten Tool „eLCA“ wurde die Ökobilanz eines Bauwerks zusammengesetzt. Für die Berechnung der Ökobilanz werden die im Bauwerk verbauten Materialien und deren Massen, die eingesetzten technischen Komponenten und für das Modul B6 der Energieverbrauch und die mögliche Energieerzeugung des Gebäudes benötigt.

Für den Vergleich der ökologischen Auswirkungen verschiedener Varianten wurde dabei der Wert „GWP-gesamt“ gewählt. Der Wert beschreibt das Treibhauspotential in „kg CO₂-Äqv.“, das die verschiedenen gewählten Modulgruppen des berechneten Bauwerks verursachen.¹⁷ Ein niedriger Wert ist dabei immer besser.

2.3.3 Lebenszykluskostenberechnung / LCC (Life Cycle Costing) Betrachtung

Die Lebenszykluskostenberechnung ermittelt die Wirtschaftlichkeit einer Baumaßnahme über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes innerhalb eines gewählten Betrachtungszeitraums. Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit orientiert sich dabei an der „VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“. In der Berechnung ist der finanzielle Aufwand nachfolgender Positionen enthalten:¹⁸

- kapitalgebundene Kosten (einschließlich Erneuerung)
- bedarfsgebundene Kosten (Brennstoffe, Erlöse aus Energieerzeugung)
- betriebsgebundene Kosten (einschließlich Instandsetzung)
- sonstige Kosten (z.B. Versicherungen, Steuern)

Bei der Berechnung handelt es sich um eine dynamische Kostenberechnung, bei der bei allen Zahlungen, die innerhalb des Betrachtungszeitraums in der Zukunft liegen, ab dem 2. Jahr entsprechende Preissteigerungsraten angegeben werden können.

Als Ergebnis wird der Barwert oder die Annuität der Investitionen berechnet.

- *„Der Barwert ist der heutige Wert einer zukünftigen Zahlung. Er wird durch Abzinsung der künftigen Zahlungen mit Hilfe eines angenommenen Zinssatzes bestimmt“.¹⁹*
- Die Annuität beschreibt dabei: *„Regelmäßig wiederkehrende gleich hohe Zahlungen, üblicherweise die Jahresrate der Tilgung und Verzinsung einer Schuld“.²⁰*

¹⁶ [DIN 15804, 2020, S.20-22]

¹⁷ [DIN 15804, 2020, S.63]

¹⁸ [VDI 2067-1, 2012, S.16-20]

¹⁹ [Haack et al., 2017, S.348]

²⁰ [VDI 2067-1, 2012, S.4]

Je geringer der Barwert bzw. die Annuität ist, desto wirtschaftlicher ist das geplante Vorhaben.

Die rechnerische Nutzungsdauer, der Aufwand für Instandsetzung, Aufwand für Wartung und Inspektionen und der Aufwand für das Bedienen können der VDI 2067, Anhang A Tabelle A2 ab Seite 21 entnommen werden.

3 Grundlagen

3.1 Grundlagen Infrarotheizung

Der wesentliche Unterschied in der Wirkweise von IR-Heizungen gegenüber anderen Systemen zur Wärmeversorgung ist die Eigenschaft, die Wärme zum überwiegenden Teil über Infrarotstrahlung an den Raum abzugeben. Daher werden im Folgenden die theoretischen Grundlagen der Wärmeübertragung durch Strahlung vorgestellt. Diese sind zum Verständnis der Wirkweise und Funktion von IR-Heizungen essenziell.

3.1.1 Thermodynamische Grundlagen zur Infrarotstrahlung

Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten, wie Wärme übertragen werden kann: Wärmeleitung, Wärmeströmung (Konvektion) und Wärmestrahlung.

Im Folgenden wird die Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung näher erläutert:

Jeder Körper, der eine Temperatur über dem absoluten Nullpunkt von $-273,15\text{ °C}$ hat, sendet elektromagnetische Wellen aus. Die Länge der Wellen hängt dabei von der Temperatur des Körpers ab. Je höher die Temperatur, desto kürzer wird die Wellenlänge, desto energiereicher wird die elektromagnetische Strahlung. Wärmestrahlung benötigt kein Medium zur Wärmeübertragung, sie kann sich also auch im Vakuum ausbreiten.

Unser Körper ist in der Lage, Strahlung aus einem bestimmten Teil des Spektrums über die Haut als Wärme zu empfinden. Diesen Teil des Spektrums nennt man Infrarotstrahlung. Die Infrarotstrahlung wird dabei in folgende Bereiche unterteilt:

- nahes Infrarot (englisch: near infrared, NIR) ist kurzwellige IR-Strahlung von:
0,78 μm bis 3,0 μm
- mittleres Infrarot (englisch: mid wave length, MWIR) mit Wellenlängen von:
3,0 μm bis 8,0 μm
- langwelliges Infrarot (englisch: long-wave length, LWIR) mit Wellenlängen von:
8,0 μm bis 15,0 μm
- fernes Infrarot (englisch: far infrared, FIR) ist langwellige IR-Strahlung von:
15,0 μm bis 100,0 μm

Für die Beheizung von Gebäuden ist dabei die mittel- und langwellige Infrarotstrahlung von Bedeutung. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Hell- und Dunkelstrahlern:

- Hellstrahler arbeiten in einem Temperaturbereich von 300 °C bis 700 °C , was einem Wellenlängenbereich von circa 5 - 3 Mikrometern entspricht.
- Dunkelstrahler arbeiten in einem Temperaturbereich von 60 °C bis 180 °C , was einem Wellenlängenbereich von circa 6 - 9 Mikrometern entspricht.

Alle Körper stehen zu jeder Zeit im Strahlungsaustausch miteinander. Jeder Körper ist dabei gleichzeitig Sender und Empfänger. Stehen sich zwei gleich warme Körper gegenüber, senden und empfangen die jeweils zum anderen Körper orientierten Flächen die gleiche Energiemenge. Sie befinden sich im Strahlungsgleichgewicht. Ist einer der beiden Körper wärmer als der andere, gibt dieser Körper mehr Energie in Form von Strahlung an den anderen Körper ab, als er empfängt. Die Differenz wird Netto- Strahlungsfluss / Strahlungsleistung genannt.²¹

Entscheidend dafür, wie gut ein Körper seine Wärme in Form von Wärmestrahlung abgeben (emittieren) kann, ist der Emissionsgrad seiner Oberfläche. „Der Emissionsgrad eines Stoffes ist bei gleicher Temperatur und gleicher Wellenlänge gleich seinem Absorptionsgrad“²² (Kirchhoffsches Strahlungsgesetz). Das heißt, ein Körper mit einem idealen Emissionsgrad von $\epsilon = 1$, nimmt 100 % der empfangenen Strahlungsenergie auf und kann bei entsprechender Temperatur an einen anderen Körper 100 % seiner Energie in Form von Strahlung abgeben. Einen solchen idealen Strahler nennt man Schwarzer Strahler bzw. Schwarzer Körper.

Die Strahlungsleistung eines Schwarzen Strahlers wird durch das „Stefan-Boltzmann-Gesetz“ beschrieben:²³

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

σ :	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
A :	Die abstrahlende Fläche in m^2
T :	Die absolute Temperatur der abstrahlenden Fläche in K

Um die Strahlungsleistung eines Nicht-Schwarzen Strahlers gegenüber einem Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt näherungsweise zu berechnen, kann die Formel zum Strahlungsaustausch verwendet werden:²⁴

$$P = \sigma \cdot A \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_2}\right) - 1} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

σ :	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
A :	Die abstrahlende Fläche in m^2
ϵ_1 :	Der Emissionsgrad der abstrahlenden Fläche
ϵ_2 :	Der Emissionsgrad der bestrahlten Fläche
T_1 :	Die absolute Temperatur der abstrahlenden Fläche in K
T_2 :	Die absolute Temperatur der bestrahlten Fläche in K

Die Strahlungsleistung ist somit abhängig von:

- der Temperatur des abstrahlenden Körpers
- der Fläche des abstrahlenden Körpers
- dem Emissionsgrad des abstrahlenden Körpers
- der Temperatur und dem Emissionsgrad der Fläche des bestrahlten Körpers.

²¹ [Zimmermann, Zimmermann 2012, S.37]

²² [Kübler 2001, S.28]

²³ [Glück, 1990, S.150]

²⁴ [Glück, 1990, S.164]

3.1.2 Strahlungsleistung einer IR-Heizung

Ein Infrarotheizkörper gibt seine zugeführte elektrische Energie immer über alle drei Wege in Form von Wärmeenergie an die Umgebung ab, dominierend ist jedoch die Wärmestrahlung. Entscheidend für die Strahlungsleistung einer IR-Heizung ist die Fläche, die durchschnittliche Temperatur und der Emissionsgrad der wärmeabgebenden Oberfläche sowie die Temperatur und der Emissionsgrad der bestrahlten Fläche. Sind die Werte bekannt, lässt sich die Strahlungsleistung mit Hilfe der Formel zum Strahlungsaustausch (s. Seite 52) berechnen.

Die Temperatur der wärmeabgebenden Oberfläche spielt dabei für die Strahlungsleistung eine entscheidende Rolle. Je größer die Temperaturdifferenz zwischen strahlendem und bestrahltem Körper, desto größer ist die Strahlungsleistung. Durch eine Verdopplung der Oberflächentemperatur erreicht man auf der gleichen wärmeabgebenden Fläche eine Verdrei- bis Vervielfachung der Strahlungsleistung. Umgekehrt braucht man bei Halbierung der Oberflächentemperatur etwa die drei- bis vierfache Fläche, um die gleiche Strahlungsleistung in den Raum abzugeben.

Für die Praxis bedeutet dies, dass eine IR-Heizung mit einer hohen Oberflächentemperatur eine höhere Strahlungsleistung pro Quadratmeter abgeben kann. Eine IR-Heizung mit einer niedrigeren Oberflächentemperatur kann die gleiche Strahlungsleistung abgeben, braucht dann aber eine größere wärmeabgebende Fläche. Die Strahlungsleistung darf jedoch nicht mit dem Strahlungswirkungsgrad einer IR-Heizung verwechselt werden.

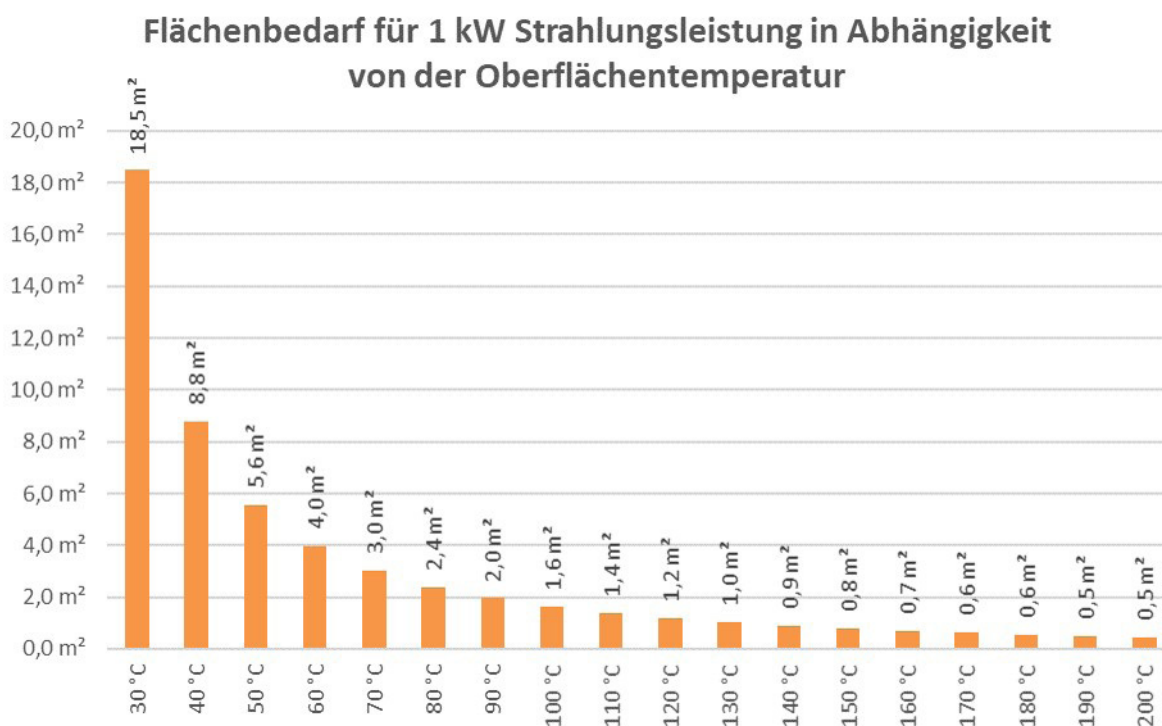


Abb. 20 Flächenbedarf für 1 kW Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des IR-Systems (Temperatur der gegenüberliegenden Fläche 20 °C, Emissionsgrad 0,9)

3.1.3 Strahlungswirkungsgrad einer IR-Heizung

Die Infrarotheizung soll ihre Wärme, im Gegensatz zur Konvektionsheizung, primär über Wärmestrahlung an den Raum abgeben. Dementsprechend ist das Ziel, den Anteil der Wärmeabgabe über Wärmestrahlung zu maximieren und die Übertragung von Wärme durch Wärmeleitung und Konvektion zu minimieren.

Eine optimale IR-Heizung sollte also einen möglichst großen Teil der eingesetzten elektrischen Energie dazu verwenden, nur die zum Raum hin orientierte Vorderseite so stark wie möglich zu erhitzen. Alle anderen Seiten sollten sich im Betrieb so gering wie möglich erwärmen. Es darf so wenig Energie wie möglich durch Strahlung, Konvektion oder Wärmeleitung an den Seiten oder der Rückseite abgegeben werden.

In der Praxis ist es jedoch nicht möglich, 100 % der eingesetzten elektrischen Energie in Form von Strahlungsenergie abzugeben, da immer ein Teil der Wärme über Konvektion und Wärmeleitung verloren geht. Die Kenngröße für die Strahlungseigenschaften einer IR-Heizung ist der Strahlungswirkungsgrad.

Der Strahlungswirkungsgrad $\alpha_{str.}$ beschreibt, wieviel Prozent der zugeführten elektrischen Leistung im Beharrungszustand in Form von Strahlungsleistung abgegeben wird:

$$\alpha_{str.} = \frac{P_{str.}}{P_{el.}}$$

Dies bedeutet, dass eine Infrarotheizung mit hohem Strahlungswirkungsgrad bei geringerem elektrischen Energieeinsatz die gleiche Oberflächentemperatur und damit die gleiche Strahlungsleistung erreicht wie eine IR-Heizung mit niedrigerem Strahlungswirkungsgrad und höherem elektrischen Energieeinsatz. Im Umkehrschluss gibt eine IR-Heizung mit hohem Strahlungswirkungsgrad einen geringeren Teil ihrer Wärme über Konvektion oder Transmission ab. Der Strahlungswirkungsgrad ist dabei allein von der Konstruktion und der Position der IR-Heizung im Raum abhängig. Der Strahlungswirkungsgrad spiegelt damit die Güte bzw. Effizienz einer Infrarotheizung wider.

Ein einheitliches Verfahren zur Bestimmung des Strahlungswirkungsgrades von IR-Heizungen wird in der „DIN EN IEC 60675-3, Elektrische Haushalt-Direktheizgeräte - Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaft - Teil 3: Zusätzliche Bestimmungen für die Messung des Strahlungswirkungsgrades“ beschrieben. Unter Punkt 3.108 wird in der DIN ein Niedertemperatur-Infrarotheizgerät wie folgt definiert: *„Heizgerät ohne sichtbar glühende Teile, mit einer oder mehreren aktiven Strahlungsheizflächen mit einer Durchschnittstemperatur zwischen 40 °C und 200 °C und einem Nennwert des Strahlungswirkungsgrades von 40 %,...“*²⁵

Da der Name Infrarotheizung suggeriert, dass bei dieser Heizungsart ein überwiegender Teil der Energie in Form von Strahlungswärme in den Raum abgegeben wird, sollte nach Ansicht des Autors dieser Arbeit und abweichend von der Norm, eine IR-Heizung einen Strahlungswirkungsgrad von mindesten 51 % aufweisen.

²⁵ [DIN EN IEC 60675-3, 2021, 3.108]

3.1.4 Abstrahlverhalten und Strahlungsintensität über die Entfernung

Eine gedachte, liegende plattenförmige Infrarotheizung strahlt in den über ihr liegenden Halbraum (Hemisphäre) ab. Wie eigene Messungen, aber auch theoretische Simulationen der FH Burgenland im Folgenden zeigen, wird der Hauptteil der Strahlung bei typischen Konstruktionen diffus in einem Abstrahlwinkel von circa 120° über der Oberfläche der IR-Heizung abgegeben (s. Kapitel: 4.4.6).

Um die Strahlungsintensität über die Entfernung abzuschätzen, wird vereinfacht von einem punktförmigen Strahler ausgegangen. Die IR-Heizung verteilt ihre Wärmestrahlung diffus über die Innenoberfläche einer Halbkugel mit einem Abstrahlwinkel von 120°. Die gedachte Innenoberfläche der Halbkugel / Mantelfläche einer Kugelkappe, auf die sich die Wärmestrahlung bei unterschiedlichen Radien verteilt, wird allgemein wie folgt berechnet:

$$M = 2\pi \cdot r \cdot h$$

Bei einem Abstrahlwinkel von 120° entspricht $h = r/2$. Demnach lässt sich die gedachte Innenoberfläche / Mantelfläche wie folgt berechnen:

$$M_{(120^\circ)} = \pi \cdot r^2$$

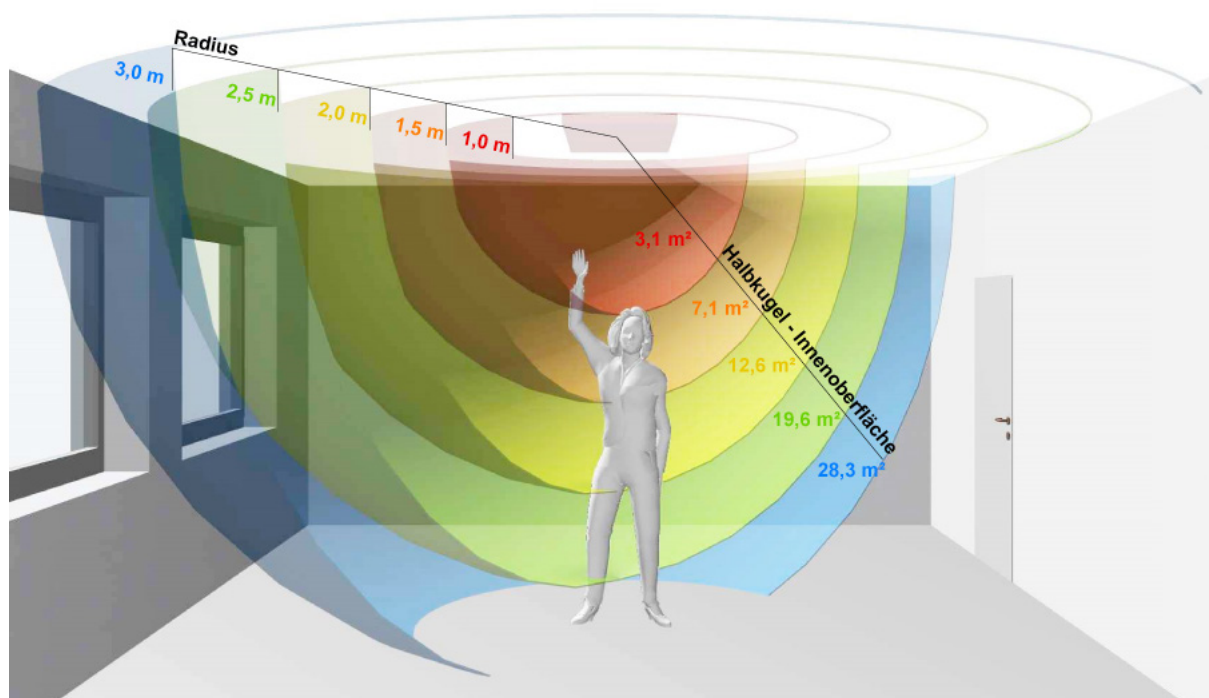
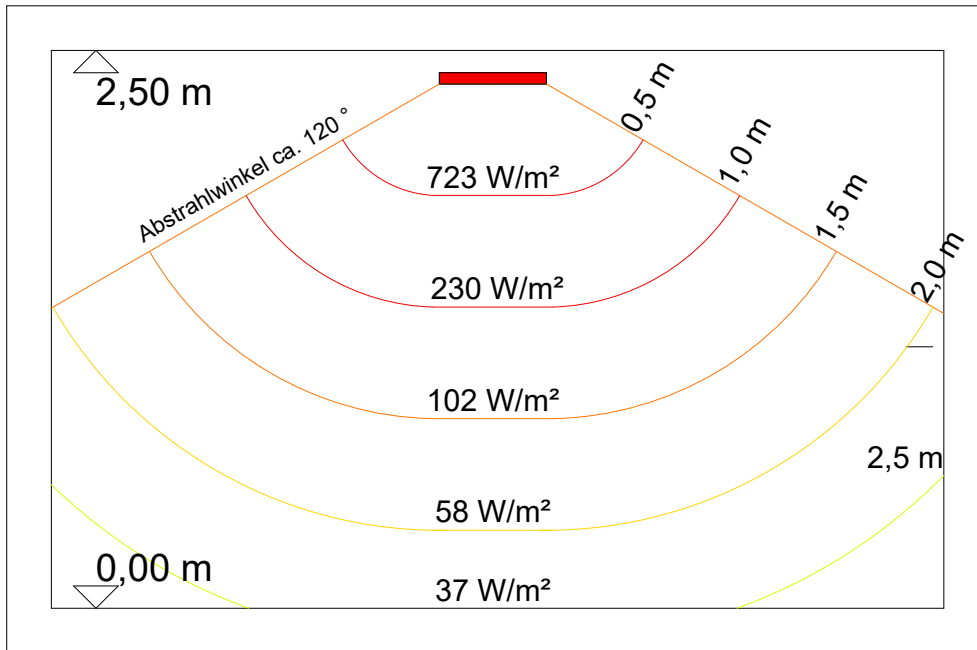


Abb. 21 Ausbreitung der IR-Strahlung im Halbraum unter einer IR-Heizungsplatte

Die Strahlungsintensität pro Quadratmeter ist somit abhängig von der Entfernung vom strahlenden zum bestrahlten Körper. Die Intensität der Strahlung reduziert sich durch die Ausbreitung über die Hemisphäre mit dem Quadrat der Entfernung. Dies bedeutet, dass es in einem mit IR-System beheizten Raum in Abhängigkeit von Position, Größe und Oberflächentemperatur der Heizelemente Bereiche geben kann, in denen die Strahlungsleistung zu hoch oder zu gering ist, um eine thermische Behaglichkeit zu erreichen.



Elektrische Leistung IR Heizung: 1200 W
 Fläche IR Heizung: 1,0 m²
 Durchschnittliche Oberflächentemperatur IR-Heizung: 110 °C
 Strahlungswirkungsgrad der IR-Heizung: ca. 65 %

Abb. 22 Beispielhafte Verteilung der Strahlungsleistung im Raum

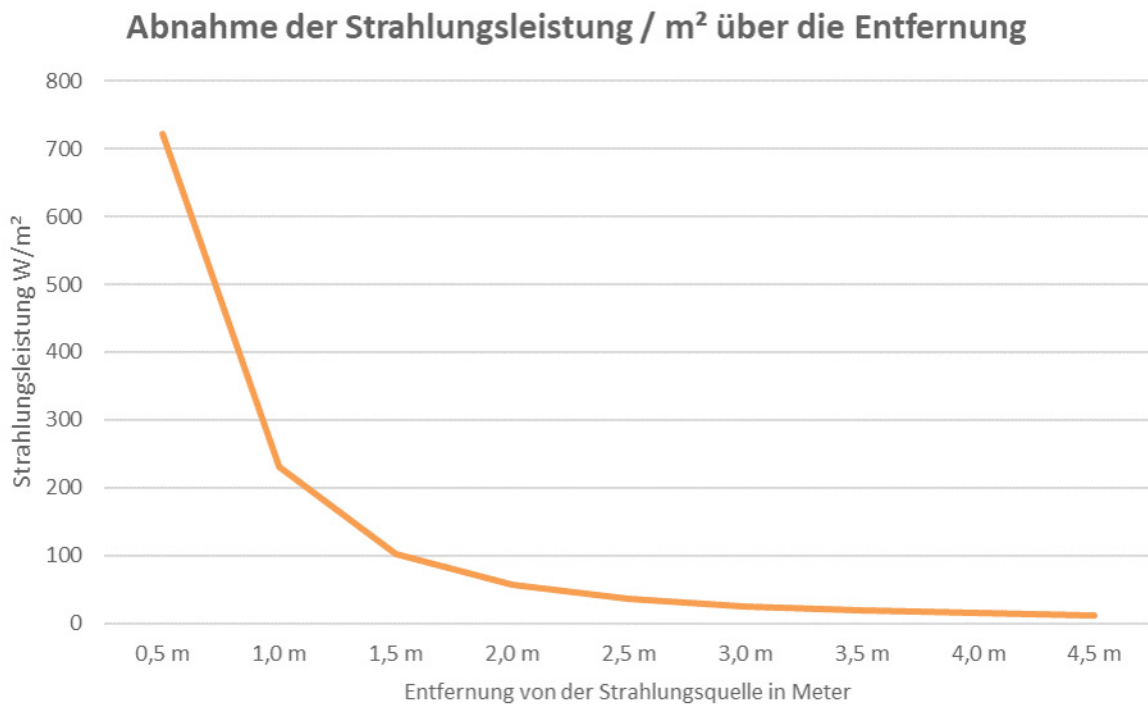


Abb. 23 Abnahme der Strahlungsleistung / m² über die Entfernung

3.1.5 Elektrische Widerstände in Infrartheizungen

Eine elektrische Infrartheizung bezieht ihre Wärme aus der abgegebenen Wärmeenergie des in ihr eingesetzten elektrischen Widerstands R , wenn dieser über eine gewisse Zeit t bei einer bestimmten Spannung U von einem Strom I durchflossen wird, dessen Stärke von der Größe des Widerstands und der Spannung abhängt.

In Ohmschen Widerständen wird die elektrische Energie wie folgt in Wärme umgesetzt:²⁶

$$W = U \cdot I \cdot t$$

Die elektrische Leistung P ist wiederum abhängig von der Spannung U und der Stromstärke I , die an einem elektrischen Leiter anliegen:²⁷

$$P = U \cdot I$$

Die sich einstellende Spannung ist wiederum von dem elektrischen Widerstand R des Leiters und der Stromstärke I abhängig:²⁸

$$U = R \cdot I$$

Je größer der Widerstand R eines elektrischen Leiters ist, desto größer muss die angelegte Spannung sein, damit ein Strom einer bestimmten Stromstärke I durch einen elektrischen Leiter fließen kann.

Der elektrische Widerstand des Leiters lässt sich aus dem spezifischen Widerstand des Leitermaterials ρ ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), der Länge des Leiters l (m) und der Querschnittsfläche des Leiters A (mm^2) wie folgt berechnen:²⁹

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Ein elektrischer Widerstand, der eine bestimmte Wärmeleistung erzeugen soll, muss auf der einen Seite groß genug sein, damit eine bestimmte Spannung notwendig ist, um einen Strom gewünschter Stärke fließen zu lassen, darf aber auch nicht zu groß sein, da sonst kein Stromfluss mehr stattfindet.

Soll z.B. eine Wärmeleistung von 1.000 W erzeugt werden und eine Spannung von 220 V liegt an, muss der Widerstand so groß sein, dass ($I = P/U$) bei 220 V ein Strom von 4,54 A fließen kann. Nach $R=U/I$ muss der elektrische Widerstand eine Größe von 48,45 Ohm haben. Ein Kupferkabel mit einem spezifischen Widerstand von $0,01786\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ und einer Länge von 10 m müsste demnach eine Querschnittsfläche von ($l \cdot \rho/R$) $0,0035 \text{ mm}^2$ aufweisen.

Sollen also Materialien als Heizwiderstand verwendet werden, die einen geringen spezifischen Widerstand haben (sog. elektrische Leiter), müssen diese relativ dünn und lang sein. Ein solches Heizband kann, entsprechend isoliert, z.B. auf einer Metallplatte mit einer Fläche von einem Quadratmeter in Schleifen verlegt werden. Die Fläche hat dann eine Heizleistung von $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$. Wird dieser Widerstand an das Stromnetz angeschlossen, wird dem Widerstand und der mit

²⁶ [Fischer, 2019, S.10]

²⁷ [ebd., S.9]

²⁸ [ebd., S.9]

²⁹ [ebd., S.10]

ihr verbundenen Konstruktion über die Zeit Wärme zugeführt. Die Temperatur der Konstruktion nimmt nun solange zu, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt, bei dem genau so viel Wärmeleistung von der Konstruktion in Form von Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion abgegeben wird, wie elektrische Leistung zugeführt wird.

Neben Heizbändern kommen auch Heizmatten, Heizfliesen oder Halbleiterschichten bei der Konstruktion von IR-Heizungen als elektrischer Widerstand zum Einsatz. Diese können zum Beispiel aus Carbon, Graphit, Siliziumcarbit oder anderen künstlich hergestellten Halbleitern bestehen. So hat zum Beispiel Carbon gegenüber Kupfer einen höheren spezifischen Widerstand ($35 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) und erlaubt größere Querschnittsflächen oder geringere Leitungslängen bei gleichem Widerstand wie bei einem Kupferkabel.

Soll eine Fläche, mittels der auf ihr angebrachten Halbleiterschicht, gleichmäßig erwärmt werden, ist es einerseits wichtig, dass die Halbleiterschicht eine gleichmäßige Dicke aufweist. Andererseits muss man an zwei Rändern der Halbleiterschicht Elektroden über die gesamte Breite anbringen, die einen sehr viel geringeren elektrischen Widerstand haben als die Halbleiterschicht selbst. Diese Elektroden müssen mit der Halbleiterschicht elektrisch leitend verbunden sein.

3.2 Thermische Behaglichkeit und operative Temperatur

Der Mensch ist ständig darauf angewiesen, seine Körpertemperatur auf einem bestimmten Niveau zu halten. Über seine Körperoberfläche steht er in Kontakt mit seiner Umgebung. Verliert er über seine Körperoberfläche genauso viel Energie wie der Körper erzeugt, befindet er sich im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung und fühlt sich behaglich. Verliert er mehr als er erzeugt, empfindet er seine Umgebung als zu kalt, erhält er dagegen mehr als er verliert, empfindet er sie als zu warm.³⁰ Die Methoden zur Vorhersage und Messung der thermischen Behaglichkeit im Raum werden in den folgenden zwei Kapiteln beschrieben.

3.2.1 PMV / PPD

Für die Aufrechterhaltung des Temperaturgleichgewichts sind verschiedene Faktoren von Bedeutung. Professor Ole Fanger hat in seinen Klimakammerexperimenten mit einer großen Anzahl von Testpersonen die grundlegenden Faktoren ermittelt, die für die thermische Behaglichkeit von Bedeutung sind. Auf Grundlage dieser Faktoren hat er eine Gleichung aufgestellt, mit deren Hilfe sich abschätzen lässt, wie eine große Personengruppe die Umgebungsbedingungen beurteilt. Fanger nennt dies „Vorausgesagtes mittleres Votum (PMV)“. Die Beurteilung erfolgt dabei in einer 7- stufigen Klimabeurteilungsskala. Die Skala reicht dabei von -3 (kalt) über 0 (neutral) zu +3 (heiß). Die Formel wird in der DIN EN ISO 7730 genau beschrieben. Für die thermische Behaglichkeit sind demnach nachfolgende Faktoren von Bedeutung:³¹

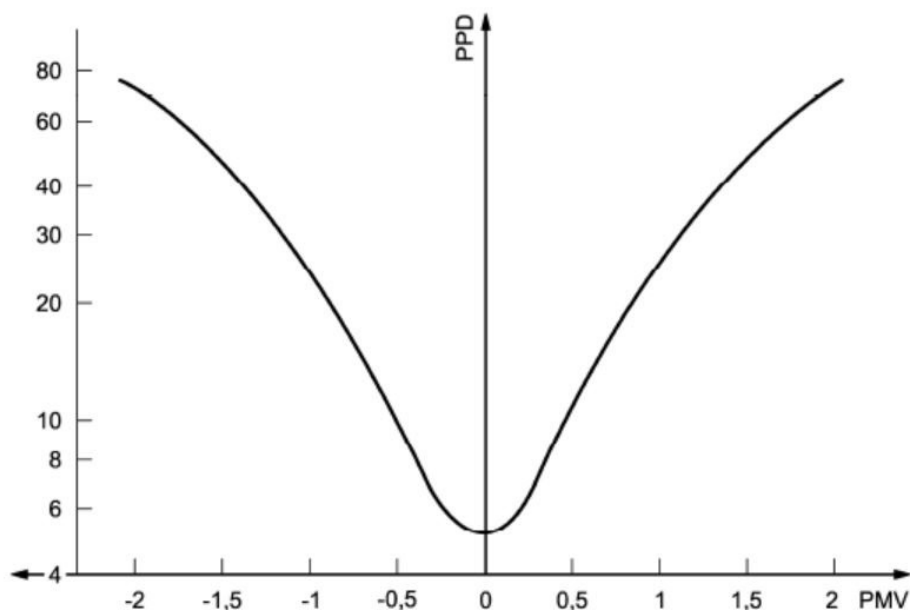
- der Energieumsatz der Person
- die wirksame mechanische Leistung der Person
- die Bekleidungsisolierung
- der Bekleidungsflächenfaktor
- die Lufttemperatur
- die mittlere Strahlungstemperatur
- die relative Luftgeschwindigkeit
- der Wasserdampfpartialdruck
- der konvektive Wärmeübergangskoeffizient
- die Oberflächentemperatur der Bekleidung

Der PMV- Wert gibt die durchschnittliche Klimabeurteilung einer großen Gruppe wieder. Die Beurteilung des Klimas durch einzelne Personen variiert jedoch aufgrund spezifischer subjektiver Faktoren um diesen Mittelwert. Mithilfe des PPD- Index (Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD)), der auf der PMV- Berechnung aufbaut, lässt sich eine Voraussage treffen, wieviel Prozent einer Personengruppe mit dem Umgebungsklima voraussichtlich unzufrieden sind. Abb. 24 auf S. 60 zeigt den Prozentsatz der Unzufriedenen, in Abhängigkeit des PMV- Werts. Wie man aus der Abbildung ableiten kann, ist es nie möglich, eine thermische Behaglichkeit herzustellen, die alle Menschen zufriedenstellt. Ein gewisser Prozentsatz von 5 % wird immer unzufrieden sein. Gleichzeitig markiert der PPD- Wert von 5 % den besten zu erreichenden und damit in der Planung anzustrebenden Wert. Die Formel für die PPD- Berechnung wird in der DIN EN ISO 7730, Seite 8 genau beschrieben.

Zusätzlich zu den Faktoren, die in die PMV- Berechnung einfließen, gibt es weitere Randbedingungen, die sich auf die lokale thermische Behaglichkeit auswirken. Die DIN ISO 7730 beschreibt dies wie folgt: *„PMV und PPD drücken ein warmes und kaltes Unbehaglichkeitsempfinden des Körpers als Ganzes aus. Thermische Unzufriedenheit kann jedoch auch durch unerwünschtes Abkühlen (oder Erwärmen) eines bestimmten Körperteils entstehen. Dies ist als lokale Unbehag-*

30 [DIN EN ISO 7730, S.6]

31 [DIN EN ISO 7730, S.7]



Legende

PMV Vorausgesagtes mittleres Votum
 PPD Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen, %

Abb. 24 PPD in Abhängigkeit von PMV [DIN 7730, S.9]

*lichkeit bekannt. Die häufigste Ursache für lokale Unbehaglichkeit ist Zugluft. Lokale Unbehaglichkeit kann allerdings auch durch ungewöhnlich hohe vertikale Temperaturunterschiede im Bereich zwischen Kopf und Fußgelenken hervorgerufen werden, durch zu warme oder zu kalte Fußböden oder durch eine zu hohe Asymmetrie der Strahlungstemperatur“.*³²

Tabelle A.1, S.17 in der DIN 7730 beschreibt die einzuhaltenden Randbedingungen der lokalen thermischen Behaglichkeit, um einen gewünschten PPD- Wert einzuhalten. Für einen PPD- Wert von < 6 / Klimakategorie A sollten demnach folgende Randbedingungen eingehalten werden:³³

- Der vertikale Lufttemperaturunterschied sollte kleiner 2 K sein.
- Der Unterschied zwischen warmen und kalten Fußbodenflächen sollte kleiner 10 K sein.
- Ist die Decke wärmer als die sonstigen Umgebungsflächen, sollte die Differenz kleiner 5 K sein.
- Ist eine Wand kühler als die sonstigen Umgebungsflächen, sollte die Differenz kleiner 10 K sein.
- Ist die Decke kühler als die sonstigen Umgebungsflächen, sollte die Differenz kleiner 14 K sein.
- Ist eine Wand wärmer als die sonstigen Umgebungsflächen, sollte die Differenz kleiner 23 K betragen.

³² [DIN EN ISO 7730, S.10]

³³ [DIN EN ISO 7730, S.20/21]

3.2.2 Operative Temperatur

Die operative Temperatur oder auch Empfindungstemperatur beschreibt vereinfacht ein behagliches Raumklima. Bei der operativen Temperatur werden im Vergleich zur PMV- Berechnung Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit vernachlässigt. Auch alle Werte, die Person selbst betreffend, wie z.B. Bekleidungsgrad oder Aktivitätsgrad werden vernachlässigt. Dies hat den Vorteil, dass die nun übriggebliebenen Werte, Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der Umgebung, einfach fass- und messbar sind. Die operative Temperatur wird wie folgt berechnet:³⁴

$$\vartheta_{op} \approx \frac{\vartheta_L + \vartheta_s}{2}$$

- ϑ_{op} : Operative Temperatur
- ϑ_L : Lufttemperatur
- ϑ_s : Strahlungstemperatur der Umgebung

Ob eine operative Temperatur von z.B. 20 °C als behaglich empfunden wird, ist dabei jedoch immer abhängig vom Bekleidungs- und Aktivitätsgrad (s. Abb. 25).

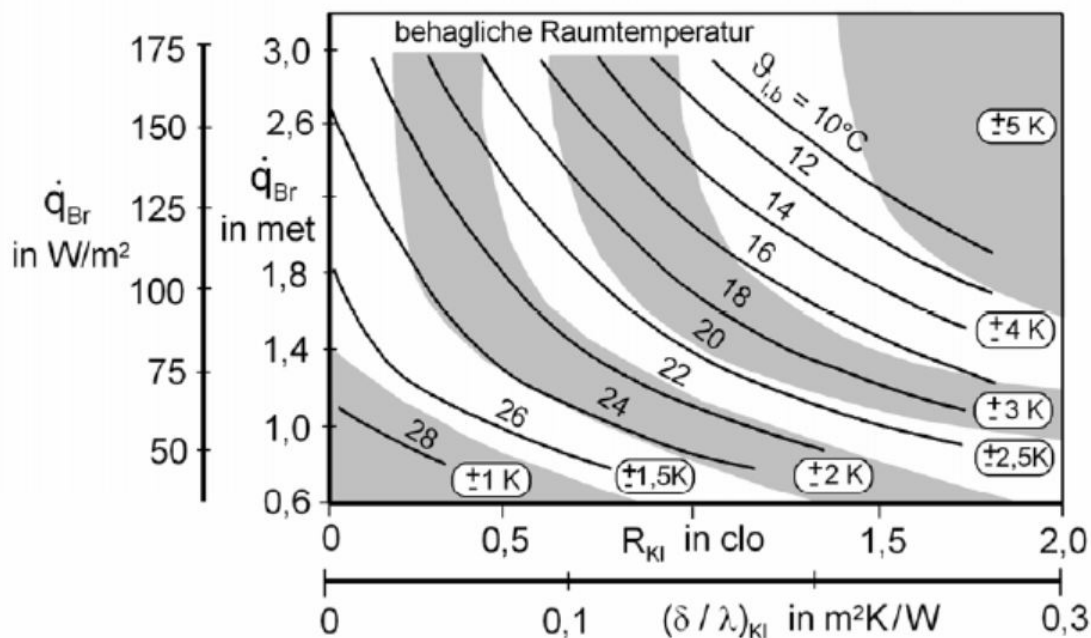


Abb. 25 Behagliche Raumtemperatur in Abhängigkeit von Aktivität (in „met“) und äquivalentem Wärmeleitwiderstand der Kleidung (in „clo“) sowie zulässige Abweichungen bei $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$ (ausgewähltes Beispiel für PPD $\leq 10\%$) als unterschiedlich markierte (weiß/grau) Flächen.³⁵

34 [Richter, 2006, S.20]

35 [ebd., S.20]

Die EN ISO 7726 beschreibt in Anhang G die Messung der operativen Raumtemperatur, die wie folgt definiert wird:

„Die operative (wirksame) Raumtemperatur (t_0) ist definiert als die einheitliche Temperatur einer Umhüllung, in der eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht-einheitlichen Umgebung“.³⁶

Solange die Luftgeschwindigkeit im Raum kleiner 0,2 m/s und der Unterschied zwischen Strahlungstemperatur und Lufttemperatur kleiner 4 °C ist, kann die operative Raumtemperatur ausreichend genau durch den Mittelwert aus Luft- und mittlerer Strahlungstemperatur beschrieben werden.³⁷ Für eine höhere Genauigkeit und abweichende Umgebungsbedingungen kann die Gleichung aus der DIN 7726, Seite 59 verwendet werden.

Abb. 26 beschreibt anschaulich die Abhängigkeit der operativen Temperatur von der Lufttemperatur und der Temperatur der Raumumschließungsflächen (mittlere Strahlungstemperatur). Der Mensch fühlt sich nicht nur bei einer exakten operativen Temperatur behaglich, sondern innerhalb eines Behaglichkeitsfelds. So empfindet er zum Beispiel bei einer Lufttemperatur von 23 °C eine Oberflächentemperatur von 16 °C noch behaglich. Umgekehrt fühlt er sich bei einer erhöhten Oberflächentemperatur bis 26 °C auch bei einer Lufttemperatur von circa 19.5 °C behaglich.

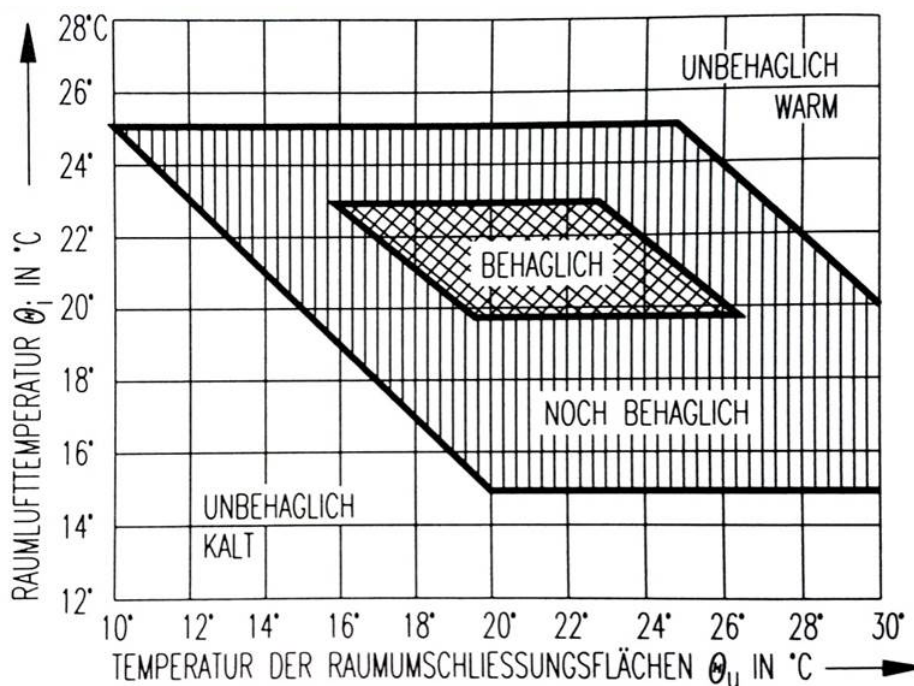


Abb. 26 Zone der Behaglichkeit in Abhängigkeit zur Lufttemperatur und der Temperatur der abstrahlenden Flächen.³⁸

³⁶ [DIN 7726, S.58]

³⁷ [ebd., S.58]

³⁸ [Pistohl, 2007, H8]

3.3 Energetische Bilanzierung von Wärmepumpen

Da sich ein wesentlicher Teil der vorliegenden Arbeit mit dem energetischen Vergleich von IR-Heizungen und Wärmepumpen befasst, ist es von Bedeutung darzulegen, wie Wärmepumpen energetisch bewertet und bilanziert werden.

3.3.1 Leistungszahl / COP

Die Leistungszahl bzw. der COP (engl: coefficient of performance) im Heizbetrieb einer Wärmepumpe ist in DIN EN 14511-1 wie folgt definiert:

*„Verhältnis der Heizleistung zur effektiven Leistungsaufnahme des Gerätes“.*³⁹

In [Lenz, Schreiber, Stark] wird der COP etwas ausführlicher wie folgt beschrieben: *“Das Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu aufgenommener elektrischer Antriebsleistung zu einem bestimmten Zeitpunkt und für bestimmte Temperaturverhältnisse. Aussage: Effizienz der Anlage bei Prüfbedingungen”.*⁴⁰

Der COP dient als Kennwert der Effizienz einer Wärmepumpe und wird von den Herstellern im Datenblatt der Wärmepumpe bei verschiedenen Standardtemperaturbedingungen angegeben. Die effektive Leistungsaufnahme beinhaltet dabei die Leistung folgender Komponenten:

„Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme des Gerätes innerhalb einer bestimmten Zeitspanne, die sich ergibt aus:

- der Leistungsaufnahme für den Betrieb des Verdichters;
- der Leistungsaufnahme aller Steuer-, Regel- und Sicherheitseinrichtungen des Gerätes;
- der Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe, die dem verdunstungsgekühlten Verflüssiger gegebenenfalls Wasser zuführt;
- der anteiligen Leistungsaufnahme der Fördereinrichtungen (z.B. Ventilatoren, Pumpen) zur Sicherstellung des Transports der Wärmeträger innerhalb des Gerätes, Angabe in Watt“.
⁴¹

Zusätzlich fordert die DIN EN 14511-3 eine Korrektur der effektiven Leistungsaufnahme wie folgt:

*„Die effektive Leistungsaufnahme muss die Korrektur aufgrund der Leistungsaufnahme von Innen- und/oder Außenventilatoren und/oder Pumpen beinhalten“.*⁴²

3.3.2 Jahresarbeitszahl JAZ

Die Berechnung zur Ermittlung der Jahresarbeitszahl für elektrische Wärmepumpen erfolgt in der Regel nach VDI 4650, Blatt 1. Für den energetischen Vergleich von Wärmepumpen gegenüber anderen elektrischen Wärmeerzeugern ist es wichtig zu verstehen, dass es bei Wärmepumpensystemen verschiedene Bilanzräume gibt, nach denen die Jahresarbeitszahl berechnet werden kann. Die genaue Definition der Bilanzräume nach VDI 4650 lautet wie folgt:

³⁹ [DIN EN 14511-1, S.10]

⁴⁰ [Lenz, Schreiber, Stark, 2010, S.26]

⁴¹ [DIN EN 15218, S.5]

⁴² [DIN EN 14511-3, 2019, S.11]

„Entscheidend für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist die Beachtung der Systemgrenzen. Daher muss zur Berechnung der Effizienz einer Wärmepumpe zuerst die Bilanzgrenze definiert werden (siehe Abb. 27). Die vorliegende Richtlinie berechnet die Jahresarbeitszahl für die Bilanzgrenze der Wärmepumpenanlage, bei der die Antriebsleistung für die Wärmequelle und des zweiten Wärmeerzeugers berücksichtigt werden. Wird die Bilanzgrenze der Wärmepumpenheizungsanlage bei der Berechnung der Jahresarbeitszahl zugrunde gelegt, so unterscheidet sich diese u.a. durch die Berücksichtigung der Speicherverluste, der Pumpenenergie und der Wärmeverluste von Wärmeverteilung und Wärmeübergabe (z.B. Regeleinrichtungen)“.⁴³

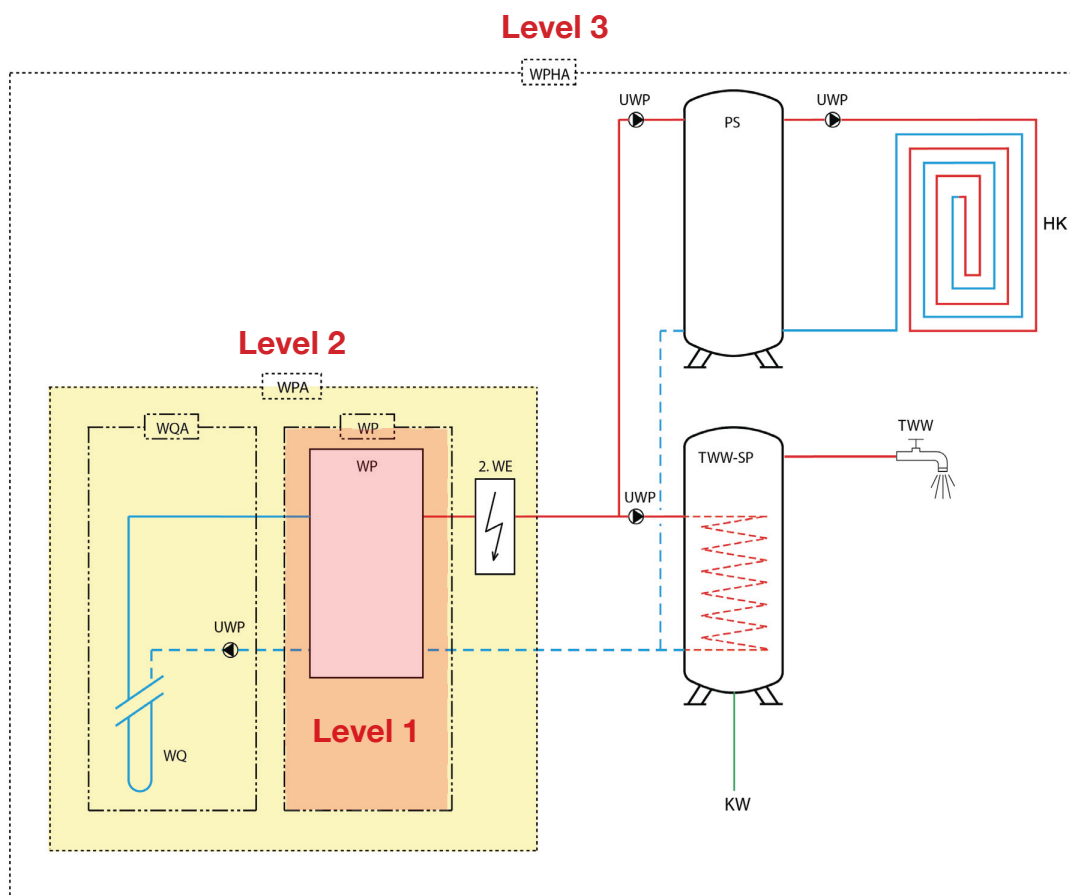


Abb. 27 Bilanzgrenze am Beispiel einer Sole-Wasser-Wärmepumpenheizungsanlage

Legende: 2. WE zweiter Wärmeerzeuger (z.B. elektrischer Zusatzheizer, Kessel),
 HK Heizkreis, KW Kaltwasser, PS Pufferspeicher, TWW Trinkwassererwärmung
 TWW-SP Trinkwarmwasserspeicher, UWP Umwälzpumpe, WP Wärmepumpe
 WPA Wärmepumpenanlage, WPHA Wärmepumpenheizungsanlage, WQ Wärmequelle
 WQA Wärmequellenanlage⁴⁴

Wird ein Raum direktelektrisch über z.B. eine IR-Heizung beheizt, entspricht der elektrische Verbrauch der Heizung dem Nutzwärmebedarf des Raumes. Entsprechend muss für einen energetischen Vergleich bei Wärmepumpen der gesamte notwendige Strombedarf bilanziert werden, der zur Deckung des Nutzwärmebedarfs eines Raumes notwendig ist. Für die Ermittlung einer Jahresarbeitszahl darf also nicht allein von dem Bilanzraum „WPA“ (s. Abb. 27) ausgegangen werden, den die VDI 4650 nutzt, sondern es muss der Bilanzraum „WPHA“ (Level 3, s. Abb. 27) angesetzt werden.

43 [VDI 4650-1, 2019, S.11]

44 [ebd., S.12]

Dieser Bilanzraum berücksichtigt alle Stromverbräuche und Wärmeverluste, die zur Versorgung eines Raumes mit der erforderlichen Nutzwärme notwendig sind, also die Leitungs- und Speicherluste, die Übergabeverluste und die Energie für Pumpen, Stellventile, Wärmemengenzähler und eventuell zusätzlich notwendigen Raumtemperaturregelungen.

Dies hat zur Folge, dass die Jahresarbeitszahl, bezogen auf den Bilanzraum WPHA, im Vergleich zur Jahresarbeitszahl nach VDI 4650, kleiner wird. Somit ist die Differenz im Stromverbrauch von Wärmepumpe und IR-Heizung in Realität geringer, als die Werte nach VDI 4650 zunächst vermuten lassen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Bilanzraum „WP“ als „**Level 1**“ und der Bilanzraum „WPHA“ als „**Level 3**“ definiert (s. Abb. 27 auf S. 64). Der Level 1 Bilanzraum dient dabei der Kontrolle, ob die Wärmepumpe ordnungsgemäß mit der vorgesehenen Effizienz läuft. Der Bilanzraum Level 3 dient zum energetischen Vergleich mit den Wärmeerzeugern in den anderen Testräumen.

3.4 Grundlagen der Mess- und Regeltechnik

3.4.1 Messdatenerfassung

Grundlage eines jeden Projekts, in dem Forschungsfragen durch objektiv erfasste Messdaten überprüft werden sollen, bildet die Messdatenerfassung. Die Messdatenerfassung besteht dabei immer aus einem oder mehreren Sensoren und einer Anzeige des vom Sensor gemessenen Werts oder einem Gerät zur Speicherung der von den Sensoren gemessenen Werten (Datenlogger). Um Sensorwerte über einen längeren Zeitraum mit festem Intervall aufzuzeichnen, ist ein Datenlogger sinnvoll. Möglichst zu Beginn eines Projekts, in dem Messdaten erfasst werden, sollten nachfolgende Fragen geklärt werden:

Auswahl der Messtechnik

- Ziel der Messungen?
- Was soll gemessen werden (z.B. Temperatur, Energie, Wärme, etc...)?
- Welche Sensoren werden benötigt?
- Wie viele Sensoren / Messpunkte wird es geben?
- Welche Protokolle verwenden die geplanten Sensoren (z.B. PT-100, 0-10 V, Modbus, I2C, S0, One Wire, etc...)?
- Wird ein Datenlogger benötigt? Hat der geplante Datenlogger ausreichend Schnittstellen für die benötigten Sensoren?
- Wie erfolgt die Verbindung von Sensor zu Datenlogger (Kabel, Funk)?
- Gibt es Einschränkungen für die Länge des Übertragungsweges oder Hindernisse, die die Reichweite der Übertragung einschränken?
- Wie hoch sind die Anforderungen an die Messgenauigkeit? Müssen bzw. können die Sensoren kalibriert werden? Ist eine Kalibrierung zusammen mit dem geplanten Datenlogger nötig bzw. möglich?
- Soll das geplante System nur Messdaten aufzeichnen können oder soll es auch gleichzeitig auf Grundlage der gemessenen Werte Regelungsaufgaben übernehmen?

Einbau der Messtechnik

- Wann und von wem können bzw. sollen die Sensoren eingebaut werden (Hilfreich ist es z.B., wenn die Messtechnik in Wohngebäuden vor Einzug installiert wird.)? Braucht es Fachpersonal zum Einbau der Sensoren?
- Wo werden die Sensoren angebracht, wo der Datenlogger untergebracht?
- Müssen die Sensoren geschützt werden, bis evtl. Bauarbeiten abgeschlossen sind?
- Wer übernimmt die Verantwortung für den Ein- und Ausbau (z.B. beim Einbau von Stromzählern in Wohngebäude im laufenden Betrieb)?
- Müssen die Sensoren kalibriert werden, bevor sie an ihrer vorgesehenen Position eingebaut werden?

Messdatenspeicherung, Verwaltung und Auswertung

- Über welchen Zeitraum soll die Messung erfolgen?
- Welche zeitliche Auflösung sollen die Messpunkte haben (minütlich, stündlich, täglich)?
- Sollen alle Messdaten zentral erfasst werden oder reicht eine dezentrale manuelle Auswertung?
- Sollen alle Messpunkte einen einheitlichen Zeitstempel haben?
- Wie erfolgt die Datenaufzeichnung, in welchem Format werden die Daten gespeichert, wie

- viel Speicherplatz wird benötigt?
- Wie sollen die Daten später ausgewertet werden (Excel, Monisoft, etc...)?
- Kann das zur Auswertung geplante Programm die Anzahl der gemessenen Werte verarbeiten (Excel kann z.B. „nur“ maximal 1.048.576 Zeilen / gemessene Werte verarbeiten)?
- Wo werden die Daten gespeichert?
- Wie kann ein Verlust der Daten vermieden werden (Backup)?
- Im Falle der Erfassung von realen Nutzerdaten sollte ein schriftliches Einverständnis zur Speicherung der Daten eingeholt werden.
- Müssen / sollen reale Nutzerdaten anonymisiert gespeichert werden?
- Wer hat Zugriff auf die Daten?
- Wie erfolgt der Zugriff auf die Messtechnik?
- Wie kann sichergestellt werden, dass die Messdatenerfassung einwandfrei funktioniert, wenn diese an einem entfernten Ort und über längere Zeiträume stattfindet?

Auf Basis dieser Aspekte kann ein Messkonzept erstellt werden. Die Messkonzepte für die Begleitforschung und die Laborräume werden in den Kapiteln 2.1.3 und 2.2.3 beschrieben.

3.4.2 Sensoren - Temperaturmessung

Die Celsius-Temperatur wird mit der Einheit Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$), die thermodynamische Temperatur und Temperaturdifferenzen dagegen in Kelvin (K) angegeben.⁴⁵ Messwertaufnehmer zur Temperaturmessung nennt man Thermometer. Thermometer lassen sich in direkt anzeigende Thermometer oder elektrische Thermometer unterteilen, die ihren Messwert in ein elektrisches Signal umwandeln. Weiter lassen sie sich in berührende und zur berührungslosen Temperaturmessung sowie analoge und digitale Sensoren unterteilen. Für die berührende Temperaturmessung, bei dem der Messfühler direkten Kontakt zum zu messenden Material, zur Flüssigkeit oder zum Gas hat, eignen sich am besten Thermoelemente und Widerstandsthermometer.⁴⁶ Widerstandsthermometer unterscheiden sich dabei nochmals in Kaltleiter und Heißleiter. *„Platin-Widerstandsthermometer sind dabei die genauesten Sensoren für die industrielle Anwendung und haben auch die beste Langzeitstabilität.“*⁴⁷

In dieser Arbeit wurden Platin-Widerstandsthermometer (PT-100) und digitale One-Wire Temperatursensoren (DS18B20) zur Temperaturmessung verwendet.

Platin-Widerstandsthermometer haben einen definierten Widerstand bei 0°C . PT-100 Sensoren haben entsprechend einen Widerstand von $100\ \Omega$ bei 0°C , PT-500 $500\ \Omega$ bei 0°C und PT-1000 $1000\ \Omega$ bei 0°C . Ändert sich die Temperatur des Sensors, ändert sich auch der Widerstand. Anhand der Widerstandsänderung kann die Temperatur abgeleitet werden.

Sensoren zur Temperaturmessung haben aufgrund von produktionstechnischen Schwankungen oft Abweichungen von der tatsächlichen Temperatur. Das heißt, sie haben bei z.B. 0°C nicht exakt $100\ \Omega$. Daraus entsteht eine Messungenauigkeit. DIN 60751 beschreibt in Tabelle 3 auf Seite 13 Genauigkeitsklassen für Widerstandsthermometer:

Eine Genauigkeitsklasse gilt dabei jedoch immer nur innerhalb des angegebenen Gültigkeitsbereichs. Zusätzlich zu den Klassen AA bis C gibt es noch die Klassen:

1/3 Klasse B	Grenzabweichung $\pm (0,10\ \text{K} + 0,005 * t)$
1/10 Klasse B	Grenzabweichung $\pm (0,03\ \text{K} + 0,005 * t)$

⁴⁵ [DIN 1345, 1993, S.2]

⁴⁶ [Nau, 2004, S.7]

⁴⁷ [Nau, 2004, ebd.]

Tabelle 3 – Genauigkeitsklassen für Thermometer

Klasse	Gültigkeitsbereich °C		Grenzabweichung ^a °C
	Drahtgewickelte Widerstände	Schichtwiderstände	
AA	-50 bis +250	0 bis +150	$\pm (0,1 + 0,0017 t)$
A	-100 bis +450	-30 bis +300	$\pm (0,15 + 0,002 t)$
B	-196 bis +600	-50 bis +500	$\pm (0,3 + 0,005 t)$
C	-196 bis +600	-50 bis +600	$\pm (0,6 + 0,01 t)$

^a |t| = Betrag der Temperatur in °C ohne Berücksichtigung des Vorzeichens.

Abb. 28 Genauigkeitsklassen von Widerstandsthermometern⁴⁸

Bei einem PT-100 Sensor Klasse AA darf die Abweichung bei z.B. 20 °C maximal:

$$0,1 \text{ °C} + (20 \text{ °C} * 0,0017) = \pm 0,13 \text{ °C betragen.}$$

Zusätzlich zu der Sensorgenauigkeit ist die Messgenauigkeit bei Platin-Widerstandstemperatursensoren auch abhängig von der Anschlussart und der Qualität des Analog / Digital Wandlers.

Wird ein Platin-Temperatursensor z.B. über ein zweiadriges Kupferkabel angeschlossen, verfälscht, je nach Länge des Kabels, der zusätzliche Eigenwiderstand des Kupferkabels das Messergebnis. Um dieses Problem zu umgehen, ist es sinnvoll, Platin-Temperatursensoren, die eine hohe Messgenauigkeit haben sollen, mindestens in 3-Leiter-Schaltung, am besten in 4-Leiter-Schaltung auszuführen. Dies fordert auch die DIN 60751: *„Alle Thermometer mit Genauigkeitsklasse besser als Klasse B müssen in 3- oder 4-Leiter-Schaltung ausgeführt werden.“*⁴⁹ Beim Anschluss in Vierleitertechnik *„wird das Messergebnis weder von den Leitungswiderständen noch von ihren temperaturabhängigen Schwankungen beeinträchtigt. Ein Leitungsabgleich ist nicht erforderlich“.*⁵⁰ Ein detaillierter Schaltungsplan der verschiedenen Anschlussarten aus der DIN 60751 ist in Abb. 29 auf S. 69 aufgeführt.

Der gemessene Temperaturwert liegt zunächst als analoger Wert des gemessenen Widerstands vor. Soll der Wert nun als digitaler Wert weiterverarbeitet werden, benötigt man einen Analog / Digital Wandler (A/D Wandler). Je nach Güte des A/D Wandlers entsteht bei der Umwandlung des analogen Messsignals in einen digitalen Wert noch einmal eine Umwandlungsungenauigkeit. Die Ungenauigkeit des Sensors addiert sich mit der des A/D Wandlers. Hat der A/D Wandler eine Ungenauigkeit von $\pm 0,5 \text{ °C}$, ergibt sich bei einer zu messenden Solltemperatur von 20 °C zusammen mit einem PT-100 Klasse AA nachfolgende Abweichung:

$$\pm 0,13 \text{ °C} + \pm 0,5 \text{ °C} = \pm 0,63 \text{ °C}$$

Am Messgerät werden 20 °C angezeigt. Die tatsächliche Temperatur kann aber, im schlechtesten Fall bei 19,37 °C oder 20,63 °C liegen. Da dies für eine genaue Temperaturmessung und noch mehr für eine Regelung von zu vergleichenden Heizungssystemen eine unzulässig hohe mögliche Abweichung ist, müssen alle Temperatursensoren vor Beginn der Messungen inklusiv der Messtechnik kalibriert werden. Dies gilt genauso für die digitalen One-Wire Temperatursensoren. Bei ihnen entfällt jedoch der A/D Wandler, da das Temperatursignal gleich im Sensor in ein digitales Signal umgewandelt wird.

48 [DIN 60751, 2009, S.13]

49 [DIN 60751, 2009, ebd]

50 [Nau, 2004, S.51]

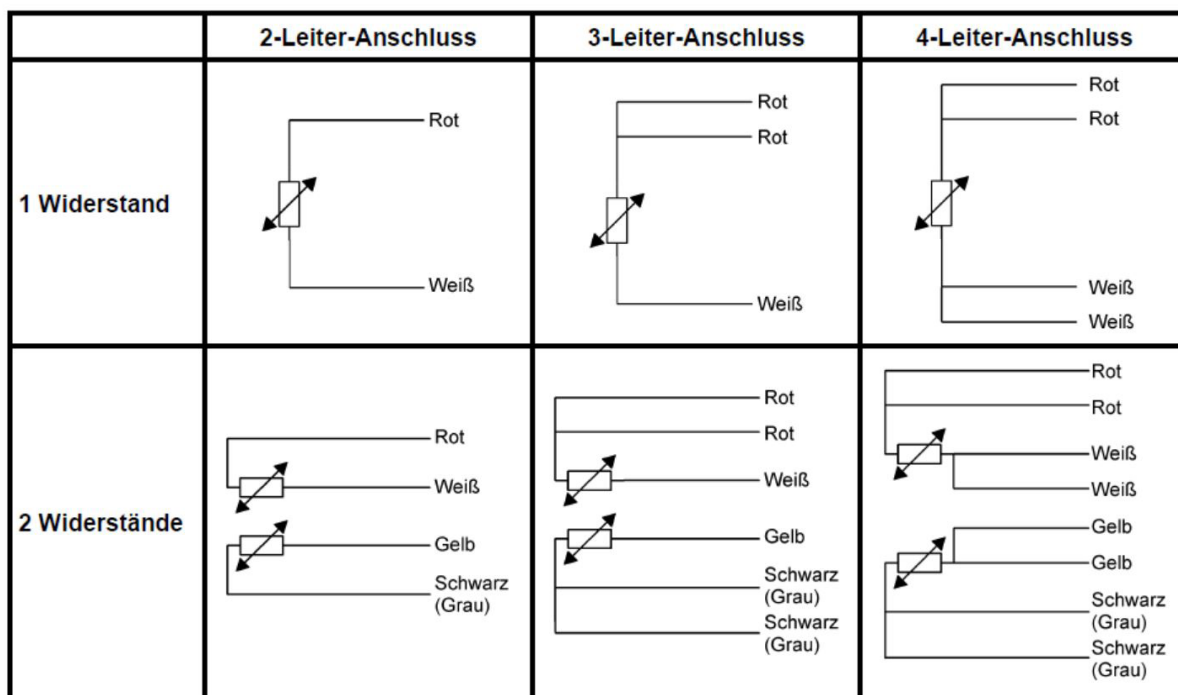


Bild 1 – Anschlussarten

Abb. 29 Anschlussarten von Platin-Widerstandstempersensoren⁵¹

Kalibrierung von Temperatursensoren

Mit der Kalibrierung eines Temperatursensors wird dessen Abweichung von der „tatsächlichen“ Temperatur bei einem oder mehreren Temperaturpunkten gemessen. Der oder die Temperaturpunkte sollten dabei so gewählt werden, dass sie den späteren Messbereich umfassen. Sollen im späteren Messverlauf z.B. Temperaturen zwischen 10 °C und 30 °C gemessen werden, sollten mindestens zwei Temperaturpunkte bei 10 °C und 30 °C vermessen werden. Es können auch noch zusätzliche Punkte bei z.B. 20 °C vermessen werden.

Die Messung der Temperaturpunkte kann z.B. im Wasserbad erfolgen. In einem Kalibrierbad mit Wärme- und Kältethermostat (in diesem Fall „LAUDA RE 212“) kann das im Bad enthaltene Wasser beliebig temperiert werden. Diese Temperatur kann dann durch die integrierte Regelungstechnik nahezu konstant über einen längeren Zeitraum gehalten werden. Sind die Sensoren nicht von einer wasserdichten Schutzhülse umschlossen, sollte der direkte Kontakt der Sensoren zum Wasser auf andere Weise unterbunden werden

Zur Bestimmung der „tatsächlichen“ Temperatur benötigt man ein hochpräzises Thermometer, dessen Genauigkeit höher ist als die angestrebte Genauigkeit der Messungen. Dieses Thermometer muss von einem „akkreditierten Kalibrierlabor“ vermessen und dessen Genauigkeit in einem Kalibrierzertifikat bestätigt worden sein. Die Messtechnik der „akkreditierten Kalibrierlabore“ wird wiederum in Deutschland von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt kalibriert. So ergibt sich eine Kette von Prüflaboren, durch die die Rückführbarkeit der Messergebnisse auf möglichst exakte und international vergleichbare physikalische Grundlagen gewährleistet wird. Diese Kette der Rückführbarkeit sollte immer dokumentiert werden.

Durch die zeitgleiche Messung der Wassertemperatur mit den zu kalibrierenden Sensoren und dem hochpräzisen Thermometer, das die „tatsächliche“ Temperatur mit einer höheren Genauig-

51 [DIN 60751, 2009, S.14]

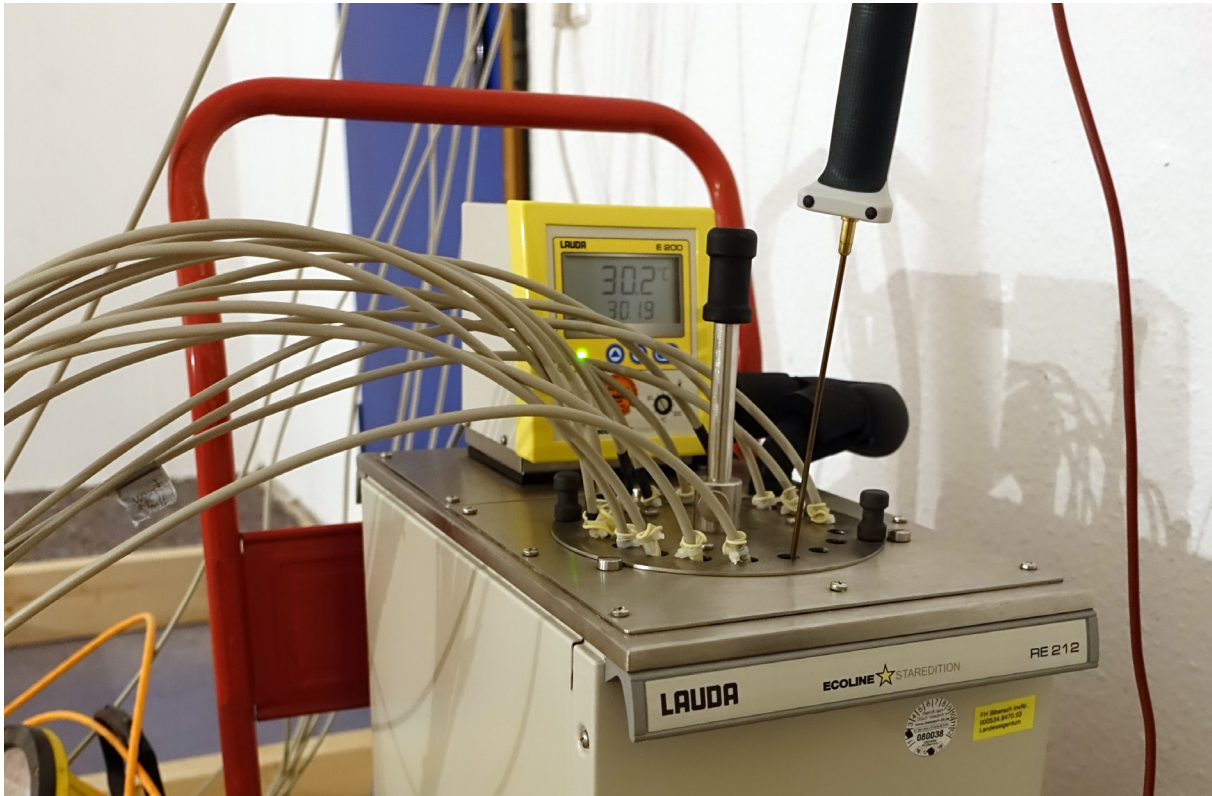


Abb. 30 Kalibrierung der Temperatursensoren im Wasserbad

keit misst, kann die Abweichung der Sensoren festgestellt werden. Anschließend kann den kalibrierten Sensoren ein Korrekturwert an einem oder mehreren Temperaturpunkten zugewiesen werden.

Gemessen hochpräzises Thermometer	20,00 °C
Gemessen zu kalibrierendes Thermometer	20,34 °C
Korrekturwert bei 20 °C	-0,34 °C

Je nach verwendetem Datenlogger können die Korrekturwerte bei verschiedenen Temperaturpunkten hinterlegt werden. Zwischenwerte können dann interpoliert werden. Nach dem erfolgreichen Kalibrieren sollten alle Temperatursensoren im Wasserbad die gleiche Temperatur wie die des hochpräzisen Thermometers anzeigen.

Messung der Lufttemperatur

„Unabhängig von der gemessenen Größe kann ein Messwertaufnehmer nur die Temperatur messen, die er selbst hat; diese Temperatur kann aber von der zu messenden Temperatur des Fluids (z.B. Luft) abweichen.“⁵²

Das Zitat aus der DIN 7726 verdeutlicht das Problem, das bei der Lufttemperaturmessung auftreten kann. Wird der Sensor falsch positioniert oder nicht von der Umgebung abgeschirmt, misst der Sensor nicht die Lufttemperatur, sondern einen Mittelwert aus Luft- und Strahlungstemperatur der Umgebung. Daher sollte man bei der Lufttemperaturmessung folgende Punkte beachten:

- Der Sensor sollte nicht der Strahlung (Wärmestrahlung eines benachbarten Objekts oder Sonnenstrahlung) ausgesetzt werden.

52 [DIN 7726, 2002, S.17]

- Der Sensor sollte eine Oberfläche mit niedrigem Emissionsgrad haben.
- Zusätzlich sollte der Sensor von der Umgebung abgeschirmt werden. Die Abschirmung sollte mit einem Material mit niedrigem Emissionsgrad versehen werden (z.B. Alufolie).
- Gleichzeitig sollte die Luftzirkulation um den Sensor so hoch wie möglich sein.
- Die Masse und damit die thermische Trägheit des Sensors sollte so gering wie möglich sein, um Änderungen der Lufttemperatur ohne Verzögerung erfassen zu können.

Im Falle der Lufttemperatursensoren in den Laborräumen wurden die PT-100 Sensoren mittig in einem vertikal aufgehängten HT-Rohr positioniert, welches zum Raum hin mit Alufolie bekleidet wurde (s. Abb. 31 im Hintergrund). Damit wurde eine Abschirmung gegen Strahlung, aber gleichzeitig eine gute Luftzirkulation gewährleistet.

Messung der operativen Temperatur

Anstelle einer Globesonde kann zur Ermittlung der operativen Temperatur auch eine getrennte Messung und anschließende Verrechnung der Lufttemperatur und der Flächenstrahlungstemperatur erfolgen.⁵³

Die operative Temperatur kann auch direkt mit einer geschwärzten Hohlkugel (Globesonde) (s. Abb. 31 / 32) gemessen werden. „Das Globethermometer (auch Globus-Thermometer besteht aus einer mattschwarzen Hohlkugel mit ca. 150 mm Durchmesser, in deren Inneren die sich einstellende Temperatur mit z.B. Thermoelementen oder PT-100-Fühlern gemessen wird. Die Temperatur liegt in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit zwischen der Lufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen. Bei üblichen Raumluftgeschwindigkeiten (um 0,1 bis 0,2 m/s) ist die gemessene Globetemperatur in etwa das Mittel zwischen Luft- und mittlerer Oberflächentemperatur und entspricht der operativen (empfundene) Raumtemperatur.“⁵⁴

Eine genaue Beschreibung des Aufbaus einer geschwärzten Hohlkugel und weitere Hinweise zur Anwendung kann der EN ISO 7726 im Anhang B (S. 20) entnommen werden.



Abb. 31 Globesonde und abgeschirmter Lufttemperatursensor

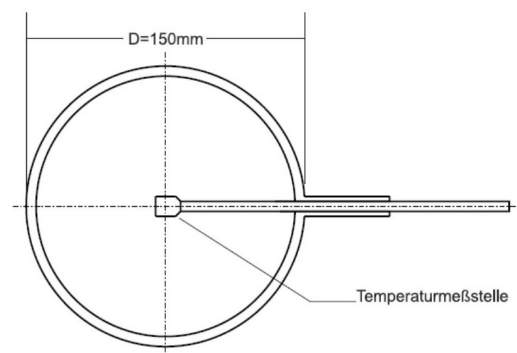


Abb. 32 Schematischer Aufbau des Globethermometers⁵⁵

53 [DIN 7726, S.27]

54 [Recknagel, Sprenger, Schramek, 2019, S.358]

55 [Hausladen, Meyer, 1999, S.23]

Messung der Oberflächentemperatur mit dem Kontaktthermometer

Bei der Messung der Oberflächentemperatur mit einem Kontaktthermometer sollte der Wärmeaustausch zwischen Oberfläche und Sensor sehr viel größer sein als zwischen der Umgebung und dem Sensor. Um dies zu erreichen, muss der Anpressdruck zwischen Sensor und Oberfläche möglichst groß sein, zudem sollte Wärmeleitpaste zur Verbesserung der Wärmeleitung eingesetzt werden.

Bei der Messung mit dem Kontaktthermometer ist zu beachten, dass sich die Temperatur so nur sehr lokal messen lässt. Um auf kleineren Flächen mit inhomogener Wärmeverteilung eine durchschnittliche Temperatur messen zu können, können die Sensoren auf einer gut wärmeleitenden Platte befestigt werden (z.B. einem dünnen Kupferblech).

Soll die durchschnittliche Wandtemperatur ermittelt werden, ist zu beachten, dass gerade in Räumen, die mit IR-Heizungen beheizt werden, die Wandtemperaturen durch die inhomogene Strahlungsverteilung der IR-Heizung deutliche Temperaturunterschiede auf der Wandfläche aufweisen können. Um diese Temperaturunterschiede messen und die gemessenen Wandtemperaturen für die Berechnung der operativen Temperatur im Raum verwenden zu können, hat sich im Projekt gezeigt, dass eine berührungslose Temperaturmessung mit Infrarotthermometern besser geeignet ist.

Berührungslose Messung der Oberflächentemperatur

Thermometer zur berührungslosen Temperaturmessung nennt man Pyrometer oder auch Infrarotthermometer. Bei Pyrometern wird mittels eines optischen Systems die eintreffende Wärmestrahlung auf einen Infrarotempfänger fokussiert. Das vom Pyrometer ausgegebene Ausgangssignal ist dann proportional zur eintreffenden Strahlung.

Die Optik von Pyrometern kann verschiedene Sichtwinkel in den Raum aufweisen. So ist es möglich, die durchschnittliche Temperatur über einer größeren Fläche zu messen. Anders als bei einer IR-Kamera ist jedoch keine differenzierte Darstellung oder Messung einzelner Bereiche des Sichtwinkels möglich.

Um Pyrometer zu kalibrieren, benötigt man im Idealfall einen Blockkalibrator. Behelfsmäßig lassen sich Pyrometer auch kalibrieren, indem man sie auf eine Wand ausrichtet, auf der im Sichtfeld des Pyrometers möglichst viele bereits kalibrierte Kontaktthermometer angebracht sind. Durch eine gleichzeitige Messung mit allen Thermometern über einen längeren Zeitraum lässt sich die Abweichung des Pyrometers von den kalibrierten Kontakttemperatursensoren ermitteln. Bei der Messung ist darauf zu achten, dass der Raum, in dem die Messung stattfindet, möglichst von externen Wärmestrahlungsquellen abgeschirmt ist. Die Pyrometer sollten bei der Kalibrierung den gleichen Abstand von der Wand haben, den sie später auch im eingebauten Zustand haben, da es sonst zu Messabweichungen kommen kann.

Messung der Wandschichttemperatur

Um die Temperatur in einem Bauteil zu messen, sollte der Sensor möglichst bei Erstellung des Bauteils in die gewünschte Position eingebaut werden. Der thermische Kontakt zwischen den verschiedenen Materialien des Bauteils muss durch den Einsatz von Wärmeleitpaste verbessert werden. Der Weg zwischen Sensor und Austritt des Sensorkabels aus der Wand sollte so lang wie möglich sein, um eventuelle Wärmeleitung durch das Kabel an den Sensor zu minimieren.

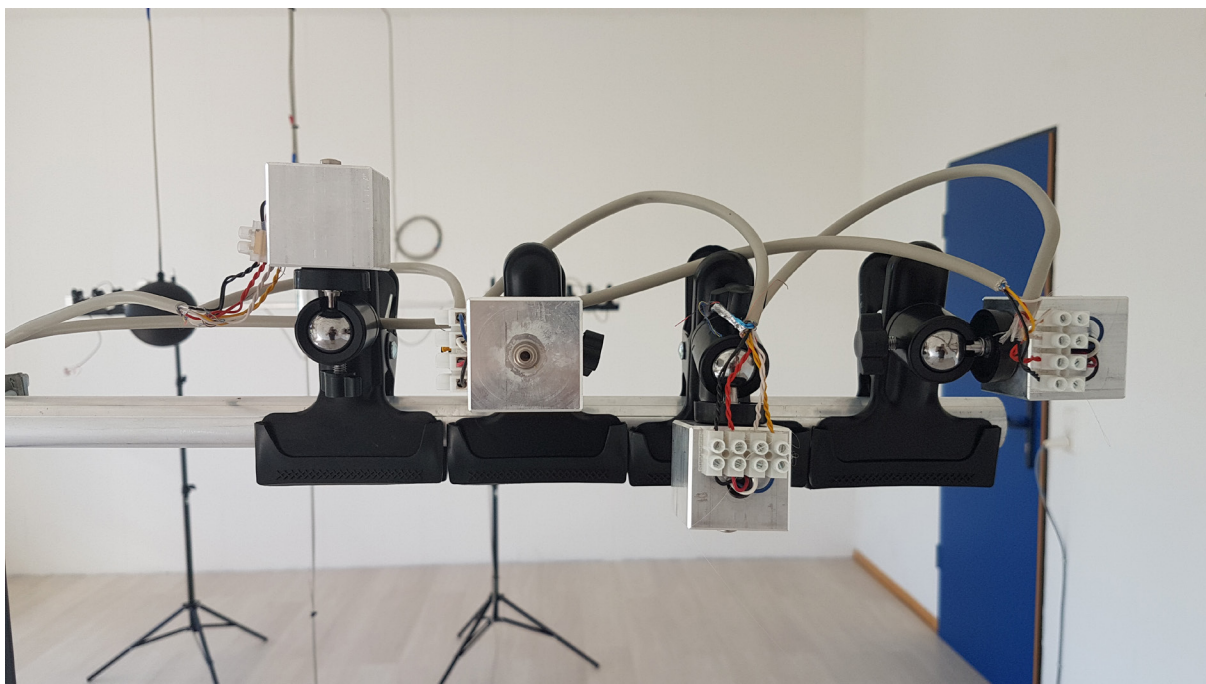


Abb. 33 Pyrometer (IR-Thermometer) zur Messung der Oberflächentemperaturen im Raum
(Eigenbau mit MLX90614ESF-BAA Sensoren)

Kann der Sensor erst nachträglich in ein Bauteil eingebaut werden, ist es von Vorteil, wenn der Sensor möglichst robust ist, damit er beim Einbringen nicht beschädigt wird. Das Bohrloch sollte, genau wie das verwendete Sensorkabel, möglichst dünn sein. Das Bohrloch muss am Austritt des Kabels abgedichtet werden, damit keine Umgebungsluft die Temperatur im Inneren des Bauteils beeinflusst.

3.4.3 Sensoren - Luftfeuchtemessung

Sensoren, mit denen man den Feuchtegehalt der Luft messen kann, nennt man Hygrometer. Man unterscheidet dabei Sensoren, die die absolute Luftfeuchte messen und solche, die die relative Luftfeuchte messen.

Die absolute Luftfeuchte beschreibt, wieviel Wasser (in Form von Wasserdampf) sich in einer bestimmten Menge Luft befindet. Sie wird in g/m^3 angegeben.

Für die thermische Behaglichkeit im Raum ist die relative Luftfeuchte von Bedeutung. Sie beschreibt, wieviel Wasserdampf, im Vergleich zur maximal möglichen bindbaren Menge an Wasser (Taupunkt), in der Luft gebunden ist. Sie wird in % von 100 angegeben. Die relative Luftfeuchte ist von der Lufttemperatur, dem Luftdruck und der absoluten Luftfeuchte abhängig. Je höher die Lufttemperatur, desto mehr Wasserdampf kann in der gleichen Menge Luft gebunden werden. Die Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte und Temperatur wird im h,x -Diagramm beschrieben.

Zur Messung der relativen Luftfeuchte wurde in den Laborräumen ein One-Wire Sensor vom Typ DHT 22 eingesetzt. Er hat eine Genauigkeit von $\pm 2\%$ RF. Da eine höhere Genauigkeit für die Messungen in den Laborräumen nicht notwendig war, wurde auf eine Kalibrierung verzichtet.

Hygrometer sollten genauso wie Thermometer von Wärmestrahlungsquellen abgeschirmt werden, damit die Messergebnisse nicht von der Strahlung beeinträchtigt werden.

3.4.4 Sensoren - Stromverbrauchsmessung

Die elektrische Energie ist das Produkt aus Leistung (P) und der Zeit (t), in der die Leistung anliegt. So verbraucht eine IR-Heizung mit 1.000 Watt Leistung (P) in einer Stunde (t) eine Kilowattstunde an elektrischer Energie. Die elektrische Energie kann in Wattsekunden (Ws), Wattstunden (Wh) oder gängigerweise in Kilowattstunden (kWh) ausgedrückt werden.

Der Verbrauch an elektrischer Energie kann mit Stromzählern gemessen werden. Damit die Stromzähler eine ausreichende Genauigkeit haben und die Stromverbräuche verschiedener Zähler verglichen werden können, sollten die Zähler geeicht oder MID-konform sein:

Eine Eichung ist dabei eine hoheitliche Aufgabe eines Landes, in der geprüft wird, ob ein Messgerät die notwendige vorgeschriebene Genauigkeit einhält oder nicht. Im Vergleich zur Kalibrierung ist bei bestimmten Messgeräten eine Eichung zwingend notwendig, um diese in den Verkehr zu bringen und damit Messungen durchzuführen. In Deutschland wird „das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt, ihre Verwendung und Eichung sowie über Fertigpackungen“ im „Mess- und Eichgesetz - MessEG“ rechtlich geregelt.

Die MID (Measuring Instruments Directive) definiert grundlegende und messgerätespezifische Anforderungen und bezieht sich auf zehn verschiedene Messgeräte (Elektrizitätszähler, Wasserzähler, Gaszähler ...) im Bereich des gesetzlichen Messwesens. Die bisherige Ersteichung durch die Eichbehörde bzw. durch eine staatlich anerkannte Prüfstelle wird durch ein Konformitätsbewertungsverfahren ersetzt, bei dem die Mitwirkung einer vom Hersteller gewählten und benannten Stelle vorgeschrieben ist.⁵⁶

Bei der Auswahl der Stromzähler ist darauf zu achten, dass die Zähler für die zu messende maximale Stromstärke (Ampere) ausgelegt sind. Es wird in Wechselstrom- und Drehstromzähler unterschieden (Starkstrom).

Für die längerfristige Aufzeichnung von Stromverbräuchen ist es nötig, dass der Stromzähler den gemessenen Stromverbrauch zum einen im Gerät selbst speichert und dieser über ein Display ablesbar ist. So wird der Verbrauch auch im Falle eines Ausfalls des Datenloggers gemessen. Zum anderen sollten die Zählerdaten auch über eine geeignete Schnittstelle an einen Datenlogger übertragen werden, um den zeitlichen Verlauf der Stromverbräuche erfassen zu können. Als Schnittstelle kommen z.B. „S0“ oder „Modbus“ in Frage. Ist eine hohe zeitliche Auflösung bei der Aufzeichnung der Stromverbräuche notwendig, sollte im Falle der Verwendung der „S0“ Schnittstelle ein Zähler mit hoher Impulsanzahl pro kWh gewählt werden.

Eine Beschreibung der im Projekt eingesetzten Stromzähler findet sich in den Kapiteln 2.1.3 und 2.2.3

3.4.5 Sensoren - Wärmemengenzähler

Wärmemengenzähler (WMZ) messen die Wärmemenge in kWh, die in einem hydraulischen System transportiert und abgegeben wird. Dies erfolgt durch die Messung von Vor- und Rücklauftemperatur und des Volumenstroms des Mediums. In Wohngebäuden werden WMZ vor allem auch zu Abrechnungszwecken genutzt.

Wärmemengenzähler sollten genau wie Stromzähler geeicht oder MID-konform sein und immer im Rücklauf eingebaut werden. Neben dem direkten Ablesen des Zählers über das Display, lassen sich viele WMZ auch über verschiedene Schnittstellen mit Datenloggern verbinden. So lässt

56 [www.janitza.de, 04/2020]

sich neben der Wärmemenge auch die genau Lastkurve aufzeichnen. Um auch Leitungs- und Speicherverluste zu erfassen, kann es erforderlich sein, mehrere WMZ in einem hydraulischen Verteilnetz einzubauen. Eine Übersicht zu Position und Anzahl der im Projekt eingesetzten WMZ gibt das Hydraulikschema in Abb. 10 auf S. 40.

3.4.6 Sensoren - Solare Einstrahlung

Sensoren zur Messung der solaren Einstrahlung werden Pyranometer genannt. Pyranometer messen die solare Einstrahlung in W/m^2 . Die Messung der solaren Einstrahlung ist z.B. hilfreich, um Temperaturveränderungen im Raum, die durch den Eintrag solarer Strahlungsenergie hervorgerufen wurden, nachvollziehen zu können.

Pyranometer messen dabei ohne zusätzliche Abschirmung immer die gesamte eintreffende Direkt- und Diffusstrahlung in der Hemisphäre um sich. Für die Messung der solaren Einstrahlung an der Ost-, Süd- und Westfassade bräuchte man also drei Pyranometer, für die Messung der Globalstrahlung ein Pyranometer in unverschatteter horizontaler Ausrichtung.

Soll nur die Direktstrahlung oder die Diffusstrahlung gemessen werden, benötigt man ein automatisches Trackingsystem, auf dem das Pyranometer befestigt ist und das dem Sonnenverlauf folgt. Durch eine Blende kann dann entweder die diffuse Einstrahlung oder die Direktstrahlung ausgeblendet werden.

Pyranometer werden in nachfolgende Genauigkeitsklassen unterteilt:

- Second Class (ungenauer)
- First Class
- Secondary Standard (sehr genau)



Abb. 34 Pyranometer SMP 10-A von Kipp und Zohnen in Fensterebene der Laborräume

Je nach Anwendung sollte geprüft werden, welche Genauigkeit benötigt wird. Für die Messung der solaren Einstrahlung in den Laborräumen wurde ein Pyranometer der Klasse „Secondary Standard“ gewählt. Um über einen längeren Zeitraum eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten, sollte der Glasdom des Pyranometers regelmäßig gereinigt werden.

Pyranometer können, je nach Modell, über verschiedene Schnittstellen (0-10V / Modbus) mit einem Datenlogger verbunden werden.

3.4.7 Regelungstechnik

Es wird grundsätzlich zwischen Steuerung und Regelung unterschieden.

Bei einer Steuerung „wird die zu beeinflussende Größe nicht gemessen, sondern es wird an ihrer Stelle eine Ersatzgröße gemessen, die den Schaltvorgang auslöst (z.B. über eine Schaltuhr für die Nachtabsenkung einer Heizungsanlage).“⁵⁷

„Bei einer Regelung findet eine laufende Messung (Überwachung) statt, die durch Regelglieder den jeweiligen Anforderungen entsprechend die Regelvorgänge beeinflusst (z.B. eine gleitende Anpassung der Vorlauftemperatur an die jeweilige Außentemperatur).“⁵⁸

Regler unterscheiden sich wiederum in stetige Regler (z.B. P, I, PI, PID) und unstetige Regler (z.B. Zweipunktregler). Die Wärmeerzeuger in den Laborräumen in dieser Arbeit wurden ausschließlich mit einer Zweipunktregelung geregelt.

Für die Zweipunktregelung wird ein Sollwert und eine Hysterese vorgegeben, in der der Sollwert über- oder unterschritten werden darf. Unterschreitet der gemessene Wert den Sollwert minus Hysterese, wird der Wärmeerzeuger eingeschaltet. Überschreitet der gemessene Wert den Sollwert plus Hysterese, wird der Wärmeerzeuger ausgeschaltet. Siehe Beispiel in Abb. 35.

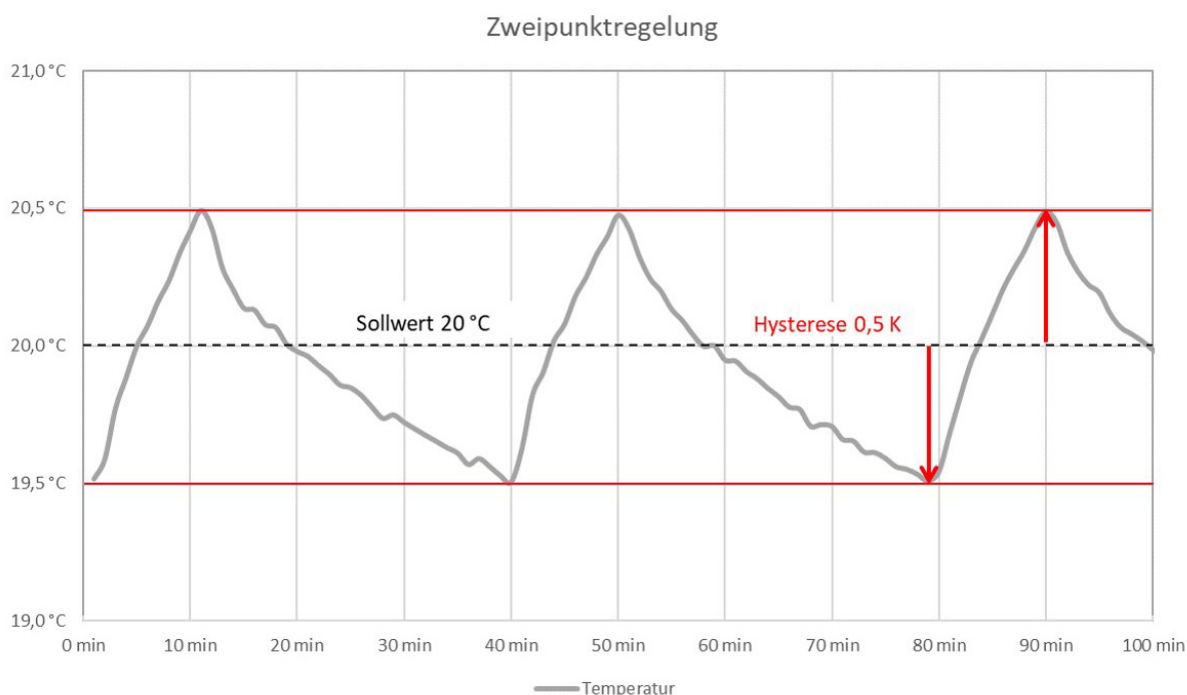


Abb. 35 Beispielhafter Temperaturverlauf bei einer Zweipunktregelung

57 [Pistohl, 2007, S. H184]

58 [ebd., S. H184]

Je nach Trägheit des zu regelnden Wärmeerzeugers kann die Temperatur über den oberen oder unteren Grenzwert über- bzw. unterschwingen.

Globesonden sind für eine Regelung mit Zweipunktregler nur bedingt geeignet. Je mehr Masse sie haben, desto größer ist die Trägheit des Sensors und der Wert der tatsächlichen operativen Temperatur wird nur zeitverzögert an den Sensor im Inneren weitergegeben. Die tatsächliche operative Temperatur im Raum kann somit zur gleichen Zeit bereits deutlich höher sein.

Sollen nicht nur Daten aufgezeichnet, sondern auch in Abhängigkeit der gemessenen Daten z.B. Wärmeerzeuger geregelt werden, sollten Aufzeichnung und Regelung in einem System erfolgen.

4 Detailuntersuchungen zur Wirkungsweise und Effizienz von IR-Heizungen

4.1 Effizienzunterschiede IR-Heizung / Wärmepumpe im Betrieb unter Laborbedingungen

IR-Heizungen sollen, aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften als Wärmeerzeuger, Effizienzvorteile im Nutzwärmebedarf gegenüber anderen Wärmeerzeugungssystemen bieten. Diese Vorteile sollen vor allem aus den in Kapitel 1.1 beschriebenen Wirkweisen resultieren. Im folgenden Kapitel soll untersucht werden, ob sich die beschriebenen Wirkweisen bestätigen lassen und wie groß die effektive Differenz des Strombedarfs im Betrieb für die Wärmeversorgung von Räumen im Realbetrieb inklusive Hilfsenergie zwischen folgenden Wärmeerzeugern ist:

- Raum T1: Luftwärmepumpe und Fußbodenheizung im Heizestrich
- Raum T2: Elektrische Fußbodenheizung als Trockenbausystem
- Raum T3: Infrartheizsystem (Deckenaufhängung)
- Raum T4: Infrartheizsystem (Wandaufhängung)

Für den direkten Vergleich im Realbetrieb wurden vier bauphysikalisch gleiche Laborräume mit den vier Wärmeerzeugern Wärmepumpe mit Fußbodenheizung, Elektrische Fußbodenheizung, IR-Heizung an der Decke und IR-Heizung an der Wand ausgestattet. Siehe Kapitel 2.2.

In der **Heizperiode 2017 / 18** wurden die Strom- und Wärmeverbräuche der Laborräume T1, T2, T3 und T4 in drei Messphasen miteinander verglichen. Siehe Abbildungen ab S.81.

- Erste Messphase: 22.12.2017 – 07.02.2018. Die Lüftung in jedem Laborraum wurde in diesem Zeitraum auf maximale Stufe (55 m³/h) ohne WRG gestellt. Die Hysterese der drei Elektroheizungen wurde auf 0,1 K, die der wassergeführten FBH auf 0,5 K gestellt. Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur (Globesonde).
- Zweite Messphase: 21.02.2018 – 20.03.2018. Die Lüftung in jedem Laborraum wurde auf die kleinste Stufe (12 m³/h) mit WRG gestellt. Die Hysterese aller Heizungen wurde einheitlich auf 0,5 K gestellt. Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.
- Dritte Messphase: 20.03.2018 – 01.05.2018 Die Lüftung in jedem Laborraum wurde auf kleinste Stufe (12 m³/h) mit WRG gestellt. Die Hysterese der IR-Heizungen wurde wieder auf 0,1 K, die der zwei FBH auf 0,5 K gestellt. Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

In der **Heizperiode 2018 / 19** wurden die Strom- und Wärmeverbräuche der Laborräume T1, T2 und T3 in vier Messphasen miteinander verglichen. Siehe Abbildungen ab S.87.

- Erste Messphase: 11.11.2018 – 30.11.2018. Die Lüftung in jedem Laborraum wurde auf kleinste Stufe (12 m³/h) mit WRG gestellt. Die Hysterese aller Heizungen wurde einheitlich auf 0,5 K gestellt. Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

- Zweite Messphase: 20.12.2018 – 01.03.2019. Die Lüftung in jedem Laborraum wurde auf kleinste Stufe (12 m³/h) mit WRG gestellt. Die Hysterese aller Heizungen wurde einheitlich auf 0,5 K gestellt. Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.
- Dritte Messphase: 07.03.2019 – 20.03.2019. Die Lüftung in jedem Laborraum wurde auf kleinste Stufe (12 m³/h) mit WRG gestellt. Die Hysterese aller Heizungen wurde einheitlich auf 0,5 K gestellt. Regelung nach **berechneter** operativer Temperatur.
- Vierte Messphase: 12.04.2019 – 01.05.2019. Die Lüftung in jedem Laborraum wurde auf kleinste Stufe (12 m³/h) mit WRG gestellt. Die Hysterese aller Heizungen wurde einheitlich auf 0,5 K gestellt. Regelung nach **berechneter** operativer Temperatur.

Die Regelung aller Laborräume erfolgte einheitlich mittels Zweipunktregler durch den Loxone Miniserver. Als Solltemperatur wurde 20 °C vorgegeben. Alle Umgebungsräume wurden gleichmäßig beheizt. Die Bilanzräume für die Berechnung der Jahresarbeitszahl / Arbeitszahl der Wärmepumpe werden wie folgt definiert:

- AZ Level 1: Es wird die Wärmemenge, die direkt am Ausgang der Wärmepumpe gemessen wurde, mit dem Strombedarf der Wärmepumpe für Kompressor und Ventilator ins Verhältnis gesetzt.
- AZ Level 3: Es wird die Wärmemenge, die Laborraum T1 zur Aufrechterhaltung der Solltemperatur erhalten hat, ins Verhältnis zum anteiligen Gesamtstrombedarf für Laborraum T1 gesetzt.

Der Gesamtstrombedarf enthält: Wärmepumpenaußeneinheit (Kompressor, Ventilator), Wärmepumpeninneneinheit (Heizkreispumpen, Ventile, Elektroheizstab, interne Regelungstechnik der Wärmepumpe), Rohrbegleitheizung für den Kondensatabfluss der Außeneinheit und Stellventile. Der Gesamtstrombedarf wurde im Verhältnis der gemessenen gelieferten Wärmemengen für den Laborraum und die Auslastungsräume aufgeteilt. Aus dieser Aufteilung ergibt sich der anteilige Strombedarf für Laborraum T1.

Bei einer dezentralen direktelektrischen Heizung werden 100 % der eingesetzten elektrischen Energie im zu beheizenden Raum in Wärme umgesetzt (s. Kapitel 3.1.5). Daher entspricht der Wärmeverbrauch der Laborräume mit IR-Heizung oder E-FBH immer exakt dem gemessenen Stromverbrauch des jeweiligen Systems.

4.1.1 Messergebnisse Heizperiode 2017 / 2018

Messphase 1: 22.12.2017 – 07.02.2018

Lüftung **55 m²/h ohne WRG,**

Hysterese FBH **0,5 K**; E-FBH **0,1 K**; IR-Decke **0,1 K**; IR-Wand **0,1 K**

Durchschnittliche Außentemperatur 2,7 °C; AZ Level 1 der WP: 4,3; AZ Level 3 der WP: 3,8

Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,5 %

Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

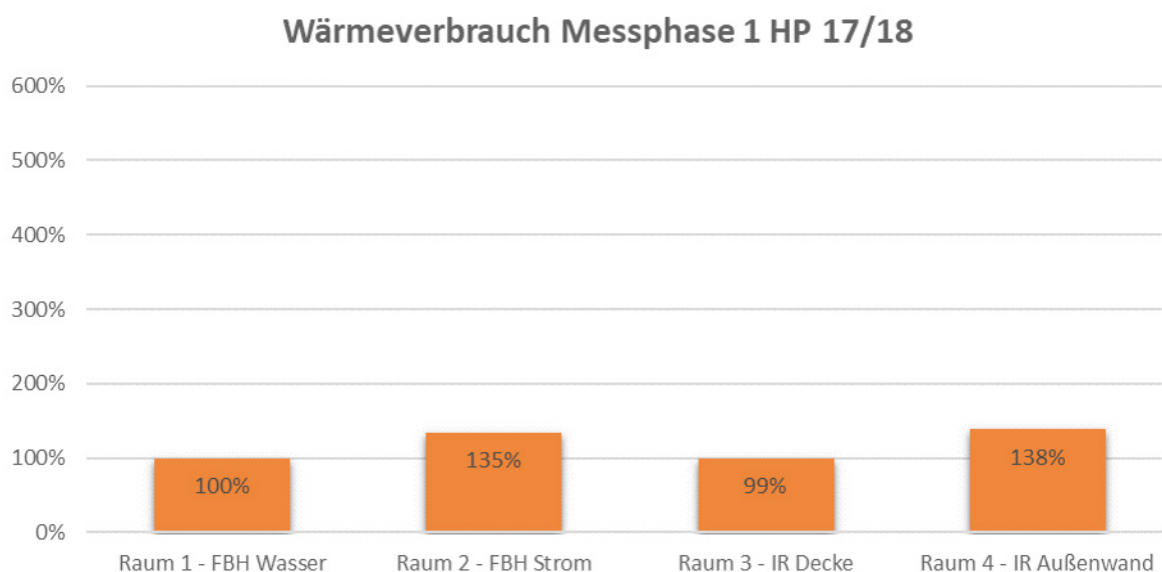


Abb. 36 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2017/2018

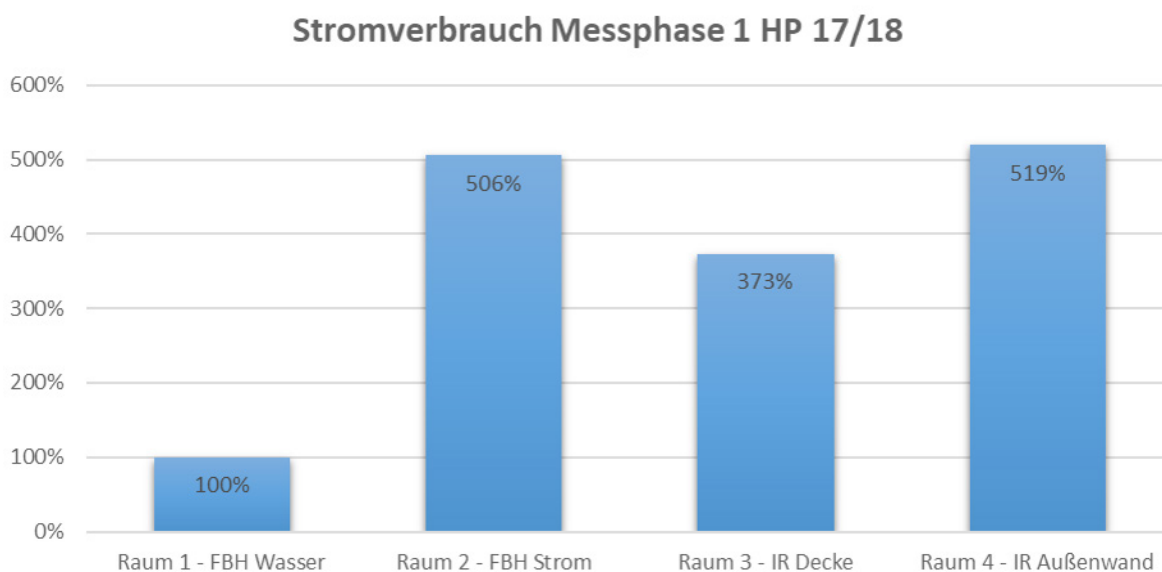


Abb. 37 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2017/2018

Messphase 2: 21.02.2018 – 20.03.2018

Lüftung **12 m²/h mit WRG,**

Hysterese FBH **0,5 K**; E-FBH **0,5 K**; IR-Decke **0,5 K**; IR-Wand **0,5 K**

Durchschnittliche Außentemperatur -0,6 °C; AZ Level 1 der WP: 3,5; AZ Level 3 der WP: 3,0

Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,5 %

Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

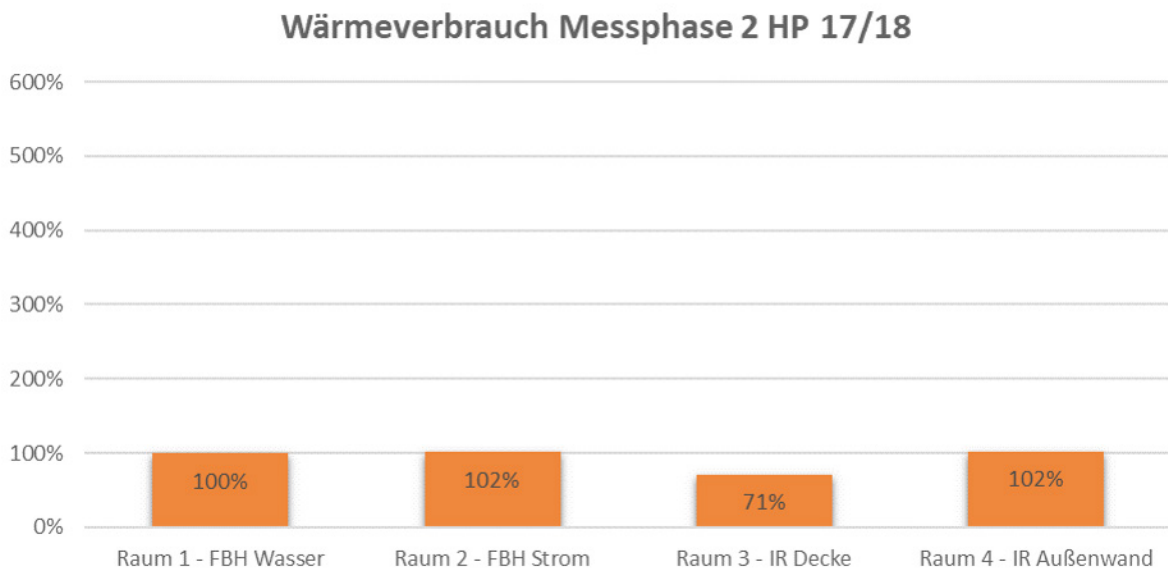


Abb. 38 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2017/2018

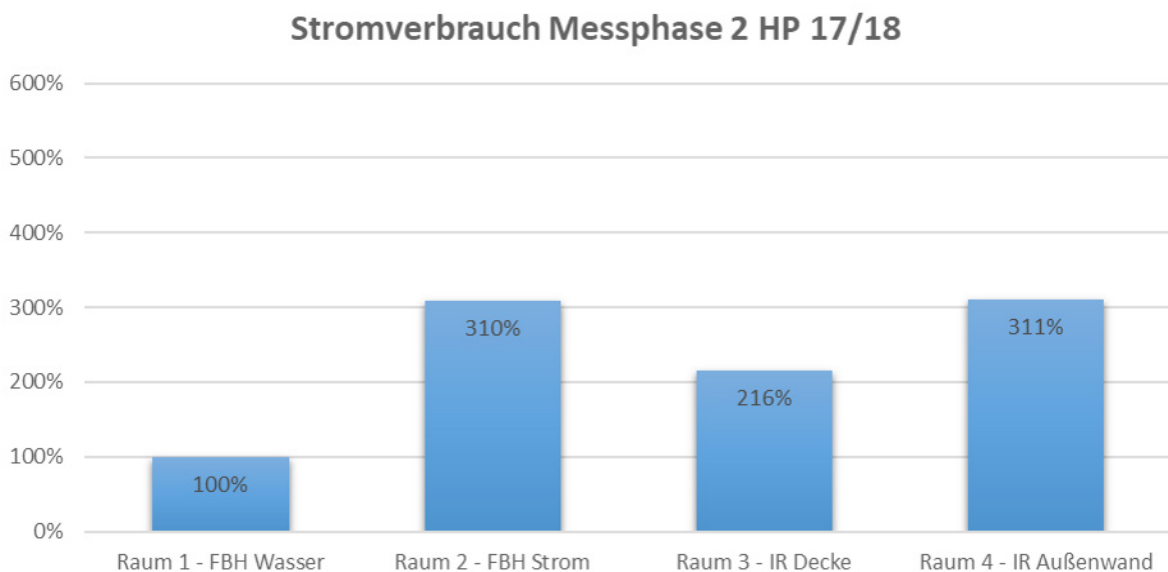


Abb. 39 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2017/2018

Messphase 3: 20.03.2018 – 01.05.2018

Lüftung **12 m²/h mit WRG**,

Hysterese FBH **0,5 K**; E-FBH **0,5 K**; IR-Decke **0,1 K**; IR-Wand **0,1 K**

Durchschnittliche Außentemperatur 10,2 °C; AZ Level 1 der WP: 4,0; AZ Level 3 der WP: 3,1

Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 2,2 %

Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

Wärmeverbrauch Messphase 3 HP 17/18

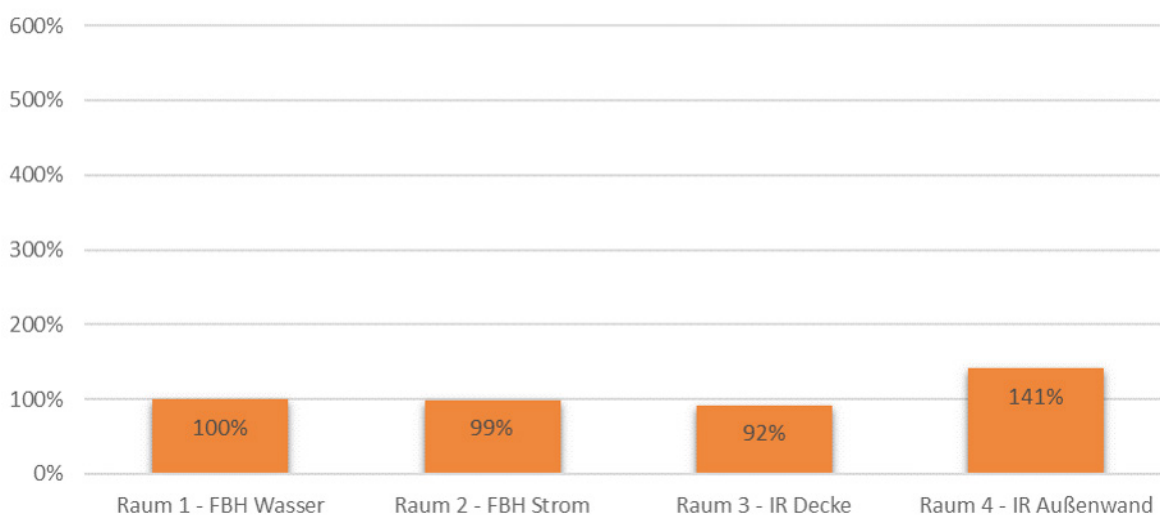


Abb. 40 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2017/2018

Stromverbrauch Messphase 3 HP 17/18

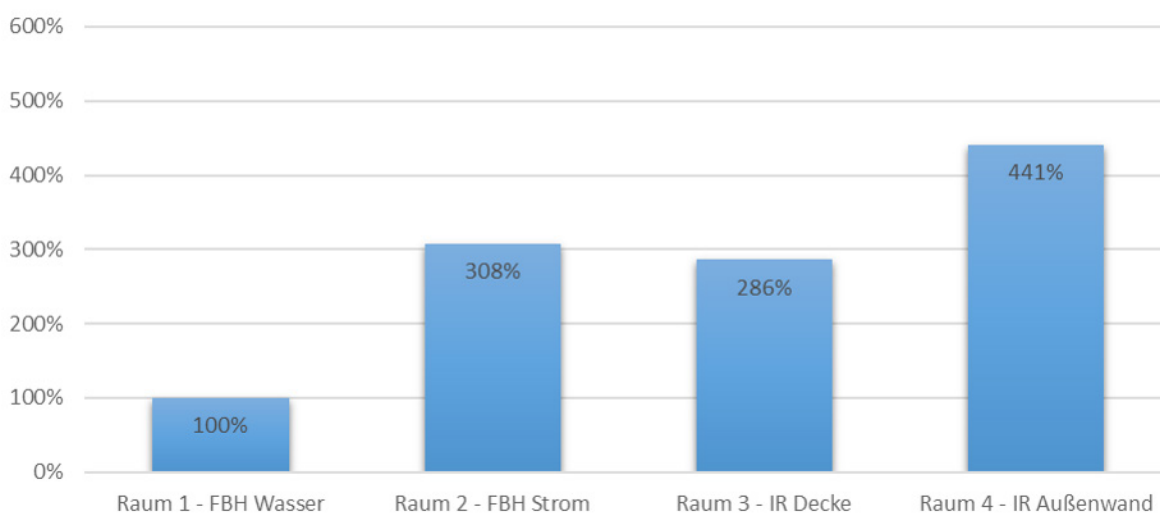


Abb. 41 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2017/2018

4.1.2 Interpretation der Messergebnisse Heizperiode 2017 / 2018

Bei den Wärmeverbräuchen zeigt sich, dass der Wärmeverbrauch von Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) in allen drei Messphasen immer unter dem von Laborraum T1 (Wärmepumpe mit FBH) liegt. In Messphase 2 ist der Wärmeverbrauch in Laborraum T3 (IR-Heizung Decke), bei gleichen Behaglichkeitsparametern, sogar um 30 % geringer als in Laborraum T1 (FBH-Wasser).

Vergleicht man die Stromverbräuche, weist Laborraum T1 (WP/FBH) wie erwartet durchgehend die niedrigsten Verbräuche auf. Hier profitiert die Wärmepumpe durch die Nutzung der Umweltwärme. In Zeiten mit niedrigen Außentemperaturen (Messphase 2) reduzieren sich jedoch die Effizienzunterschiede bis auf den Faktor 1:2 (Raum T1 zu T3), obwohl die durchschnittliche Level 1 Arbeitszahl der Wärmepumpe in der Zeit bei 3,0 liegt und so eigentlich ein Unterschied von 1:3 zu erwarten wäre.

Deutlichen Einfluss auf die Strom- und Wärmeverbräuche haben die Position der IR-Heizung, der eingestellte Luftvolumenstrom der Lüftung, die Wärmerückgewinnung der Lüftung und die Hysterese der Regelung.

Die wandaufgehängte IR-Heizung hat durchweg den höchsten Wärme- und Stromverbrauch. Dies hat zwei Ursachen:

- Für die Strahlungsleistung/m² ist der Abstand von strahlender Fläche zu bestrahltem Körper entscheidend. In allen drei Messphasen in HP 2017/18 wird die operative Raumtemperatur, nach der geregelt wird, von einer Globesonde gemessen, die exakt in Raummitte hängt. Die wandaufgehängten IR-Heizungen haben einen mittleren Abstand von 3,7 m, die deckenaufgehängten IR-Heizungen einen mittleren Abstand von nur 1,8 m. Da die Strahlungsleistung mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, ist die Strahlungsleistung/m², die die Globesonde erreicht, bei Wandaufhängung in diesem Fall viel geringer als bei Deckenaufhängung. Bei geringerer Strahlungsleistung erwärmt sich die Globesonde langsamer, die IR-Heizung läuft länger (s. Abb. 43 auf S. 86) und verbraucht so mehr Energie. Dies zeigt auch, dass die operative Temperatur in einem mit IR-Heizung beheizten Raum inhomogen ist.
- Bei Wandaufhängung einer IR-Heizung erhöht sich die Wärmeabgabe in Form von Konvektion, die Wärmeabgabe über Strahlung verringert sich (s. Kapitel: 4.4.7). Dies hat drei negative Auswirkungen:
 1. Durch den verringerten Strahlungsanteil wird auch die Strahlungsleistung, die die Globesonde erreicht, weiter verringert.
 2. Die aufsteigende Warmluft bildet unter der Decke ein Warmluftpolster (s. Abb. 42 auf S. 85). In mittlerer Raumhöhe trägt diese Warmluft nur geringfügig zum Erreichen einer behaglichen Raumtemperatur bei.
 3. Wird der Raum belüftet, erhöhen sich durch die stärkere Erwärmung der Raumluft die Lüftungswärmeverluste. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn über die Fenster oder eine Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung gelüftet wird.

Eine hohe Luftwechselrate ohne WRG wirkt sich auf alle drei direktelektrischen Heizsysteme negativ aus, bei den wandaufgehängten IR-Heizungen entsprechend der oben genannten Gründe. Aus den gemessenen Lufttemperaturen der elektrischen Fußbodenheizung lässt sich ableiten, dass diese als Trockenbausystem einen höheren Konvektionsanteil bei ihrer Wärmeübertragung hat als die wassergeführte Fußbodenheizung im Heizestrich. Entsprechend sind die Lüftungsverluste höher.

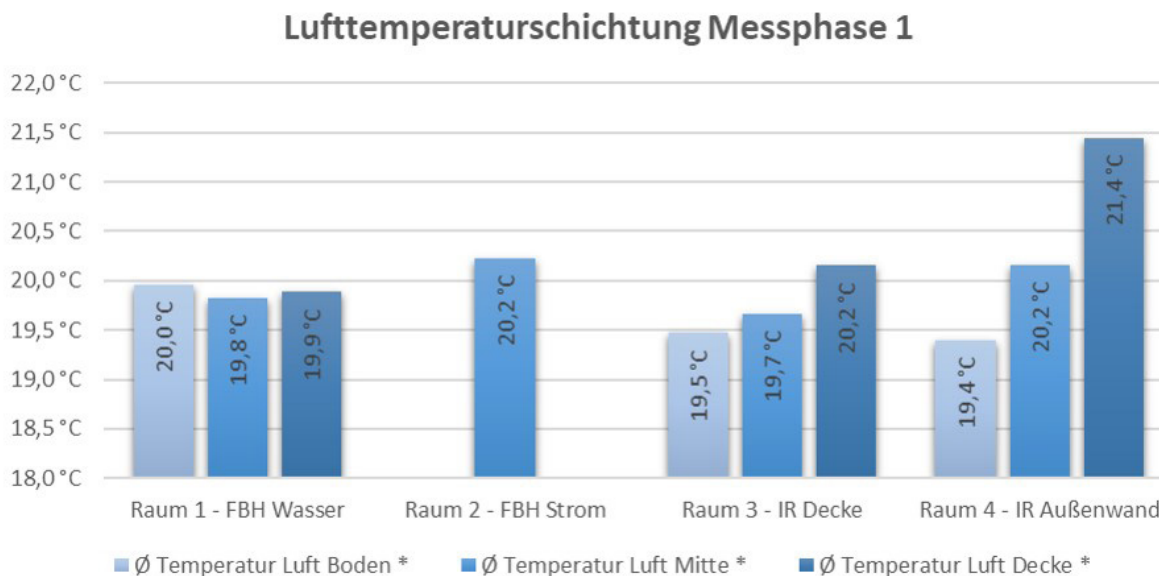


Abb. 42 Lufttemperaturschichtung Raum T1-T4, Messphase 1 HP 2017/18

Auch auf die deckenaufgehängten IR-Heizungen scheint eine hohe Luftwechselrate ohne WRG negative Auswirkungen zu haben. Dies hängt vermutlich damit zusammen, dass auch bei Deckenaufhängung ein Teil der von der IR-Heizung abgegebenen Wärme über Konvektion abgegeben wird. Die warme Luft steigt zur Decke auf und bildet dort ein Warmluftpolster. Wird nun, wie in den Laborräumen, die Abluft im oberen Bereich des Raumes abgesaugt, entstehen entsprechende Lüftungswärmeverluste.

Die Hysterese der Regelung hat ebenso einen Einfluss auf die Effizienz. Zwar entstehen bei kleiner Hysterese für die Elektroheizungen durch die hohen Taktraten, anders als für Wärmepumpen, keine Nachteile in der Effizienz und Lebensdauer. Aber durch eine hohe Hysterese lassen sich solare Wärmegewinne des Tages bzw. der nur langsame Temperaturabfall über Nacht, gerade in hochgedämmten Gebäuden, besser nutzen. In Abb. 44 auf S. 86 sieht man die operativen Temperaturen von Raum T2 (rot) und Raum T3 (blau). Die E-FBH in Raum T2 hat eine Hysterese von 0,5 K. Die IR-Heizung in Raum T3 eine Hysterese von 0,1 K. Infolgedessen ist die Laufzeit der IR-Heizung deutlich länger. Entsprechend höher ist der Stromverbrauch. Eine hohe Hysterese wirkt hier also wie eine eingestellte Nachtabenkung um 0,5 K.

Aus den Messungen in Heizperiode 2017 / 2018 lässt sich ableiten, dass es für eine Infrarotheizung, die nach gemessener operativer Temperatur geregelt wird, Vorteile hat, wenn diese:

- an der Decke montiert wird,
- die eingestellte Hysterese 0,5 K (oder größer) beträgt,
- die Raumlüftung durch eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erfolgt.

Gerade in Messphase 2 hat sich ein großer Unterschied im Wärmeverbrauch zwischen Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) und Laborraum T1 (WP/FBH) gezeigt. Um zu untersuchen, ob sich dieses Messergebnis wiederholen lässt, wurden die Messungen unter gleichen Einstellungen wie in Messphase 2 in der Heizperiode 2018 / 2019 wiederholt.

Da sich herausgestellt hat, dass die wandaufgehängten IR-Heizungen in Raum T4 bei Regelung nach gemessener operativer Raumtemperatur einen höheren Verbrauch haben als die deckenaufgehängten IR-Heizungen in Raum T3, wurde Laborraum T4 in der zweiten Heizperiode 2018 / 2019 nicht weiter in die Vergleichsmessungen miteinbezogen.

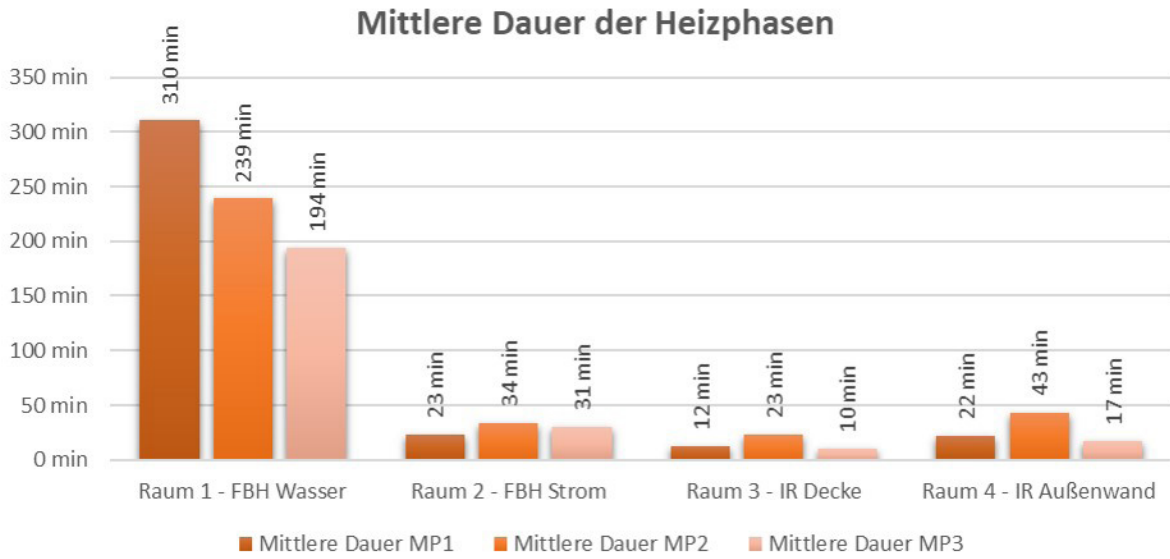


Abb. 43 Mittlere Dauer der Heizphasen Raum T1-T4 HP 2017/2018

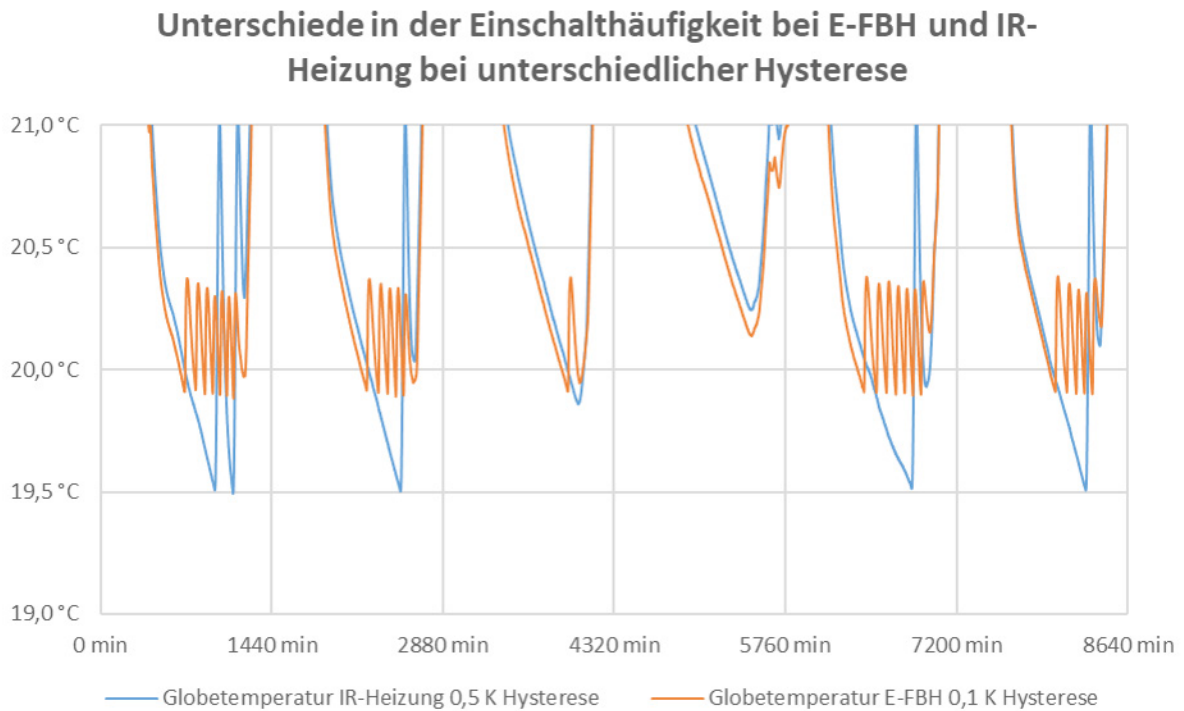


Abb. 44 Unterschiede in der Einschalthäufigkeit bei E-FBH und IR-Heizung bei unterschiedlicher Hysterese

4.1.3 Messergebnisse Heizperiode 2018 / 2019

Messphase 1: 13.11.2018 – 30.11.2018

Lüftung 12 m²/h mit WRG,
 Hysterese FBH 0,5 K; E-FBH 0,5 K; IR-Decke 0,5 K;

Durchschnittliche Außentemperatur 1,2 °C; Level 1 AZ: 4,1; Level 3 AZ: 3,5
 Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,5 %
 Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

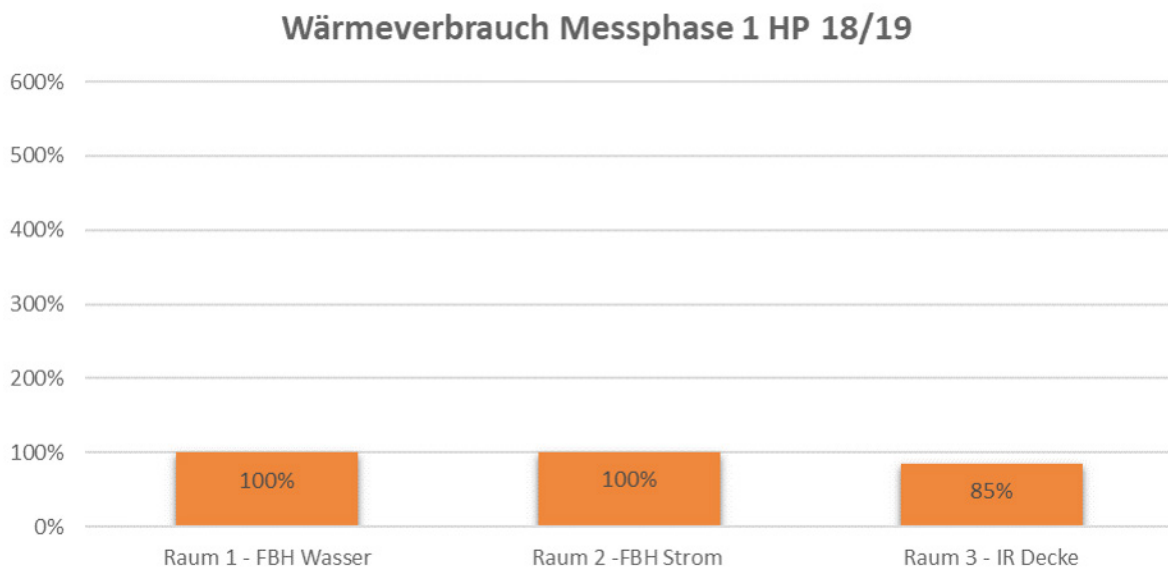


Abb. 45 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1,
 Messphase 1, Heizperiode 2018/2019

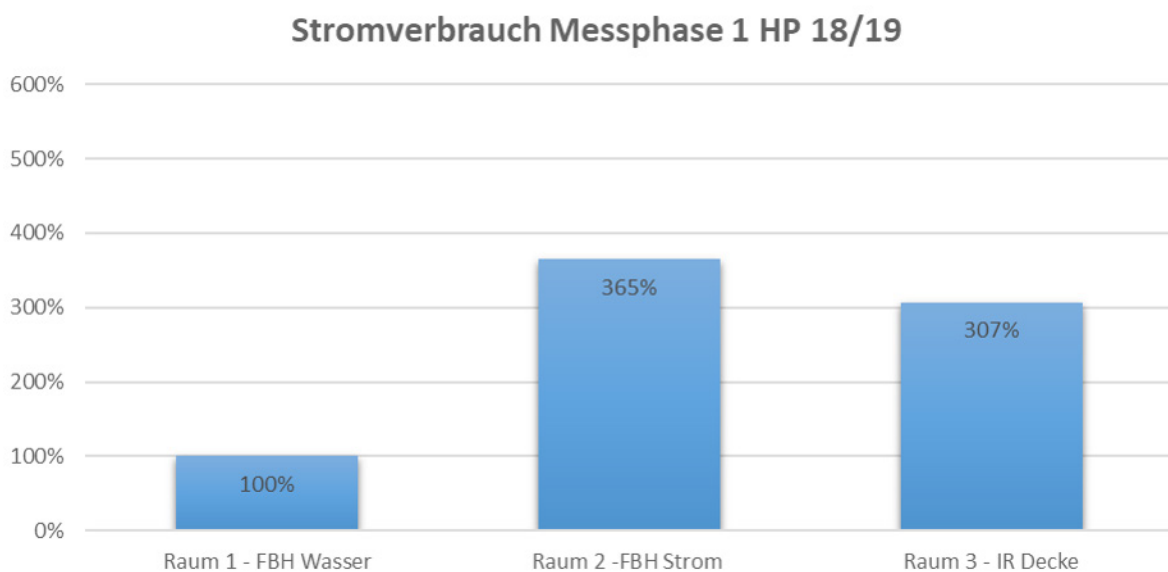


Abb. 46 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1,
 Messphase 1, Heizperiode 2018/2019

Messphase 2: 20.12.2018 – 01.03.2019

Lüftung 12 m²/h mit WRG,
Hysterese FBH 0,5 K; E-FBH 0,5 K; IR-Decke 0,5 K;

Durchschnittliche Außentemperatur 0,3 °C; Level 1 AZ: 3,8; Level 3 AZ: 3,3
Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,6 %
Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

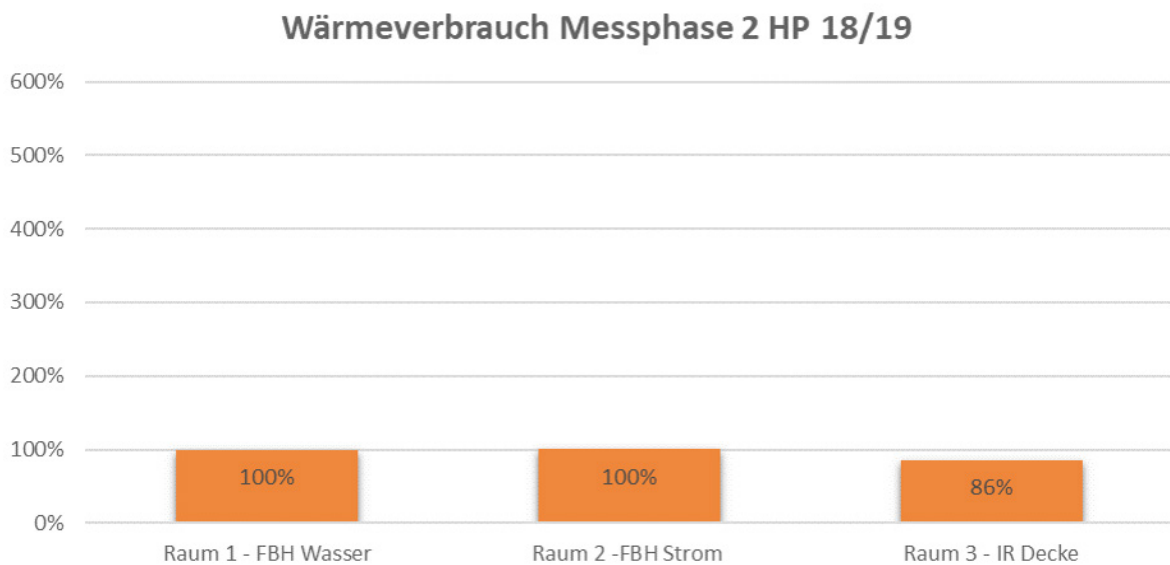


Abb. 47 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2018/2019

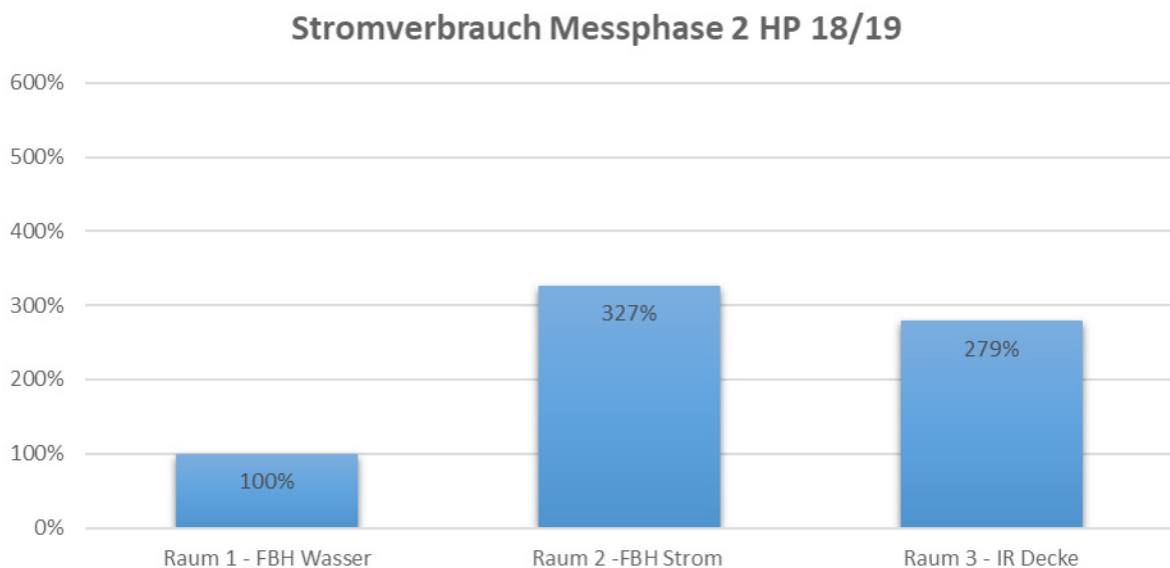


Abb. 48 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2018/2019

Messphase 3: 08.03.2019 – 14.03.2019

Lüftung 12 m²/h mit WRG,
 Hysterese FBH 0,5 K; E-FBH 0,5 K; IR-Decke 0,5 K;

Durchschnittliche Außentemperatur 4,4 °C; Level 1 AZ: 4,9; Level 3 AZ: 4,1
 Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,8 %
 Regelung nach **berechneter** operativer Temperatur.

Wärmeverbrauch Messphase 3 HP 18/19

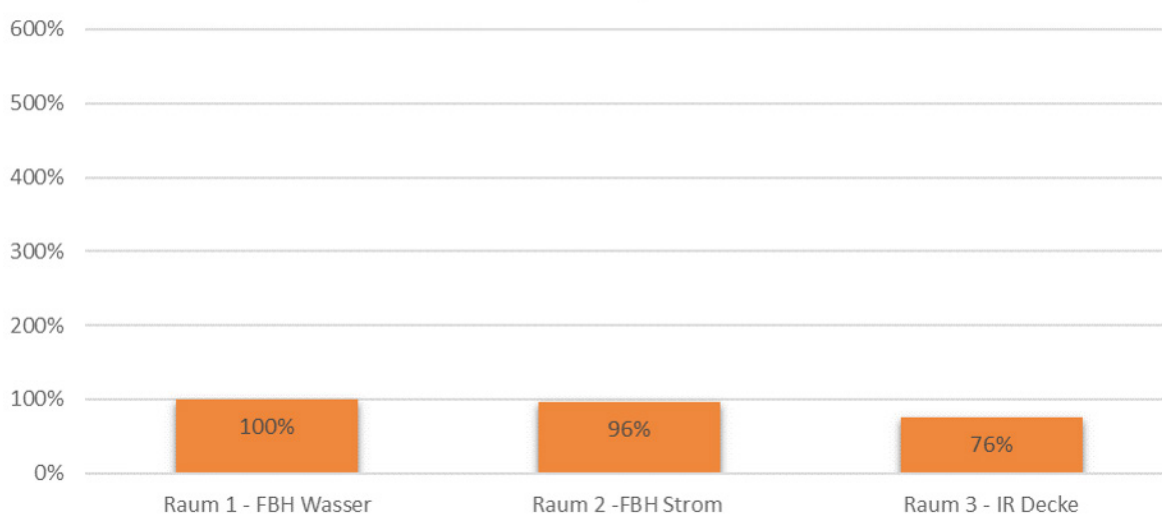


Abb. 49 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2018/2019

Stromverbrauch Messphase 3 HP 18/19

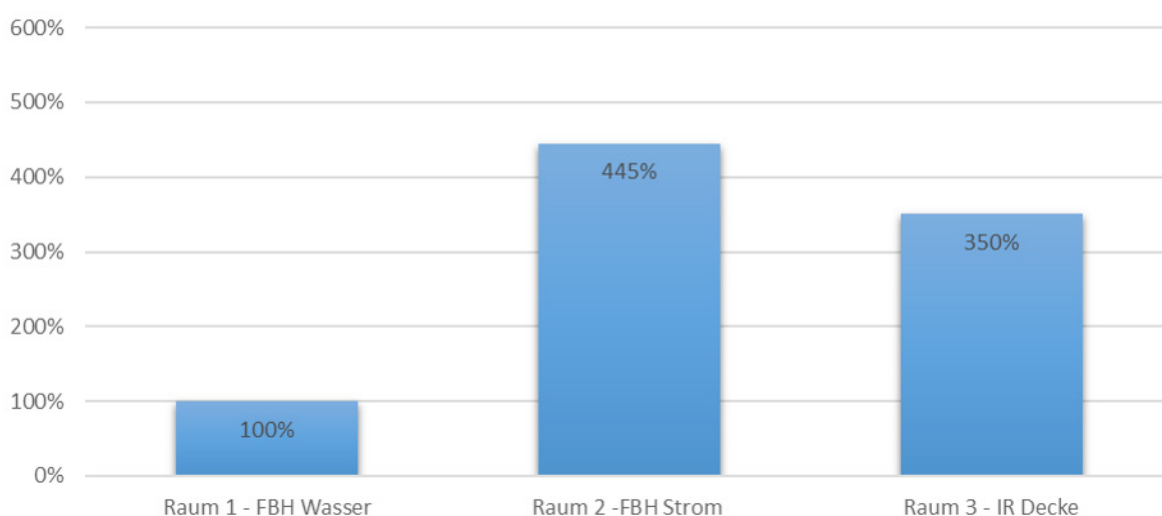


Abb. 50 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2018/2019

Messphase 4: 12.04.2019 – 01.05.2019

Lüftung 12 m²/h mit WRG,
Hysterese FBH 0,5 K; E-FBH 0,5 K; IR-Decke 0,5 K;

Durchschnittliche Außentemperatur 8,1 °C; Level 1 AZ: 4,8; Level 3 AZ: 3,9
Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,8 %
Regelung nach **berechneter** operativer Temperatur.

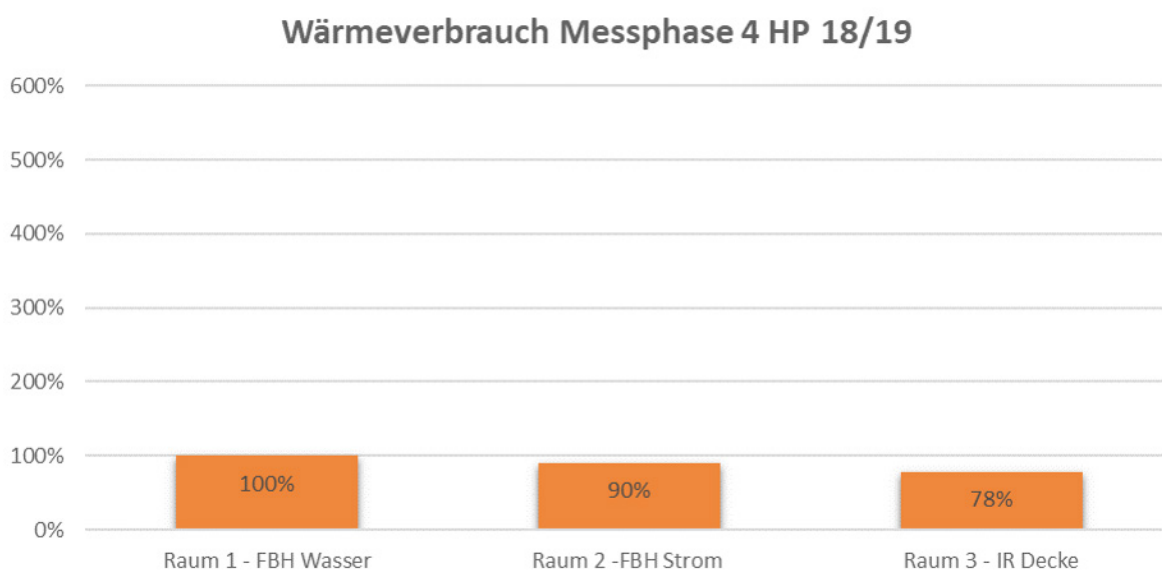


Abb. 51 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 4, Heizperiode 2018/2019

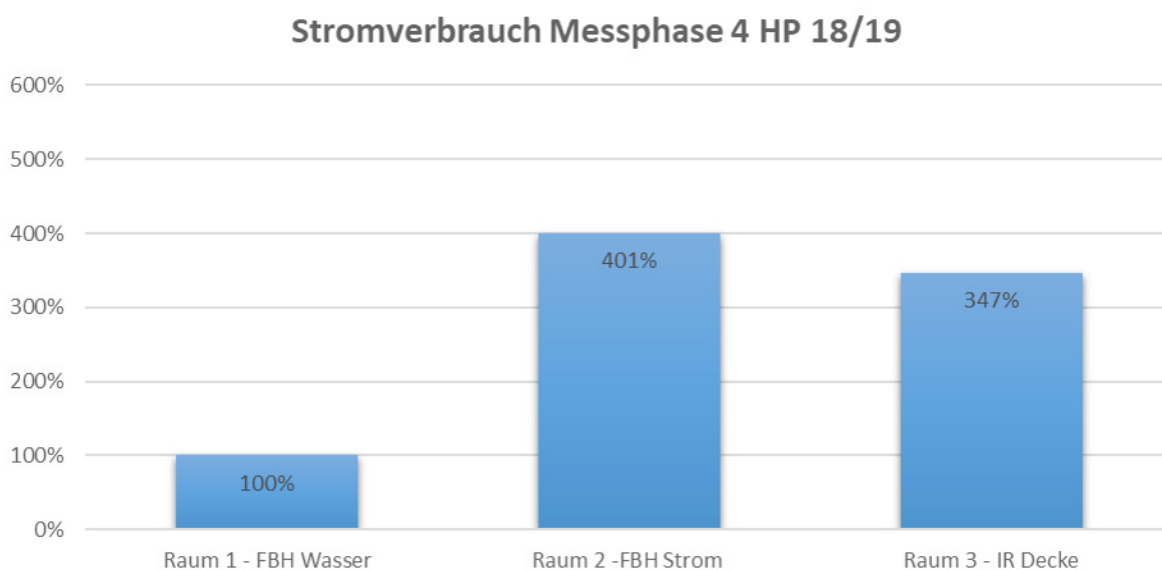


Abb. 52 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 4, Heizperiode 2018/2019

Gewichteter Durchschnitt der Messphasen 1-4:

Lüftung 12 m²/h mit WRG,
 Hysterese FBH 0,5 K; E-FBH 0,5 K; IR-Decke 0,5 K;

Durchschnittliche Außentemperatur 3,0 °C; Level 1 AZ: 4,0; Level 3 AZ: 3,5
 Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,6 %
 Regelung entweder nach gemessener oder berechneter operativer Temperatur.

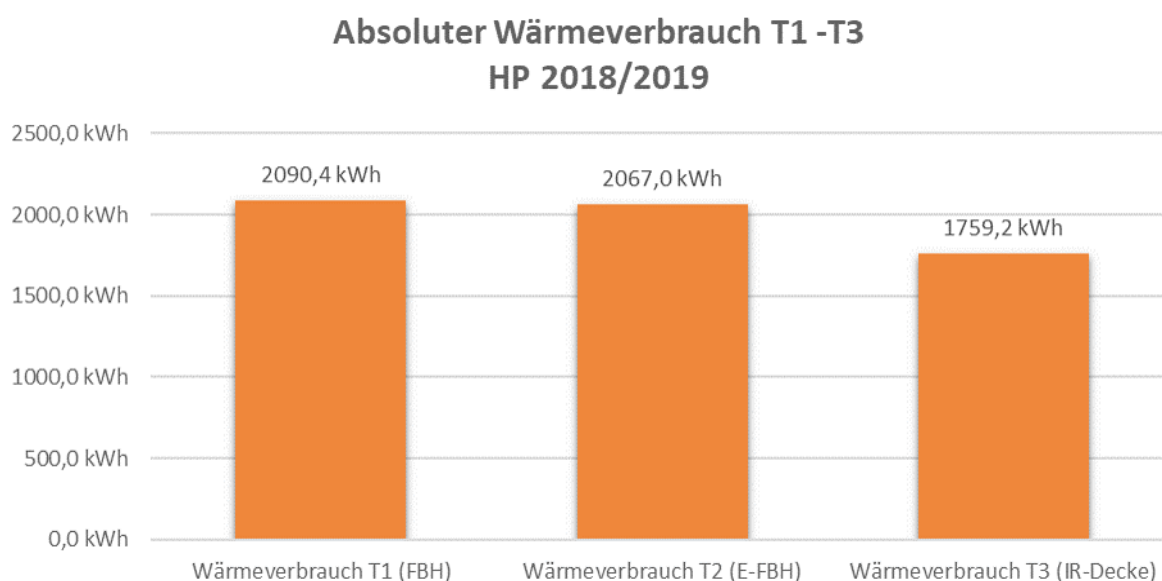


Abb. 53 Wärmeverbrauch Raum T1-T3, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019

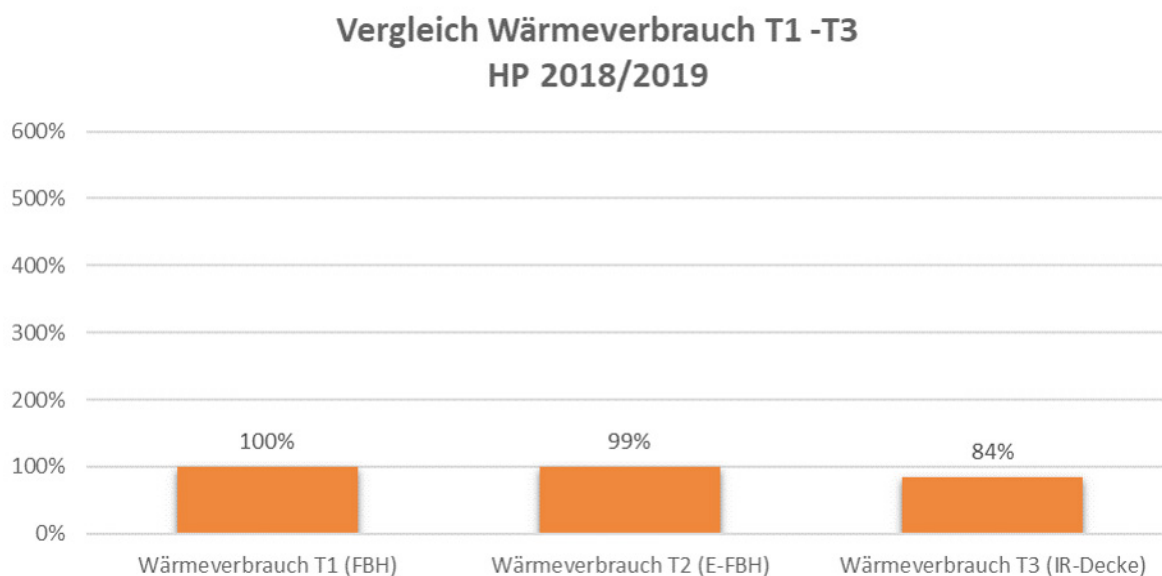


Abb. 54 Wärmeverbrauch Raum T2 und T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019

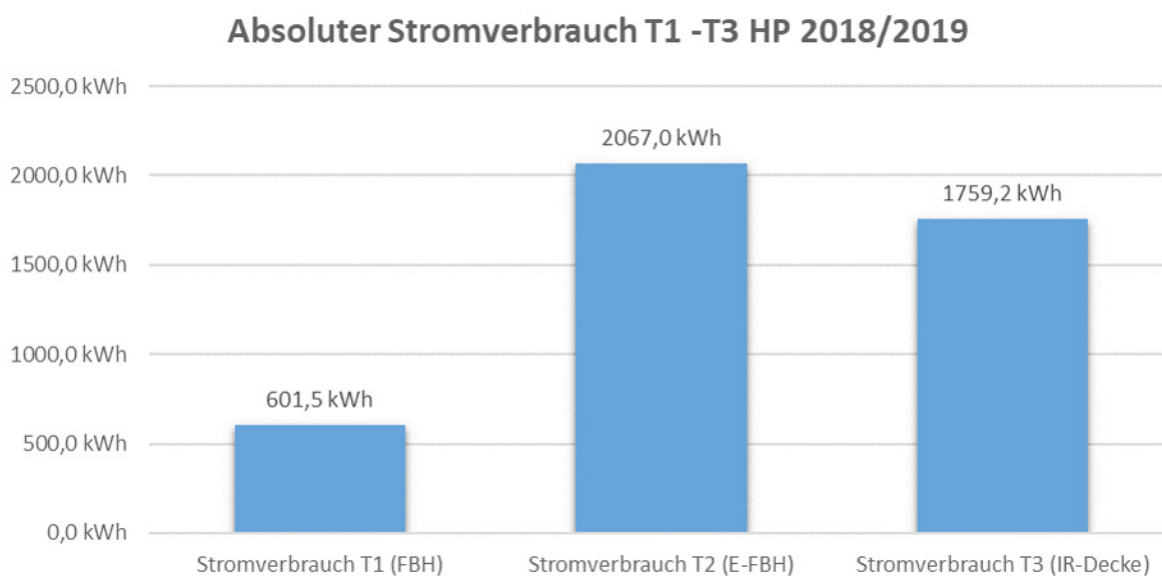


Abb. 55 Stromverbrauch Raum T1-T3, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019

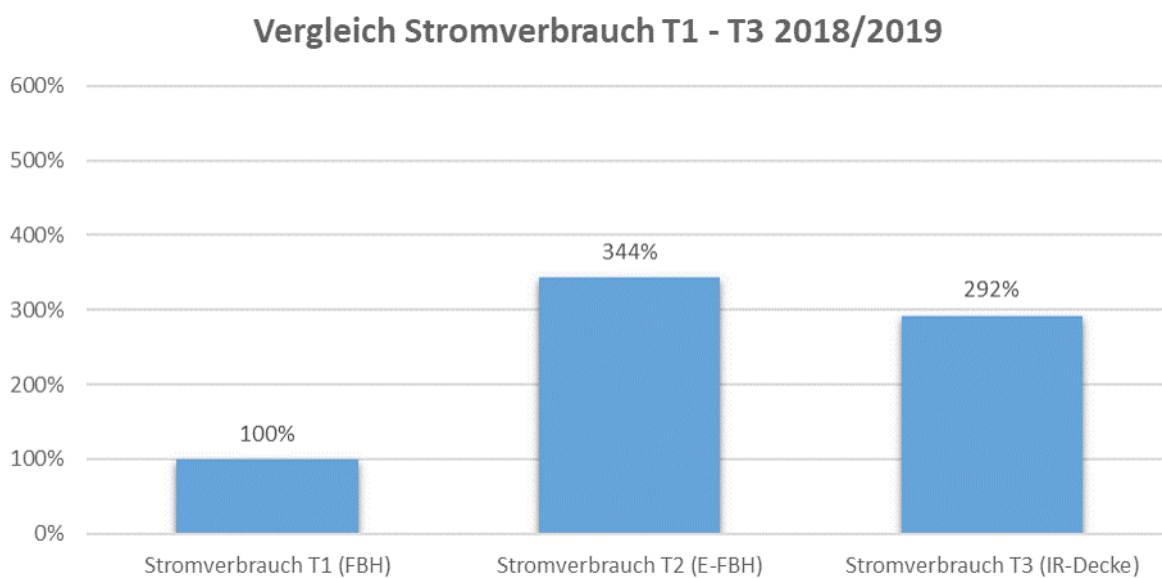


Abb. 56 Stromverbrauch Raum T2 und T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019

4.1.4 Interpretation der Messergebnisse Heizperiode 2018 / 2019

In Heizperiode 2018 / 2019 wurden die Messungen in den Laborräumen T1 bis T3 mit den gleichen Einstellungen wie in Messphase 2 in HP 2017/18 wiederholt. In Messphase 3 und 4 wurde die Regelung von der gemessenen auf die berechnete operative Temperatur umgestellt. Die Umstellung erfolgte aus zwei Gründen:

- Die operative Temperatur, die mit Hilfe einer Globesonde gemessen wird, ist sehr von der Entfernung von Strahlungsquelle zu Globesonde abhängig. So kann man zwar für einen Punkt im Raum die operative Temperatur messen, das Messergebnis ist dabei aber von der zufällig ausgewählten Position der Heizkörper abhängig. Es lässt sich also keine allgemeine positionsunabhängige Aussage über die operative Temperatur im Raum treffen.
- Die Globesonde selbst hat eine Masse und damit eine gewisse Trägheit. Bei sich schnell ändernden Temperaturbedingungen, wie sie bei einer IR-Heizung mit Zweipunktregelung und 0,5 K Hysterese auftreten, ist die Trägheit der Globesonde zu groß, um die tatsächliche aktuelle operative Raumtemperatur zu messen. Ein Vergleich der zwei Temperaturkurven zeigt dies deutlich (s. Abb. 57). Wird das System nach gemessener operativer Temperatur geregelt, läge die tatsächliche operative Temperatur viel höher als der Sollwert. Der Stromverbrauch ist entsprechend höher.

Die Messungen in den vier Messphasen in der Heizperiode 2018 / 2019 bestätigen die Messungen aus der Heizperiode 2017 / 2018. Wieder hat Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) einen deutlichen Effizienzvorteil im Wärmeverbrauch gegenüber den beiden Fußbodenheizungsvarianten. Erfolgt die Regelung nach berechneter, anstelle der gemessenen operativen Temperatur, steigt der Effizienzvorteil von durchschnittlich 14 % - 15 % auf 22 % - 24 % an.

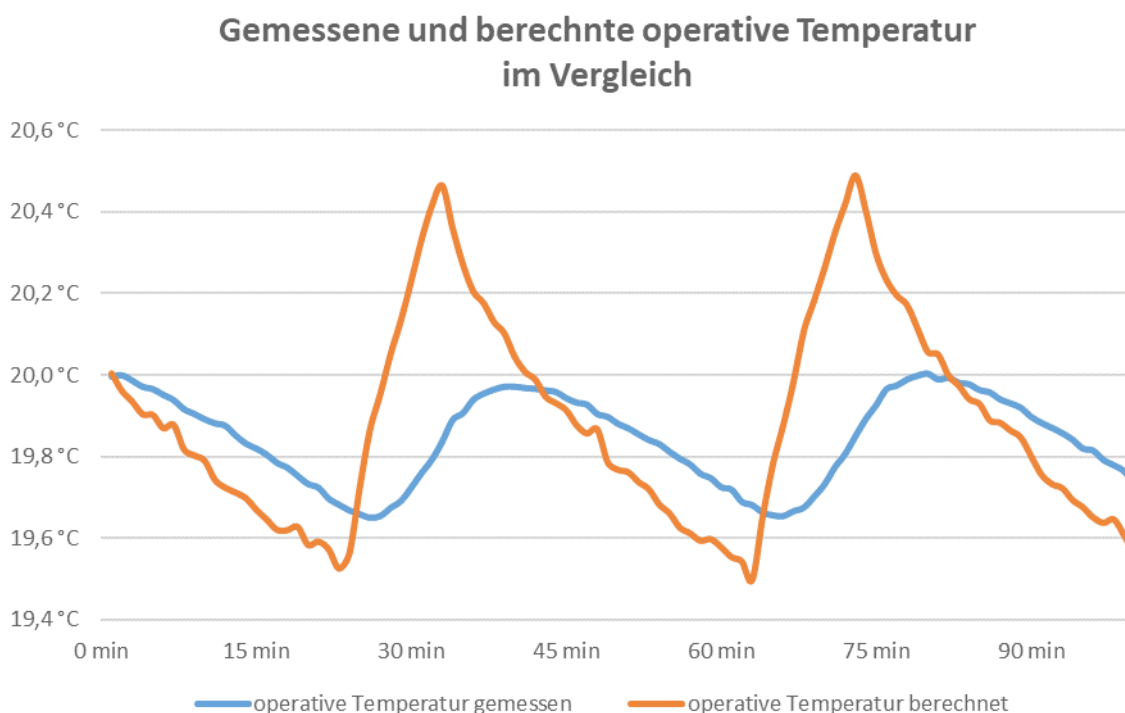


Abb. 57 Gemessene und berechnete operative Temperatur bei Betrieb einer IR-Heizung in Laborraum T3 im Vergleich

Zeiträume mit einheitlicher Temperatur und Regelung in T1 (FBH) und T3 IR-Decke in HP 2018/2019

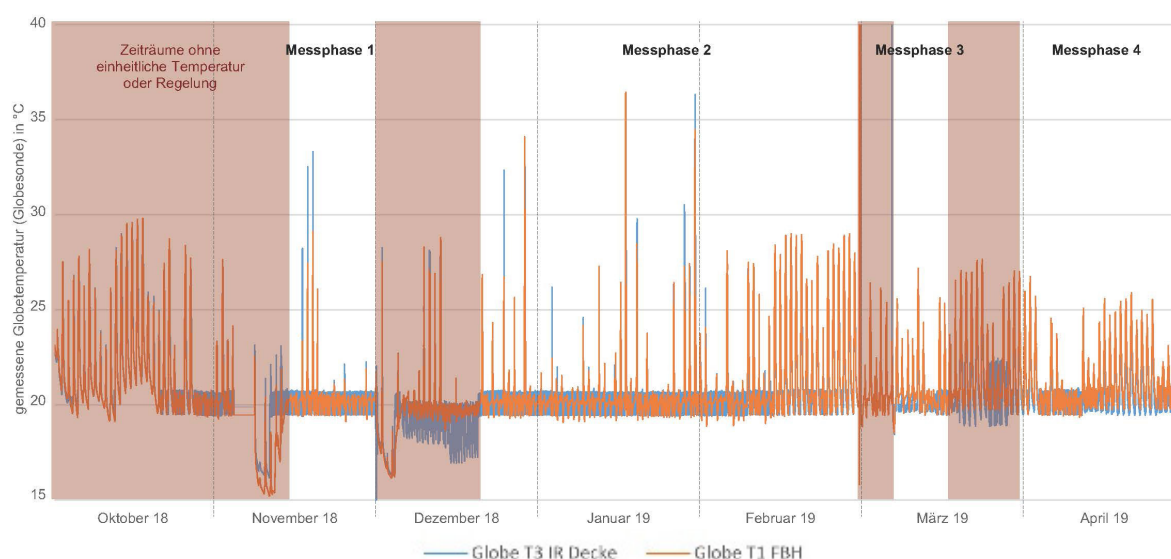


Abb. 58 Übersicht der Messphasen in Heizperiode 2018 / 2019

Anhand einer detaillierten Analyse der Messdaten aus Messphase 3 wurden die Ursachen für diese Effizienzvorteile der IR-Heizung untersucht. Vergleicht man die in Messphase 3 gemessenen Durchschnittswerte von Luft- und Oberflächentemperatur aus Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) nachts (s. Abb. 59 auf S. 95), also in Zeiten, in denen die Raumtemperaturen nur durch die Heizsysteme beeinflusst werden, fällt auf, dass die Lufttemperatur im IR-Heizungsraum etwa 0,6 K niedriger, die Oberflächentemperatur fast 0,4 K höher ist als im Fußbodenheizungsraum. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Lüftungs- und Infiltrationswärmeverluste in Raum T1 (WP/FBH) im Testzeitraum eventuell höher gewesen sein könnten.

Vergleicht man die gemessenen durchschnittlichen Innenoberflächentemperaturen im Detail (s. Abb. 60 auf S. 95) kann man feststellen, dass die Deckentemperatur in Raum T3 (IR-Decke) wie erwartet höher ist als die Temperatur der Decke in Raum T1 (WP/FBH). Auch die Fußbodentemperatur ist in Raum T1 (WP/FBH) wie erwartet höher als in Raum T3 (IR-Decke). Die Temperaturen der Wände sind jedoch in Raum T3 (IR-Decke), anders als erwartet nicht etwa höher, sondern niedriger als in Raum T1 (WP/FBH).

Die höhere Gesamt-Oberflächentemperatur in Raum T3 (IR-Decke) wird hier maßgeblich von der Oberflächentemperatur der Decke beeinflusst. Niedrigere Wandtemperaturen in Raum T3 bedeuten niedrigere Wärmeverluste durch Transmission über die Wände. Hinzu kommt, dass die gemessene Oberflächentemperatur der Decke in Raum T3 die Heizflächen der IR-Heizungen beinhalten. Die tatsächliche mittlere Temperatur des Bauteils Decke „hinter“ den Heizflächen, die für die Transmissionswärmeverluste entscheidend ist, liegt jedoch noch einmal niedriger. Zusammenfassend kann man sagen, dass dies ein Hinweis darauf ist, dass die Transmissionswärmeverluste in Raum T3 (IR-Decke) aufgrund niedrigerer Innenoberflächentemperaturen geringer sind als in Raum T1 (WP/FBH).

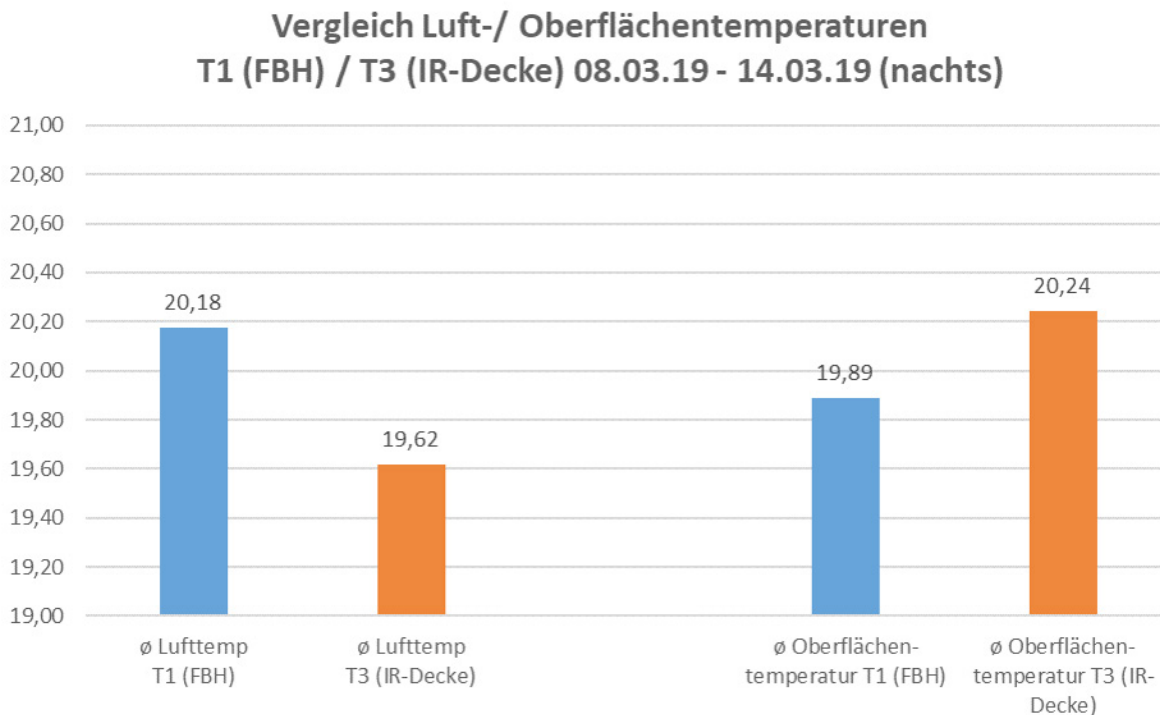


Abb. 59 Vergleich der nächtlichen Luft – und Oberflächentemperaturen zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) in Messphase 3, HP 2018/2019

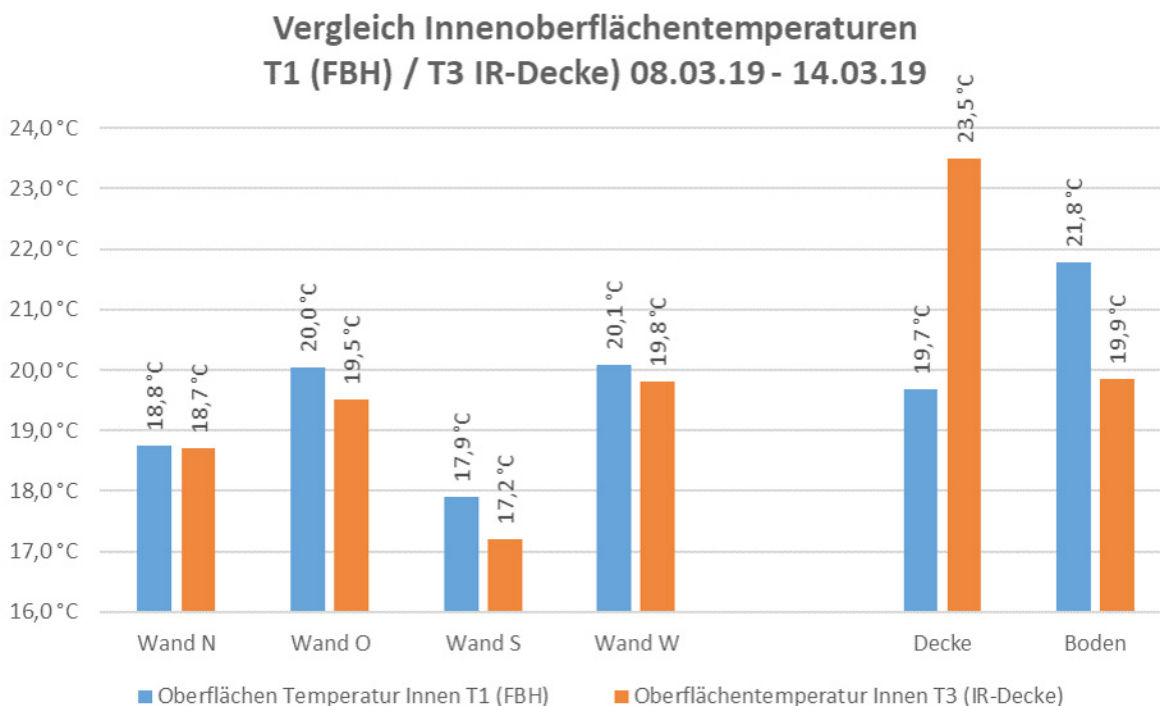


Abb. 60 Innenoberflächentemperaturen Raum T1 (WP/FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, Messphase 3, HP 2018/2019

Vergleich berechnete operative Temperaturen T1/T3 08.03.19 - 14.03.19

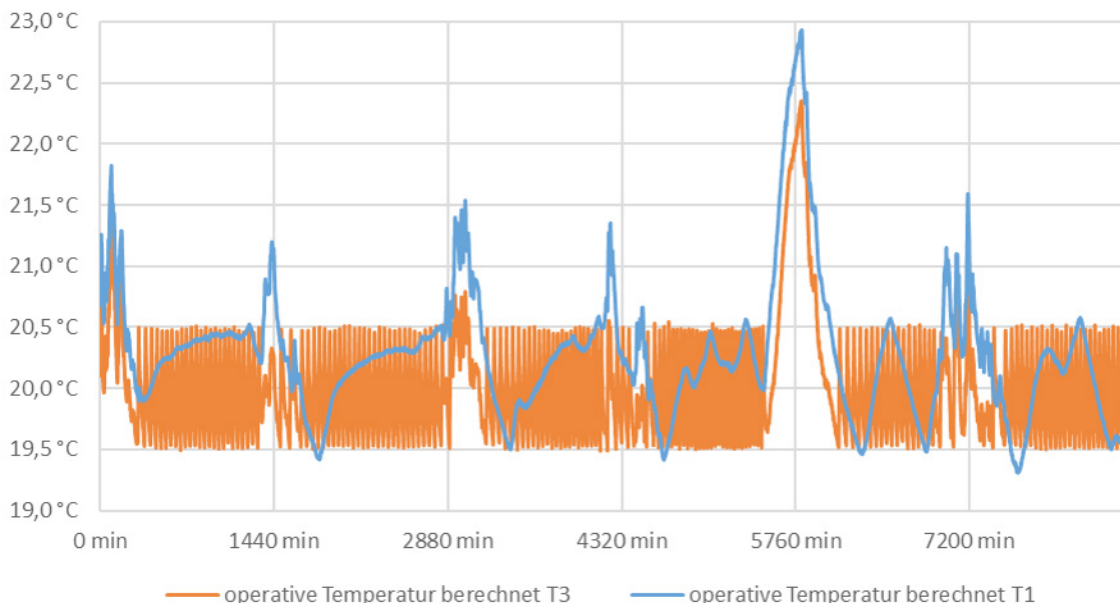


Abb. 61 Verlauf der berechneten operativen Temperaturen Raum T1 (WP/FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, Messphase 3, HP 2018/2019

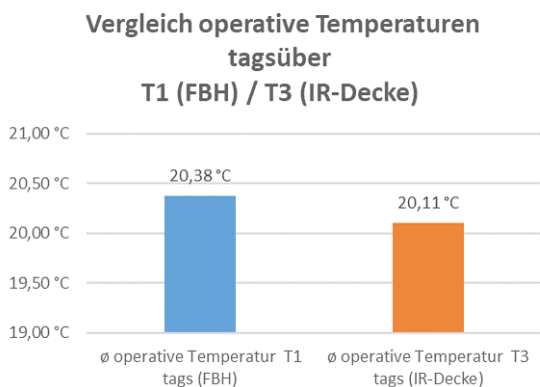


Abb. 62 Operative Temperaturen tagsüber, Messphase 3, HP 18/19

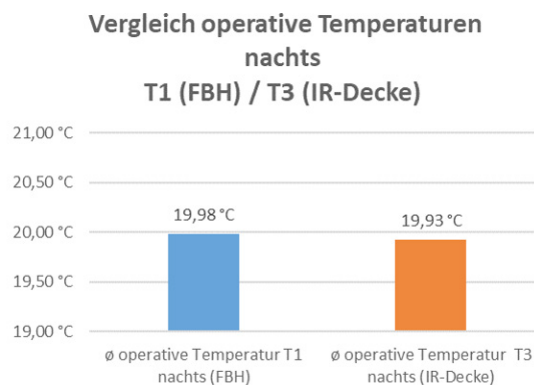


Abb. 63 Operative Temperaturen nachts, Messphase 3, HP 18/19

Abb. 61 zeigt den Verlauf der operativen Temperaturen von Raum T1 (WP/FBH / blau) und Raum T3 (IR-Decke / orange) im Vergleich. Man erkennt deutlich, dass die operative Temperatur bei solarer Einstrahlung (dann, wenn die operative Temperatur über den maximalen Sollwert von 20,5 °C ansteigt) in Raum T3 (IR-Decke) deutlich geringer ist als die Temperatur in Raum T1 (WP/FBH). Dies zeigt auch der Vergleich der operativen Temperaturen in Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) am Tag (s. Abb. 62).

Während die Werte nachts fast identisch sind (s. Abb. 63), ist die operative Temperatur in Raum T1 (WP/FBH) tagsüber deutlich höher (s. Abb. 62). Dies ist ein Hinweis darauf, dass es in Raum T1 (WP/FBH) bei solarer Einstrahlung zu höheren Übertemperaturen kommt als in Raum T3 (IR-Decke). Diese resultieren aus der höheren thermischen Trägheit des Fußbodenheizungssystems und führen zu höheren Transmissions-, Lüftungs- und Infiltrationswärmeverlusten im Vergleich zu Raum T3 (IR-Decke).

Vergleicht man die in Messphase 3 gemessenen Werte (s. Abb. 59 – Abb. 63) mit den Werten der gesamten Heizperiode 2018 / 2019 (s. Abb. 64 - Abb. 66) ist festzustellen, dass sich die in Messphase 3 gefundenen Hinweise auf die Effizienzunterschiede zwischen IR-Heizung und FBH auch in den Werten über die gesamte Heizperiode abbilden.

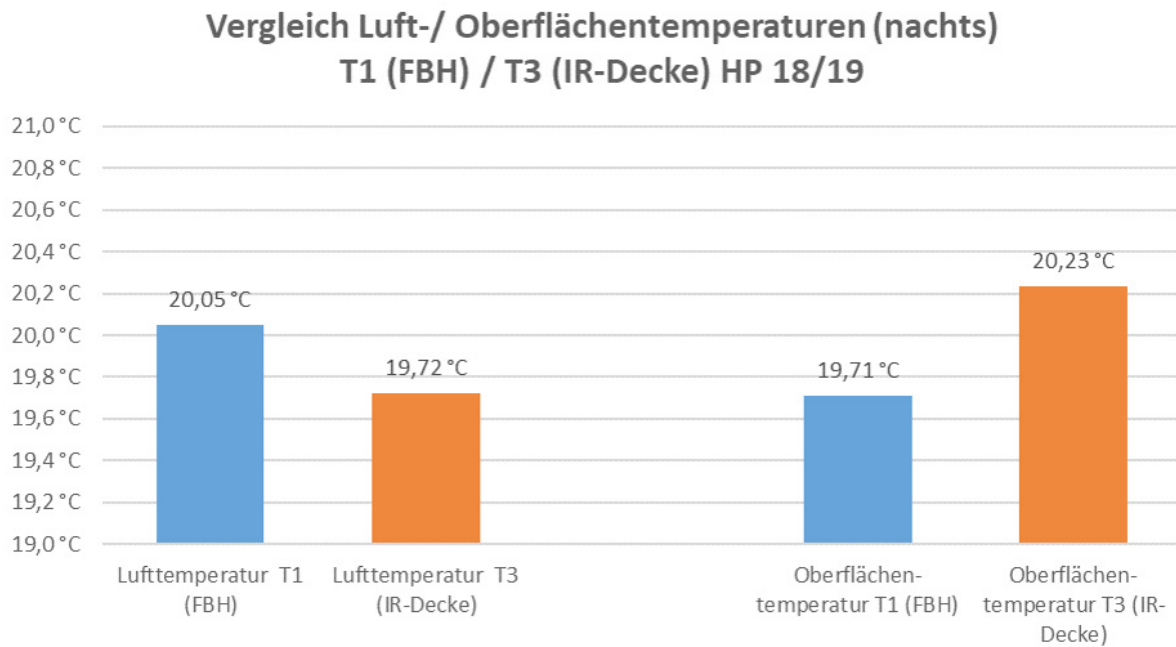


Abb. 64 Vergleich der nächtlichen Luft – und Oberflächentemperaturen zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) über die gesamte HP 2018/2019

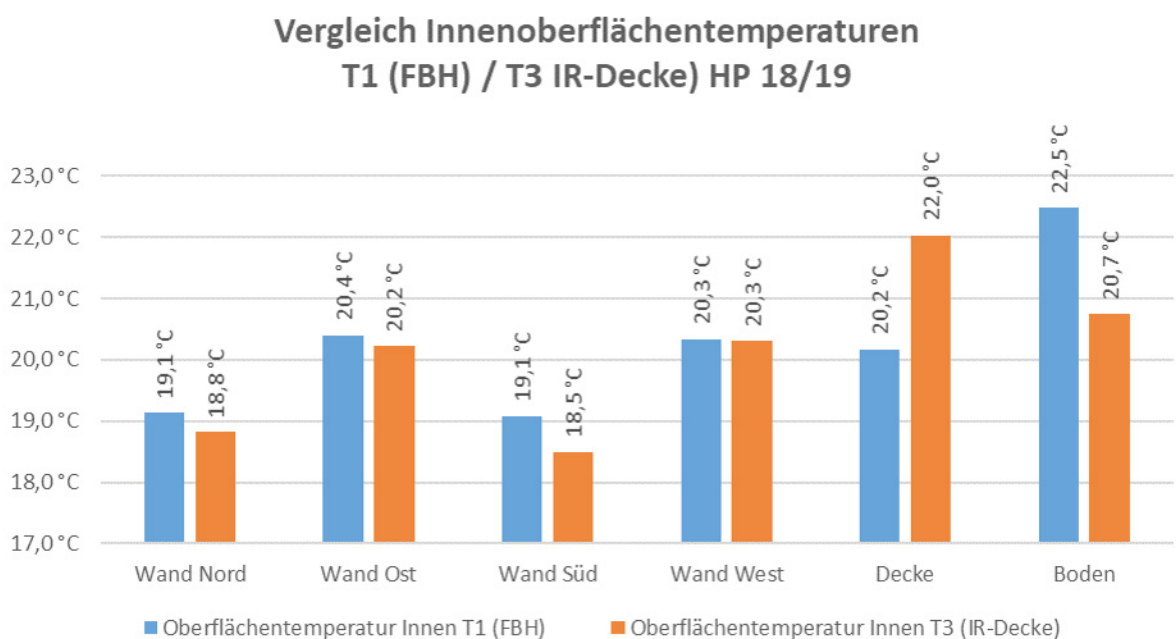


Abb. 65 Innenoberflächentemperaturen Raum T1 (FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, gesamte HP 2018/2019

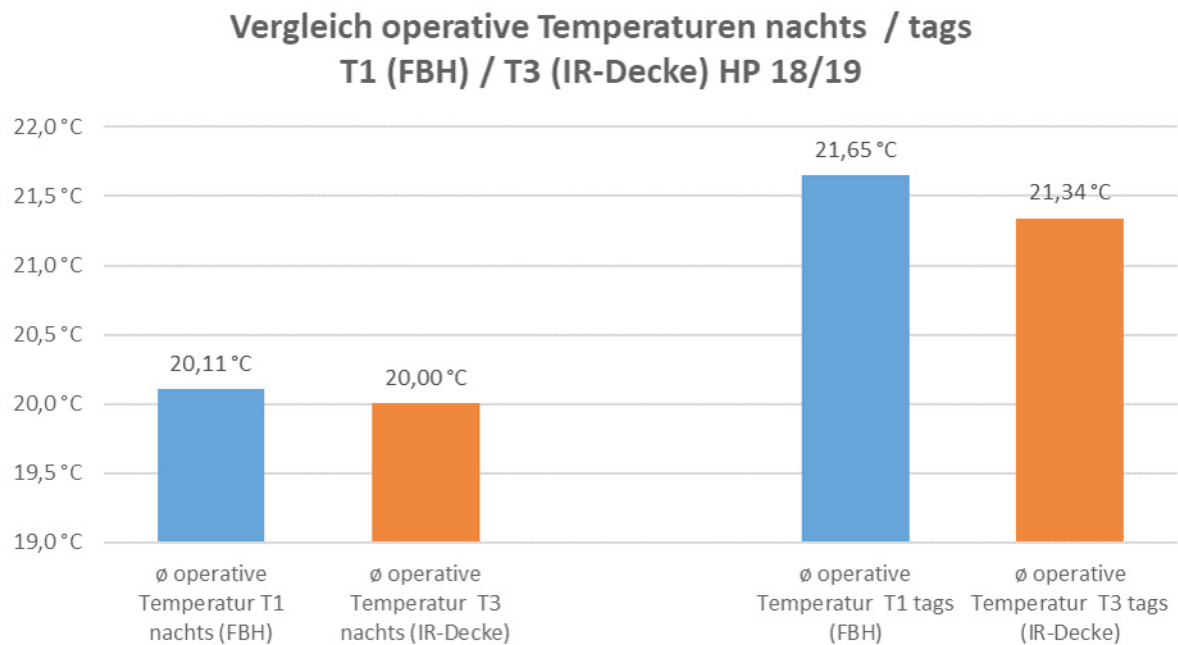


Abb. 66 Vergleich der operativen Temperaturen nachts und tagsüber, gesamte HP 2018 / 2019

4.1.5 Berechnung der Effizienzunterschiede im Wärmeverbrauch

Anhand der Messdaten aus Messphase 3, HP 2018/2019 kann nun rechnerisch überprüft werden, ob sich die errechenbaren Effizienzunterschiede im Wärmeverbrauch mit den gemessenen Werten decken. Der gemessene Wärmeverbrauch für Laborraum T1 (WP/FBH) in Messphase 3 beträgt 91,4 kWh. Der Verbrauch für Laborraum T3 (IR-Decke) lag bei 69,5 kWh und ist somit um 21,9 kWh oder 24 % niedriger.

Die Lüftungswärmeverluste lassen sich überschlägig (mit vereinfachten Annahmen zur Wärmerückgewinnung) in Anlehnung an die DIN 18599-2, Formel 87 wie folgt berechnen:⁵⁹

$$Q_{V,mech} = \frac{V_L \cdot c_{p,a} \cdot \rho_a}{3,6 \cdot 1000} \cdot (T_{innen} - T_{außen}) \cdot t \cdot (1 - WRG)$$

$Q_{V,mech}$	Lüftungswärmeverluste in kWh
V_L	Luftvolumenstrom der Lüftungsanlage in m ³ /h
$c_{p,a}$	spezifische Wärmespeicherkapazität der Luft in J/(kgK)
ρ_a	spezifische Luftdichte in kg/m ³
T_{innen}	Lufttemperatur innen in °C
$T_{außen}$	Lufttemperatur außen in °C
t	Zeit in Stunden
WRG	Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage in %

Die Infiltrationswärmeverluste lassen sich in Anlehnung an die DIN 18599-2, Formel 58 wie folgt berechnen.⁶⁰ Als n_{50} Wert wurde ein Schätzwert angenommen:

$$Q_{V,inf} = \frac{V \cdot c_{p,a} \cdot \rho_a}{3,6 \cdot 1000} \cdot (T_{innen} - T_{außen}) \cdot t \cdot n_{50} \cdot e \cdot f_{ATD} \cdot \left(1 + (f_e - 1) \frac{t_{v,mech}}{24 h}\right)$$

$Q_{V,inf}$	Infiltrationswärmeverluste in kWh
V	Nettoraumvolumen
$c_{p,a}$	spezifische Wärmespeicherkapazität der Luft in J/(kgK)
ρ_a	spezifische Luftdichte in kg/m ³
T_{innen}	Lufttemperatur innen in °C
$T_{außen}$	Lufttemperatur außen in °C
t	Zeit in Stunden
n_{50}	Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz
e	Volumenstromkoeffizient
f_{ATD}	Faktor zur Berücksichtigung von Außenluftdurchlässen
f_e	vermehrte oder verminderte Infiltration durch mechanische Lüftungsanlagen
$t_{v,mech}$	tägliche Betriebsdauer der Lüftungsanlage

59 [DIN 18599-2, S.61]

60 [DIN 18599-2, S.53]

Die Transmissionswärmeverluste lassen sich überschlägig (ohne detaillierte Berechnung der Wärmebrücken) in Anlehnung an die DIN 18599-2, Formel 42 wie folgt berechnen:⁶¹

$$Q_T = \frac{A \cdot U \cdot t \cdot (T_{innen} - T_{außen})}{1000}$$

Q_T	Transmissionswärmeverluste in kWh
A	Fläche des Bauteils in m ²
U	U-Wert des Bauteils in W/m ² K
t	Zeit in Stunden
T_{innen}	Luft- oder Oberflächentemperatur innen in °C
$T_{außen}$	Luft- oder Oberflächentemperatur außen in °C

Für die Lüftungs- und Infiltrationswärmeverluste in Messphase 3 ergeben sich für Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) die Werte entsprechend Tabelle 6 bis Tabelle 9. Die geringeren nächtlichen Lufttemperaturen in Raum T3 (IR-Decke) führen zu einer Verringerung der Lüftungs- und Infiltrationswärmeverluste in Raum T3 von 0,11 kWh gegenüber Raum T1 (WP/FBH). Dies entspricht circa 1,6 % der gesamten Differenz von 21,9 kWh.

	Luft- volumen	Außenluft- temperatur	Innenluft- temperatur	WRG	Zeit	Verluste
Raum 1 nachts	12 m ³ /h	3,8 °C	20,2 °C	0,85 kWh	109 Std	1,09 kWh

Tabelle 6 Nächtliche Lüftungswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19

	Luft- volumen	Außenluft- temperatur	Innenluft- temperatur	WRG	Zeit	Verluste
Raum 3 nachts	12 m ³ /h	3,8 °C	19,6 °C	0,85 kWh	109 Std	1,05 kWh

Tabelle 7 Nächtliche Lüftungswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

	Raum- volumen	Außenluft- temperatur	Innenluft- temperatur	e	n50	Zeit	Verluste
Raum 1 nachts	99,2 m ³	3,8 °C	20,2 °C	0,07	1,5	109 Std	9,09 kWh

Tabelle 8 Nächtliche Infiltrationswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19

	Raum- volumen	Außenluft- temperatur	Innenluft- temperatur	e	n50	Zeit	Verluste
Raum 3 nachts	99,2 m ³	3,8 °C	19,6 °C	0,07	1,5	109 Std	8,77 kWh

Tabelle 9 Nächtliche Infiltrationswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

61 [DIN 18599-2, S.48]

Für die nächtlichen Transmissionswärmeverluste in Messphase 3 ergeben sich für Raum T1 und Raum T3 Werte entsprechend Tabelle 10 und Tabelle 11.

Durch die geringeren nächtlichen Innenoberflächentemperaturen in Raum T3 (IR-Decke) gegenüber Raum T1 (WP/FBH) ergibt sich eine Differenz von 16,69 kWh bei den nächtlichen Transmissionswärmeverlusten. Dies entspricht circa 76,1 % der gesamten Differenz von 21,9 kWh.

	Fläche	Temp Innen	Temp Außen	U-Werte	Zeit	Verluste T1
Wand N	18,8 m ²	18,7 °C	15,1 °C	1,83 W/m ² K	109 Std	13,5 kWh
Boden Seite N	0,6 m ²	22,9 °C	15,1 °C	1,27 W/m ² K	109 Std	0,7 kWh
Wand O	15,1 m ²	20,0 °C	19,9 °C	2,41 W/m ² K	109 Std	0,5 kWh
Boden Seite O	0,5 m ²	22,9 °C	19,9 °C	1,43 W/m ² K	109 Std	0,2 kWh
Wand S	18,8 m ²	17,5 °C	3,8 °C	1,26 W/m ² K	109 Std	36,6 kWh
Boden Seite S	0,6 m ²	22,9 °C	4,4 °C	1,25 W/m ² K	109 Std	1,6 kWh
Wand W	15,1 m ²	20,0 °C	20,1 °C	1,83 W/m ² K	109 Std	-0,4 kWh
Boden Seite W	0,5 m ²	22,9 °C	20,1 °C	1,20 W/m ² K	109 Std	0,2 kWh
Decke	32,7 m ²	19,6 °C	4,4 °C	0,22 W/m ² K	109 Std	12,0 kWh
Boden	32,7 m ²	22,9 °C	18,3 °C	1,23 W/m ² K	109 Std	20,3 kWh
Summe Transmissionswärmeverluste Raum 1 nachts						85,18 kWh

Tabelle 10 Nächtliche Transmissionswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19

	Fläche	Temp Innen	Temp Außen	U-Werte	Zeit	Verluste T3
Wand N	19,4 m ²	18,6 °C	14,9 °C	1,83 W/m ² K	109 Std	14,3 kWh
Wand O	15,6 m ²	19,5 °C	19,9 °C	2,41 W/m ² K	109 Std	-1,8 kWh
Wand S	19,4 m ²	16,7 °C	3,8 °C	1,26 W/m ² K	109 Std	34,6 kWh
Wand W	15,6 m ²	19,8 °C	19,5 °C	2,41 W/m ² K	109 Std	0,9 kWh
Decke	32,7 m ²	22,1 °C	4,4 °C	0,22 W/m ² K	109 Std	13,1 kWh
Boden	32,7 m ²	19,7 °C	18,0 °C	1,27 W/m ² K	109 Std	7,4 kWh
Summe Transmissionswärmeverluste Raum 3 nachts						68,49 kWh

Tabelle 11 Nächtliche Transmissionswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

Für die Transmissions-, Lüftungs- und Infiltrationswärmeverluste am Tag ergeben sich für Raum T1 und Raum T3 in Messphase 3 Werte entsprechend Tabelle 12 bis Tabelle 17.

Die höheren Übertemperaturen am Tag in Raum T1 (WP/FBH) führen dazu, dass Raum T1 in Summe 3,26 kWh höhere Transmissions-, Lüftungs- und Infiltrationswärmeverluste aufweist als Raum T3 (IR/Decke). Dies entspricht circa 15,4 % der gesamten Differenz von 21,9 kWh.

	Fläche	Temp Innen	Temp Außen	U-Werte	Zeit	Verluste T1
Wand N	18,8 m ²	19,1 °C	15,1 °C	1,83 W/m ² K	35 Std	4,8 kWh
Boden Seite N	0,6 m ²	22,1 °C	15,1 °C	1,27 W/m ² K	35 Std	0,2 kWh
Wand O	15,1 m ²	20,2 °C	20,1 °C	2,41 W/m ² K	35 Std	0,2 kWh
Boden Seite O	0,5 m ²	22,1 °C	20,1 °C	1,43 W/m ² K	35 Std	0,0 kWh
Wand S	18,8 m ²	19,2 °C	6,8 °C	1,26 W/m ² K	35 Std	10,5 kWh
Boden Seite S	0,6 m ²	22,1 °C	10,3 °C	1,25 W/m ² K	35 Std	0,3 kWh
Wand W	15,1 m ²	20,4 °C	20,3 °C	1,83 W/m ² K	35 Std	0,2 kWh
Boden Seite W	0,5 m ²	22,1 °C	20,3 °C	1,20 W/m ² K	35 Std	0,0 kWh
Decke	32,7 m ²	19,9 °C	10,3 °C	0,22 W/m ² K	35 Std	2,4 kWh
Boden	32,7 m ²	22,1 °C	18,8 °C	1,23 W/m ² K	35 Std	4,5 kWh
Summe Transmissionswärmeverluste Raum 1 tagsüber						23,12 kWh

Tabelle 12 Transmissionswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19

	Fläche	Temp Innen	Temp Außen	U-Werte	Zeit	Verluste T3
Wand N	19,4 m ²	19,0 °C	14,9 °C	1,83 W/m ² K	35 Std	5,0 kWh
Wand O	15,6 m ²	19,7 °C	20,2 °C	2,41 W/m ² K	35 Std	-0,7 kWh
Wand S	19,4 m ²	18,6 °C	6,8 °C	1,26 W/m ² K	35 Std	10,0 kWh
Wand W	15,6 m ²	20,0 °C	19,7 °C	2,41 W/m ² K	35 Std	0,4 kWh
Decke	32,7 m ²	20,9 °C	9,6 °C	0,22 W/m ² K	35 Std	2,8 kWh
Boden	32,7 m ²	20,4 °C	18,7 °C	1,27 W/m ² K	35 Std	2,5 kWh
Summe Transmissionswärmeverluste Raum 3 tagsüber						19,86 kWh

Tabelle 13 Transmissionswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

	Luft- volumen	Außenluft- temperatur	Innenluft- temperatur	WRG	Zeit	Verluste
Raum 1 tags	12 m ³ /h	6,8 °C	20,8 °C	0,85 kWh	35 Std	0,29 kWh

Tabelle 14 Lüftungswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19

	Luft- volumen	Außenluft- temperatur	Innenluft- temperatur	WRG	Zeit	Verluste
Raum 3 tags	12 m ³ /h	6,8 °C	20,2 °C	0,85 kWh	35 Std	0,28 kWh

Tabelle 15 Lüftungswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

	Raum- volumen	Außenluft- temperatur	Innenluft- temperatur	e	n50	Zeit	Verluste
Raum 1 tags	99,2 m ³	6,8 °C	20,8 °C	0,07	1,5	35 Std	2,45 kWh

Tabelle 16 Infiltrationswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19

	Raum- volumen	Außenluft- temperatur	Innenluft- temperatur	e	n50	Zeit	Verluste
Raum 3 tags	99,2 m ³	6,8 °C	20,2 °C	0,07	1,5	35 Std	2,35 kWh

Tabelle 17 Infiltrationswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

Für die berechneten Gesamtdifferenzen ergibt sich eine Bilanz entsprechend Tabelle 18. Damit entsprechen die berechneten Differenzen von 20,1 kWh circa 93 % der gemessenen Gesamtdifferenz von 21,9 kWh. Die restlichen 7 % ergeben sich vermutlich aus der Mess- und Rechengenauigkeit.

Berechnete Differenzen im Wärmeverbrauch zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke):

	Raum T1 (WP/FBH)	Raum T3 (IR-Decke)	Differenz
Differenz aufgrund niedrigerer Lufttemperatur nachts in Raum T3	10,17 kWh	9,82 kWh	0,36 kWh
Differenz aufgrund niedrigerer Transmissionswärmeverluste in Raum T3	85,18 kWh	68,49 kWh	16,69 kWh
Differenz aufgrund höherer Übertemperatur tagsüber in Raum T1	25,86 kWh	22,49 kWh	3,38 kWh
Summe berechneter Differenzen im Wärmeverbrauch:			20,42 kWh
Gemessene Differenz im Wärmeverbrauch:			21,90 kWh

Tabelle 18 Berechnete Differenzen im Wärmeverbrauch zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke)

4.1.6 Hinweise zu den Messungen und Berechnungen

Die Oberflächentemperatur des Fußbodens in Raum T1 wurde mithilfe der IR-Sensoren gemessen. Die relevante Temperatur zur Bestimmung der Transmissionswärmeverluste in den angrenzenden Raum bei einer Fußbodenheizung ist jedoch die Temperatur unterhalb des Heizestrichs auf Höhe der Fußbodenheizungsrohre. Da hier keine Sensoren eingebaut waren, wurde die Estrichunterseitentemperatur in der obigen Berechnung mithilfe der gemessenen Vor- und Rücklaufemperatur der Fußbodenheizung näherungsweise bestimmt.

Im IR-Heizungsraum ergibt sich das gegenteilige Problem wie im Fußbodenheizungsraum. Die von den IR-Sensoren gemessene durchschnittliche Oberflächentemperatur der Decke beinhaltet die Vorderseitentemperatur der IR-Heizungen. Hier ist die tatsächlich für die Wärmeverluste entscheidende Temperatur, die Temperatur der über der IR-Heizung liegenden Decke, die in der Regel geringer ist als die Vorderseitentemperatur der IR-Heizung. Aus Messungen der Deckenoberflächentemperaturen an drei Punkten (an der Decke in Raummitte, an der Decke oberhalb des Randes der IR-Heizung, an der Decke über dem Mittelpunkt der IR-Heizung) parallel zu den Messungen der IR-Vorderseitentemperatur und der Gesamt-Deckentemperatur lässt sich die tatsächliche durchschnittliche Oberflächentemperatur auf der Ebene hinter den IR-Heizungen errechnen (s. Abb. 67).

Diese liegt in Messphase 3 mit 21,1 °C deutlich niedriger als die auf der Vorderseite gemessene durchschnittliche Deckentemperatur von 23,5 °C. Dies ist auch ein Hinweis darauf, dass ein optimierter Strahlungswirkungsgrad bei IR-Heizungen Effizienzvorteile bietet. Gelangt weniger Abwärme auf die Rückseite der IR-Heizung, erwärmt sich die darüber liegende Decke geringer, entsprechend geringer sind die Transmissionswärmeverluste der Decke.

Temperaturverlauf Oberflächentemperaturen vor / hinter einer deckenaufgehängten IR-Heizung

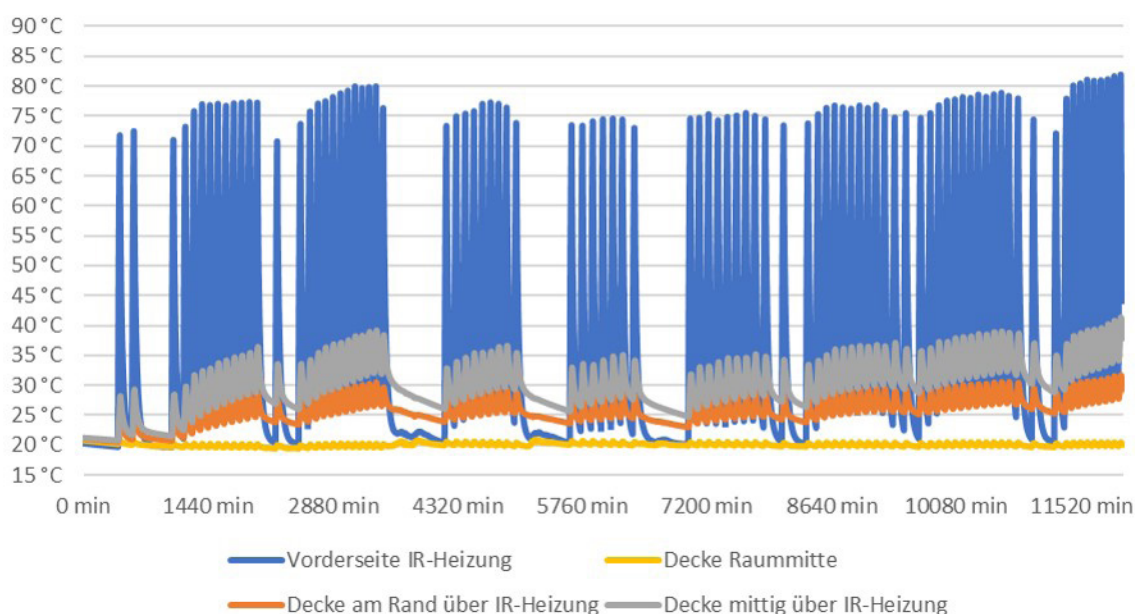


Abb. 67 Temperaturverlauf der Oberflächentemperaturen auf der Vorderseite der IR-Heizung und der darüber liegenden Deckenflächen.

Die hier gemessenen Verbrauchsunterschiede gelten zunächst alleine für die untersuchten Laborräume mit ihren entsprechenden bauphysikalischen Rahmenbedingungen. Es gibt in den Laborräumen mehrere Besonderheiten, die eine einfache Übertragung der Messergebnisse auf andere Gebäude erschweren:

- Alle Laborräume sind nach Süden orientiert. Entsprechend hoch sind die solaren Einträge über die Fenster und die daraus resultierenden Übertemperaturen. In einem Gebäude mit unterschiedlichen Ausrichtungen der Fenster fallen die Differenzen durch Übertemperaturen eventuell geringer aus.
- Die Laborräume sind mit 3,04 m lichter Raumhöhe ca. 0,5 m höher als übliche Wohnräume.
- Die Räume sind nicht möbliert.
- Die Räume sind nur mittelmäßig gedämmt.
- Betrachtet man die Verteilung der Transmissionswärmeverluste (s. Abb. 68) fällt auf, dass Raum T1 (WP/FBH) viel mehr Wärme durch den Boden verliert als Raum T3 (IR-Heizung). Dies ist nachvollziehbar, da die Fußbodenheizung im direkten thermischen Kontakt mit der sie umgebenden Baukonstruktion ist. In einem üblichen Gebäude wären jedoch diese „Verluste“ entweder Wärmegewinne für den darunterliegenden Raum oder der Boden wäre in der Regel besser gedämmt und ans Erdreich angrenzend. Das heißt, dass die Fußbodenheizung mehr Energie durch die schlecht gedämmte Decke an den unter ihr liegenden Raum verliert als üblich. Da der unter Raum T1 liegende Bereich jedoch außerhalb der Bilanzgrenze liegt, werden diese Verluste erfasst. Das gleiche gilt auch für die IR-Heizung gegen den kalten Dachraum, allerdings ist die Decke gegen den kalten Dachraum besser gedämmt als der Boden gegen das beheizte Erdgeschoss (s. Abb. 69 auf S. 106).

Wie sich diese Punkte auf die Effizienzunterschiede auswirken, wird in Kapitel 4.4 anhand einer Simulation weiter untersucht, die durch die gemessenen Daten validiert werden konnte.

Aufteilung der Transmissionswärmeverlustdifferenzen von T1 (FBH) im Verhältniss zu T3 (IR-Decke) 08.03.19 - 14.03.19

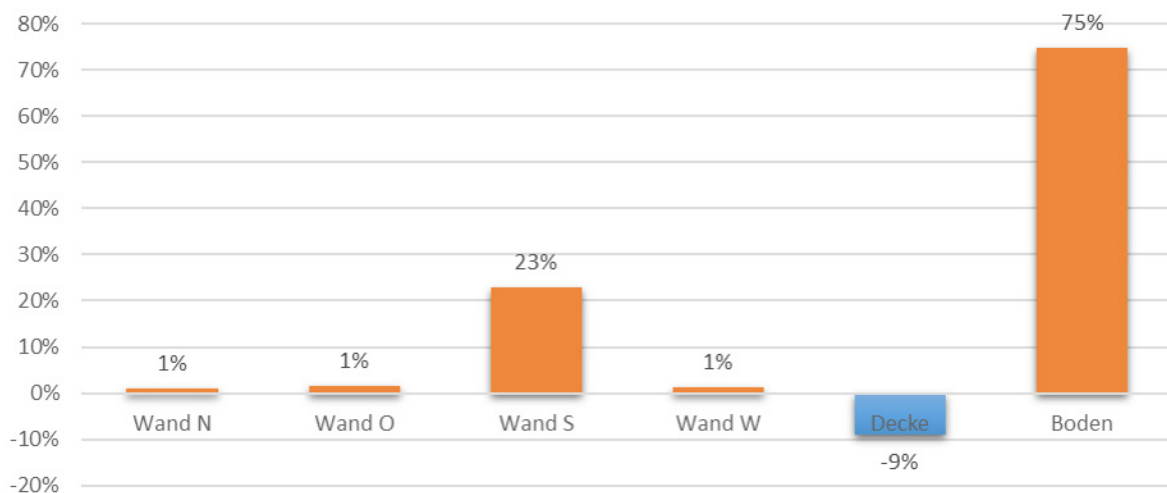


Abb. 68 Aufteilung der Differenzen der Transmissionswärmeverluste von Raum T1 (WP/FBH) im Verhältnis zu Raum T3 (IR-Decke) in Messphase 3, HP 18/19

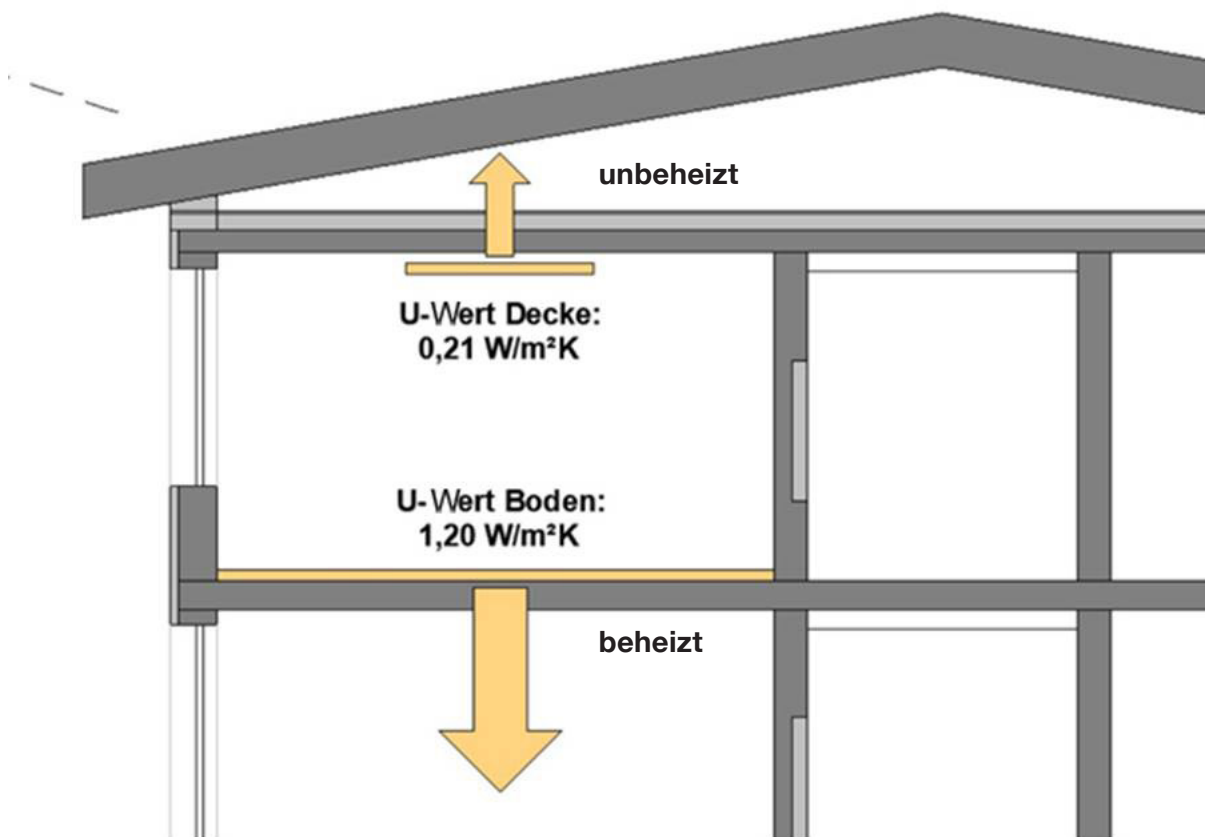


Abb. 69 Dämmsituation der IR-Heizung und der FBH in den Laborräumen in Ehoch4 im Vergleich.

4.1.7 Fazit Vergleichsmessungen Laborräume

Bei den Vergleichsmessungen in den Laborräumen in den Heizperioden 2017/2018 und 2018/2019 und einer Regelung nach operativer Raumtemperatur haben sich zunächst deutliche Unterschiede im Verbrauch der verschiedenen Wärmeerzeuger gezeigt. Die deckenaufgehängte Infrarotheizung hat circa 2,9 mal mehr Strom und die elektrische Fußbodenheizung (Trockenbau) circa 3,4 mal mehr Strom als das Luft-Wasser Wärmepumpensystem mit Fußbodenheizung (Nasssystem) verbraucht. Die Level 1 Arbeitszahl der Wärmepumpe betrug über den Messzeitraum 4,0, die Level 3 Arbeitszahl des gesamten Wärmepumpensystems 3,5.

Der Effizienzvorteil des Wärmepumpensystems bildet sich wie erwartet im Stromverbrauch ab, jedoch nicht in der Größenordnung der üblicherweise kommunizierten Level 1 Arbeitszahl (4,0 zu 2,9).

Die gemessenen Verbrauchsunterschiede gelten jedoch zunächst nur für die untersuchten Laborräume mit ihren entsprechenden bauphysikalischen Rahmenbedingungen, da es in den Laborräumen mehrere Besonderheiten gibt, die eine einfache Übertragung der Messergebnisse auf andere Gebäude erschweren.

Wie sich die Effizienzunterschiede in anderen Gebäudekonstellationen - ohne die beschriebenen Besonderheiten - verhalten, wird in Kapitel 4.4 anhand eines Simulationsmodells weiter untersucht. Dies konnte durch die in den Laborräumen gemessenen Daten validiert werden.

4.2 Rauminnenoberflächentemperatur bei IR-Heizungen

Die strahlungsdominierte Form der Wärmeübertragung bei der IR-Heizung soll dazu führen, dass in einem Raum primär die Oberflächen der raumumschließenden Bauteile erwärmt werden und nur sekundär die Raumluft. Das Erhöhen der Oberflächentemperaturen soll zu einer Verminderung der Materialfeuchte in den bestrahlten Bauteilen führen. Dadurch könnte die Wärmeleitfähigkeit reduziert werden, was zu einer Verbesserung des U-Wertes der Wand führen könnte.

Um diese Wirkweise zu überprüfen, wurden in den Laborräumen die Rauminnenoberflächentemperaturen eines mit IR-Heizung beheizten Raums - parallel zu den Innenoberflächentemperaturen eines mit Fußbodenheizung beheizten Raums - mit Hilfe von IR-Temperatur Sensoren vermessen.

Im Gebäude K76 wurden die Teilnehmer der Nutzerbefragung gebeten, in jeder Befragungsrunde die Luft- und Rauminnenoberflächentemperaturen zu protokollieren.

4.2.1 Untersuchungsergebnisse Laborräume Ehoch4

Nachfolgend werden die Rauminnenoberflächentemperaturen beschrieben, die sich in einem mit IR-Heizung beheizten und auf 20 °C operativer Temperatur geregelten Raum, im Vergleich zu einem gleich geregelten Fußbodenheizungsraum, einstellen.

Die Messungen in den Laborräumen zeigen, dass die mittlere Innenoberflächentemperatur im mit IR-Heizung beheizten Raum, zusammen **mit** den Heizflächen der IR-Heizungen, etwa 0,6 K höher ist als die Temperatur in einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum (s. Abb. 70).

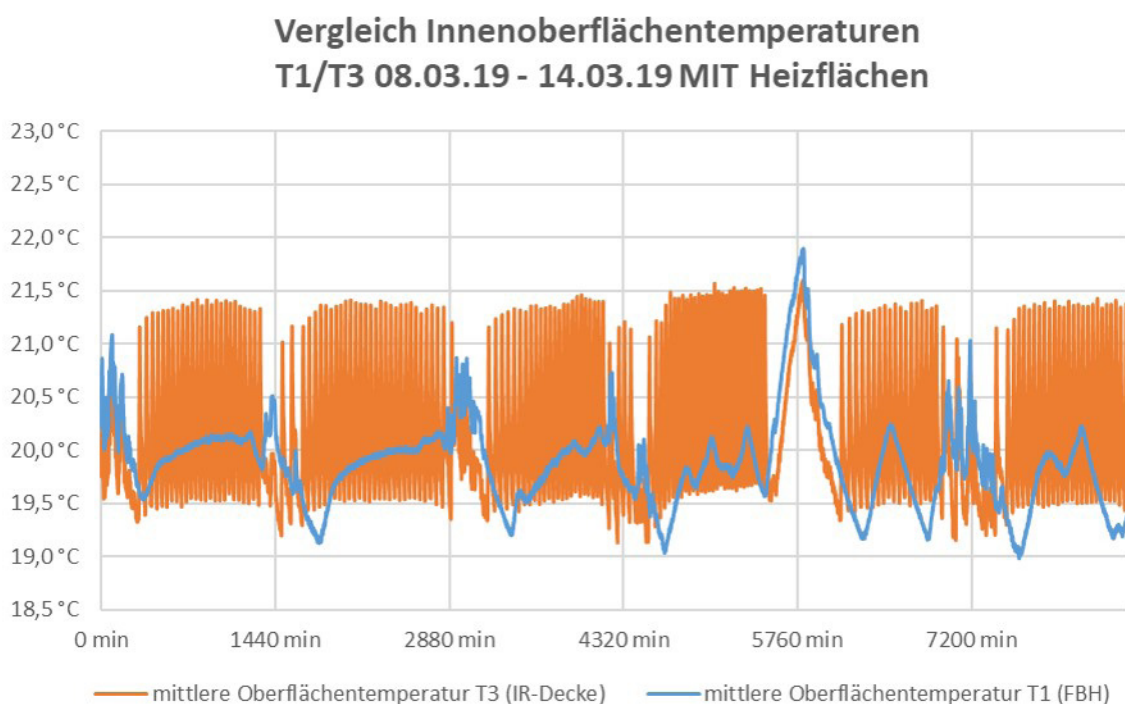


Abb. 70 Verlauf der Innenoberflächentemperaturen T1/T3 MIT Heizflächen

Vergleich Innenoberflächentemperaturen T1/T3 08.03.19 - 14.03.19 OHNE Heizflächen

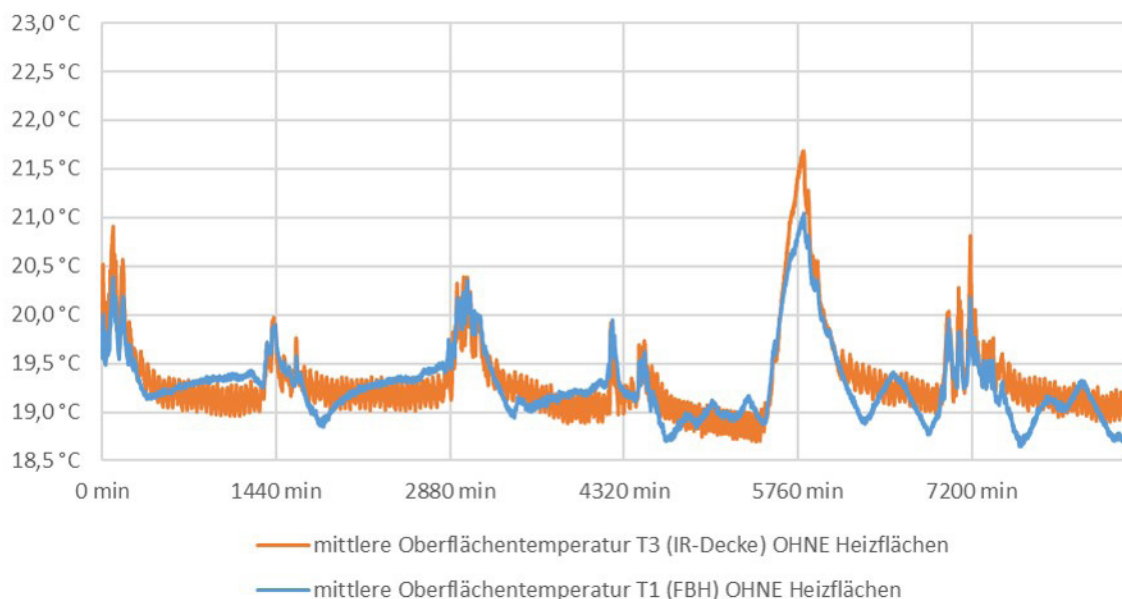


Abb. 71 Verlauf der Innenoberflächentemperaturen T1/T3 OHNE Heizflächen

Ohne die Heizflächen der IR-Heizung sind die mittleren Innenoberflächentemperaturen in dem mit IR-Heizung beheizten Raum jedoch geringer als die Innenoberflächentemperaturen im Fußbodenheizungsraum ohne die Fußbodenfläche (s. Abb. 71).

Somit zeigt sich, dass die mittlere Innenoberflächentemperatur eines mit IR-Heizung beheizten Raumes zwar höher ist als bei einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum. Die mittlere Innenoberflächentemperatur ist aber maßgeblich von der Oberflächentemperatur der IR-Heizungen abhängig. Führt man sich die Inhomogenität der Strahlungsleistungsverteilung im Raum vor Augen (s. Abb. 22 auf S. 56), ist dies auch schlüssig.

Der Wirkweise, dass bei Beheizung mit IR-Heizungen die Bauteile trockener werden, liegt zu Grunde, dass die Bauteiloberflächentemperaturen in einem mit IR-Heizungen beheizten Raum höher sind als in einem anderweitig beheizten Raum und dies einen Austrocknungseffekt bewirkt. Da die Temperaturen der Rauminnenoberflächen in einem mit IR-Heizung beheizten Raum jedoch im Vergleich zu einer Fußbodenheizung kälter sind, schließt sich aus, dass die Bauteile eines mit IR-Heizung beheizten Raumes trockener sind und bessere Dämmqualitäten erreichen.

In dieser Arbeit lag der Schwerpunkt der Messungen auf dem Vergleich von Fußbodenheizungssystemen mit/ohne Wärmepumpe zu IR-Heizungen. Auch die Fußbodenheizung hat einen relativ hohen Strahlungsanteil bei ihrer Wärmeabgabe, wenngleich ihr Strahlungswirkungsgrad in der Regel schlechter als der von IR-Heizungen ist. Die Messergebnisse lassen daher keine Aussage zum Vergleich der Innenoberflächentemperaturen von Konvektionsheizung zu IR-Systemen zu.

Grundsätzlich ist es jedoch möglich, IR-Heizungen zur Bauteiltrocknung zu verwenden. Dann muss jedoch der Abstand der IR-Heizungsvorderseite zur zu trocknenden Oberfläche stark verringert und die Heizung auf hoher Leistung betrieben werden. Diese Betriebsweise würde jedoch für die gängige Beheizung eines Wohnraums keinen Sinn machen. Um Schimmelproblemen durch zu kalte Innenoberflächentemperaturen in Altbauten vorzubeugen, kann die Infrarotheizung bei entsprechender Positionierung hilfreich sein. Es sollte jedoch zuerst geprüft werden, ob sich das Problem konstruktiv lösen lässt.

Die geringere Innenoberflächentemperatur im IR-Heizungsraum führt jedoch, anders als zunächst erwartet, tatsächlich zu einer Reduktion der Transmissionswärmeverluste. Diese Reduktion ergibt sich jedoch aus dem geringeren Temperaturunterschied zwischen Innenwandoberfläche und Außenwandtemperatur. Die daraus resultierenden Effizienzvorteile für die IR-Heizung sind jedoch gering (s. Tabelle 10 / Tabelle 11 auf S. 101).

Oberflächen wie Holz oder glatter Beton können durch den niedrigeren Emissionsgrad und damit einer erhöhten Reflexion zu einer subjektiv gefühlt wärmeren Oberfläche führen, da die eintreffende Infrarotstrahlung auf die Person im Raum reflektiert wird. Die tatsächlichen Oberflächentemperaturen wären dabei kälter, da weniger Strahlungswärme die Wand erreicht, was zu einer weiteren Reduzierung der Transmissionswärmeverluste führen würde. Ob der Einsatz von stärker IR-reflektierenden Oberflächen die Effizienz eines IR-Heizungssystems verbessern könnte, müsste untersucht werden.

4.2.2 Untersuchungsergebnisse Begleitforschung K76

Teil der Nutzerbefragung im Gebäude K76 war die messtechnische Erfassung der Rauminnenoberflächentemperaturen mit einem Infrarotthermometer in jeder Befragungsrunde. Bei den Messungen über zwei Heizperioden haben sich folgende durchschnittliche Rauminnenoberflächentemperaturen entsprechend der Tabelle 19 in den untersuchten Wohnungen ergeben.

Die gemessene Deckentemperatur entspricht der Temperatur ohne Infrarotheizung. Die Messungen wurden früh morgens und abends durchgeführt und damit zu Zeiten ohne hohe solare Einstrahlung. Die mittlere Oberflächentemperatur ohne IR-Heizungsoberflächen betrug somit etwa 19,7 °C.

Bauteil:	Durchschnittliche Oberflächentemperatur
Außenwand	19,00 °C
Innenwand	19,90 °C
Decke	19,85 °C
Boden	19,88 °C

Tabelle 19 gemessene Innenoberflächentemperaturen K76

4.2.3 Fazit Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen

Die Annahme, dass die mittleren Rauminnenoberflächentemperaturen in einem mit IR-Heizung beheizten Raum höher sind als in einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum, konnte bestätigt werden. Jedoch ist die mittlere Oberflächentemperatur maßgeblich von der Temperatur der IR-Heizungsflächen abhängig. Ohne die Heizflächen der IR-Heizung sind die übrigen Innenoberflächentemperaturen geringer als in einem Fußbodenheizungsraum. Somit schließt sich aus, dass die Bauteile eines mit IR-Heizung beheizten Raumes trockener sind und bessere Dämmqualitäten erreichen als die Bauteile eines mit Fußbodenheizung beheizten Raumes.

Im Gebäude K76 zeigt sich das gleiche Bild wie in den Laborräumen. Das Mittel der gemessenen Rauminnenoberflächentemperaturen im Gebäude K76 ohne die Oberflächen der IR-Heizungen liegt über die zwei Heizperioden bei 19,7 °C und damit, genau wie in den Laborräumen, unterhalb der Lufttemperatur. Zusammen mit den Oberflächen der IR-Heizung läge wahrscheinlich auch hier die mittlere Oberflächentemperatur deutlich höher.

Anders als zunächst angenommen, führen allerdings die geringeren Oberflächentemperaturen im IR-Heizungsraum tatsächlich zu einer, wenn auch nur geringen Reduktion bei den Transmissionswärmeverlusten gegenüber einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum.

Die erhöhte Reflexion der IR-Strahlung von Oberflächen wie Holz oder glattem Beton durch deren niedrigeren Emissionsgrad kann eventuell zu subjektiv gefühlten wärmeren Oberflächen bei einer Beheizung mit IR-Heizungen führen. Die tatsächlichen Oberflächentemperaturen könnten dabei jedoch noch geringer sein als bei einer Wand mit hohem Emissionsgrad. Dies könnte zu einer weiteren Reduzierung der Transmissionswärmeverluste führen. Ob der Einsatz von stärker IR-reflektierenden Oberflächen die Effizienz eines IR-Heizungssystems verbessern könnte, wäre daher zu prüfen. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

4.3 Lufttemperatur bei IR-Heizung

In Kapitel 4.2 wurde dargelegt, dass die mittlere Innenoberflächentemperatur in einem mit IR-Heizung beheizten Raum höher liegt als in einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum. Welche Reduktion der Lufttemperatur sich durch diese erhöhte Oberflächentemperatur bei mit IR-Heizungen beheizten Räumen realisieren lässt, um dieselben operativen Temperaturen wie in einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum sicherzustellen, wird im Folgenden untersucht.

4.3.1 Untersuchungsergebnisse Laborräume Ehoch4

Erfolgt die Messung der operativen Temperatur wie in Kapitel 2.2.3 (Abb. 18 / Abb. 19 auf S. 45) beschrieben und wird diese als Regelgröße für eine IR-Heizung verwendet, ergeben sich Differenzen in der Lufttemperatur während des Heizbetriebes zwischen einem mit IR-Heizung beheizten Raum und einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum von im Mittel ca. 0,6 K (s. Kapitel 4.1.4, Abb. 59 auf S. 95). Abb. 72 zeigt den zeitlichen Verlauf der Lufttemperaturen im gleichen Messzeitraum wie Abb. 61 auf S. 96. Die operativen Temperaturen waren in beiden Räumen in den Zeiträumen gleich und lagen bei 20 °C (s. Abb. 63 auf S. 96).

Es kann somit bestätigt werden, dass bei IR-Systemen mit niedriger Lufttemperatur die gleiche operative Raumtemperatur (und damit Behaglichkeit) erreicht werden kann wie mit einer Fußbodenheizung.

Vergleich Lufttemperaturen T1/T3 08.03.19 - 14.03.19

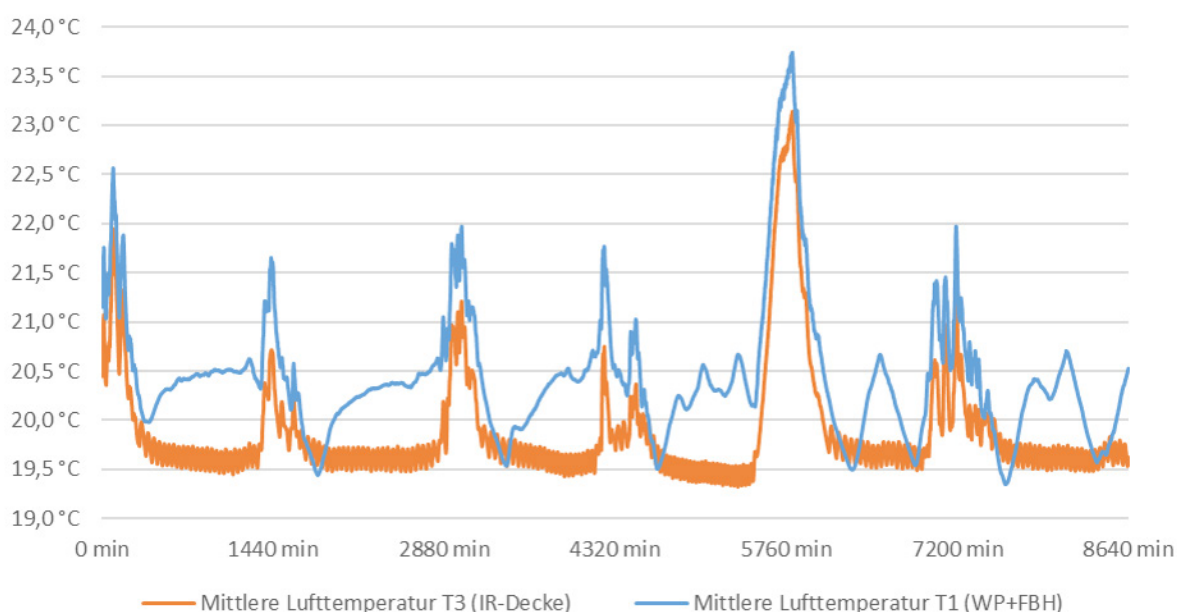


Abb. 72 Verlauf der Lufttemperaturen in Raum T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke) bei Regelung nach operativer Temperatur, MP 08.03.19 – 14.03.2019

4.3.2 Untersuchungsergebnisse Begleitforschung K76

Abb. 73 zeigt die mit den 28 Funktemperatursensoren gemessenen durchschnittlichen Lufttemperaturen im Gebäude K76 in der Heizperiode 2018 / 2019. In großen Wohnungen wurden dabei zwei Sensoren in Haupt- und Nebenräumen, in kleinen ein Sensor pro Wohnung in den Haupträumen jeweils unterhalb der Thermostate der IR-Heizungssteuerung angebracht. Die mittlere Lufttemperatur lag in HP 18/19 bei 20,04 °C.

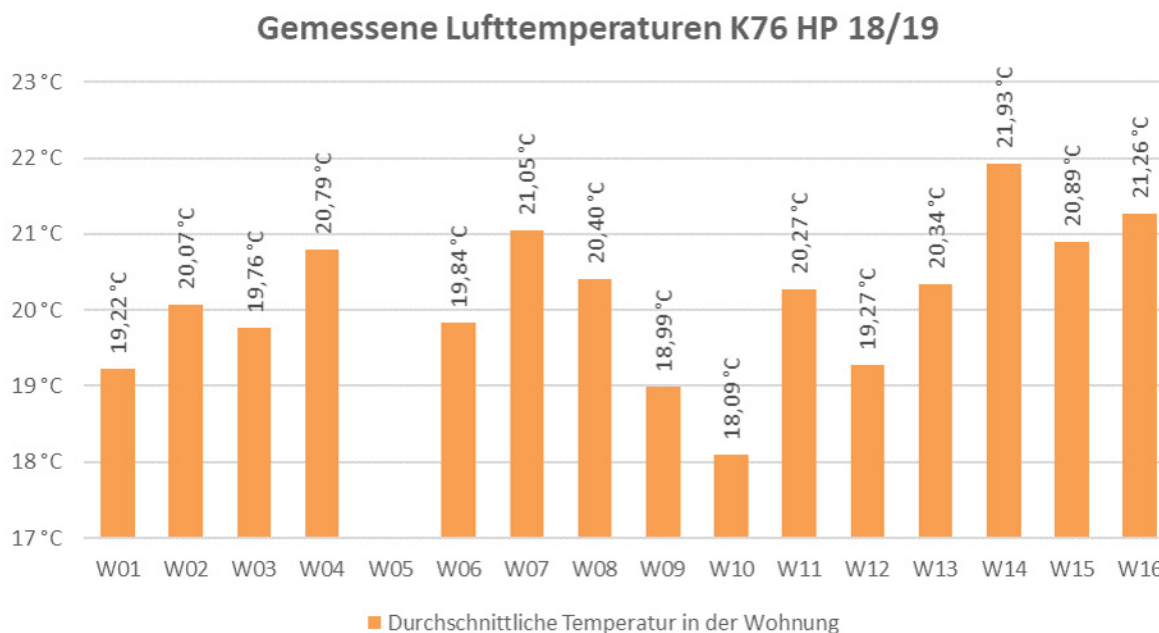


Abb. 73 Gemessene Lufttemperaturen K76 Heizperiode 2018 / 2019

4.3.3 Fazit Lufttemperaturen bei IR-Heizungen

Die Vermutung, dass die Lufttemperatur in einem mit IR-Heizungen beheizten und nach operativer Raumtemperatur geregelten Raum geringer ist als bei einem vergleichbar geregelten Fußbodenheizungsraum, konnte bestätigt werden. Die Lufttemperatur lag in den Laborraummessungen im mit IR-Heizung beheizten Raum ca. 0,6 K unter der Lufttemperatur des Fußbodenheizungsraums.

Für das Gebäude K76 zeigt sich, dass die über das gesamte Gebäude gemessenen Lufttemperaturen in Heizperiode 2018 / 2019 im Mittel bei circa 20 °C liegt. Damit lässt sich bei den Temperaturen im Gebäude K76 die gleiche Tendenz erkennen wie bei den gemessenen Temperaturen in den Laborräumen. Auch in den Laborräumen ist die mittlere Innenoberflächentemperatur, ohne die warmen Oberflächen der IR-Heizung, geringer als die dort gemessene Lufttemperatur. Zusammen mit den warmen Oberflächen der IR-Heizungen sind dort die mittleren Oberflächentemperaturen jedoch höher als die Lufttemperatur. Damit liegt in den Laborräumen auch die operative Temperatur über der Lufttemperatur.

Für das Gebäude K76 bedeutet dies, dass die operative Temperatur vermutlich auch oberhalb der Lufttemperatur lag. Würden die Heizungen im K76 auf 20 °C operative Temperatur geregelt, wären die Lufttemperaturen, aber auch die Innenoberflächentemperaturen (ohne IR-Heizungsoberflächen) noch etwas geringer. Dadurch würden sich auch die Wärmeverluste über Transmission und Lüftung geringfügig verringern. Die Berechnungen zu den Ursachen der Effizienzunterschiede in Kapitel 4.1.5 zeigen jedoch, dass die Differenzen in den Lüftungswärmeverlusten, gerade bei Einsatz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, vernachlässigbar sind.

4.4 Übergabeverluste bei IR-Heizungen

Bezüglich der Effizienzvorteile von IR-Heizungen sollen drei Kernfragen geprüft werden:

1. Führt eine strahlungsdominierte Beheizung eines Raums mit IR-System zu einer Verringerung der Wärmeverluste durch Konvektion, da sich eine reduzierte Lufttemperatur einstellt?
2. Kommt es, aufgrund der strahlungsdominierten Wärmeübertragung bei IR-Heizungssystemen gegenüber Fußbodenheizungssystemen zu höheren Wandtemperaturen? Führen diese höheren Wandtemperaturen zu einer Trocknung der Umschließungsflächen und damit zu einer Verringerung der Wärmeverluste über Transmission?
3. Kommt es, aufgrund der flexiblen Regelbarkeit, der geringen Trägheit und der thermischen Entkopplung der IR-Heizungen zu geringeren Übertemperaturen und damit zu geringeren Übergabeverlusten im Vergleich zu einem Fußbodenheizungssystem?

Die Vermutung der geringeren Lufttemperatur hat sich bestätigt. Tatsächlich stellt sich in einem mit IR-Heizung beheizten und nach operativer Temperatur geregelten Raum im Vergleich zu einem gleich geregelten Fußbodenheizungsraum eine im Mittel etwa 0,6 K niedrigere Lufttemperatur ein (s. Abb. 59 auf S. 95). Die sich dadurch ergebenden Einsparungen bei den Wärmeverlusten über Konvektion sind jedoch, gerade in gut gedämmten Häusern mit Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, äußerst gering und fallen damit nicht weiter ins Gewicht.

Die Vermutung der höheren Wandtemperaturen hat sich ebenfalls bestätigt. Jedoch ist die durchschnittliche Temperatur der Umschließungsflächen in einem IR-Heizungsraum nur zusammen mit den Oberflächen der IR-Heizungen wärmer als die Oberflächen im Fußbodenheizungsraum. Ohne die warmen Oberflächen der IR-Heizungen sind die durchschnittlichen Innenoberflächentemperaturen kälter als die Innenoberflächen im Fußbodenheizungsraum. Damit schließt sich aus, dass es im IR-Heizungsraum zu einer stärkeren Trocknung der Oberflächen kommt als im Fußbodenheizungsraum. Die niedrigeren Oberflächentemperaturen im IR-Heizungsraum haben jedoch den Vorteil, dass dadurch die Transmissionswärmeverluste etwas geringer sind als im Fußbodenheizungsraum.

Die Vermutung der geringeren Übertemperaturen hat sich bestätigt. Die thermische Entkopplung der IR-Heizung von der Baukonstruktion führt zu geringeren Wärmeverlusten an die Baukonstruktion. Die geringe Trägheit und flexible Regelbarkeit der IR-Heizung gegenüber einer Fußbodenheizung führt zu geringeren Wärmeverlusten durch Übertemperaturen im Raum.

Damit stehen als Hauptursache für den geringeren Wärmebedarf des IR-Heizungsraums gegenüber dem Fußbodenheizungsraum die Differenzen bei den Übergabeverlusten fest. Die Laborräume weisen jedoch, wie bereits beschrieben, die Besonderheit auf, dass sie nur südorientiert sind und die Geschosdecke Richtung Erdgeschoss schlecht gedämmt ist. Da diese zwei Faktoren für die IR-Heizung im Vergleich mit der Fußbodenheizung Vorteile bieten, wird im Folgenden zuerst ein Simulationsmodell erstellt und validiert. Mit Hilfe des validierten Simulationsmodells werden dann die Effizienzvorteile und Übergabeverluste bei Standardrandbedingungen simuliert.

4.4.1 Erstellung Simulationsmodell / Validierung der Simulationen

Um zu überprüfen, ob das Simulationsmodell (s. Kapitel 2.3.1) die Realität korrekt abbildet, wurde dieses in drei unterschiedlichen Validierungsphasen getestet. Als Testzeitraum wurden Zeiten im Frühjahr 2019 gewählt, in denen schon nach berechneter operativer Raumtemperatur geregelt wurde. Die Validierungsphasen unterscheiden sich zudem deutlich in ihrer Dynamik hinsichtlich Temperatur und solarer Einstrahlung, deren Einfluss auf das Raumklima sich im Verlauf der operativen Temperatur widerspiegelt. Die Abb. 74 bis Abb. 79 zeigen die gemessenen Außenlufttemperaturen und die gemessenen operativen Temperaturen in Laborraum T3 in den drei Validierungsphasen.

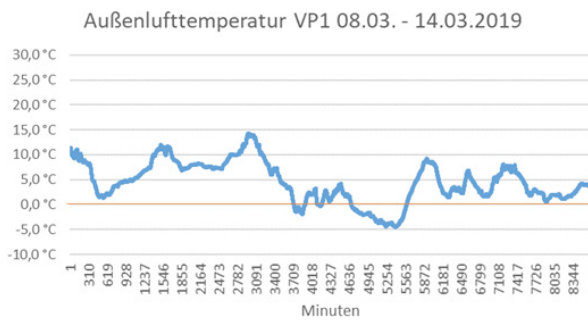


Abb. 74 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 1 (6 Tage/im Mittel 4,5°C)

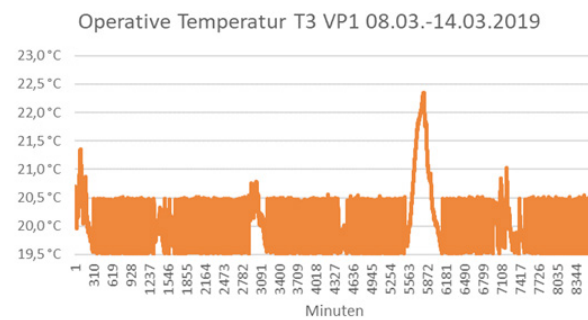


Abb. 75 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 1

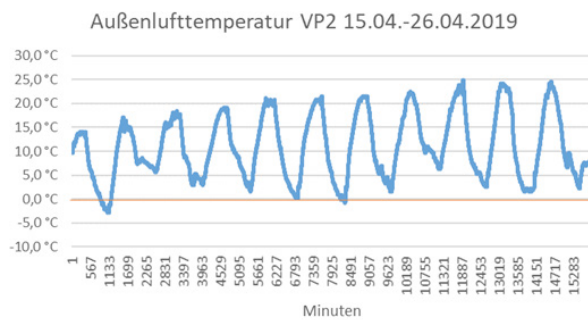


Abb. 76 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 2 (11 Tage/im Mittel 11,0°C)

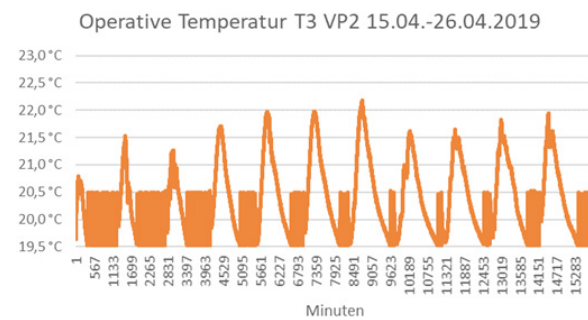


Abb. 77 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 2

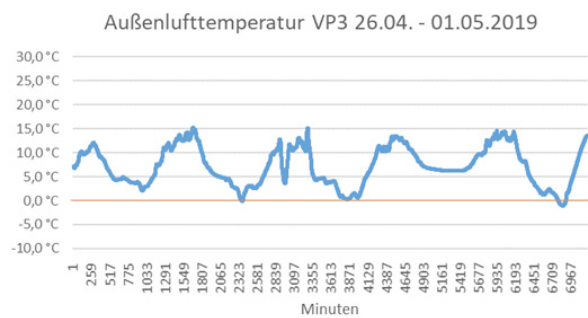


Abb. 78 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 3 (5 Tage / im Mittel 7,2 °C)

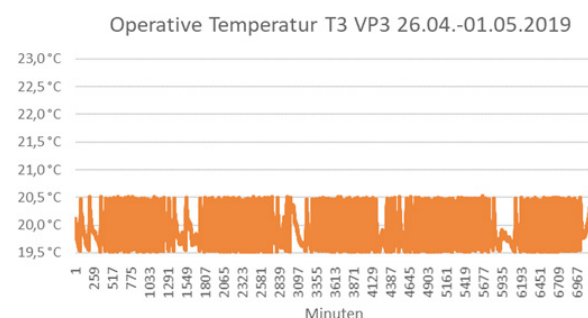


Abb. 79 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 3

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse (orange) mit den in den Laborräumen gemessenen Daten aus den drei Validierungsphasen verglichen (blau). Die Tabelle unter den Diagrammen zeigt immer die Abweichung der Simulationswerte von den gemessenen Werten.

Abb. 80 zeigt den simulierten Strom- bzw. Wärmeverbrauch von Laborraum T3 (IR-Decke) im Vergleich zu den gemessenen Werten. Wie sich in Tabelle 20 zeigt, weisen die simulierten Werte in Laborraum T3 (IR-Decke) zu den gemessenen Werten eine Abweichung von maximal +/- 10 % auf.

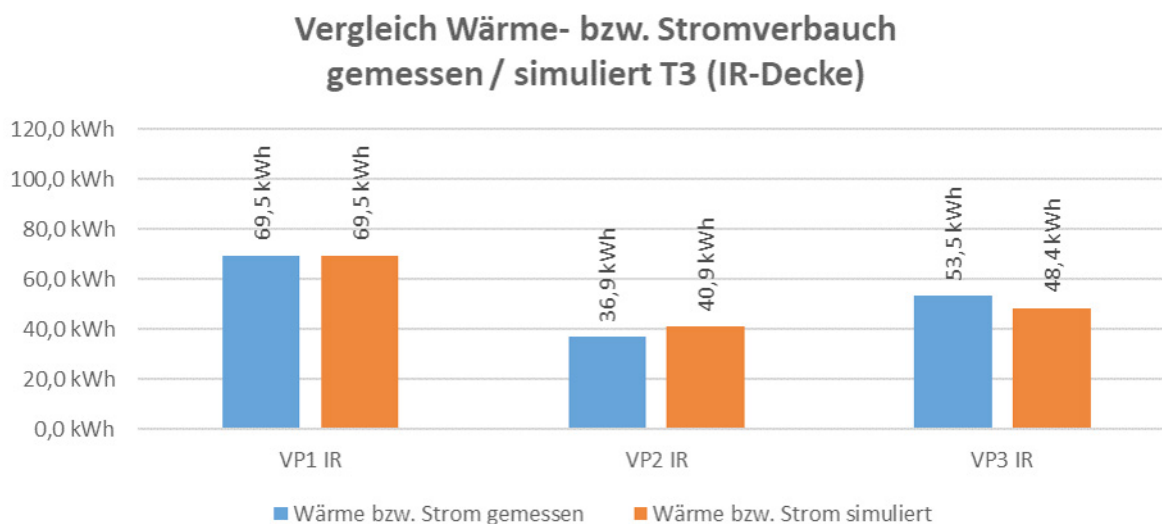


Abb. 80 Gemessene absolute Wärme- bzw. Stromverbräuche Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den simulierten Werten

	VP1 IR	VP2 IR	VP3 IR
Strom gemessen	69,5 kWh	36,9 kWh	53,5 kWh
Strom simuliert	69,5 kWh	40,9 kWh	48,4 kWh
Abweichung	0%	10%	-10%

Tabelle 20 Abweichung der simulierten Wärme- und Stromverbräuche in Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten

Abb. 81 auf S. 116 zeigt den simulierten Wärmeverbrauch von Laborraum T1 (WP/FBH) im Vergleich zu den gemessenen Werten. Die Abweichungen zwischen gemessenen Wärmeverbrauchswerten und simulierten Werten liegen auch hier bei circa +/- 10 % (s. Tabelle 21 auf S. 116). In den Phasen 2 und 3 verhalten sich die Abweichungen dabei genau gleich wie bei Laborraum T3 (IR-Decke) (s. Abb. 81). Nur Phase 1 weicht um circa 13 % ab.

Abb. 82 auf S. 116 zeigt den simulierten Stromverbrauch von Laborraum T1 (WP/FBH) im Vergleich zu den gemessenen Werten. Auch die Abweichungen der gemessenen zu den berechneten Stromverbräuchen zeigen eine Abweichung von maximal -11 % (s. Tabelle 22 auf S. 116). Es lässt sich eine leichte Tendenz in Richtung geringeren simulierten Stromverbrauchswerten bei Laborraum T1 (WP/FBH) erkennen.

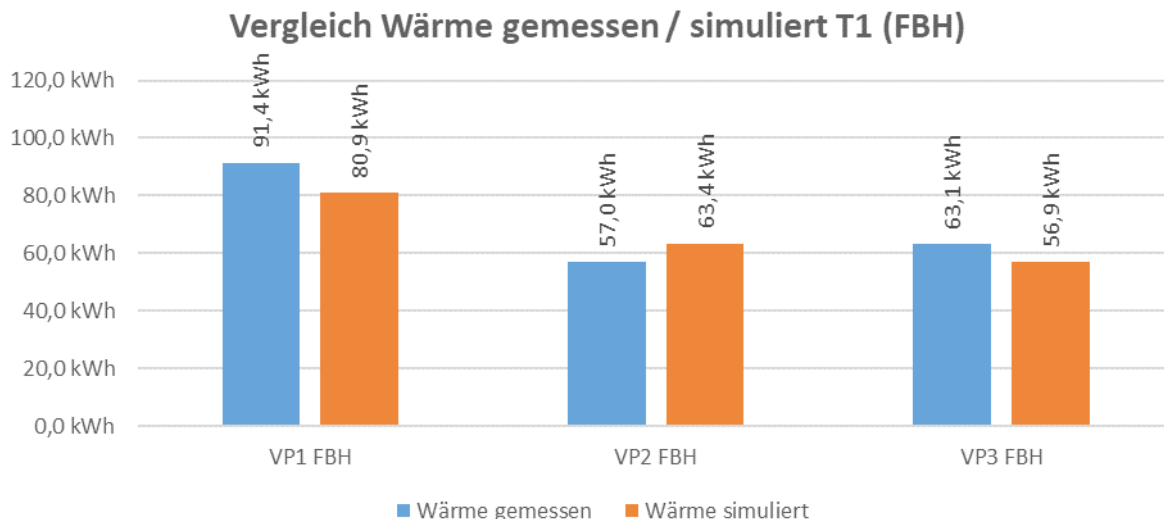


Abb. 81 Gemessene absolute Wärmeverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten

	VP1 FBH	VP2 FBH	VP3 FBH
Wärme gemessen	91,4 kWh	57,0 kWh	63,1 kWh
Wärme simuliert	80,9 kWh	63,4 kWh	56,9 kWh
Abweichung	-13%	10%	-11%

Tabelle 21 Abweichung der simulierten Wärmeverbräuche Laborraum T3 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten

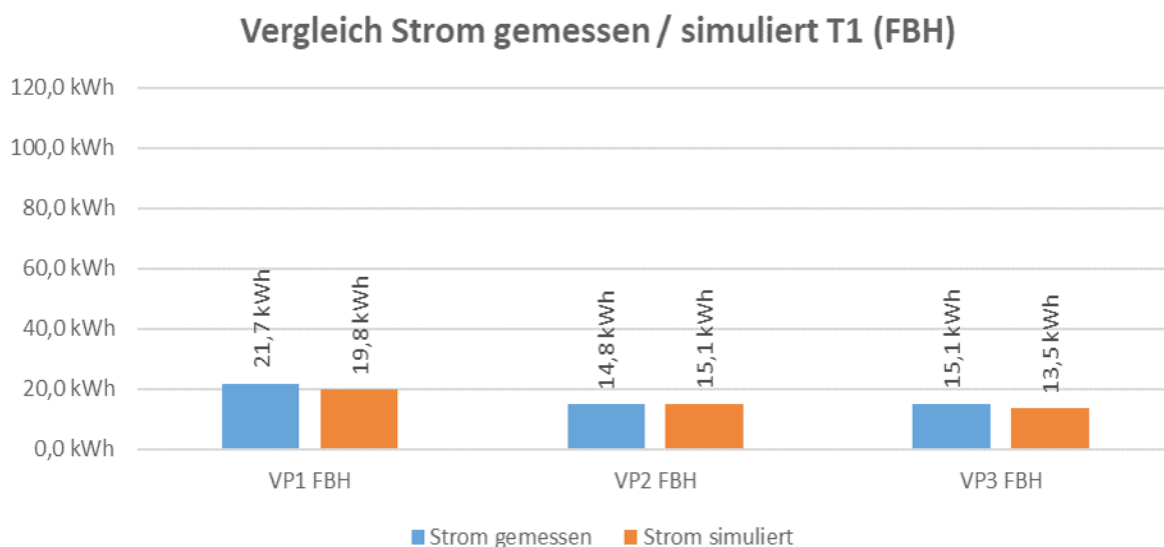


Abb. 82 Gemessene absolute Stromverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den simulierten Werten

	VP1 FBH	VP2 FBH	VP3 FBH
Strom gemessen	21,7 kWh	14,8 kWh	15,1 kWh
Strom simuliert	19,8 kWh	15,1 kWh	13,5 kWh
Abweichung	-10%	2%	-11%

Tabelle 22 Abweichung der simulierten Stromverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten

Vergleich AZ Level 1 gemessen / simuliert

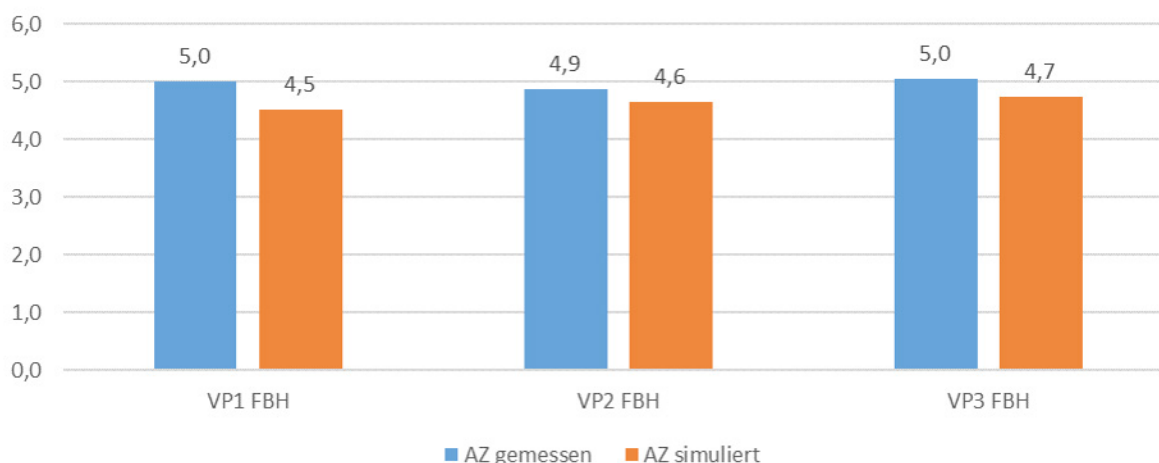


Abb. 83 Gemessene und simulierte Level 1 Arbeitszahlen der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich

	VP1 FBH	VP2 FBH	VP3 FBH
AZ Level 1 gemessen	5,0	4,9	5,0
AZ Level 1 simuliert	4,5	4,6	4,7
Abweichung	-11%	-5%	-6%

Tabelle 23 Abweichung der simulierten Level 1 Arbeitszahl der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten

Vergleich AZ Level 3 gemessen / simuliert

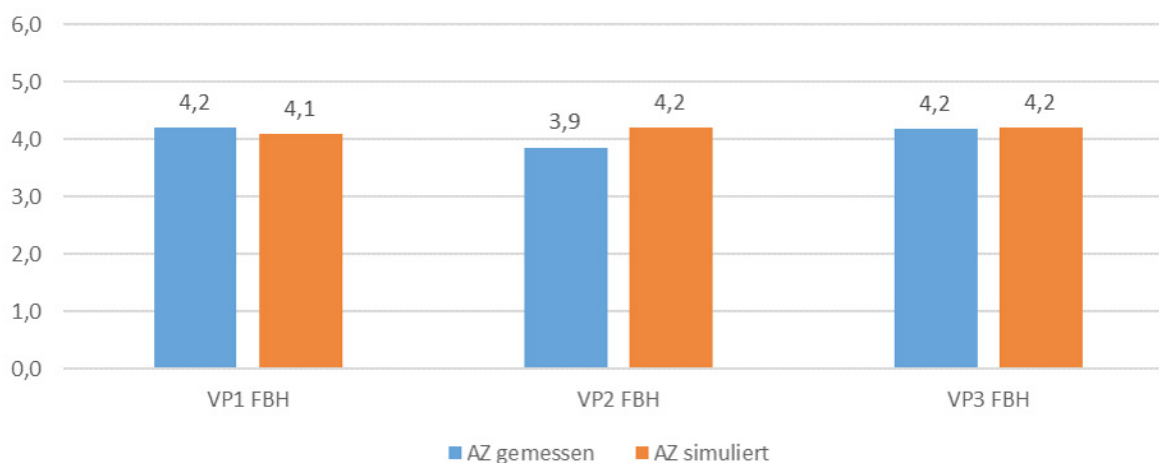


Abb. 84 Gemessene und simulierte Level 3 Arbeitszahlen der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich

	VP1 FBH	VP2 FBH	VP3 FBH
AZ Level 3 gemessen	4,2	3,9	4,2
AZ Level 3 simuliert	4,1	4,2	4,2
Abweichung	-3%	8%	0%

Tabelle 24 Abweichung der simulierten Level 3 Arbeitszahl der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten

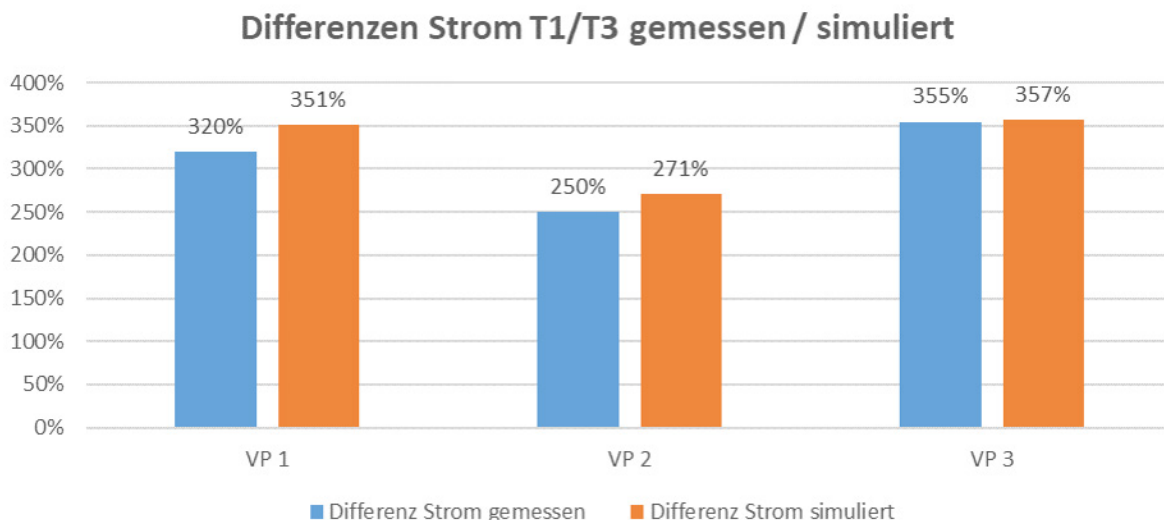


Abb. 85 Differenzen im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke) gemessen und simuliert im Vergleich.

	VP 1	VP 2	VP 3
Differenz Strom gemessen	320%	250%	355%
Differenz Strom simuliert	351%	271%	357%
Abweichung	-9%	-8%	-1%

Tabelle 25 Abweichungen der Differenzen im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke) gemessen und simuliert im Vergleich.

Abb. 83 und Abb. 84 auf S. 117 zeigen die gemessenen und simulierten Level 1 und Level 3 Arbeitszahlen der Wärmepumpe in Laborraum T1. Die gemessenen Level 1 Arbeitszahlen (Abb. 83) sind im Schnitt etwas besser als die simulierten. Die Abweichungen der gemessenen Level 3 Arbeitszahlen (Abb. 84) sind geringer. Da diese für den Effizienzvergleich mit der IR-Heizung entscheidend sind, fällt die höhere Abweichung bei den Level 1 Arbeitszahlen nicht sehr ins Gewicht.

Abb. 85 zeigt die gemessene und die simulierte Differenz im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und T3 (IR-Decke). Bei den Differenzen zeigt sich wie in Abb. 83 die Tendenz, dass die simulierten Stromverbräuche der Wärmepumpe etwas geringer sind und sich damit auf die Verbrauchsdifferenzen auswirken.

Vergleicht man die Simulationsdaten im Detail mit den gemessenen Daten, ergibt sich nachfolgendes Bild. Abb. 86 auf S. 119 zeigt den Verlauf der simulierten operativen Temperaturen von Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke). Vergleicht man Abb. 86 mit Abb. 61 auf S. 96, fällt auf, dass die Temperaturspitzen sich bei solarer Einstrahlung im Simulationsmodell etwa gleich verhalten wie die gemessenen Temperaturen. Die Übertemperaturen im FBH-Raum sind bei solarer Einstrahlung im Simulationsmodell, genauso wie bei den Messungen, höher. Dies ist ein wichtiger Faktor zur Erklärung der Verbrauchsunterschiede.

Vergleicht man die simulierten Lufttemperaturen aus Abb. 86 auf S. 119 mit den Lufttemperaturen aus Abb. 72 auf S. 111 fällt auf, dass die simulierten Lufttemperaturen höher sind als die gemessenen. Das gleiche Bild ergibt sich aus dem detaillierten Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturen während der Aufheizphasen im IR-Heizungsraum in Abb. 88 / Abb. 89 auf S. 120.

Vergleich simulierte operative Temperaturen T1/T3 08.03.19 - 14.03.19

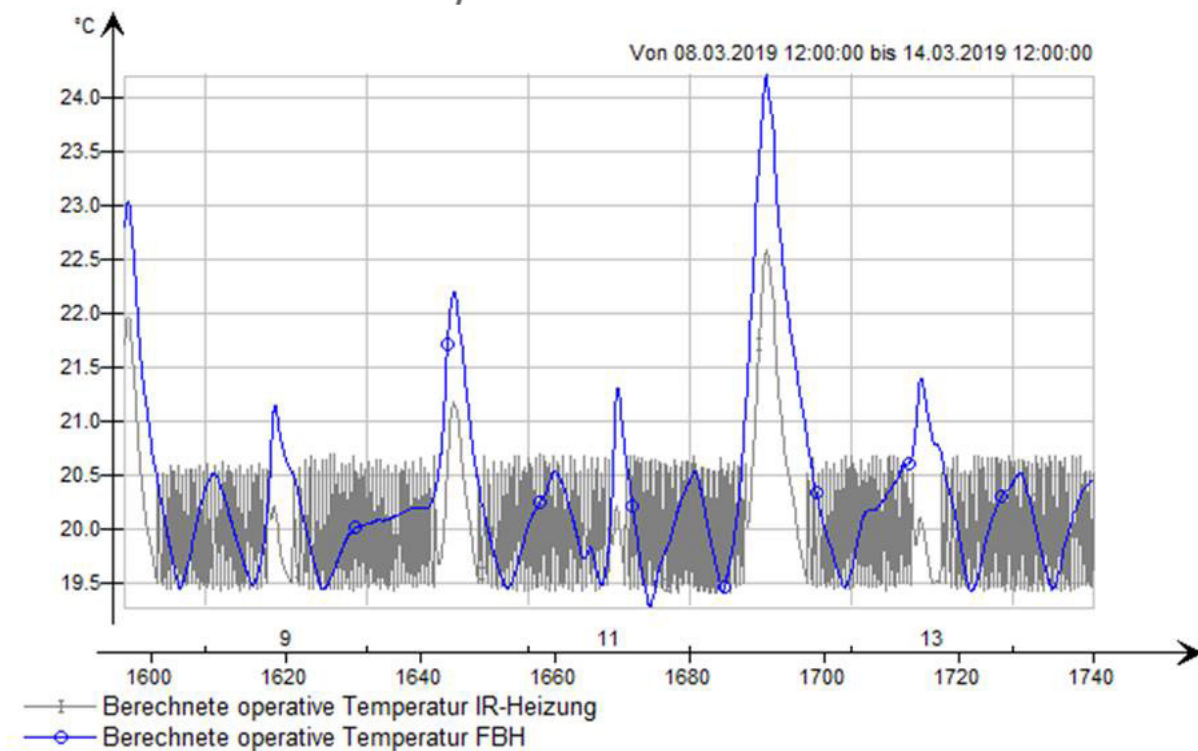


Abb. 86 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen Laborraum T1 (WP/FBH) / Laborraum T3 (IR-Decke), Validierungsphase 1 im Vergleich.

Vergleich simulierte Lufttemperaturen T1/T3 08.03.19 - 14.03.19

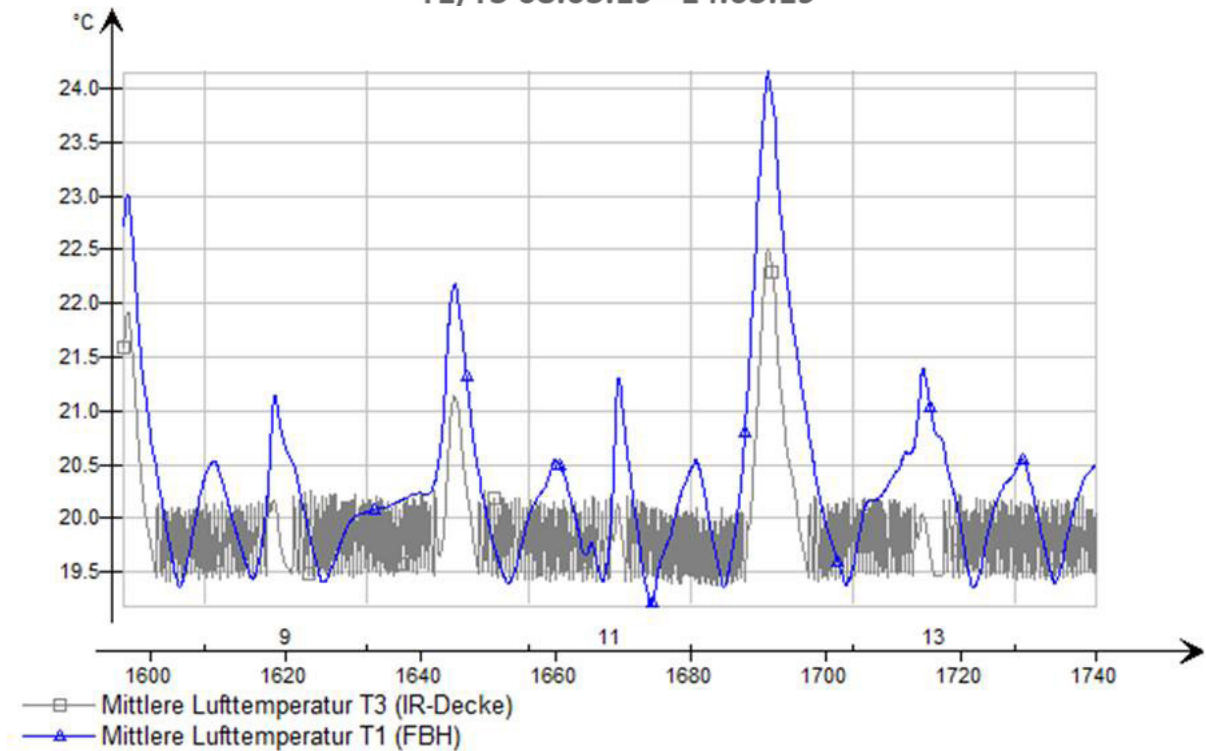


Abb. 87 Verlauf der simulierten Lufttemperaturen Laborraum T1 (WP/FBH) / Laborraum T3 (IR-Decke), Validierungsphase 1 im Vergleich.

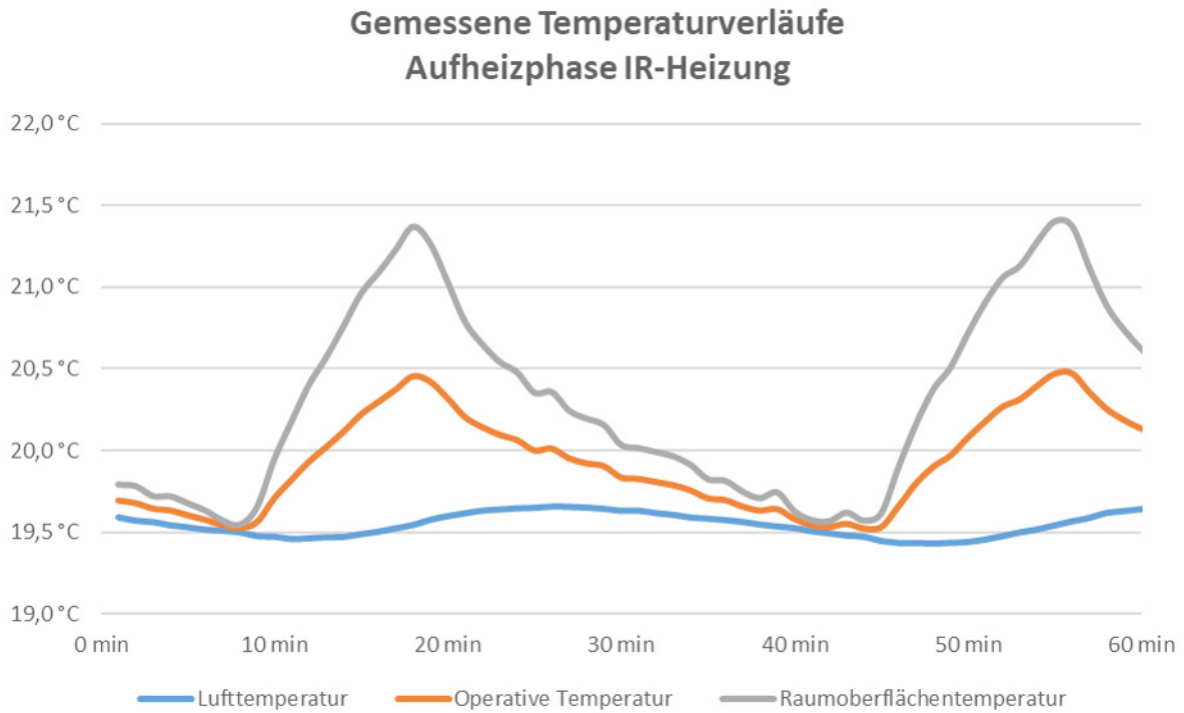


Abb. 88 Verlauf der gemessenen Temperaturen Aufheizphase IR-Heizung

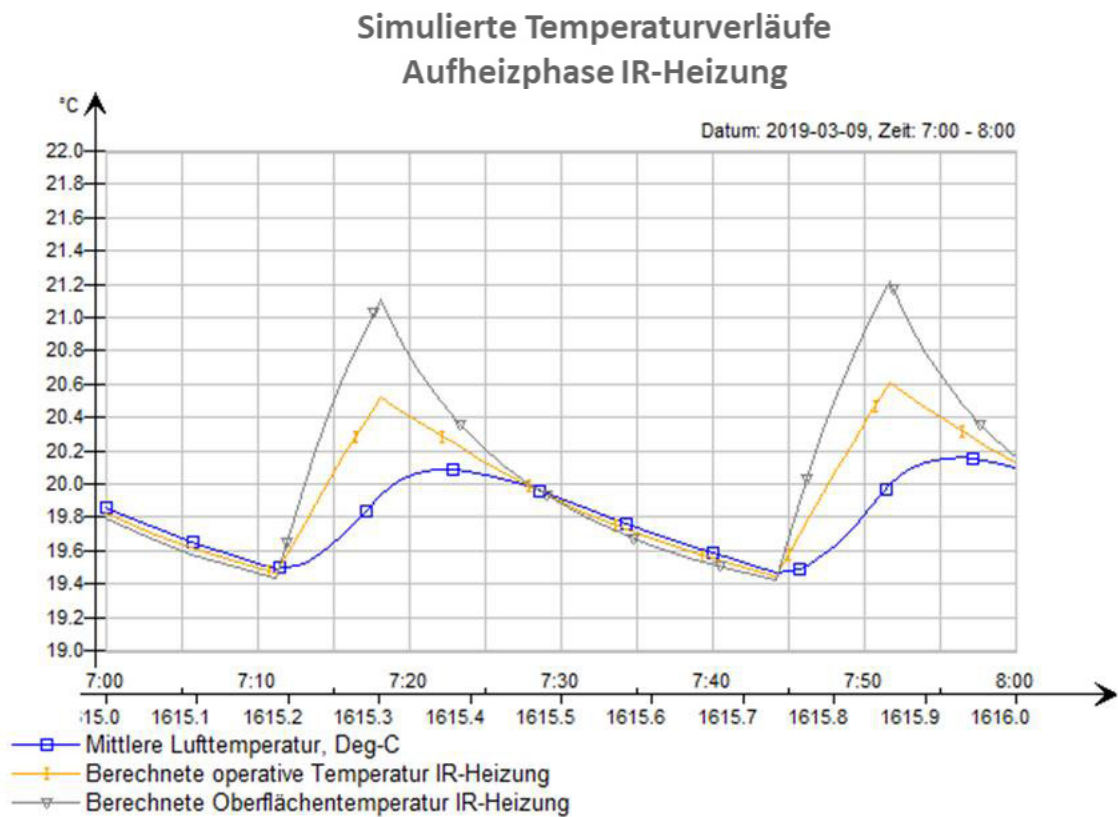


Abb. 89 Verlauf der simulierten Temperaturen Aufheizphase IR-Heizung

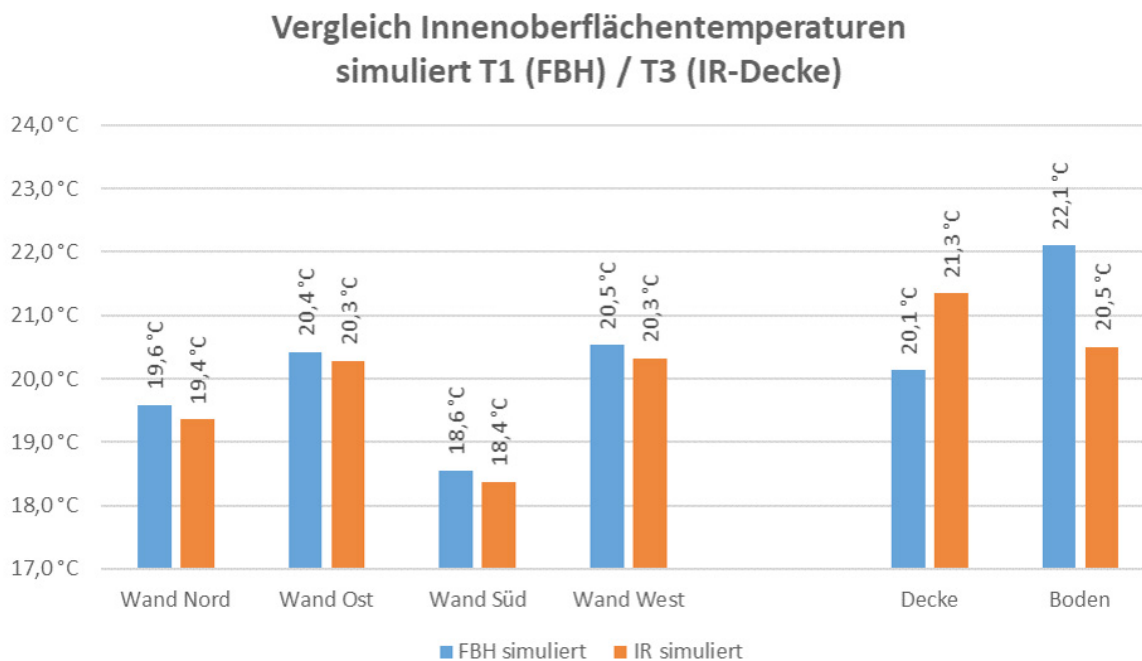


Abb. 90 Vergleich der simulierten Innenoberflächentemperaturen T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke)

Der Vergleich der simulierten durchschnittlichen Oberflächentemperaturen aus Abb. 90 mit den tatsächlichen gemessenen Oberflächentemperaturen in Abb. 60 auf S. 95 ergibt ein gleiches Grundverhalten in Simulation und Messung. In beiden Fällen sind die Oberflächentemperaturen der Wände im Mittel im Fußbodenheizungsraum höher als im mit IR-Heizung beheizten Raum. Jedoch sind die Abweichungen in den Messungen höher als in den Simulationen.

Somit wird in der detaillierten Betrachtung der Simulationsdaten deutlich, dass sich die Simulationen, in den für die Verbrauchsdifferenzen wichtigen Punkten, ähnlich verhalten. Die Ausprägung der für die Verbrauchsdifferenzen entscheidenden Unterschiede sind jedoch in den gemessenen Daten größer. Hier sollte das Simulationsmodell noch optimiert werden. Als Schlussfolgerung kann festgestellt werden, dass in der Simulation die Differenzen in den Wärmeverbräuchen etwas geringer ausfallen als in der Realität.

Im Gesamten stellt sich dar, dass das Simulationsmodell in den drei sehr unterschiedlichen Validierungsphasen 1 - 3 mit einer Genauigkeit von +/- 10 % den Änderungen der klimatischen Randbedingungen genauso folgt wie die realen Messwerte. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass weiterführende Simulationen bei gleichen Grundeinstellungen, aber mit abgeänderten Parametern Ergebniswerte generieren, die in einem Feld von circa +/- 10 % (bezogen auf den jeweiligen Messwert) die Realität abbilden.

Um das Simulationsmodell noch einmal über einen längeren Zeitraum zu prüfen und mit gemessenen Daten abzugleichen, wurden im Folgenden die Messphasen 1 - 4 aus der Heizperiode 2018 / 2019 simuliert und mit den gemessenen Daten verglichen.

Abb. 91 auf S. 122 zeigt die absoluten gemessenen und simulierten Werte des Wärmeverbrauchs von Laborraum T1 (WP/FBH) der Messphasen 1 - 4 aus der Heizperiode 2018 / 2019. Es bildet ab, dass die simulierten Werte gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen (s. Tabelle 26 auf S. 122). Gerade in der langen Messphase 2 (2 ½ Monate) liegt der Unterschied zwischen gemessenem und simuliertem Wert bei nur 1 %.

Absolute Verbrauchswerte Wärme T1 (FBH) MP 1-4 HP 18/19 gemessen / simuliert

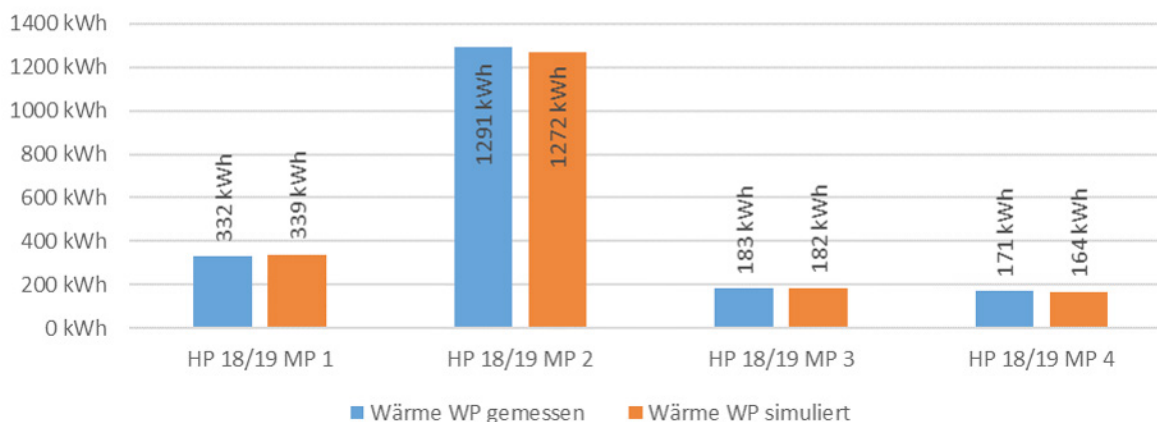


Abb. 91 Absoluter Wärmeverbrauch Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert

	HP 18/19 MP 1	HP 18/19 MP 2	HP 18/19 MP 3	HP 18/19 MP 4
Wärme WP gemessen	332 kWh	1291 kWh	183 kWh	171 kWh
Wärme WP simuliert	339 kWh	1272 kWh	182 kWh	164 kWh
Abweichung	2%	-1%	-1%	-4%

Tabelle 26 Abweichung der simulierten von den gemessenen Wärmeverbrauchswerten Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4, HP 18/19

Absolute Verbrauchswerte Strom T1 (FBH) MP 1-4 HP 18/19 gemessen / simuliert

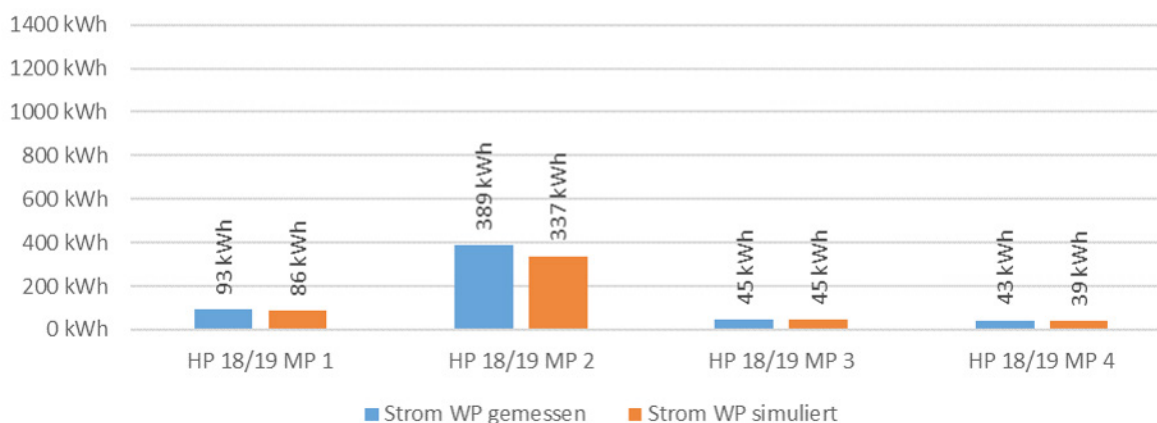


Abb. 92 Absoluter Stromverbrauch Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert

	HP 18/19 MP 1	HP 18/19 MP 2	HP 18/19 MP 3	HP 18/19 MP 4
Strom WP gemessen	93 kWh	389 kWh	45 kWh	43 kWh
Strom WP simuliert	86 kWh	337 kWh	45 kWh	39 kWh
Abweichung	-8%	-13%	0%	-8%

Tabelle 27 Abweichung der simulierten von den gemessenen Stromverbrauchswerten Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4, HP 18/19

Abb. 92 auf S. 122 zeigt die absoluten gemessenen und simulierten Stromverbrauchswerte für Laborraum T1 (WP/FBH) aus den Messphasen 1 - 4 der Heizperiode 2018 / 2019. Die simulierten Stromverbräuche weichen systematisch in eine Richtung ab. Dies lässt den Schluss zu, dass die in der Simulation eingesetzte Wärmepumpe effizienter läuft als die real gemessene und die Simulationsergebnisse bisher den Stromverbrauch der Wärmepumpe zu gering darstellen.

Abb. 93 zeigt die absoluten gemessenen und simulierten Strom- und Wärmeverbrauchswerte von Laborraum T3 (IR-Decke) aus den Messphasen 1 - 4 der Heizperiode 2018 / 2019. Gerade in der langen Messphase 2 scheinen die Verbrauchswerte gut übereinzustimmen. Die Laborräume wurden jedoch in den ersten zwei Messphasen nach gemessener operativer Temperatur geregelt und erst in den letzten zwei Messphasen nach berechneter operativer Temperatur.

An den Messergebnissen in Kapitel 4.5.1 kann man erkennen, dass sich eine Umstellung der Regelung von gemessener auf berechnete operative Temperatur positiv auf die Effizienz des IR-Heizungsraums ausgewirkt hat. Da das Simulationsmodell die operative Raumtemperatur auf die gleiche Weise berechnet, wie die Messung in den Laborräumen in den letzten zwei Messphasen erfolgte, müssten also die simulierten Werte in den Messphasen 1 und 2 tendenziell geringer sein als die gemessenen Werte. Da dies nicht so ist und auch die simulierten Werte im Gesamten eher höher sind als die gemessenen Werte, besteht Grund zu der Annahme, dass die Strom- und Wärmeverbräuche der IR-Heizung bislang im Simulationsmodell eher zu hoch sind.

Abb. 94 auf S. 124 zeigt nochmals die simulierten und gemessenen Gesamtverbräuche der Heizperiode 2018 / 2019 mit den Wärme- und Stromverbräuchen von Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke). Die simulierten Wärmeverbräuche in Laborraum T1 passen fast exakt zu den gemessenen Werten. Der Stromverbrauch von Laborraum T1 (WP/FBH System) ist in der Simulation eher zu gering und weicht um 11 % nach unten gegenüber den gemessenen Werten ab. Der Strom- und Wärmeverbrauch in Laborraum T3 (IR-Heizung) ist in der Simulation eher zu hoch. Die gleichen Tendenzen finden sich auch in Abb. 95 auf S. 124 wieder.

Absolute Verbrauchswerte Strom / Wärme T3 (IR-Decke) MP 1-4 HP 18/19 gemessen / simuliert

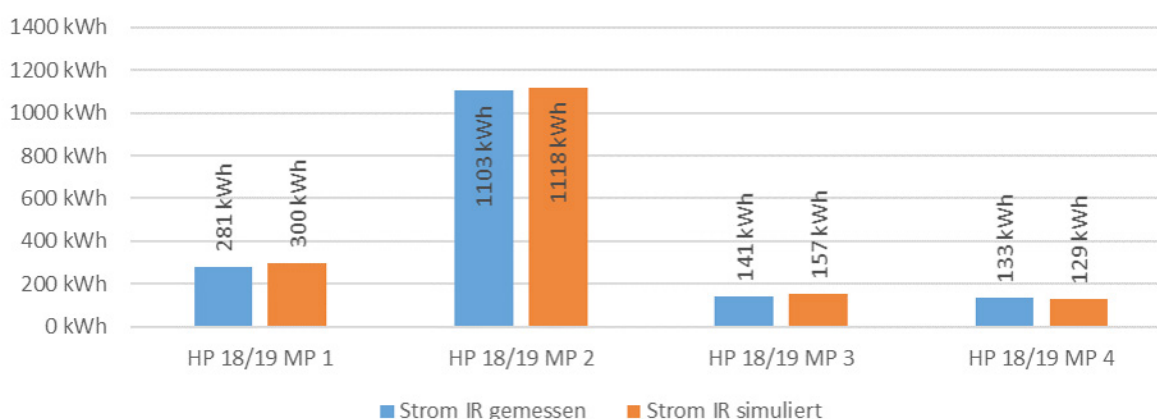


Abb. 93 Absoluter Strom / Wärmeverbrauch Laborraum T3 (IR-Decke), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert

	HP 18/19 MP 1	HP 18/19 MP 2	HP 18/19 MP 3	HP 18/19 MP 4
Strom IR gemessen	281 kWh	1103 kWh	141 kWh	133 kWh
Strom IR simuliert	300 kWh	1118 kWh	157 kWh	129 kWh
Abweichung	7%	1%	11%	-3%

Tabelle 28 Abweichung der simulierten von den gemessenen Stromverbrauchswerten Laborraum T3 (IR-Decke), MP 1-4, HP 18/19

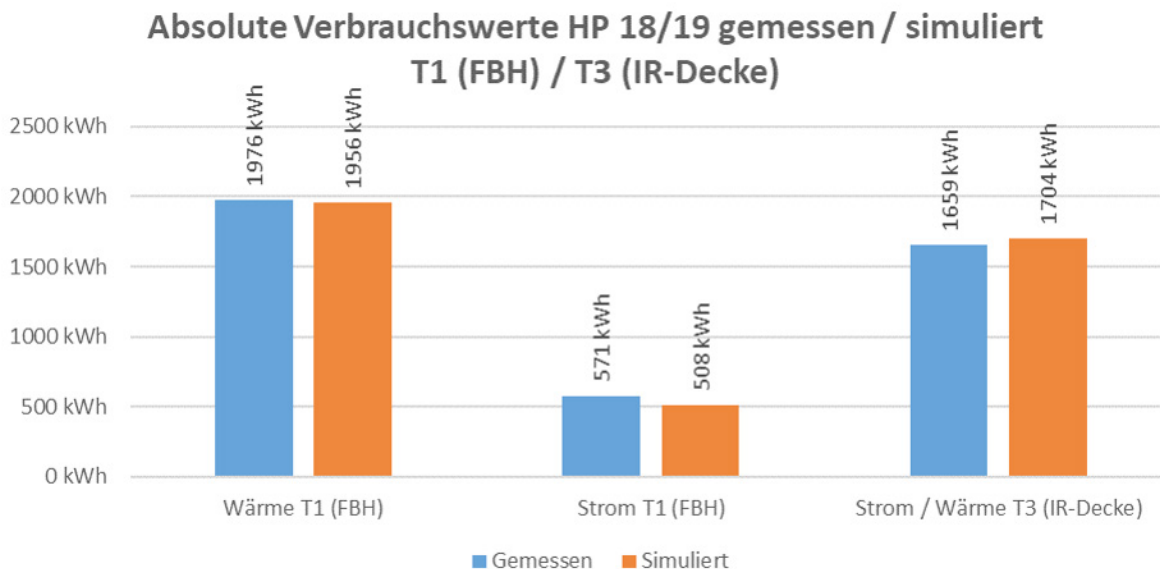


Abb. 94 Absolute Verbrauchswerte Strom / Wärme Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke) HP 18/19 gemessen / simuliert

	Wärme T1 (FBH)	Strom T1 (FBH)	Strom / Wärme T3 (IR-Decke)
Gemessen	1976 kWh	571 kWh	1659 kWh
Simuliert	1956 kWh	508 kWh	1704 kWh
Abweichung	-1%	-11%	3%

Tabelle 29 Abweichung der simulierten von den gemessenen gesamt Wärme- und Stromverbrauchswerten Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke), HP 18/19

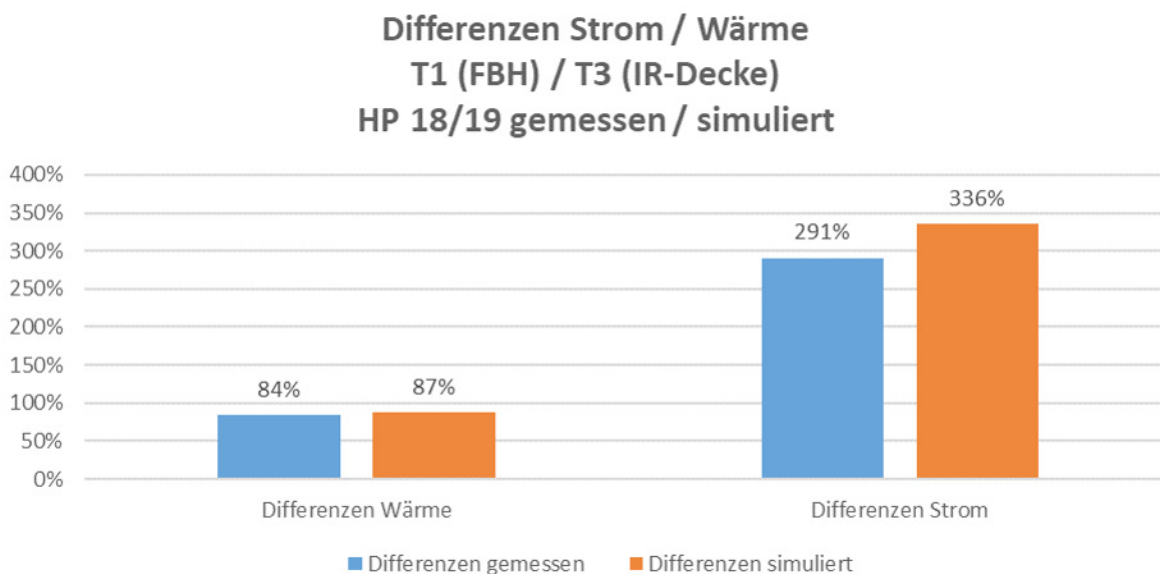


Abb. 95 Differenzen Strom / Wärme Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke), HP 18/19 gemessen / simuliert

Eine im Modell durchgeführte Simulation der gesamten Heizperiode vom 01.10.2018 bis 30.04.2019 kommt zu den nachfolgenden Ergebnissen in Abb. 96 und Abb. 97. Die Ergebnisse sind jedoch, für die Laborräume in Ehoch4, beim Stromverbrauch der Wärmepumpe vermutlich circa 10 % zu niedrig und für den Stromverbrauch der IR-Heizung wahrscheinlich circa 3 - 10 % zu hoch.

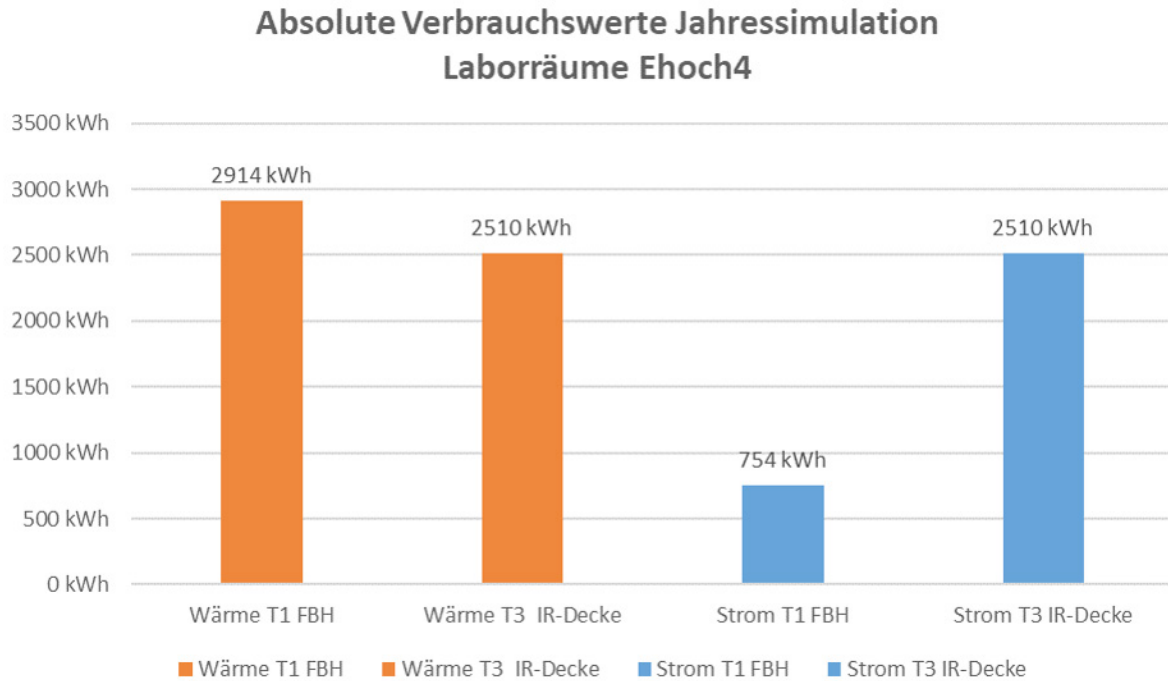


Abb. 96 Absolute Verbrauchswerte Jahressimulation Laborräume Ehoch4 HP 18/19

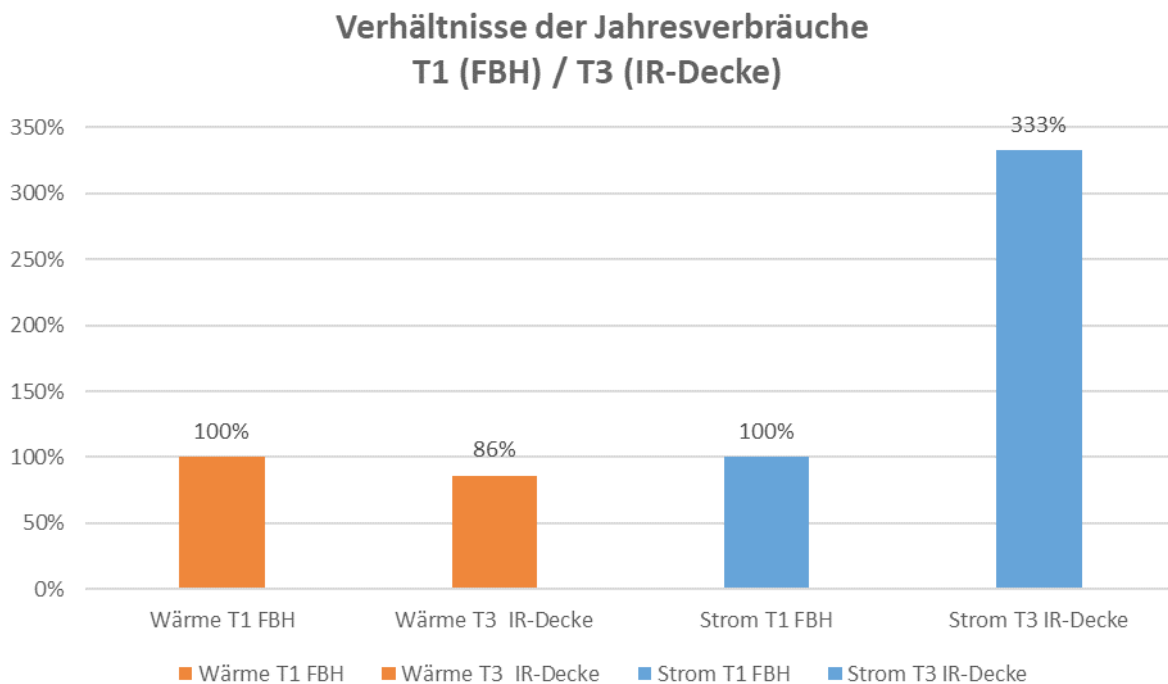


Abb. 97 Verhältnisse der simulierten Jahresverbrauchswerte Laborräume Ehoch4 HP 18/19

4.4.2 Untersuchung der Übergabeverluste der IR-Heizung

Mit Hilfe des validierten Simulationsmodells werden im Folgenden die Differenzen der Übergabeverluste zwischen mit Fußbodenheizung beheizten (im Heizestrich) und mit IR-Heizungen an der Decke beheizten Räumen untersucht.

In einer ersten Variante wurden zwei Laborräume mit Nord- / Südausrichtung betrachtet (s. Abb. 98). Die Räume grenzen an das Erdreich und an die Außenluft an. Die Dämmqualität wurde gegenüber den Laborräumen deutlich verbessert (Wände, Decke und Boden $U = 0,16$; Fenster $U = 0,7$). Zusätzlich wurde noch die sich ergebende Wärmeabgabe eines idealen Heizelementes untersucht. Das ideale Heizelement liefert dem Raum immer genau die Menge an Energie, die zur Aufrechterhaltung der Solltemperatur notwendig ist. Es bildet damit den Nutzwärmebedarf des Raumes ab.

In einer zweiten Variante wurden die Laborräume in Ehoch4 im Modell vervielfältigt (s. Abb. 99). Auch hier grenzen die Räume an das Erdreich und an die Außenluft an und die Dämmqualität wurde deutlich verbessert (Wände, Decke und Boden $= 0,16$; Fenster $U = 0,7$). Zusätzlich wurde wieder ein ideales Heizelement mit untersucht.

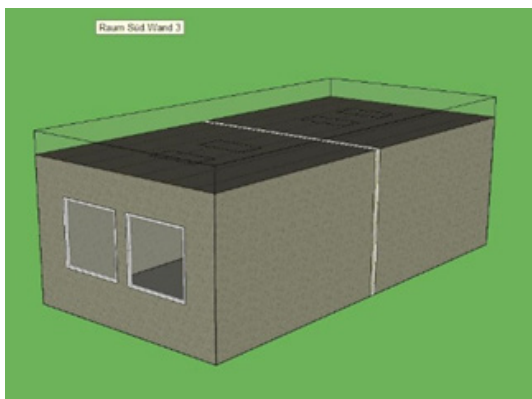


Abb. 98 3D Darstellung der simulierten Laborräume aus IDA ICE

	FBH	IR-Heizung	Ideales Heizelement
Südraum	391 kWh 100%	350 kWh 90%	353 kWh 90%
Nordraum	675 kWh 100%	650 kWh 96%	639 kWh 95%
Gesamt	1066 kWh 100%	1000 kWh 94%	992 kWh 93%
	33,3 kWh/m ²	31,2 kWh/m ²	31,0 kWh/m ²

Tabelle 30 Simulierte Verbrauchsunterschiede zweier Laborräume

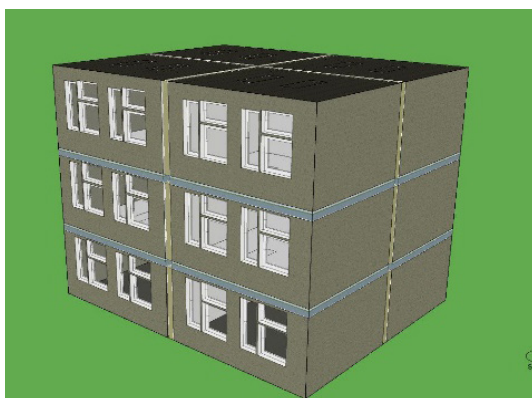


Abb. 99 3D Darstellung der vervielfältigten Laborräume aus IDA ICE

	FBH	IR Heizung	Ideales-Heizelement
Südräume	3010 kWh 100%	2780 kWh 92%	2720 kWh 90%
Nordräume	5811 kWh 100%	5637 kWh 97%	5623 kWh 97%
Gesamt	8822 kWh 100%	8416 kWh 95%	8343 kWh 94%
	22,7 kWh/m ²	21,6 kWh/m ²	21,4 kWh/m ²

Tabelle 31 Simulierte Verbrauchsunterschiede vervielfältigter Laborräume

In beiden Varianten stellt sich heraus, dass sich die Differenz im Wärmeverbrauch gegenüber den Laborraumsimulationen deutlich verringert hat. Die Ursachen dafür sind:

- Die Fußbodenheizung ist nun nach unten deutlich besser gedämmt und hat somit geringere Wärmeverluste in Zonen, die außerhalb des Bilanzraums liegen.
- Wie auch aus den Simulationsergebnissen der zwei Varianten hervorgeht, profitiert die IR-Heizung in südorientierten Räumen stärker von ihrer geringen Trägheit und flexiblen Regelbarkeit. Werden nordorientierte Räume mit in den Bilanzraum aufgenommen, verringert sich die Gesamtdifferenz beim Wärmeverbrauch der mit IR-Heizung beheizten Räume im Vergleich zur Fußbodenheizungsvariante.

4.4.3 Vergleich simulierte Übergabeverluste / Berechnung nach DIN 18599

Tabelle 32 auf S. 128 und Tabelle 33 auf S. 129 zeigen, wie die Übergabeverluste der Fußbodenheizung und der Elektrodirektheizung aktuell in der DIN V 18599 abgebildet werden. Dabei zeigt Tabelle 32 die Berechnung nach aktueller DIN 18599-5 2016, Tabelle 33 die Berechnung nach der für die EnEV gültigen DIN 18599-5 2011. In der DIN werden die Übergabeverluste immer als Aufschlag auf den zuvor berechneten Nutzwärmebedarf berechnet. Dieser Aufschlag ist in der DIN 18599-5 2016 abhängig von der Summe aller Verluste verursachten Temperaturschwankungen, $\Delta\vartheta_{ce}$, die von nachfolgenden Einflussfaktoren abhängig ist:

- „durch Schichtung verursachte räumliche Temperaturschwankung (K): $\Delta\vartheta_{str}$
- die Regelabweichung (K): $\Delta\vartheta_{ctr}$
- durch den zusätzlichen Wärmeverlust von in die Gebäudehülle integrierten Heizkörpern verursachte Temperaturschwankung: $\Delta\vartheta_{emb}$
- durch die von der Art des Wärmeübergabesystems abhängige Strahlung verursachte Temperaturschwankung (K); $\Delta\vartheta_{rad}$
- durch intermittierenden Betrieb verursachte und von der Art des Wärmeübergabesystems abhängige Temperaturschwankung (K), $\Delta\vartheta_{im}$
- durch einen nicht durchgeführten hydraulischen Abgleich verursachte Temperaturschwankung in K (K); $\Delta\vartheta_{hydr}$
- die auf dem eigenständigen oder in ein Netzwerk integrierten Betrieb der Raumautomation des Systems verursachte Temperaturschwankung (K); $\Delta\vartheta_{roomaut}$ “⁶²

In der älteren DIN 18599-5 2011 ist der Aufschlag für die Übergabeverluste von nachfolgenden Faktoren abhängig:

- „Faktor für Intermittierenden Betrieb: f_{int}
- Faktor für Strahlungseinfluss: $f_{radiant}$
- Faktor Hydraulischer Abgleich: f_{hydr}
- der Teilnutzungsgrad für vertikales Lufttemperaturprofil: η_L
- der Teilnutzungsgrad für Raumtemperaturregelung: η_C
- der Teilnutzungsgrad für spezifische Verluste der Außenbauteile: η_B “⁶³

Als „Nutzwärmebedarf“ wurde der gemessene Wert über die MP 1 - 4 aus Raum T3 (IR-Decke) verwendet, da sich nach den Simulationsergebnissen aus Tabelle 30 und Tabelle 31 auf S. 126 die IR-Heizung in Südräumen annähernd wie ein ideales Heizelement verhält und damit den Nutzwärmebedarf widerspiegelt. Es zeichnen sich mehrere Parallelen zwischen den Messungen, Simulationen und den Berechnungen nach DIN 18599-5 ab.

62 [DIN 18599-5, 2016, S. 43-44]

63 [DIN 18599-5, 2011, S. 39-40]

Die Differenz zwischen der Ausgangsvariante „FBH Laborraum Ehoch4“ und der Variante „IR ohne Verluste“ beträgt 16 %. Dies entspricht der durchschnittlichen Abweichung im Wärmeverbrauch aus den Messergebnissen in den Messphasen 1 - 4, HP 2018/19 (s. auch Abb. 95 auf S. 124). Bei dem Wert für die Ausgangsvariante nach DIN 18599 handelt es sich um einen Mittelwert über Räume sämtlicher Orientierungen. Der Wert aus den Messergebnissen repräsentiert die Abweichung eines Südraums. Daher ist die Annahme zulässig, die Übergabeverluste in Variante „IR ohne Verluste“ auf null zu reduzieren und die daraus resultierenden Werte mit den Werten der Variante „FBH Laborraum Ehoch4“ ins Verhältnis zu setzen.

Betrachtet man die anderen Varianten „FBH Laborraum verbessert“ und „IR- nach DIN 18599-2016“ erkennt man, wie auch in der DIN 18599 die Einflussfaktoren Fußbodendämmung und Orientierung der Räume die Übergabeverluste beeinflussen. Bei der Fußbodenheizung führt eine bessere Dämmung des Fußbodens zu geringeren Wärmeverlusten an externe Zonen und damit zu geringeren Übergabeverlusten. Die Infrarotheizung profitiert hingegen auf der Nordseite weniger von ihrer schnellen Regelbarkeit bei externem Wärmeeintrag und damit der Nutzung der solaren Wärmegewinne, was die Differenzen in den Übergabeverlusten im Vergleich zur Fußbodenheizung verringert.

Übergabeverluste nach DIN 18599-5 2016

		FBH Laborraum Ehoch4	FBH Laborraum verbessert	E-Heizung nach 18599-16	E-Heizung ohne Verluste
Nutzwärmebedarf	Q _{h,b}	1659 kWh	1659 kWh	1659 kWh	1659 kWh
durch alle Verluste verursachte Temperaturschwankungen	Δθ _{ce}	2,85	1,6	0,7	0,0
Bilanz-Innentemperatur für den Heizwärmebedarf	θ _{i,h}	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C
Mittlere Außentemperatur im Bilanzzeitraum	θ _e	5 °C	5 °C	5 °C	5 °C
<hr/>					
Nutzwärmebedarf		1659 kWh	1659 kWh	1659 kWh	1659 kWh
Übergabeverluste		315 kWh	177 kWh	77 kWh	0 kWh
<hr/>					
Summe		1974 kWh	1836 kWh	1736 kWh	1659 kWh
Differenz zu "FBH Laborraum Ehoch4"		100%	93%	88%	84%
			1836 kWh	1736 kWh	1659 kWh
Differenz zu "FBH Laborraum verbessert"			100%	95%	90%

Tabelle 32 Berechnung der Übergabeverluste nach DIN 18599-5 - 2016

Für die Varianten wurden folgende Werte gesetzt:

- Variante „FBH Laborraum Ehoch4“: Δθ_{ctr} = 1,2; Δθ_{emb} = 1,05; Δθ_{hydr} = 0,6
- Variante „FBH Laborraum verbessert“: Δθ_{ctr} = 1,2; Δθ_{emb} = 0,4; Δθ_{hydr} = 0,0
- Variante „E-Heizung nach 18599-2016“: Δθ = 0,7; Δθ_{hydr} = 0,0
- Variante „E-Heizung ohne Verluste“: Δθ = 0,0; Δθ_{hydr} = 0,0

Vergleicht man nun die Differenzen der beiden Varianten „FBH Laborraum verbessert“ und „IR-nach 18599-2016“ direkt miteinander, entsprechen diese den Werten der Simulationen der besser gedämmten und Nord / Süd ausgerichteten Laborräume.

Da die EnEV bislang zur Bilanzierung noch die alte DIN 18599-5 aus dem Jahr 2011 verwendet und die Berechnungsmethodik sich in der neuen DIN 18566-5 2016 geändert hat, werden die Varianten aus Tabelle 32 auf S. 128 im Folgenden noch einmal nach der alten, aber für die EnEV-Berechnung aktuell gültigen DIN 18599-5 aus dem Jahr 2011 berechnet.

Es zeigt sich, dass die DIN 18599 von 2011 trotz älterer Berechnungsmethodik zu annähernd den gleichen Ergebnissen kommt. Die Elektrodirektheizungsvariante mit Übergabeverlusten wird jedoch nach der neuen DIN etwas besser bewertet.

Übergabeverluste nach DIN 18599-5 2011

		FBH Laborraum Ehoch4	FBH Laborraum verbessert	E-Heizung nach 18599-11	E-Heizung ohne Verluste
Nutzwärmebedarf	Q _{h,b}	1659 kWh	1659 kWh	1659 kWh	1659 kWh
Faktor für Intermittierenden Betrieb	f _{int}	1	1	1	1
Faktor für Strahlungseinfluss	f _{Radiant}	1	1	1	1
Faktor Hydraulischer Abgleich	f _{hydr}	1,06	1	1	1
Gesamt Nutzungsgrad für die Wärmeübergabe an den Raum	η _{h,ce}	0,85	0,90	0,940	1
<hr/>					
Nutzwärmebedarf		1659 kWh	1659 kWh	1659 kWh	1659 kWh
Übergabeverluste		407 kWh	182 kWh	106 kWh	0 kWh
<hr/>					
Summe		2066 kWh	1841 kWh	1765 kWh	1659,00
Differenz zu "FBH Laborraum Ehoch4"		100%	93%	89%	83%
			1841 kWh	1765 kWh	1659 kWh
Differenz zu "FBH Laborraum verbessert"			100%	96%	90%

Tabelle 33 Berechnung der Übergabeverluste nach DIN 18599-5 - 2011

Für die Varianten wurden folgende Werte gesetzt:

- Variante „FBH Laborraum Ehoch4“: $\eta_C = 0,93$; $\eta_B = 0,94$; $f_{hydr} = 1,06$
- Variante „FBH Laborraum verbessert“: $\eta_C = 0,93$; $\eta_B = 0,96$; $f_{hydr} = 1,00$
- Variante „E-Heizung nach 18599“: $\eta_{h,ce} = 0,94$
- Variante „E-Heizung ohne Verluste“: $\eta_{h,ce} = 1,00$

Die DIN 18599-5 kennt bislang weder in der Fassung von 2011 noch in der von 2016 Infrarotheizungen. Es ist jedoch möglich, die Übergabeverluste der Elektrodirektheizung nach DIN 18599 mit den nachfolgenden Einstellungen auf das Niveau einer IR-Heizung zu reduzieren:

- „Wärme-Erzeugungseinheit“ und „Heizkreis“ müssen in der beheizten Zone liegen.
- Es muss ein „elektrisches Heizsystem für Raumheizung“ ausgewählt werden.
- Die Erzeugung der Heizungswärme muss durch eine „elektrische Direktheizung erfolgen“.
- In den Einstellungen des Heizkreises muss für den hydraulischen Abgleich die Option 3/ mit maximal 8 Heizkörpern/Heizflächen pro Volumenstromregler / Differenzdruckregler gewählt werden.
- Für die Übergabe an der Raum muss unter der Rubrik Typ und Regelung die Option „Direktheizung, PID-Regler mit Optimierung“ und unter der Rubrik Position die Option „Außenwand“ gewählt werden.
- Die Option „Intermittierender Betrieb“ bringt eine weitere Verbesserung der Effizienz der Elektroheizung gegenüber der Fußbodenheizung, da hier der Effizienzgewinn für die Elektroheizung nach DIN-18599 höher bewertet wird als für die Fußbodenheizung.

4.4.4 Berechnungen der Laborräume nach DIN 18599

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Messungen, Simulationen und Untersuchungen der DIN 18599 wurden für die Laborräume EnEV-Berechnungen (BKI-Energieplaner Software) als Nichtwohngebäude ohne Trinkwarmwasser durchgeführt. Es wurde eine Variante Luft-WP mit FBH und eine Variante Elektrodirektheizung / IR-Heizung, jeweils im Bestandszustand und in einer verbesserten Variante (bessere Dämmung / optimierte Technik), erstellt. Tabelle 34 auf S. 131 zeigt die Ergebnisse der Berechnung im Gebäudebestand. Hier wurden folgende Einstellungen vorgenommen:

- Als Grundfläche wurden dabei 137 m² (Laborraum und Auslastungsraum Wärmepumpe) angenommen.
- Die Bauteilaufbauten entsprechen den Bestandsaufbauten ($Ht' = 0,57$).
- Die Fußbodenheizung wurde schlecht gedämmt, ein hydraulischer Abgleich wurde nicht durchgeführt.
- Als Regler wird ein Zweipunkt / P-Regler für die FBH verwendet.
- Für die IR-Heizung werden die in Kapitel 5.3 genannten Einstellungen verwendet.

Die EnEV-Berechnungen ergeben, dass die Abweichungen beim Wärme- und Stromverbrauch in etwa ähnlich groß sind wie in den gemessenen Zeiträumen MP 1 - 4, Heizperiode 2018/2019. Tabelle 35 auf S. 131 zeigt die Ergebnisse der EnEV-Berechnung in einer Variante mit verbesserter Dämmung und optimierter Technik. Hier wurden folgende Einstellungen vorgenommen:

- Als Grundfläche wurden 137 m² (Laborraum und Auslastungsraum Wärmepumpe) angenommen.
- Die Bauteilaufbauten sind nun besser gedämmt ($Ht' = 0,25$).
- Die Fußbodenheizung wurde sehr gut gedämmt, ein hydraulischer Abgleich wurde durchgeführt.
- Heizung und Pumpen laufen im intermittierenden Betrieb.
- Als Regler wird ein Zweipunkt / P-Regler für die FBH verwendet.
- Für die IR-Heizung werden die in Kapitel 5.3 genannten Einstellungen verwendet und es wurde zusätzlich ein intermittierender Betrieb eingestellt.

Berechnungen BKI Energieplaner 18, Nichtwohngebäude nach DIN 18599 2011	Variante	
	Luft-WP + FBH	Variante IR-Heizung
Nutzenergieabgabe	18743 kWh	19013 kWh
Jährlicher Übergabeverlust	4601 kWh	1214 kWh
Jährliche Leitungs- und Speicherverluste	381 kWh	0 kWh
Erzeugernutzwärme Heizung	23725 kWh	20227 kWh
Differenz Erzeugernutzwärme		-17%
Endenergie Heizen	6314 kWh	20227 kWh
Hilfsenergie Heizen	689 kWh	
Summe Endenergie Heizen	7003 kWh	20227 kWh
Differenz Endenergie		289%
JAZ Level 1	3,8	1,0
JAZ Level 3	3,4	1,0

Tabelle 34 Ergebnisse der EnEV-Berechnung der Laborräume in Ehoch4, Gebäudebestand

Berechnungen BKI Energieplaner 18, Nichtwohngebäude nach DIN 18599 2011	Variante	
	Luft-WP + FBH	Variante IR-Heizung
Nutzenergieabgabe	11663 kWh	11881 kWh
Jährlicher Übergabeverlust	1024 kWh	379 kWh
Jährliche Leitungs- und Speicherverluste	314 kWh	0 kWh
Erzeugernutzwärme Heizung	13001 kWh	12260 kWh
Differenz Erzeugernutzwärme		-6%
Endenergie Heizen	3429 kWh	12260 kWh
Hilfsenergie Heizen	505 kWh	
Summe Endenergie Heizen	3934 kWh	12260 kWh
Differenz Endenergie		312%
JAZ Level 1	3,8	1,0
JAZ Level 3	3,3	1,0

Tabelle 35 Ergebnisse der EnEV-Berechnung der Laborräume in Ehoch4, verbesserte Dämmung / optimierte Technik

Die Variante der EnEV-Berechnung mit verbesserter Dämmung und optimierter Technik ergibt, dass das Verhältnis im Erzeugernutzwärmebedarf der beiden Heizungsvarianten dem entspricht, was auch schon die Simulationen der verbesserten Laborräume ergeben haben. Die Differenz im Stromverbrauch wird, wie erwartet, durch die optimierte Technik bei der Wärmepumpe und der nun besser gedämmten Fußbodenheizung größer.

4.4.5 Mögliche Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen

Mit der Frage nach den Übergabeverlusten ist auch verknüpft, welche Einsparungen sich im Energiebedarf durch die optimal an das Nutzerverhalten anpassbare Regelung erzielen lassen.

In den Laborräumen wurden dazu zunächst die Aufheizzeiten der verschiedenen Heizungen untersucht. Im Vergleich zu einer im Heizestrich verbauten Fußbodenheizung haben Infrarotheizsysteme eine sehr geringe Masse und können ohne Verzögerung die maximale installierte Heizleistung abrufen und für unbestimmte Zeit halten und schnell reduzieren. Dies ermöglicht einer IR-Heizung vergleichsweise sehr schnelle Reaktionszeiten auf Wärmebedarfsanforderungen sowie auf interne und solare Wärmegevinne.

Abb. 100 bis Abb. 102 auf S. 133 zeigen den Verlauf der Luft- und Globetemperaturen während einer Aufheizphase von circa 16 °C auf 20 °C Globetemperatur. Zusätzlich ist der Verlauf der Heizleistung angegeben. Die Unterschiede in der Aufheizdauer der Räume sind deutlich sichtbar. Während die beiden elektrischen Systeme bereits nach etwa 1,5 Stunden (IR-Heizung) und 2,5 Stunden (E-FBH Heizung) die Solltemperatur von 20 °C erreichen, braucht die Fußbodenheizung länger als 24 Stunden.

Die längere Aufheizdauer der E-FBH gegenüber der IR-Heizung resultiert primär aus den größeren Transmissionswärmeverlusten über den Fußboden bei der E-FBH. Somit kann nur ein Teil der zugeführten Heizleistung tatsächlich zur Beheizung des Raumes genutzt werden. Bei der wassergeführten Fußbodenheizung kommt die Masse des Estrichs hinzu, die zuerst erwärmt werden muss. Die Wärmepumpe richtet ihre Leistung und damit die Vorlauftemperatur an der eingestell-

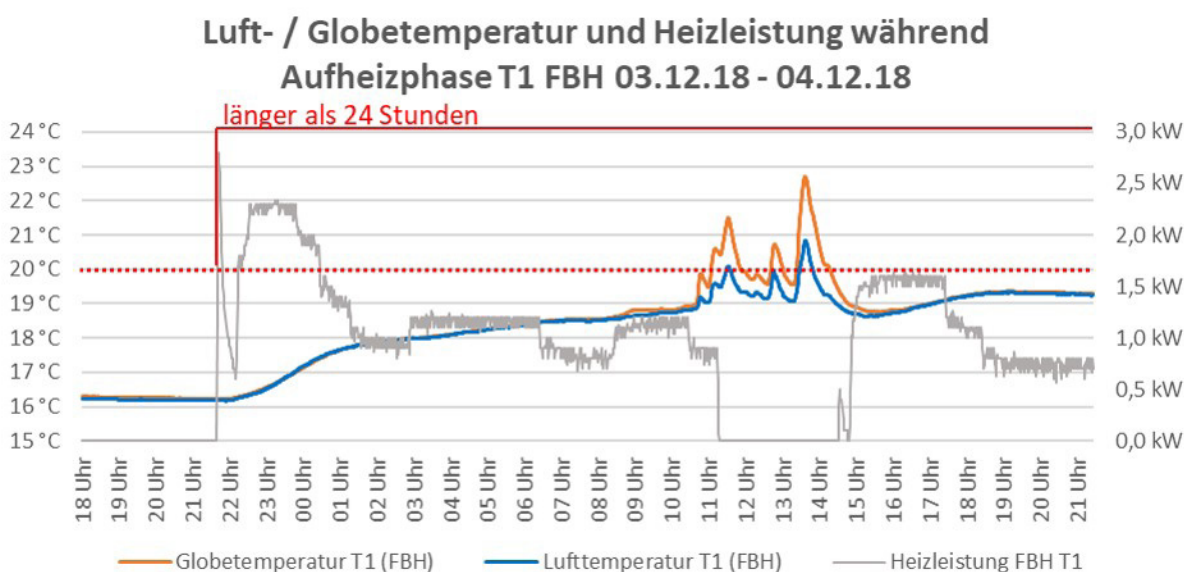


Abb. 100 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T1 (WP/FBH) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.2018

ten Heizkurve aus. In der Heizkurve ist wiederum hinterlegt, bei welcher Außentemperatur welche Vorlauftemperatur erzeugt wird. Dies ist sinnvoll, da die Effizienz der Wärmepumpe besser wird, je geringer der Unterschied zwischen Wärmequelle und Wärmeabgabetemperatur ist. Es führt aber dazu, dass bei moderaten Außentemperaturen nicht die volle Leistung abgerufen wird und dies zu einer längeren Aufheizdauer im intermittierenden Betrieb führt.

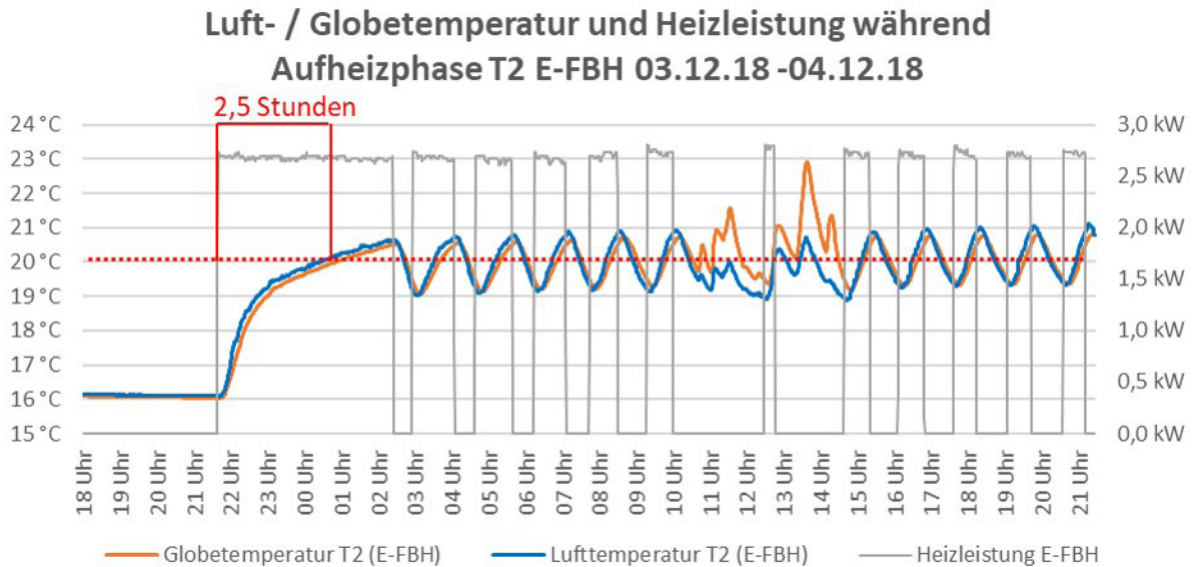


Abb. 101 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T2 (E-FBH) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.2018

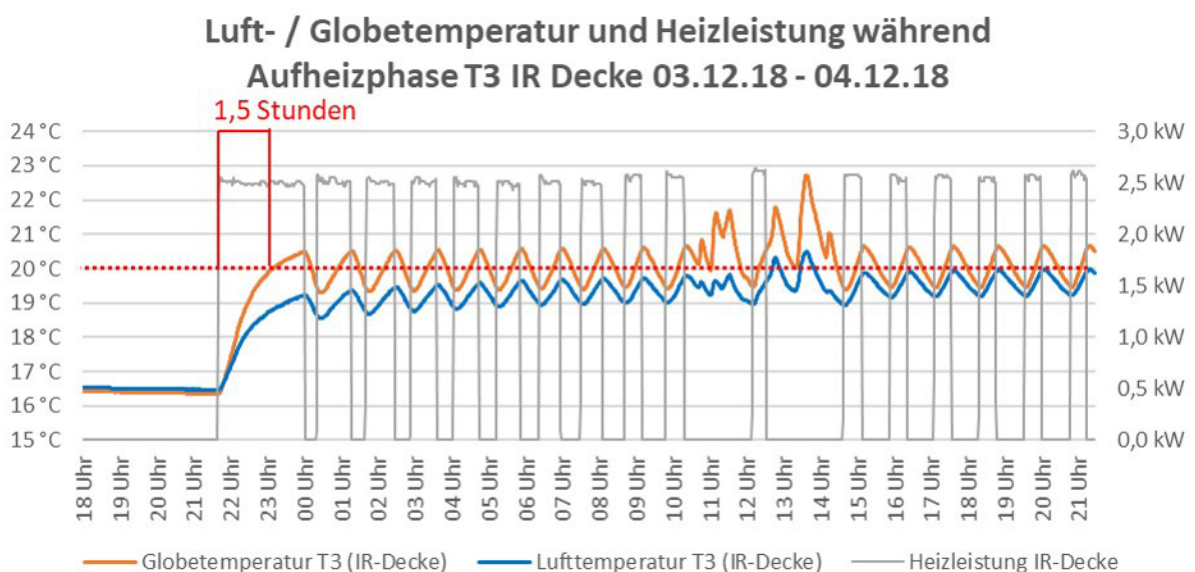


Abb. 102 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T3 (IR-Decke) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.18

Um zu überprüfen, wie sich ein intermittierender Betrieb in gut gedämmten, nach nord- und südorientierten Räumen auf die Verbräuche auswirkt, wurde die Betriebsweise im Simulationsmodell untersucht. Als Nutzungsprofil wurden folgende Annahmen getroffen:

- Am Wochenende, während Ferien, Feiertagen, unter der Woche zwischen 6 und 8 Uhr und von 18 bis 24 Uhr beträgt die Solltemperatur 20 °C.
- In den übrigen Zeiten 17 °C.

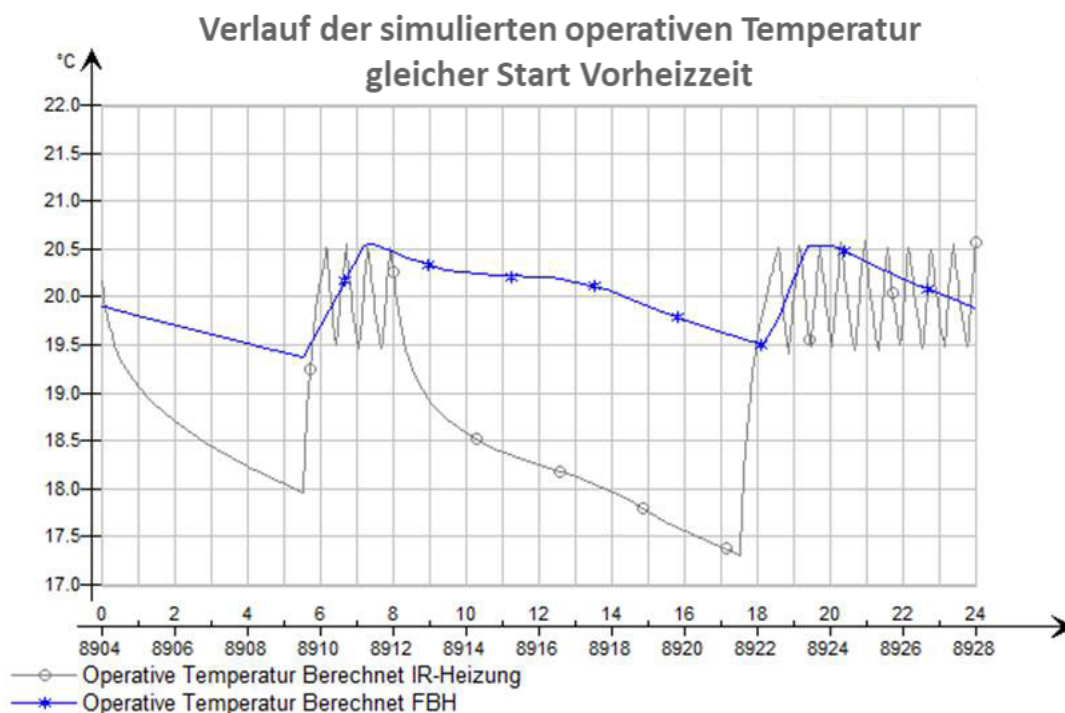


Abb. 103 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen während intermittierendem Betrieb bei gleichem Start der Vorheizzeit

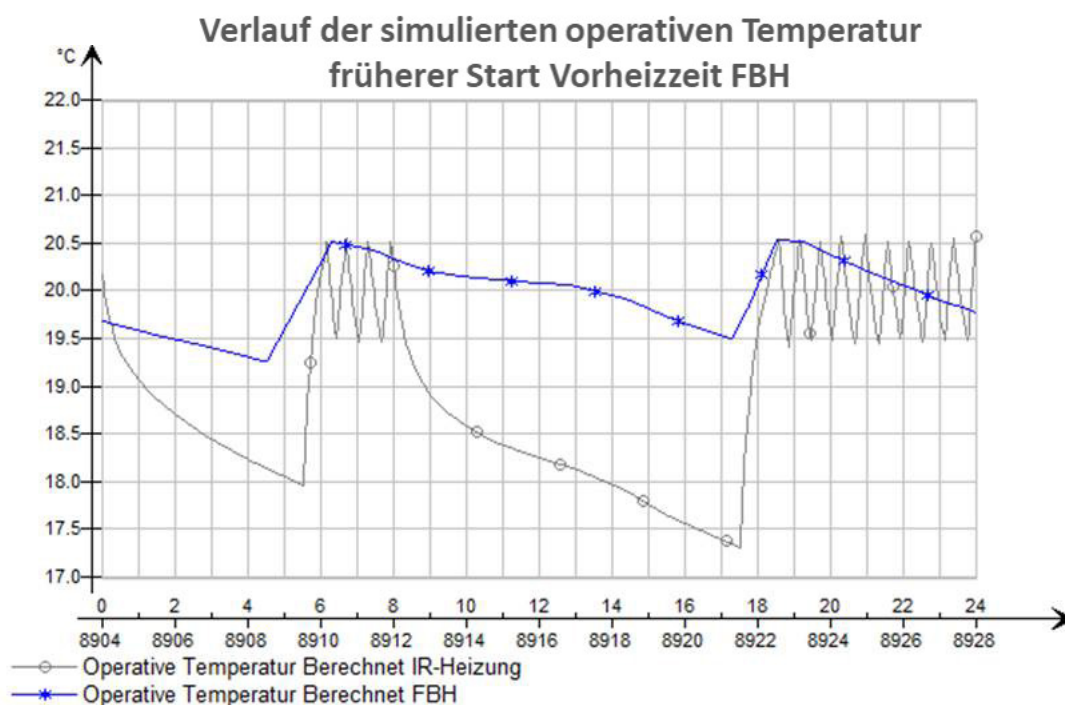


Abb. 104 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen während intermittierendem Betrieb bei früherem Start der Vorheizzeit für die Fußbodenheizung

Durch die unterschiedlich schnellen Aufheizgeschwindigkeiten von IR-Heizung und Fußbodenheizung ergibt sich das Problem der unterschiedlichen Vorheizzeiten. Setzt man die Vorheizzeiten bei IR-Heizung und Fußbodenheizung gleich, erreicht die Fußbodenheizung erst deutlich später die geforderte Solltemperatur (s. Abb. 103 auf S. 134). Ein Vergleich der Energieverbräuche wäre so nicht sinnvoll.

Verschiebt man den Beginn der Aufheizzeit der Fußbodenheizung um eine Stunde nach vorne, erreichen beide Heizsysteme in der Simulation die Solltemperatur zur annähernd selben Zeit (s. Abb. 104 auf S. 134).

Ein Vergleich der Energieverbräuche bei nun gleichen raumklimatischen Bedingungen im bereits verwendeten Simulationsmodell stellt dar, dass sich der Verbrauchsunterschied zwischen Fußbodenheizung und IR-Heizung um 2 % gegenüber der Variante ohne intermittierenden Betrieb vergrößert hat (vgl. Tabelle 30 auf S. 126 und Tabelle 36).

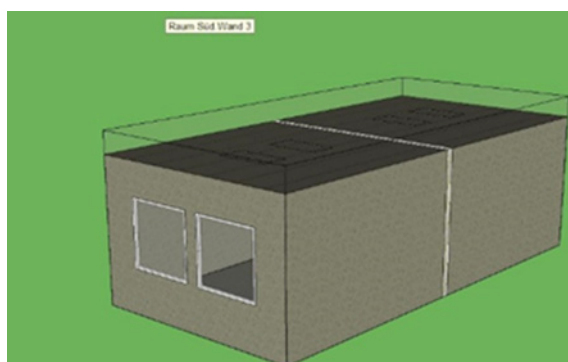


Abb. 105 3D Darstellung der simulierten Laborräume aus IDA ICE

	FBH	IR-Heizung	Ideales Heizelement
Südraum	396 kWh 100%	355 kWh 90%	355 kWh 89%
Nordraum	672 kWh 100%	628 kWh 93%	615 kWh 92%
Gesamt	1068 kWh 100%	983 kWh 92%	970 kWh 91%

Tabelle 36 Simulierte Verbrauchsunterschiede bei intermittierendem Betrieb

4.4.6 Fazit Untersuchung der Übergabeverluste

Die Laborraummessungen in Verbindung mit den Simulationsmodellen haben ergeben, dass Infrarotheizungssysteme gegenüber wassergeführten, im Heizestrich verlegten Fußbodenheizungen geringere Übergabeverluste haben (s. Tabelle 35 auf S. 131). Die Gründe dafür liegen hauptsächlich in den geringeren Wärmeverlusten an die Baukonstruktion und der geringeren thermischen Trägheit und damit besseren Regelbarkeit der Infrarotheizung. Diese geringeren Verluste lassen sich bereits durch die DIN 18599 abbilden und bei einer EnEV-Berechnung ansetzen.

Wird die operative Raumtemperatur mit reaktionsschnellen Infrarotthermometern - anstelle von Globesonden - gemessen und diese als Regelgröße eingesetzt, zeigt sich eine weitere Reduzierung der Übergabeverluste im Vergleich zum Luft-WP mit Fußbodenheizungssystem. Diese Art der Regelung konnte jedoch noch nicht vollständig im Simulationsmodell abgebildet werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Simulationen und Berechnungen auf Grundlage der Laborraummessungen ergeben einen Stromverbrauchsunterschied von etwa 3,1 bis 3,3 zwischen Wärmepumpen- und Infrarotheizungssystem in gut isolierten Gebäuden. Generell ist es jedoch nicht möglich, ein genaues Verhältnis festzulegen, da die Unterschiede im Stromverbrauch zwischen den Systemen immer auch von der Güte der jeweils installierten Systeme abhängen. Hier kann es gerade bei Wärmepumpensystemen große Unterschiede geben.

Eine Simulation des intermittierenden Betriebs bei beiden Heizungssystemen mit einer Wärmepumpe ohne modulierende Betriebsweise und in gut gedämmten Süd- und Nordräumen ergab einen um circa 2 % geringeren Wärmeverbrauch für die Infrarotheizung.

Bei Nichtwohngebäuden mit reduziertem Wärmebedarfsprofil können unter Umständen die Effizienzvorteile größer ausfallen. Hier kann eventuell auch eine lokale Beheizung von Arbeitsplätzen sinnvoll sein. So kann am Arbeitsplatz durch die sehr lokale Wärmeabgabe der IR-Heizung eine behagliche Temperatur erreicht werden, während der Rest des Raumes geringer temperiert sein kann.

4.5 Strahlungswirkungsgrad, Aufheizzeit und Abstrahlwinkel von IR-Heizungen

Es gibt am Markt eine Vielzahl unterschiedlicher Hersteller von IR-Heizungen mit jeweils eigenen Konstruktionsarten. Je nach Konstruktion können sich dabei der Strahlungswirkungsgrad und die Aufheizzeit der IR-Heizungen deutlich unterscheiden. Im Folgenden soll untersucht werden, wie groß die Unterschiede zwischen einigen am Markt verfügbaren IR-Heizungen sind und wie sich diese auf die Effizienz auswirken.

4.5.1 Strahlungswirkungsgrade verschiedener IR-Heizungen

Um zu untersuchen, wie sich am Markt erhältliche Infrarotheizungen hinsichtlich ihres Strahlungswirkungsgrades verhalten, wurden verschiedene Module unter identischen Testbedingungen untersucht. Alle Messungen wurden im gleichen Laborraum durchgeführt. Der Raum hat eine Fläche von circa 25 m² und eine Raumhöhe von 3 Metern. Das vorhandene, nordorientierte Fenster wurde von außen mit einer IR-reflektierenden Folie und von innen mit einem schweren, lichtundurchlässigen Stoff abgehängt, um die Messungen vor eventuell störenden Einflüssen durch Wärmestrahlung von außen zu schützen. Die Module wurden nacheinander zuerst vertikal an der Wand hängend, dann nach einer Abkühlphase von circa 90 Minuten, horizontal an der Decke hängend vermessen. Die Aufheizphase der Module betrug einheitlich 60 Minuten. Nach dieser Zeit hatten alle im Test vermessenen Module ein stationäres Temperaturniveau erreicht. Der Stromverbrauch und die aufgenommene elektrische Leistung wurden einheitlich mit einem MID geeichten Wechselstromzähler gemessen und minütlich aufgezeichnet.



Abb. 106 Vertikale Aufhängung

Die Temperaturen der Vorderseite der IR-Heizungen wurden mit zwei kalibrierten Pt-100 Sensoren gemessen (s. Abb. 108 auf S. 139). Die Sensoren wurden, um den thermischen Kontakt zur IR-Heizungsoberfläche zu verbessern, auf 100 mm x 100 mm große Kupferplatten aufgebracht. Es wurde immer ein Sensor in der Mitte der IR-Heizungsvorderseite sowie ein zweiter in der oberen rechten Ecke am Plattenrand mithilfe von Kupferklebefolie befestigt. Nach Anbringung wurden die Sensoren mit einem speziellen Kreidespray für Thermographiezwecke deckend übersprüht. Das Kreidespray hat einen Emissionsgrad von 0,95.

Die Temperatursensoren zur Messung der Rückseitentemperatur haben den gleichen konstruktiven Aufbau wie die bereits beschriebenen Sensoren auf der Vorderseite. Da auf der Rückseite jedoch keine Messung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur mittels IR-Kamera möglich war, wurde hier die Anzahl der Sensoren auf vier erhöht und diagonal im gleichen Abstand über die Rückseite verteilt angebracht (s. Abb. 109 auf S. 139).

Um die durchschnittliche Oberflächentemperatur der gesamten Vorderseite zu ermitteln, wurden parallel zu den Kontaktmessungen, Serienbildaufnahmen mit einer Infrarotkamera (Testo 885-2) erstellt. Dank des bekannten Emissionsgrades des Kreidesprays ist es möglich, die mit der IR-Kamera gemessenen Temperaturen im Bereich der Oberflächentemperatursensoren mit den Werten aus der direkten Oberflächentemperaturmessung abzugleichen und die IR-Kamera-Messungen damit zu kalibrieren.

Alle Raumboberflächentemperaturen des Laborraums wurden mithilfe eines Systems aus 16 Infrarotsensoren fortlaufend gemessen und aufgezeichnet. Nach einer Aufheizzeit von 60 Minuten konnte - anhand der gemessenen durchschnittlichen Oberflächentemperatur der IR-Heizungsvorderseite, der Fläche der Vorderseite, dem Emissionsgrad der Vorderseite und der Temperatur und dem Emissionsgrad der der Heizfläche gegenüberliegenden Raumboberfläche - mit



Abb. 107 Horizontale Aufhängung an der Decke

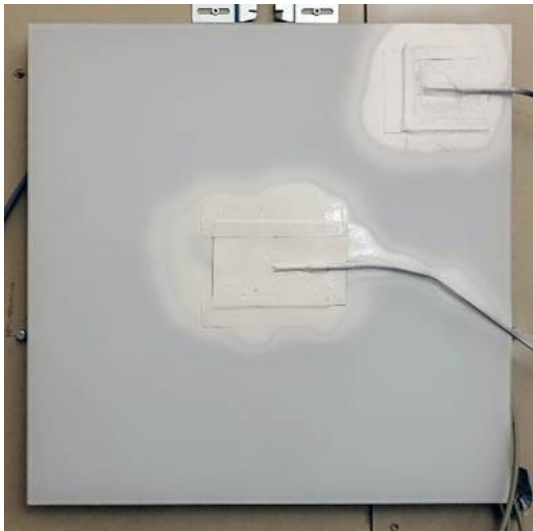


Abb. 108 Temperatursensoren Vorderseite

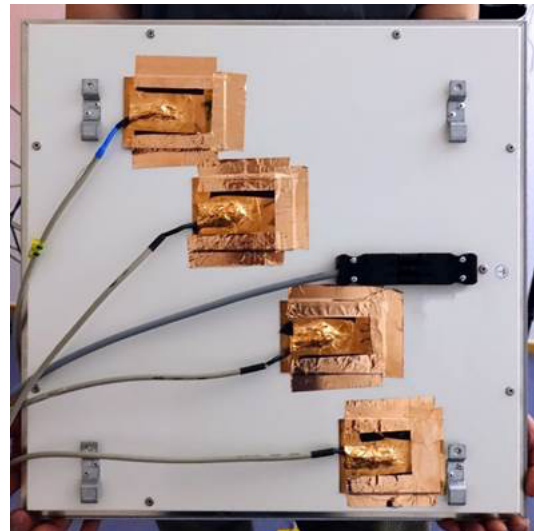


Abb. 109 Temperatursensoren Rückseite

der Formel zum Strahlungsaustausch (s. Kapitel 3.1) die Strahlungsleistung berechnet werden. Diese wurde ins Verhältnis zur gemessenen elektrischen Leistung gesetzt, um den Strahlungswirkungsgrad zu ermitteln.

Messungen an sieben IR-Heizungen verschiedener Anbieter offenbaren, dass es je nach Anbieter und Modell deutliche Unterschiede im Strahlungswirkungsgrad der IR-Heizungen gibt (s. Abb. 110). Drei der getesteten IR-Heizungen liegen bei Wandmontage deutlich unter einem Strahlungsanteil von 50 % bei der Wärmeabgabe und sind somit mehr Konvektions- als Strahlungsheizung. Bei deckenmontierten IR-Heizungen ist der Strahlungswirkungsgrad grundsätzlich höher als bei wandmontierten IR-Heizungen. Bei Wandmontage erwärmt sich die Luft an den Oberflächen der Vorder- und Rückseite der IR-Heizung und der der Rückseite gegenüberliegenden Wandfläche. Die warme Luft steigt auf, die nachströmende kalte Luft kühlt die Oberflächen der IR-Heizung

Strahlungswirkungsgrade verschiedener IR-Heizungen

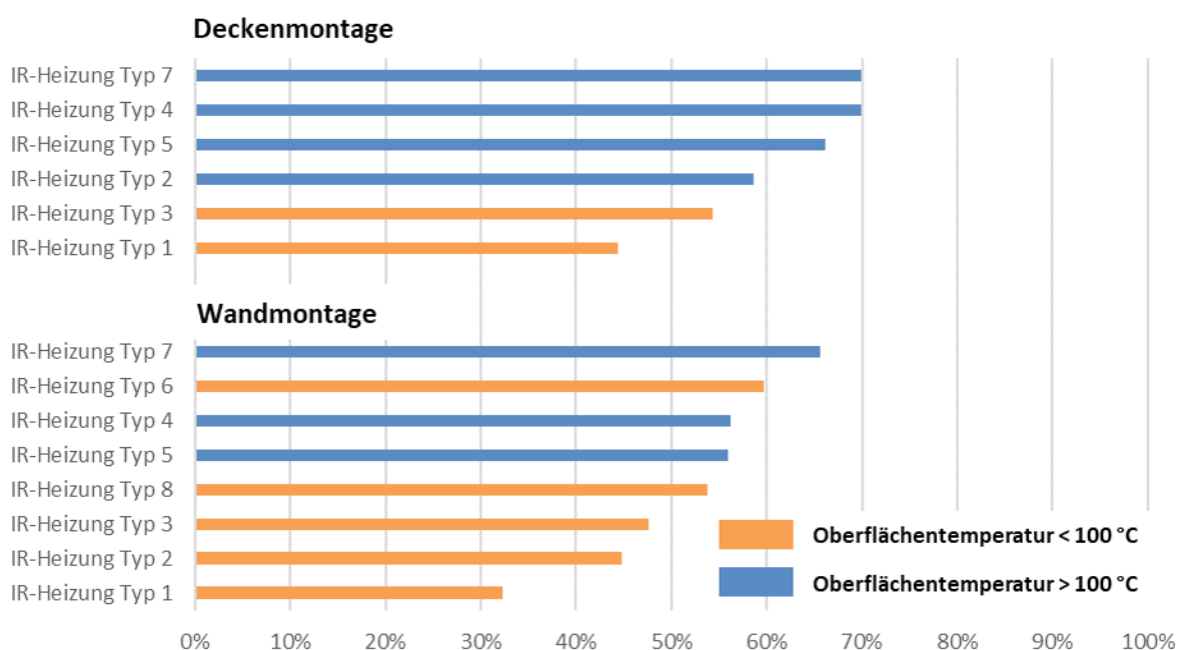


Abb. 110 Strahlungswirkungsgrade untersuchter IR-Heizungen

ab. Die IR-Heizung erreicht dadurch geringere Temperaturen an ihren Oberflächen, damit bei gleichem elektrischen Energieeinsatz eine geringere Strahlungsleistung und somit einen geringeren Strahlungswirkungsgrad als bei Deckenmontage. Gleichzeitig nimmt die Wärmeabgabe über Konvektion zu.

Bei Deckenmontage findet ebenso Konvektion statt. Da hier aber die warme Luft nicht weiter als bis zur Deckenunterseite aufsteigen kann, findet Konvektion hier nur sehr eingeschränkt statt. Ebenso ist in Abb. 110 auf S. 139 zu sehen, dass ein hoher Strahlungswirkungsgrad nicht von der Oberflächentemperatur der wärmeabgebenden Vorderseite abhängig ist. Es ist also auch möglich, eine IR-Heizung mit niedriger Oberflächentemperatur, z.B. mit 60 °C und entsprechend größerer Fläche, zu betreiben und trotzdem einen hohen Strahlungswirkungsgrad und die gleiche Energieabgabe in den Raum zu erreichen. Für die Behaglichkeit wäre eine solche Lösung eventuell von Vorteil, da eine geringere Strahlungsasymmetrie zwischen Decke und Boden zu erwarten ist. Die Leistungsdichte pro m² würde abnehmen, durch die größere Fläche aber in Summe die gleiche bleiben. Gegenstände, Personen oder Sensoren im Raum würden gleichmäßiger und unabhängiger von ihrer Position zur Strahlungsquelle erwärmt.

Wichtig für einen hohen Strahlungswirkungsgrad ist die rückseitige Dämmung innerhalb des IR-Heizungsmoduls. Abb. 111 zeigt das Verhältnis von gemessener Vorder- zu Rückseitentemperatur der untersuchten IR-Heizungen.

- Die Rückseitentemperatur des ungedämmten IR-Moduls Typ 1 liegt sowohl bei Wand- als auch Deckenmontage bei über 100 % der Vorderseitentemperatur. Entsprechend liegt der Strahlungswirkungsgrad nur zwischen etwa 33 % und 44%.
- Bei dem gedämmten IR-Modul Typ 7 liegt die Rückseitentemperatur sowohl bei Wand- als auch Deckenmontage bei nur 42 % der Vorderseitentemperatur. Entsprechend ist der Strahlungswirkungsgrad hier mit annähernd 70 % deutlich höher.

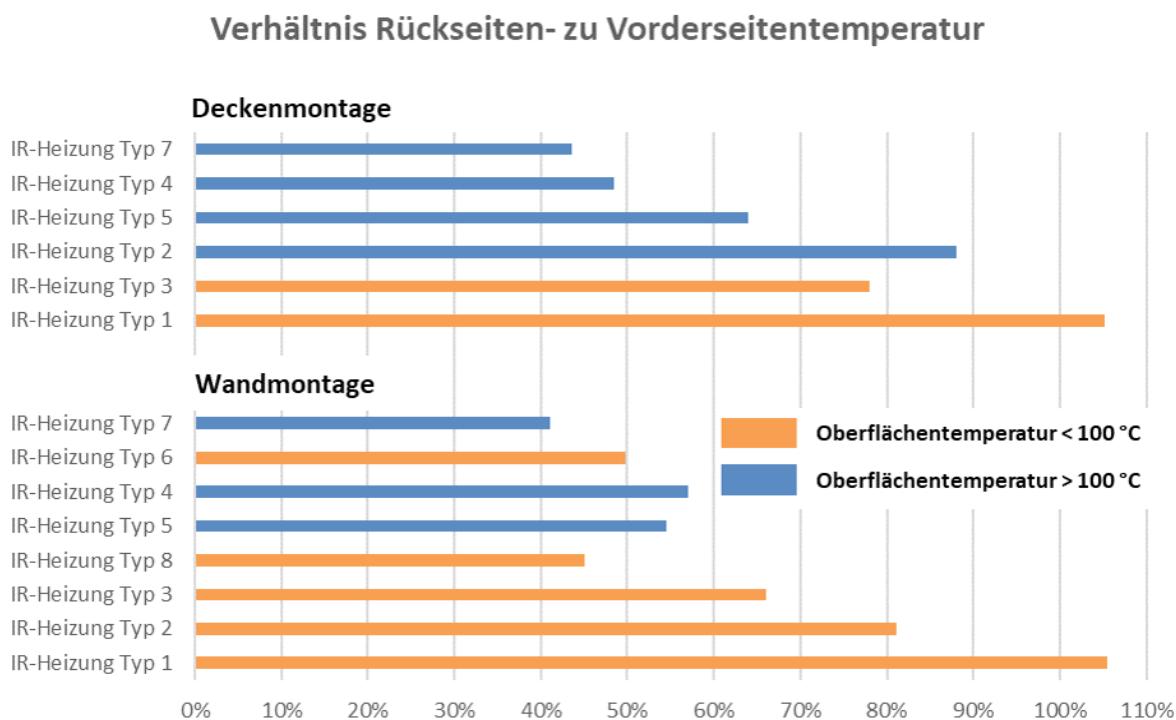


Abb. 111 Verhältnisse von Vorder- zu Rückseitentemperatur bei untersuchten IR-Heizungen

4.5.2 Aufheizzeiten verschiedener IR-Heizungen

Unabhängig von Strahlungsleistung oder Strahlungswirkungsgrad ist eine hohe Leistungsdichte und eine geringe Speichermasse bei IR-Heizungen von Vorteil. Dies erlaubt eine schnelle Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit und damit eine schnelle Reaktion auf die thermischen Anforderungen im Gebäude. Abb. 112 zeigt die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten der untersuchten IR-Heizungen.

Ohne separate Regelung bestimmt die spezifische, in der IR-Heizung installierte Leistungsdichte pro m^2 die maximal erreichbare Betriebstemperatur. Messungen an den im Projekt untersuchten IR-Heizungen zeigen auf, dass bei einer Leistungsdichte von circa 1.000 W/m^2 maximale Betriebstemperaturen von ungefähr $100 - 120 \text{ °C}$ erreicht werden (s. Abb. 112, z.B. Typ 5). Bei einer Leistungsdichte von circa 2.400 W/m^2 erhöht sich die maximale Betriebstemperatur auf etwa $180 - 190 \text{ °C}$ (s. Abb. 112, Typ 4 und Typ 7). Bei einer Dichte von circa 400 W/m^2 wird eine maximale Oberflächentemperatur von annähernd 60 °C erreicht (s. Abb. 112, Typ 6).

Um eine schnelle Aufheizzeit zu erreichen, ist eine hohe Leistungsdichte hilfreich, jedoch nicht alleine ausschlaggebend, wie bei Heizungstyp 6 erkennbar. Obwohl die Leistungsdichte gering ist, ist die Aufheizzeit hier ähnlich schnell wie bei den Typen 4 und 7 mit hoher Leistungsdichte. Dies liegt bei Typ 6 an der sehr geringen Speichermasse und der sehr guten rückseitigen Dämmung.

Eine IR-Heizung mit hoher Leistungsdichte und geringer Masse könnte eine sehr schnelle Aufheizzeit erreichen. Wenn mithilfe einer integrierten Temperaturmessung die Leistungszufuhr ab einer bestimmten Grenztemperatur gedrosselt würde, könnte so trotzdem eine für die Behaglichkeit im Raum zu hohe Temperatur der IR-Heizungsoberfläche verhindert werden.

Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit von IR-Heizungen

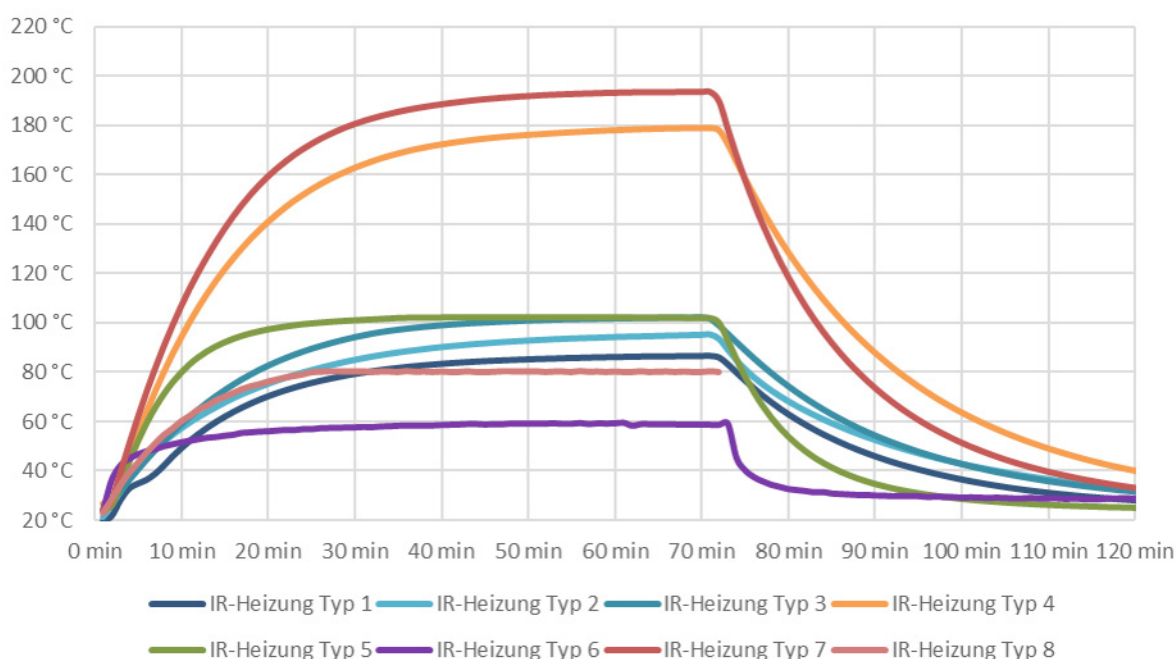


Abb. 112 Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit verschiedener IR-Heizungen bei Deckenaufhängung

4.5.3 Einfluss von Strahlungswirkungsgrad und Aufheizzeit auf die Effizienz

Der Strahlungswirkungsgrad sagt aus, wieviel Prozent der gesamt erzeugten Wärme einer IR-Heizung in Form von Wärmestrahlung - auf der dem Raum zugewandten Seite der Heizung - abgegeben wird. Der übrige Teil der Wärme wird in Form von Wärmestrahlung auf den Seiten und der Rückseite, Konvektion und Wärmeleitung an die Umgebung abgegeben.

Für die Behaglichkeit im Raum ist die Wärmeübergabe über die dem Raum zugewandte Seite der IR-Heizung entscheidend. Die über die anderen Wege abgegebene Wärme kann unter Umständen nicht zur Beheizung des Raums genutzt werden:

- Bei Deckenaufhängung führt die Wärmestrahlung der Rückseite bei schlecht gedämmten IR-Heizungen zu einer Erwärmung der Deckenoberflächentemperatur über dem Heizelement. Eine höhere Deckenoberflächentemperatur führt zu größeren Wärmeleitungsverlusten an den angrenzenden Raum (s. Abb. 67 auf S. 104).
- Sobald eine IR-Heizung in Betrieb ist, erwärmen sich die Oberflächen der Heizung und mit ihnen die sie umgebende Luft. Sowohl bei Deckenaufhängung, als auch bei Wandaufhängung führt der einsetzende Konvektionsfluss dazu, dass sich unter der Decke ein Warmluftpuffer bildet. Bei Wandaufhängung ist der Konvektionsfluss durch die vertikale Position der Heizung stärker. Da der Warmluftpuffer an der Decke außerhalb der Reichweite der Raumnutzer ist, kann er nur zum Teil zum Erreichen von thermischer Behaglichkeit im Raum genutzt werden (s. Abb. 42 auf S. 85).
- Erfolgt die Aufhängung einer IR-Heizung mit gut wärmeleitenden Materialien (Stahlelementen), kann ein Teil der Abwärme über die Aufhängung in die Wand oder Decke geleitet werden. Die Wärmeleitung nimmt zu, je schlechter die Heizung auf der raumabgewandten Seite gedämmt ist und je besser die Wärmeleitfähigkeit der Aufhängungselemente ist. Abwärme durch die Aufhängungselemente führt zu einer Erwärmung der Wand oder Decke und damit zu größeren Wärmeleitungsverlusten an den angrenzenden Raum.

Je höher der Strahlungswirkungsgrad, desto geringer sind die hier beschriebenen möglichen negativen Auswirkungen durch ungewollte Wärmeabgabe.

Neben dem Strahlungswirkungsgrad haben auch Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit Einfluss auf die Effizienz eines IR-Heizungssystems. Ein ideales Heizelement könnte einem Raum zu jeder Zeit immer genau die Menge an Energie zuführen, die zur Aufrechterhaltung einer gewünschten Solltemperatur notwendig ist. Ist die Solltemperatur erreicht, aufgrund des Heizens oder aufgrund anderer Wärmeeinträge (Solarstrahlung, interne Wärmegewinne), beendet es ohne Verzögerung die Energiezufuhr in den Raum. Es darf demnach keine Masse und damit keine Aufheizzeit / Abkühlzeit haben. Um also eine IR-Heizung vom Verhalten her einem idealen Heizelement anzugleichen, sollte eine IR-Heizung mit möglichst geringer Masse konstruiert werden.

Für die neue IEC 60675 Norm sollten daher der Strahlungswirkungsgrad und die Aufheizzeit ein elementarer Bestandteil sein, um einheitlich hohe Qualitätsstandards für zukünftig am Markt erhältliche IR-Heizungen zu erreichen.

4.5.4 Kriterien zur Optimierung einer IR-Heizung

Um einen möglichst hohen Strahlungswirkungsgrad zu erreichen, sollte eine IR Heizung folgende Kriterien erfüllen:

1. Die Befestigung des IR-Elements sollte thermisch entkoppelt werden, um eine Wärmeleitung in die Wand oder Decke zu verhindern.
2. Die Oberfläche der Rückseitenabdeckung sollte einen möglichst niedrigen Emissionsgrad aufweisen.
3. Die Rückseitenabdeckung sollte den statischen Anforderungen genügen, aber gleichzeitig eine geringe Wärmeleitung aufweisen.
4. Der rückseitige und seitliche Aufbau des elektrischen Widerstands sollte eine möglichst geringe Wärmeleitung aufweisen. Zu empfehlen ist daher die Einbindung einer Wärmedämmschicht.
5. Der elektrische Widerstand sollte bestmöglich wärmeleitend mit der Wärme abgebenden Vorderseitenabdeckung verbunden sein und er sollte möglichst homogen die gesamte Vorderseitenabdeckung erwärmen.
6. Die Vorderseitenabdeckung sollte möglichst sehr gut wärmeleitend (hoher Lambda- Wert / geringe Materialstärke) sein (evtl. aber nicht stromleitend).
7. Die Oberfläche der Vorderseitenabdeckung muss einen möglichst hohen Emissionsgrad aufweisen.
8. Notwendige Randabdeckungen sollten so gebaut werden, dass die Wärmeleitung von der Vorderseite zur Rückseite minimiert wird.

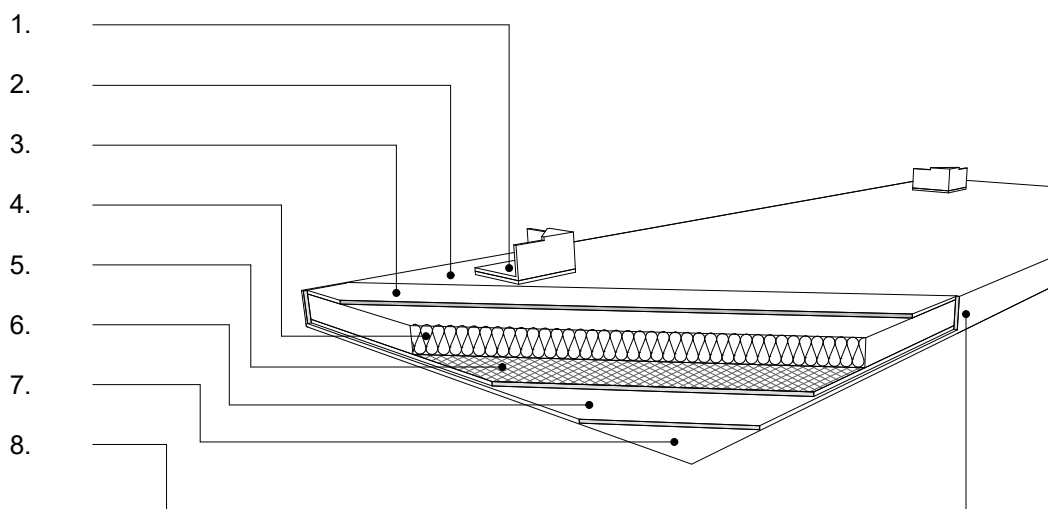


Abb. 113 Optimierter Aufbau einer IR-Heizung

Weitere Empfehlungen:

- Der Gesamtaufbau des IR-Elements sollte eine möglichst niedrige Wärmespeicherkapazität besitzen, um eine möglichst schnelle Aufheizzeit zu ermöglichen.
- Der Gesamtaufbau sollte möglichst leicht sein, um eine einfache Montage zu gewährleisten.
- Im Sinne der Nachhaltigkeit sollte die Heizung einfach demontierbar und sortenrein trennbar sein. Es dürfen keine schädlichen Materialien eingebaut sein.
- Bei Wandaufhängung von IR-Modulen sollte die wärmeabgebende Oberfläche so gestaltet werden, dass Konvektion durch sich an der Platte erwärmende und aufsteigende Luft, reduziert wird.

4.5.5 Abstrahlwinkel einer plattenförmigen Infrarotheizung

Die FH Burgenland hatte den Abstrahlwinkel verschiedener plattenförmiger Infrarotheizungen bislang nur im Simulationsmodell untersucht (s. Abb. 120 auf S. 146). Nachfolgend sollen die Simulationen durch experimentelle Messungen überprüft werden.

Abb. 114 zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung des Abstrahlwinkels als Aufsicht. An die IR-Heizung wurde seitlich ein L-Winkel aus Holz montiert. Der lange Schenkel des Winkels steht dabei um 90° versetzt zur Abstrahlfläche der IR-Heizung. Auf dem langen Schenkel wurden im Abstand von 10 cm Markierungen mit einem Kupferklebeband angebracht. Diese Markierungen sind später im Bild der IR-Kamera sichtbar.

Die IR-Heizung wurde nun für 60 Minuten angeschaltet. In Abb. 116 sieht man die Temperaturverteilung entlang des langen Holzschenkels. M1 und M2 in Abb. 117 markieren die Temperaturmaxima.

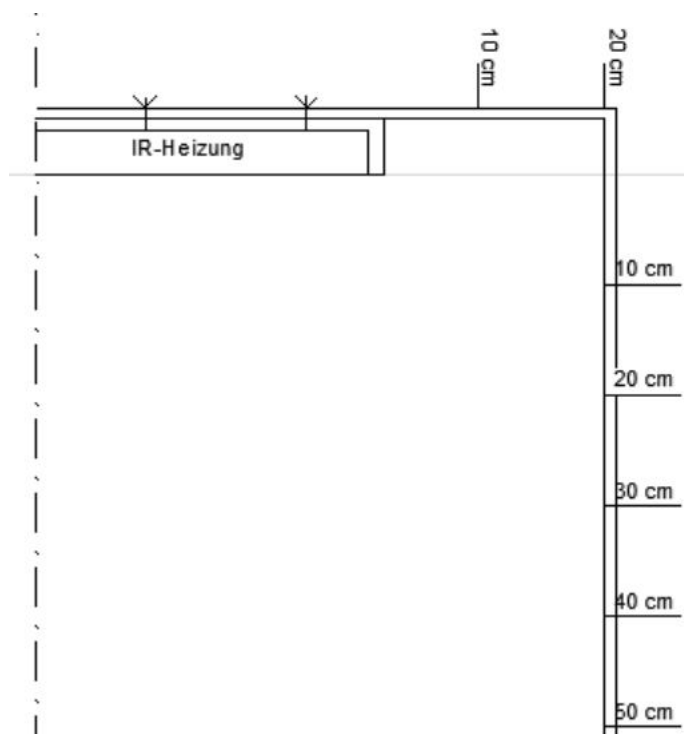


Abb. 114 Aufsicht Versuchsaufbau Abstrahlwinkel



Abb. 115 Versuchsaufbau Abstrahlwinkel

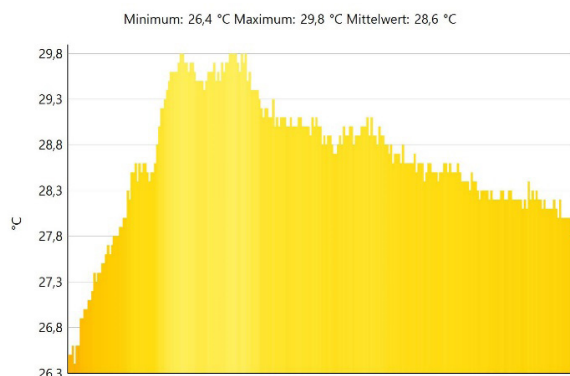


Abb. 116 Temperaturverteilung auf dem Holzschenkel

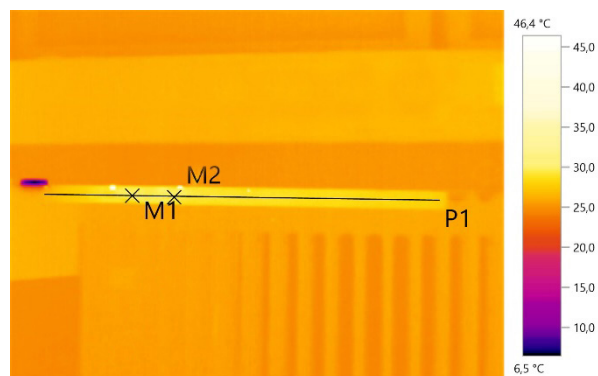


Abb. 117 Bild des Holzschenkels mit der IR-Kamera aufgenommen

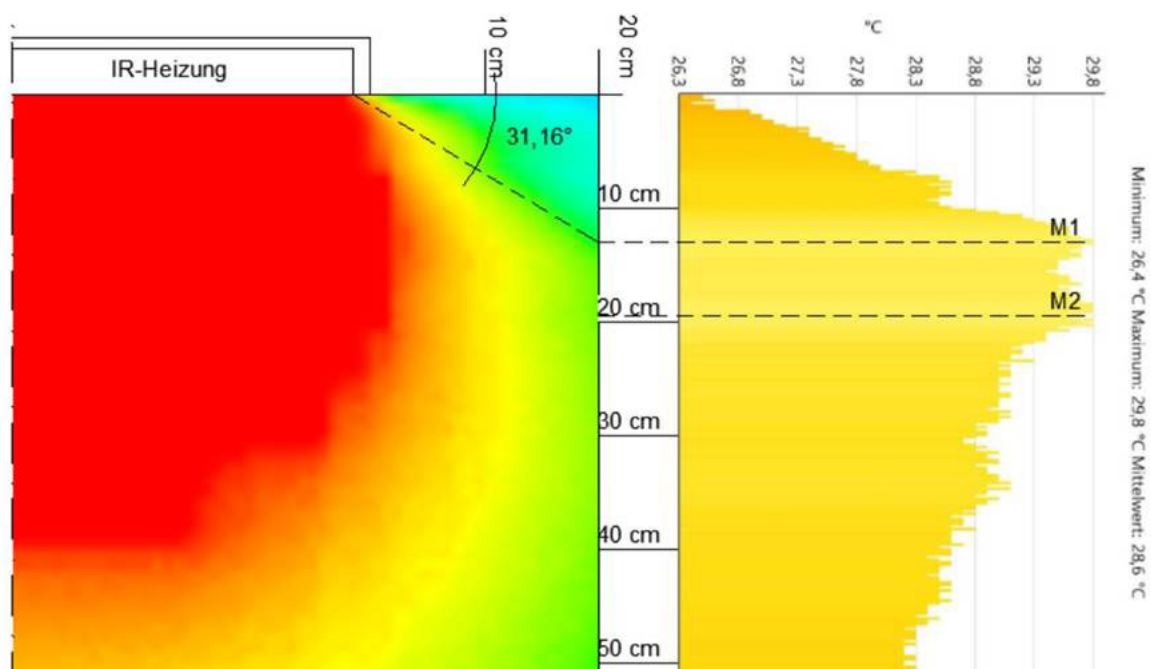


Abb. 119 Gemessener Abstrahlwinkel IR-Heizung im Vergleich zur Simulation der FH Burgenland (links) ⁶⁴

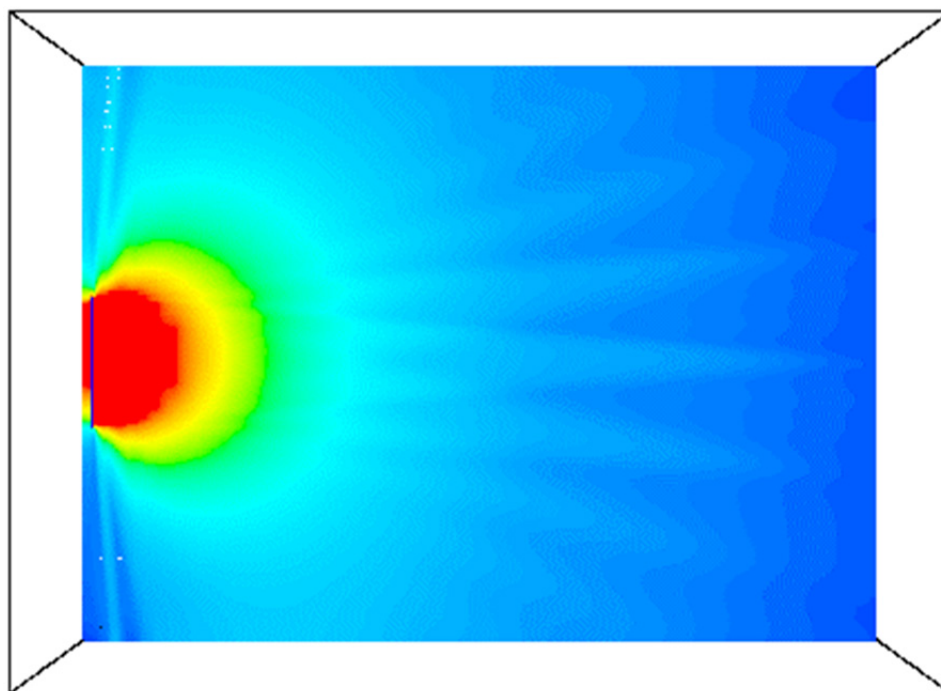


Abb. 120 Simulation der Verteilung der Strahlungstemperatur einer IR-Heizung, Seitenansicht ⁶⁵

64 [Heschl, 2016]

65 [ebd.]

4.5.6 Fazit Strahlungswirkungsgrad, Aufheizzeit und Abstrahlwinkel

Der Strahlungswirkungsgrad einer Infrarotheizung bestimmt, wieviel Prozent der zugeführten elektrischen Energie in Form von Strahlungswärme an den Raum abgegeben wird. Der übrige Teil wird in Form von Konvektion oder Wärmeleitung abgegeben und kann unter Umständen nicht primär zur Beheizung des Raums verwendet werden. Daher ist der Strahlungswirkungsgrad für die Effizienz eines Infrarotheizungssystems eine entscheidende Größe.

Bei Messungen des Strahlungswirkungsgrades an verschiedenen am Markt erhältlichen Infrarotheizungen haben sich große Unterschiede herausgestellt. Hier kann der Strahlungswirkungsgrad je nach Hersteller zwischen 40 % und 70 % variieren. Die DIN EN IEC 60675-3 beschreibt, wie der Strahlungswirkungsgrad und damit die Güte einer IR-Heizung bestimmt werden sollte.

Bei der Konstruktion von Infrarotheizungen ist eine optimale rückseitige Dämmung für den Strahlungswirkungsgrad entscheidend. Neben der Konstruktion hat auch die Position im Raum einen Einfluss auf den Strahlungswirkungsgrad. Hier hat sich gezeigt, dass sich eine Deckenaufhängung der Heizungen vorteilhaft auf den Strahlungswirkungsgrad auswirkt, da so die Wärmeabgabe über Konvektion verringert wird. Eventuell ist es aber auch möglich, durch konstruktive Maßnahmen den Konvektionsanteil bei wandaufgehängten Infrarotheizungen zu minimieren. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Um IR-Heizungen optimal regeln zu können, sollten sie eine geringe Masse aufweisen und so eine schnellere Aufheiz- und Abkühlzeit ermöglichen. Eine geringe Masse ist gleichzeitig auch für die Montage von IR-Heizungen von Vorteil.

Untersuchungen zur Strahlungsverteilung bei plattenförmigen IR-Heizungen bestätigen die Simulationen der FH-Burgenland. Die untersuchte plattenförmige IR-Heizung hat einen Abstrahlwinkel in den Raum von etwa 120 °.

5 Effizienz und Behaglichkeit von IR-Heizungen im realen Gebäudebetrieb

5.1 Effizienz der IR-Heizung im Wohngebäude K76

Im Gegensatz zu "klassischen" Heizkörpern an der Wand oder Fußbodenheizungen wurden IR-Heizungen bislang nur selten zur alleinigen Beheizung einer Wohnung oder eines Hauses verwendet und messtechnisch untersucht. Das 2017 fertiggestellte Gebäude K76 mit seinem direkt elektrischen Energiekonzept und seiner gut gedämmten Gebäudehülle bot hier optimale Möglichkeiten, die Effizienz im realen Gebäudebetrieb zu untersuchen. Mit seinen 16 Wohneinheiten und 38 Bewohnern ergeben sich - auch hinsichtlich des durchschnittlichen Nutzerverhaltens und dessen Auswirkungen auf die Verbräuche - belastbarere Ergebnisse und Erkenntnisse als bei dem Monitoring von nur ein oder zwei Wohnungen bzw. einem Ein- oder Zweifamilienhaus. Um die Stromverbräuche von IR-Heizungen, Durchlauferhitzern und Lüftungen zu untersuchen, wurde im Gebäude K76 über zwei Heizperioden ein energetisches Monitoring betrieben. Die Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben:

5.1.1 Messergebnisse K76 Heizperiode 2017 / 2018

Abb. 121 bis Abb. 123 auf S. 150 führen die wohnungsweisen Verbräuche der IR-Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung auf. In Heizperiode 2017 / 2018 konnten jedoch noch nicht alle Wohnungen detailliert erfasst werden, da die Bewohner teils noch nicht eingezogen waren oder der Anschluss der IR-Heizungen bzw. zugehöriger Technik noch nicht abgeschlossen war. Da die Auswertung von Anfang Mai stammt, sind die angegebenen Jahresverbräuche für Warmwasser und Lüftung Hochrechnungen auf Grundlage der Teilmessungen von Oktober 2017 bis Mai 2018.

Spezifischer Jahresverbrauch Warmwasser HP 2017/2018

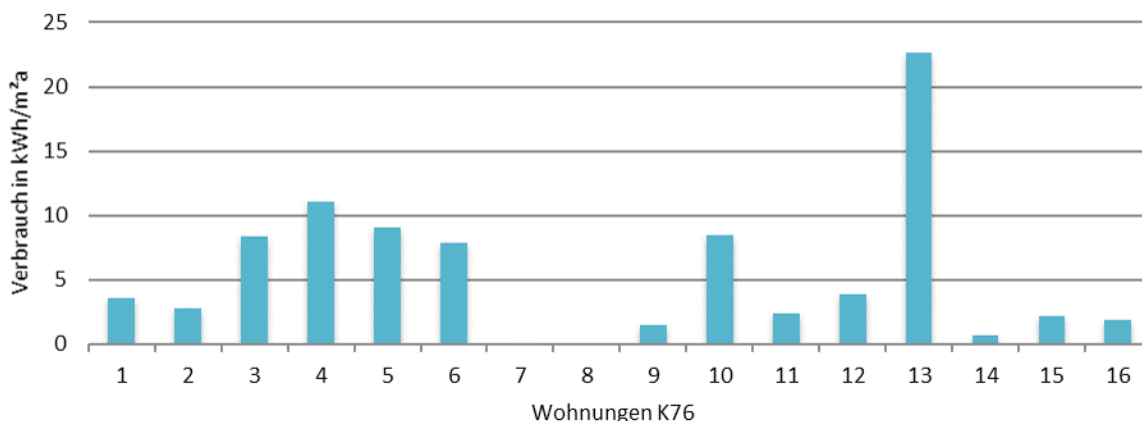


Abb. 121 Wohnungsweiser Strombedarf für Warmwasser HP 2017/2018

Spezifischer Jahresverbrauch Lüftung HP 2017/2018

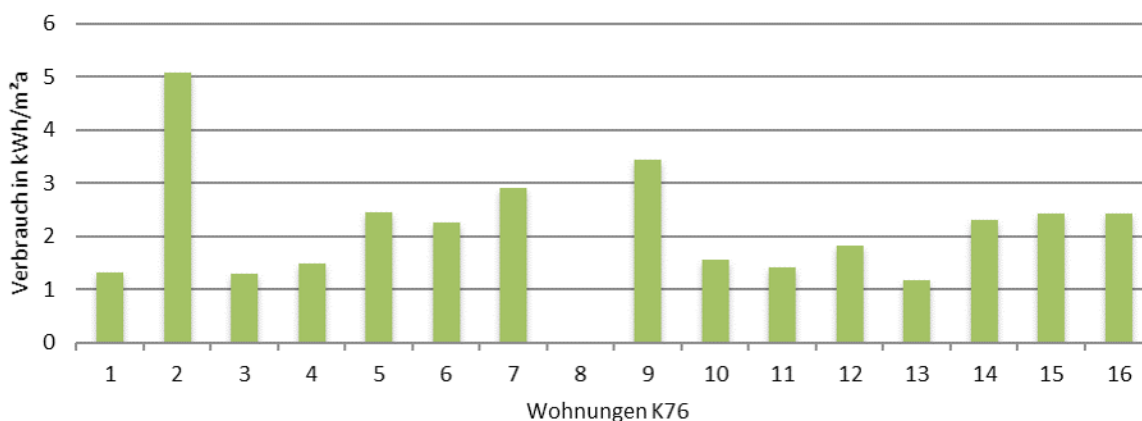


Abb. 122 Wohnungsweiser Strombedarf für Lüftung HP 2017/2018

Spezifischer Jahresverbrauch IR-Heizung HP 2017/2018

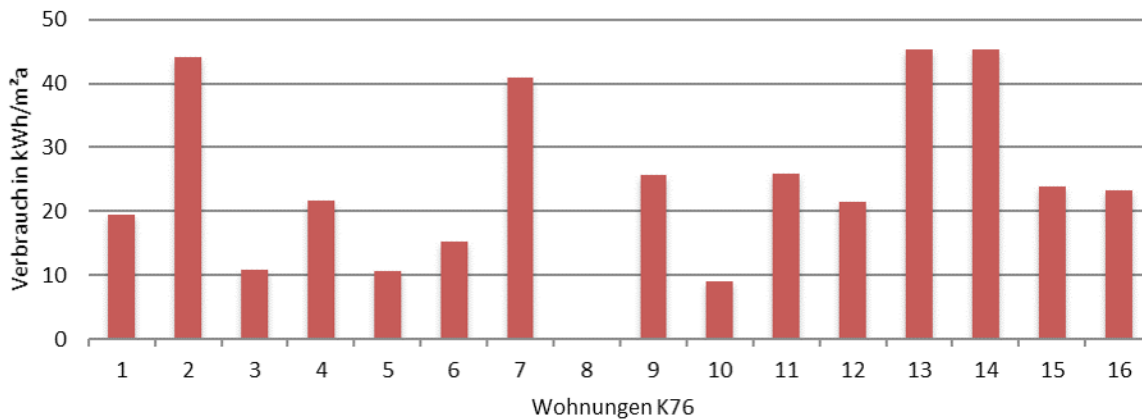


Abb. 123 Wohnungsweiser Strombedarf für IR-Heizung HP 2017/2018

Aufgegliedert nach Verbrauchern ergab sich nachfolgender Endenergieverbrauch im Vergleich zur Berechnung nach EnEV (s. Tabelle 3 auf S. 34):

Jahresverbräuche:	EnEV-Berechnung:	HP 2017/2018
Lüftung:	2,6 kWh/(m ² a)	1,9 kWh/(m ² a)
Warmwasser:	14,0 kWh/(m ² a)	6,9 kWh/(m ² a)
Heizung:	20,3 kWh/(m ² a)	23,4 kWh/(m ² a)
Summe:	36,9 kWh/(m²a)	34,7 kWh/(m²a)

Tabelle 37 Vergleich Endenergieverbrauch K76 nach EnEV / HP 2017/2018

5.1.2 Interpretation der Messergebnisse 2017 / 2018

Die Messdaten bzw. Hochrechnungen legen dar, dass die nach EnEV berechneten Verbräuche für die Heizung im Mittel nur leicht überschritten, im Falle von Warmwasser und Lüftung sogar deutlich unterschritten wurden. Grundsätzlich kann man erkennen, dass das IR-Konzept insgesamt die erwarteten Verbräuche aufweist. Gleichzeitig zeigt die wohnungsweise Betrachtung der Verbräuche, dass diese stark variieren und es teils deutliche Ausreißer nach oben gibt.

Um diese Unterschiede besser verstehen zu können, wurden die Bewohner bei einer Begehung am Ende der Heizperiode im Mai 2017 zu ihren Erfahrungen und Eindrücken mit den Heizungen in der ersten Heizperiode befragt. Ein Großteil der Bewohner war dabei grundsätzlich mit der Bedienung zufrieden (s. Abb. 137 auf S. 164). In einzelnen Wohnungen kam es jedoch, trotz der einfach gehaltenen Bedienung von Lüftung und IR-Heizung, zu einer fehlerhaften Einstellung der Technik.

- In zwei Wohnungen war die Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlagen bis in den Dezember hinein ausgeschaltet.
- In einer Wohnung lief die Lüftung auf viel zu hoher Stufe, was wahrscheinlich zu einem erhöhten Heizwärmebedarf führte.
- Die Raumtemperatursteuerung für die IR-Heizung wurde teilweise bei Inbetriebnahme der Heizungen auf Automatik mit zu hohen Temperaturvorgaben voreingestellt.
- In einzelnen Wohnungen wurde im Winter trotz eingeschalteter Lüftungsanlage weiter über die Fenster gelüftet.
- Umgekehrt gab es auch eine Wohnung, in der die Bewohner durch die Möglichkeit der direkten Einflussnahme auf die Heizkosten versucht haben, bewusst durch niedrigere Raumtemperaturen Energie und Geld zu sparen, was sich deutlich im Energieverbrauch abbildet.

Um die Ursachen für die hohen Verbräuche zu finden und diese für die zweite Heizperiode zu beseitigen, wurde jeder Wohnung eine detaillierte Übersicht ihrer Verbrauchsdaten aus der Heizperiode 2017/18 zur Verfügung gestellt (s. Abb. 124 auf Seite 152). Die Daten wurden zur besseren Einordnung in Bezug zu den jeweils durchschnittlichen, den maximalen und den minimalen Verbräuchen im gesamten K76 gesetzt. Zusätzlich sind individuelle Hinweise bzw. Vorschläge formuliert worden, wie der Energieverbrauch gesenkt werden kann.

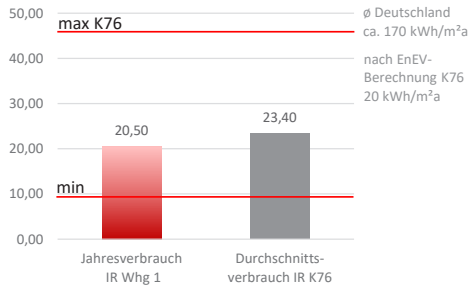
K76 | Whg 1 | Heizperiode 2017 / 2018 Verbräuche für IR-Heizung, Lüftung und Warmwasser



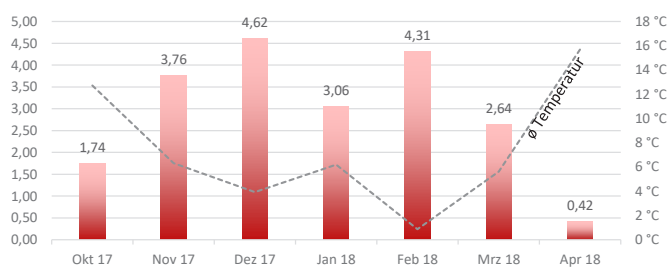
Anzahl der Bewohner: **4 Personen**
 Größe der Wohnung:
 Energiebezugsfläche An nach EnEV:

IR-Heizung

Vergleich zum Durchschnitt (kWh/m²)

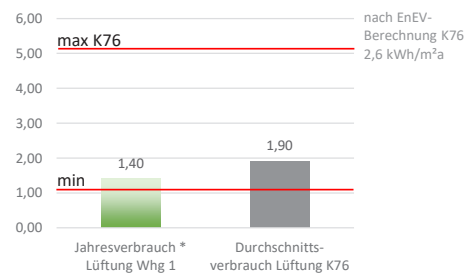


Gemessene Monatsverbräuche IR-Heizung (kWh/m²)

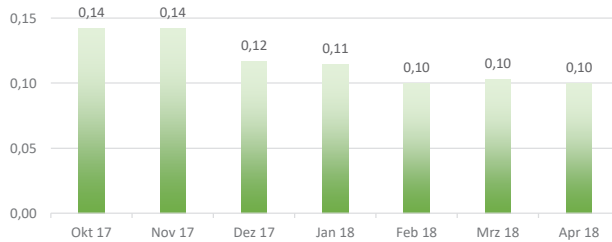


Lüftung

Vergleich zum Durchschnitt (kWh/m²)

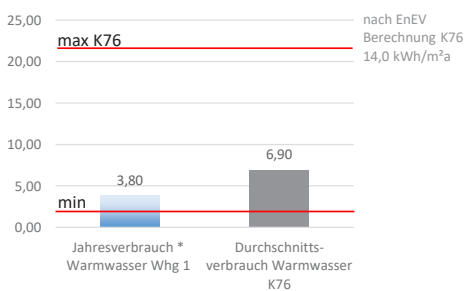


Gemessene Monatsverbräuche Lüftung (kWh/m²)

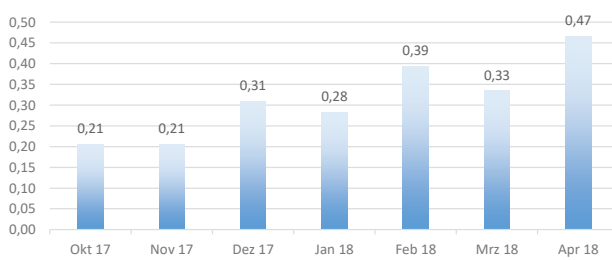


Warmwasser

Vergleich zum Durchschnitt (kWh/m²)



Gemessene Monatsverbräuche Warmwasser in kWh/m²



Hinweise:

- Der Stromverbrauch Ihrer Heizung ist etwas höher als erwartet. Evtl. sinkt der Verbrauch aber noch in der zweiten Heizperiode durch die zunehmende Austrocknung des Gebäudes.
- Der Stromverbrauch Ihrer Lüftung ist höher als erwartet. Um den Verbrauch für Lüftung und Heizung zu reduzieren, würden wir empfehlen, die Lüftung auf die niedrigste Stufe zu stellen und nur bei Bedarf hochzuschalten.
- Der Stromverbrauch für Ihr Warmwasser liegt unter dem Durchschnitt des K76 und deutlich unter dem berechneten Wert (14 kWh/m²a). Dies liegt wahrscheinlich an einem gegenüber der "Norm" geringeren Verbrauch pro Person. (Norm: 30l/p/d, Ist: ca. 7,6 l/p/d)
- Bitte nicht vergessen die IR-Heizung im Sommer auszuschalten!

* Prognose Jahresverbrauch anhand Monatsverbräuche HP 17/18

Verfasser: HTWG Konstanz / Jan Heider / 27.09.2018

Abb. 124 Beispiel einer detaillierten, wohnungsweisen Übersicht der Verbrauchsdaten

Es gab auch generelle Gründe, die einen niedrigeren Verbrauch in der zweiten Heizperiode erwarten ließen:

- Die Heizperiode 2017/18 war die erste Heizperiode nach Errichtung des Gebäudes. Da das Gebäude zu großen Teilen aus Beton besteht (Decken, Böden, Außenwände, Stützen), konnte angenommen werden, dass der Heizwärmebedarf im Zuge der Bautrocknung in der zweiten Heizperiode weiter abnimmt.
- Da Heizungen teilweise erst im Oktober / November in Betrieb genommen wurden, musste die Gebäudehülle in diesen Wohnungen erst aufgeheizt werden, was zu einem höheren Energieverbrauch geführt haben könnte.

Da die EnEV mit 19 °C Raumtemperatur rechnet, die tatsächlichen Raumtemperaturen jedoch eher bei 20 °C bis 22 °C liegen, ist der reale Verbrauch gegenüber der EnEV auch aus diesen Gründen in der Regel etwas höher.

5.1.3 Messergebnisse Heizperiode 2018 / 2019

In der zweiten Heizperiode 2018 / 2019 waren alle Wohnungen im K76 bewohnt. Bis auf Wohnung 16 gab es keinen Nutzerwechsel. Um wohnungsweise Unterschiede im Verbrauch der IR-Heizungen besser beurteilen zu können, wurde ab Januar 2019 im gesamten Gebäude ein Netz aus 28 temperaturkalibrierten Funksensoren installiert, die Lufttemperatur und relative Luftfeuchte aufzeichnen. Die Sensoren wurden überwiegend direkt unterhalb der Raumthermostate der IR-Heizungen platziert (s. Abb. 125). So konnte ermittelt werden, nach welcher Temperatur die Thermostate regeln und inwieweit Raumtemperatur und Energieverbrauch korrelieren.

Bei den Sensoren handelt es sich um „Xiaomi Aqara“ Sensoren. Sie senden die Daten per „Zig-Bee“ Funkstandard an vier „Xiaomi Multifunktionsgateways“, von denen jeweils eins in Gebäudemitte in jedem Geschoss sitzt. Die Gateways wiederum senden die Daten per LAN weiter an den „Loxone Miniserver“ im Keller. Hier wurden sowohl die Verbrauchsdaten der Stromzähler als auch die Daten der Funksensoren zentral mit einheitlichem Zeitstempel gespeichert.

Die nachfolgenden Diagramme bilden die wohnungsweisen Verbräuche von IR-Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung in Heizperiode 2018/2019 ab:



Abb. 125 Positionierung Funksensoren

Vergleich spez. Verbräuche DLH HP 17/18 - HP 18/19

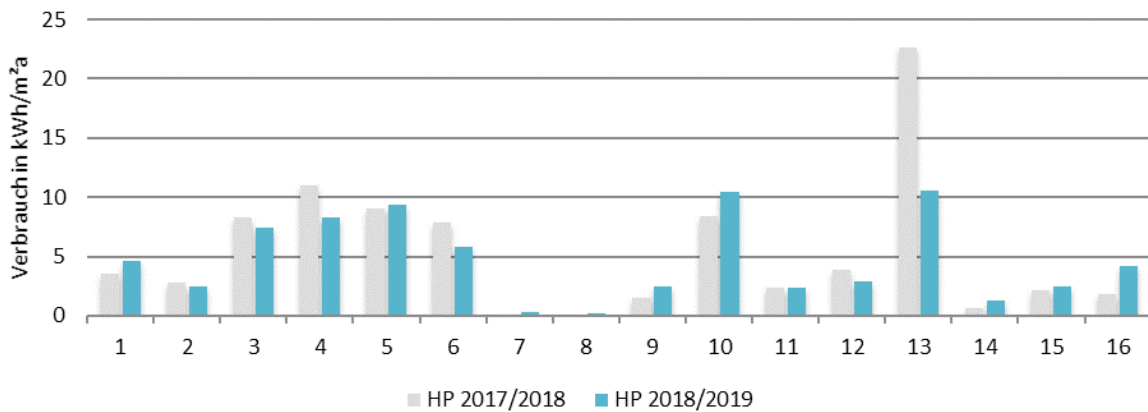


Abb. 126 Vergleich des Strombedarfs für Warmwasser pro Jahr

Vergleich spez. Verbräuche Lüftung HP 17/18 - HP 18/19

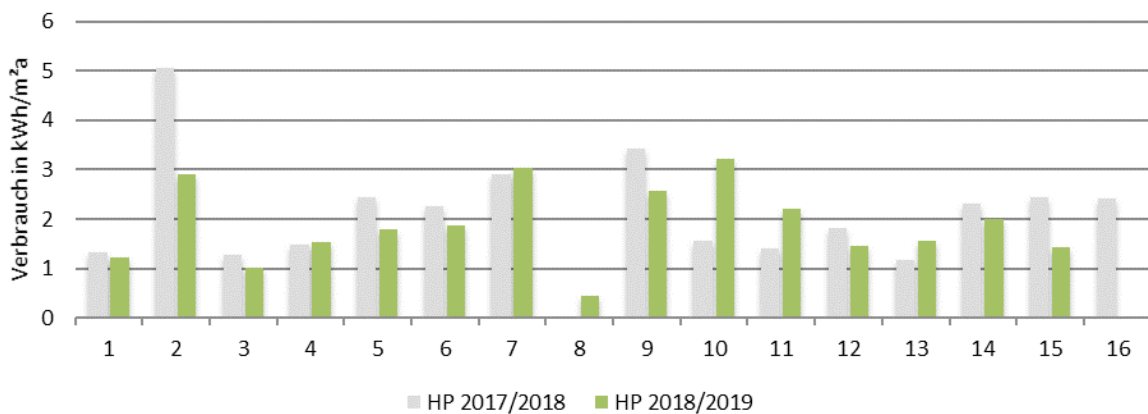


Abb. 127 Vergleich des Strombedarfs für Lüftung pro Jahr

Vergleich spez. Verbräuche IR-Heizung HP 17/18 - HP 18/19

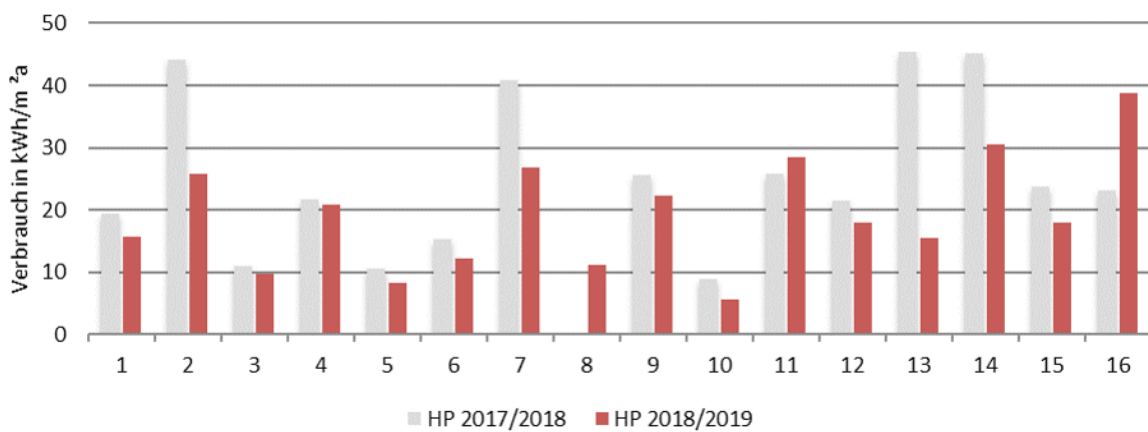


Abb. 128 Vergleich des Strombedarfs für Heizung pro Jahr

Aufgegliedert nach Verbrauchern ergab sich nachfolgender Endenergieverbrauch für die Heizperiode 2018 / 2019:

Jahresverbräuche:	EnEV-Berechnung:	HP 2017/2018	HP 2018/2019
Lüftung:	2,6 kWh/(m ² a)	1,9 kWh/(m ² a)	1,8 kWh/(m ² a)
Warmwasser:	14,0 kWh/(m ² a)	6,9 kWh/(m ² a)	5,6 kWh/(m ² a)
Heizung:	20,3 kWh/(m ² a)	23,4 kWh/(m ² a)	17,2 kWh/(m ² a)
Summe:	36,9 kWh/(m²a)	34,7 kWh/(m²a)	28,6 kWh/(m²a)

Tabelle 38 Vergleich Endenergieverbrauch K76 nach EnEV / HP 2018/2019

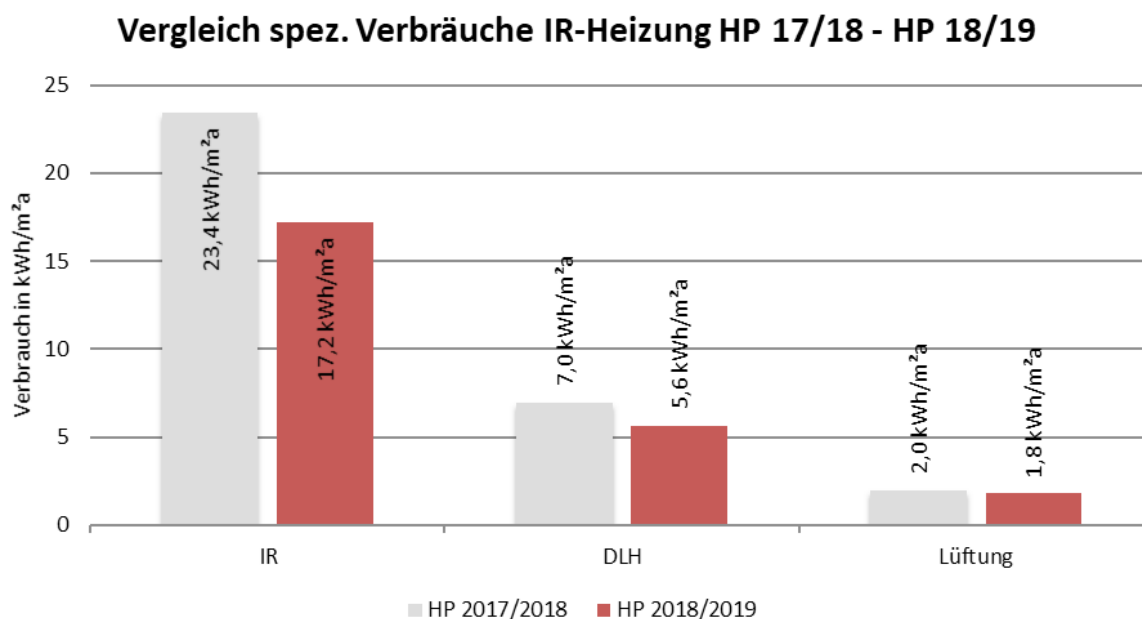


Abb. 129 Vergleich der spezifischen Verbräuche HP 2017/2018 / HP 2018/2019

Die Messwerte für den Stromverbrauch der IR-Heizung waren in den vorangegangenen Tabellen noch nicht witterungsbereinigt. Führt man die Witterungsbereinigung mithilfe des vom „Institut Wohnen und Umwelt (IWU)“ bereitgestellten Excel-Programms „Gradtagszahlen für Deutschland“ für den Standort Darmstadt durch, ergibt sich für die HP 2017/18 ein Klimafaktor von 1,1 und für HP 2018/19 ein Klimafaktor von 1,23. Das heißt, dass die Winter in den zwei Heizperioden in Darmstadt wärmer waren als die langjährige Mitteltemperatur, die als Grundlage für die EnEV-Berechnung angenommen wird. In einem kälteren Winter (nach EnEV) wären die gemessenen Verbräuche entsprechend höher. Es ergeben sich nachfolgende witterungsbereinigte Verbrauchswerte:

Jahresverbräuche:	EnEV-Berechnung:	HP 2017/2018	HP 2018/2019
Lüftung:	2,6 kWh/(m ² a)	1,9 kWh/(m ² a)	1,8 kWh/(m ² a)
Warmwasser:	14,0 kWh/(m ² a)	6,9 kWh/(m ² a)	5,6 kWh/(m ² a)
Heizung:	20,3 kWh/(m ² a)	23,4 kWh/(m ² a)	17,2 kWh/(m ² a)
Heizung Witterungsbereinigt (IWU)	20,3 kWh/m ² a	25,7 kWh/m²a	21,2 kWh/m²a
Summe:	36,9 kWh/(m²a)	34,7 kWh/(m²a)	28,6 kWh/(m²a)

Tabelle 39 Vergleich Endenergieverbrauch K76 berechnet / gemessen witterungsbereinigt

5.1.4 Interpretation Messergebnisse 2018 / 2019

Abb. 129 auf Seite 155 zeigt deutlich, dass sich die Verbräuche der IR-Heizung gegenüber der ersten gemessenen Heizperiode wie vermutet verringert haben. Auch nach der Witterungsbereinigung der Heizungsstromverbräuche ist der Rückgang des Gesamtenergieverbrauchs von 34,7 kWh/m²a auf 28,6 kWh/m²a und damit um circa 18 % deutlich zu erkennen.

Es erweist sich, dass bereits nach der zweiten Heizperiode der gemessene und witterungsbereinigte Endenergiebedarf für die IR-Heizung dem nach EnEV berechneten Endenergiebedarf entspricht. Der signifikante Rückgang des Heizungsstromverbrauchs in HP 2018/19 gegenüber HP 2017/18 hat dabei verschiedene Ursachen, die sich unterschiedlich gut belegen lassen:

- Trocknung der Gebäudemasse: Eine Ursache für die Reduzierung der Heizungsverbräuche könnte mit der zunehmenden Trocknung der Gebäudemasse zusammenhängen. Das Gebäude wurde 2017 neu erstellt. Die Decken und die tragenden Stützen bestehen aus Beton. Verdunstet das im Beton enthaltene Wasser, entzieht dies dem Beton Wärme. Diese Wärme muss in den Anfangsjahren noch zusätzlich erzeugt werden. Wie groß der Anteil der Einsparung durch die zunehmende Austrocknung ist, lässt sich aber nicht nachweisen.
- Behebung fehlerhafter Lüftungseinstellungen: In Abb. 127 auf S. 154 sieht man, dass sich z.B. in Wohnung 2 der Stromverbrauch für die Lüftung in HP 2018/19 gegenüber dem Verbrauch in HP 2017/18 fast halbiert hat. Bei geringerem Lüftungsstromverbrauch erzeugt die Lüftung einen geringeren Luftvolumenstrom und damit einhergehend reduzierte Lüftungswärmeverluste. Auch in anderen Wohnungen wurden die Lüftungseinstellungen optimiert, was sich an der Reduzierung des spezifischen Lüftungsstromverbrauchs um 5 % von 1,9 kWh/m²a auf 1,8 kWh/m²a erkennen lässt. Das Beheben von fehlerhaften Lüftungseinstellungen bei der Wärmerückgewinnung wird zu einer weiteren Einsparung bei den Lüftungswärmeverlusten und damit zu einer Reduzierung des Heizungsstrombedarfs beigetragen haben.
- Optimierung der Heizungsthermostateinstellungen: In den Wohnungen 2, 7, 13 und 14, die in HP 2017/18 die deutlich höchsten Verbräuche hatten, hat sich der Heizungsstromverbrauch in HP 2018/19 nun deutlich reduziert. Dies liegt teilweise an den oben bereits genannten behobenen Fehlern bei den Lüftern. Vermutlich wurden in diesen Wohnungen

aber auch Regelsollwerte auf eine niedrigere Temperatur gestellt. Wie sich an Abb. 130 sehen lässt, lagen dabei die Temperaturen aber noch im Bereich von 20 °C – 22 °C. Teilweise waren in HP 2017/18 auch Thermostate auf Automatikbetrieb gestellt. Dies führte dazu, dass teilweise von Hand eingestellte niedrigere Sollwerte am Thermostat nach einer bestimmten Zeit unbemerkt durch den Automatik- Sollwert überschrieben wurden.

Abb. 130 zeigt den spezifischen Stromverbrauch pro Wohnung und die jeweilige Durchschnittslufttemperatur der Wohnung. Teilweise lässt sich, wie z.B. in Wohnung 10 und Wohnung 16 klar ablesen, dass sich die Lufttemperatur im Verbrauch abzeichnet. Wohnung 03, 06, 08 und 13 widersprechen allerdings dieser Regel. Hier hat vermutlich die Lage der Wohnung im Haus und die Ausrichtung zur Sonne noch einen zusätzlichen Einfluss. Wohnungen im Erdgeschoss oder auf der Nordseite, die nur wenig solare Einstrahlung im Winter bekommen sowie Wohnungen, die viel Hüllfläche gegen die Außenluft haben, weisen einen höheren Energiebedarf zum Heizen auf.

Der spezifische Gesamtenergiebedarf für Lüftung, Warmwasser und IR-Heizung liegt deutlich unter dem durch die EnEV berechneten Wert. Dies hängt vor allem mit dem geringeren Energiebedarf für die Warmwasserbereitung zusammen. Da nur der Strombedarf für die Warmwasserbereitung gemessen wurde, jedoch nicht die damit produzierte Menge Warmwasser, lässt sich nicht direkt sagen, ob der niedrige Verbrauch mit der Effizienz der Warmwasserbereitung zusammenhängt oder mit dem geringen Verbrauch der Bewohner. Über den gemessenen Jahresstromverbrauch der Warmwasserbereitung lässt sich jedoch mit einer angenommenen Warmwassertemperatur von 38 °C die theoretisch erzeugbare Menge Warmwasser errechnen und mit dem durchschnittlichen Verbrauch vergleichen. Die Berechnung ergibt, dass der Verbrauch der Bewohner weniger als die Hälfte des typischen Verbrauchs von 40 Litern / Person und Tag beträgt. Dies erklärt den um mehr als die Hälfte niedrigeren Strombedarf für die Warmwassererzeugung im K76 in HP 2018/19.

Möglicherweise hängt der geringe Verbrauch mit dem Bewusstsein der Bewohner für die hohen Kosten der Warmwassererzeugung zusammen. Eine genauere Untersuchung dieser Frage wäre sehr interessant, war jedoch nicht Teil dieser Arbeit, da der Fokus auf der Untersuchung der IR-Heizung lag.

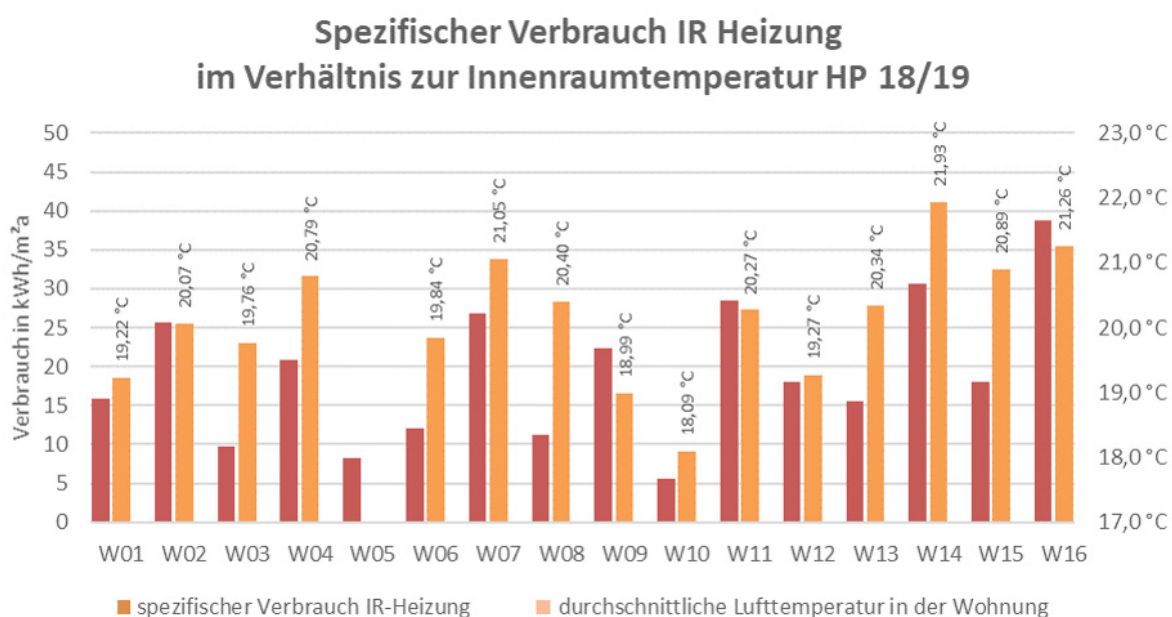


Abb. 130 Lufttemperaturen im Verhältnis zum Heizungsstromverbrauch

5.1.5 Lastkurven und Eigenverbrauchsrate im K76

Gerade bei strombasierten Haustechnikkonzepten ist eine größtmögliche Deckung von Verbrauch durch selbsterzeugten PV-Strom sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht besonders sinnvoll und wichtig. Hierzu ist es nötig, die Lastgänge für Verbrauch und Erzeugung genauer zu betrachten.

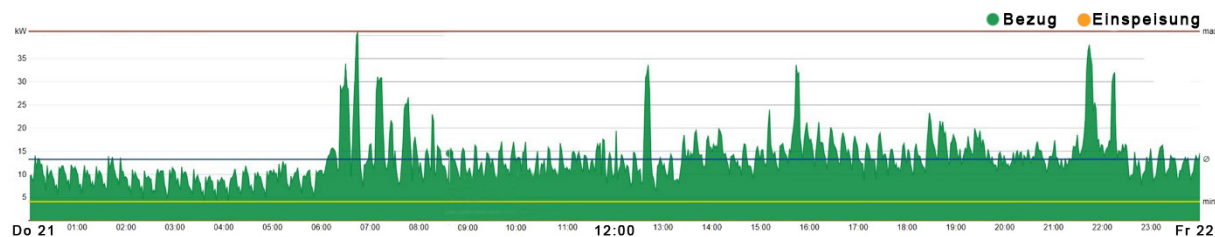


Abb. 131 Lastgang K76 Winter / 21. Dezember 2018, 0-24 Uhr ⁶⁶

In Abb. 131 sieht man deutlich, dass der PV-Strom aus der Anlage mit 36 kWp im Winter nicht ausreicht, um den Verbrauch zu decken. Der gesamte produzierte Strom wird komplett selbst verbraucht, es muss aber trotzdem zu jeder Tageszeit Strom aus dem Netz bezogen werden. Es findet keine Einspeisung von PV-Strom statt.

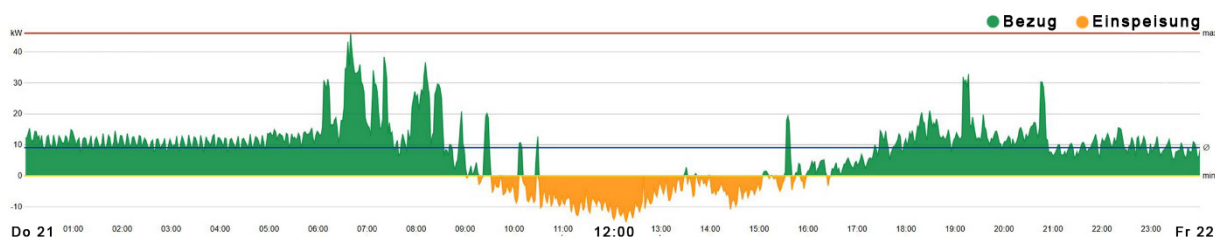


Abb. 132 Lastgang K76 Frühling / 21. März 2018, 0-24 Uhr ⁶⁷

Abb. 132 zeigt den Lastgang im Frühjahr. Hier sieht man, dass der PV-Ertrag von 10 Uhr bis 16 Uhr ausreicht, um das Gebäude zu versorgen. Es wird sogar ein Überschuss eingespeist. Gerade morgens ergeben sich jedoch Lastspitzen, die von den Durchlauferhitzern verursacht werden. Diese decken sich nicht mit der PV-Produktion.

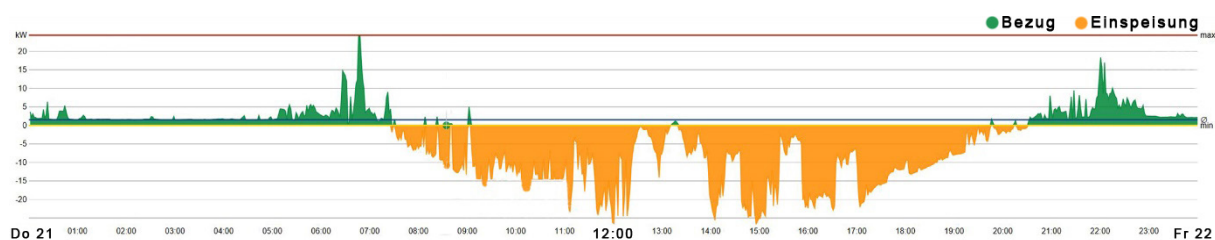


Abb. 133 Lastgang K76 Sommer / 21. Juni 2018, 0-24 Uhr ⁶⁸

Abb. 133 zeigt den Lastgang im Sommer. Von morgens 8 Uhr bis abends 20 Uhr wird genug Strom produziert, um das Haus zu versorgen. Ein großer Teil wird ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Es zeigen sich aber genauso, wie in Abb. 132, die morgendlichen und abendlichen Lastspitzen, die durch den Betrieb der Durchlauferhitzer entstehen. Diese liegen wieder außerhalb der Zeiten, in denen PV-Strom produziert wird.

⁶⁶ [Discovery / K76]

⁶⁷ [ebd.]

⁶⁸ [ebd.]

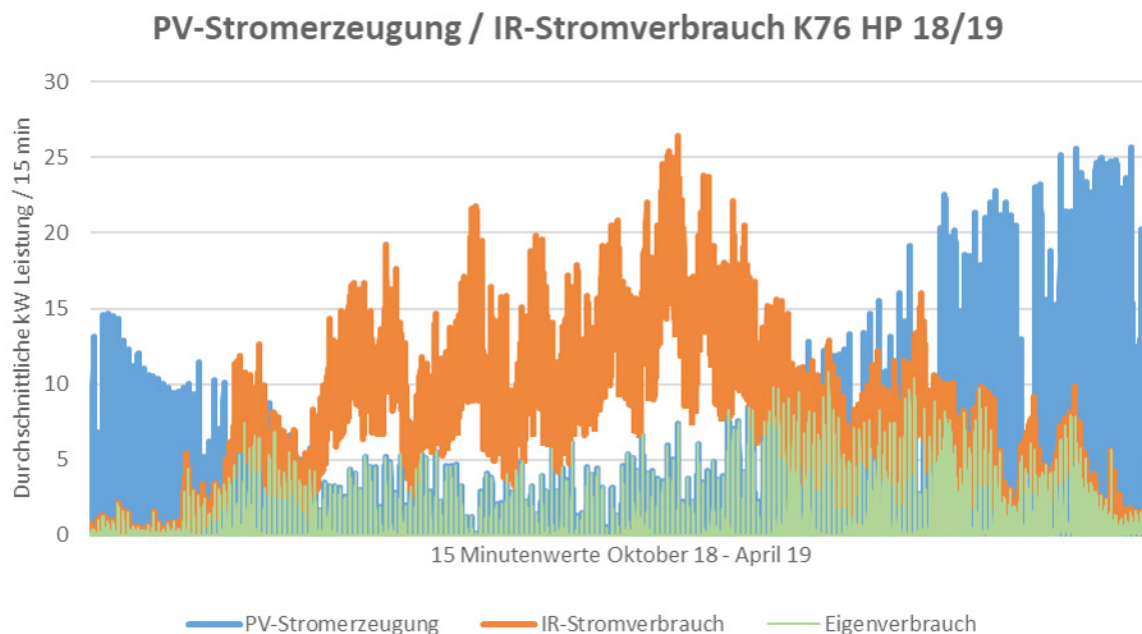


Abb. 134 Gemessener PV-Stromertrag / IR-Stromverbrauch K76 HP 2018/2019

Betrachtet man Zählerdaten von Erzeugung und Verbrauch, wird deutlich, dass bei einem Jahresertrag der PV-Anlage (10/2017 - 10/2018) von circa 34.000 kWh etwa 14.000 kWh direkt verbraucht wurden. 20.000 kWh wurden ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Bei einem prognostizierten Stromverbrauch im Zeitraum 10/2017 – 10/2018 von circa 75.500 kWh ergibt sich eine Endenergiedeckung in der Jahresbilanz von 45 %, ein Autarkiegrad von 19 % und eine Eigennutzungsrate des PV-Stroms von 41 %.

Betrachtet man die in HP 2018/19 gemessene Stromerzeugung der PV-Anlage im Verhältnis zum Stromverbrauch der IR-Heizung in der Heizperiode, erkennt man, dass über den Stromertrag der im K76 verbauten PV-Anlage der Bedarf für die IR-Heizung nur zu etwa 13 % gedeckt wird. Die restlichen 87 % des Strombedarfs müssen über den Netzanschluss bezogen werden.

Für die ökologische Bewertung eines IR-Heizungssystems ist es bedeutend, den Strombedarf der IR-Heizungen möglichst direkt über den vor Ort von der PV-Anlage produzierten regenerativen Strom zu decken und den Bezug von Netzstrom im Winter zu reduzieren. Würde man versuchen, wie zeitweise von der Genossenschaft überlegt, den Eigenverbrauchsanteil der PV-Anlage durch Einsatz eines 66 kWh-Stromspeichers zu erhöhen, so zeigen eigene überschlägige Berechnungen, würde dies den Eigenversorgungsgrad von circa 13 % auf etwa 19 % erhöhen.

In Abb. 135 auf S. 160 erkennt man, dass über den Stromspeicher im Herbst und Frühjahr der Strombedarf der IR-Heizung auch über Nacht gedeckt werden kann. Im Winter wird jedoch der gesamte produzierte Strom direkt verbraucht und es kann kein Strom für die Überbrückung der Nacht eingespeichert werden. Erweitert man den Betrachtungsraum um die Stromverbräuche für Warmwassererzeugung, Lüftung, Haushaltsstrom und Elektromobilität wird deutlich, dass ein Stromspeicher im K76 unter den vorhandenen Rahmenbedingungen so gut wie keinen Beitrag leisten würde, den Eigenverbrauchsanteil des PV-Stroms im Winter zu erhöhen.

Um die Eigenversorgung der IR-Heizung mit regenerativem Strom im Winter zu erhöhen, müsste die PV-Anlage vergrößert werden. Jedoch müsste auch bei einer größeren PV-Anlage ein Weg gefunden werden, den nächtlichen Strombedarf im Winter zu decken. Dieser beträgt zu Spitzenzeiten im Winter alleine für die IR-Heizung ungefähr 150 - 250 kWh pro Nacht. Ein Stromspeicher,

PV-Stromerzeugung / IR-Stromverbrauch K76 HP 18/19 Variante mit 66 kWh Stromspeicher

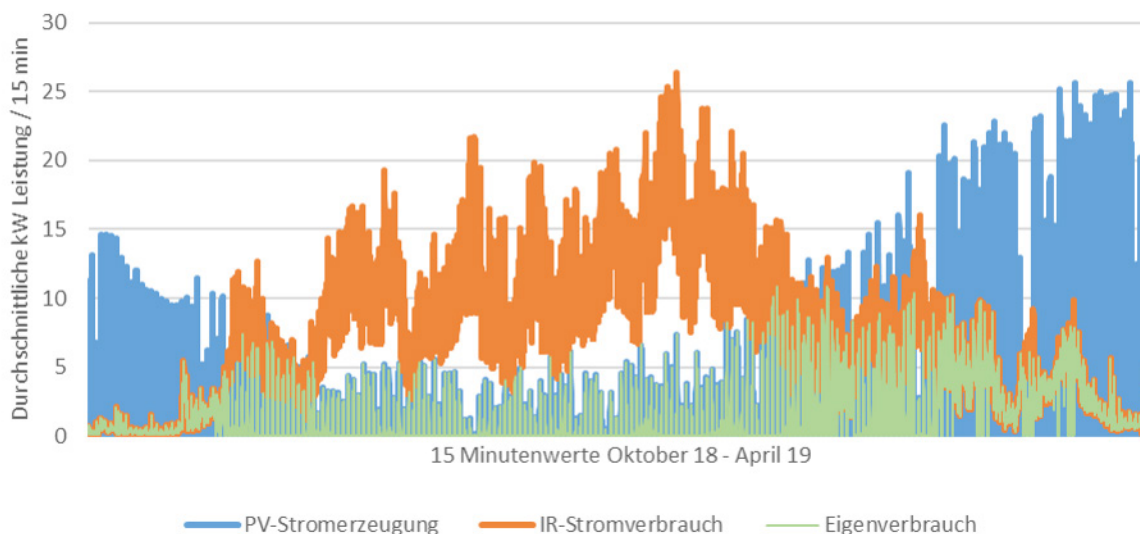


Abb. 135 Theoretisch mögliche Steigerung des Eigenverbrauchs durch einen 66 kWh-Stromspeicher

der in der Lage ist, diesen Bedarf zu decken, wäre zu heute üblichen Preisen wirtschaftlich nicht vertretbar. Zu prüfen wäre jedoch, ob eine verbesserte Regelstrategie helfen könnte, den Eigenverbrauchsanteil des PV-Stroms auch ohne Stromspeicher zu erhöhen:

- Zum einen wäre es dafür nötig, die Regelung von der bisher verwendeten Zweipunktregelung auf ein System umzustellen, das einen gleichmäßigeren Verbrauch ermöglicht. Dies könnte zum Beispiel über ein System-Management mit gegenseitiger Verriegelung der Heizungen oder über eine stetige Regelung erfolgen. Auftretende Lastspitzen könnten so vermieden werden und die Verbrauchskurve könnte besser an die Erzeugungskurve des PV-Stroms angepasst werden.
- Zum anderen wäre es notwendig zu prüfen, ob sich die Wärmeenergie der IR-Heizung auf Zeiten mit solarer Einstrahlung verlegen ließe. So könnte etwa das Temperaturniveau über den Tag von morgens 20 °C auf abends z.B. 23 °C angehoben werden. Da gut gedämmte Gebäude mit ausreichend Speichermasse nur sehr langsam abkühlen, würde das Gebäude eventuell nur um 3 °C über Nacht abkühlen und ein Stromverbrauch für die Heizung in der Nacht könnte vermieden werden. Da durch das höhere Temperaturniveau jedoch auch die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste steigen, wäre zu klären, ob der dadurch höhere Eigenverbrauchsanteil den erhöhten Energieverbrauch rechtfertigen kann.

Eigene durchgeführte Simulationen mit der Simulationssoftware „Polysun“ zeigten, dass eine auf Eigenverbrauch optimierte Regelung der IR-Heizung die Eigenverbrauchsrate deutlich verbessern kann. Hier besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf.

Eine weitere Verbesserung der Eigendeckung mit selbsterzeugtem PV-Strom könnte durch eine Umstellung der Warmwassererzeugung erfolgen. Zwar sind die Direktdurchlauferhitzer günstig in der Anschaffung, einfach in der Handhabung und frei von Leitungs- und Speicherverlusten, jedoch treten durch die direkte Warmwassererzeugung hohe Lastspitzen oft zu Zeiten ohne solare Einstrahlung auf. Hier würden nachfolgende Vorschläge die Netzdienlichkeit des Gebäudes verbessern:

- Dezentrale Warmwasserboiler mit Speicher oder dezentrale Warmwasser-Wärmepumpen mit Speicher würden eine geringere elektrische Anschlussleistung benötigen. Durch die integrierten Warmwasserspeicher könnte die Warmwasserbereitung auch zu Zeiten mit solarer Einstrahlung erfolgen.
- Bei direktelektrischer Warmwassererzeugung sollten Systeme zur dezentralen Warmwasserrückgewinnung eingesetzt werden, um die Effizienz zu verbessern.

5.1.6 Fazit Effizienz der IR-Heizung im Wohngebäude K76

Die Verbrauchsmessungen ergaben, dass das Konzept einer „Direktstromheizung“ grundsätzlich funktioniert. Die Werte aus der nach Baufertigstellung erstellten EnEV-Berechnung werden bei der Heizung und Lüftung bereits in der zweiten Heizperiode eingehalten. Auch die Innenraumtemperaturen liegen auf einem normalen Niveau. Der Energiebedarf für Warmwasser liegt sogar deutlich unter dem von der EnEV berechneten Wert. Die Ursache hierfür ist wahrscheinlich der unterdurchschnittliche Warmwasserbedarf der Bewohner. Ob dies mit der Art der Warmwasserbereitung zusammenhängt, ist offen.

Beim Stromverbrauch der IR-Heizung zeichnet sich von Heizperiode 2017/18 zu Heizperiode 2018/19 eine deutliche Dynamik ab. Die Verbräuche sind aufgrund mehrerer oben genannter Ursachen von HP 2017/18 auf HP 2018/19 um circa 18 % gesunken. Hier wäre es sehr interessant zu verfolgen, wie sich diese Entwicklung in den nächsten Heizperioden fortsetzt. Eine weitere Bauaustrocknung und eine weitere Optimierung der Lüftungs- und Heizungsregelung in den nächsten Heizperioden hat eventuell eine weitere Reduzierung der Verbräuche zur Folge.

Ein mögliches weiteres Optimierungspotential bei der Gebäudebeheizung bietet die Regelung der Heizungen nach operativer (gefühlter) Raumtemperatur. Bislang werden die IR-Heizungen im K76 noch nach Lufttemperatur geregelt. Laborraummessungen haben jedoch dargestellt, dass sich eine Regelung nach operativer Raumtemperatur positiv auf die Effizienz des IR-Heizungssystems auswirkt. Die TU Berlin entwickelt aktuell (2019) im Rahmen des von der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ geförderten „OpTemp-Heizung“-Projekts Sensoren, die eine einfache Regelung nach operativer Raumtemperatur ermöglichen sollen.

Ebenso ist zu prüfen, wo ein Raumthermostat für IR-Heizungen optimalerweise angebracht werden sollte. Aufgrund der inhomogenen Strahlungswärmeverteilung im Raum kann der Abstand der IR-Heizung zum Thermostat einen großen Einfluß auf die vom Thermostat gemessene Temperatur haben. Befindet sich das Thermostat z.B. im Strahlungsschatten der IR-Heizung, kann die tatsächliche Temperatur in der Nähe der IR-Heizung deutlich höher sein als am Thermostat gemessen.

Die ökologische und ökonomische Bewertung des „Direktstromkonzepts“ des Projekts K76, im Hinblick auf die Kombination der IR-Heizung mit einer PV-Anlage und Stromspeicher, erfolgt im Kapitel 6.

5.2 Behaglichkeit der IR-Heizung im Wohngebäude K76

Neben der Frage zur energetischen Effizienz stellt sich auch die Frage, wie die Behaglichkeit und Bedienbarkeit einer IR-Heizung im realen Betrieb von den Bewohnern bewertet wird. Sollte die thermische Behaglichkeit bei einer Beheizung mit IR-Heizungen unzureichend sein, würde dies alle möglichen ökologischen und ökonomischen Vorteile des Systems überwiegen. Genauso wäre eine schlechte Bedienbarkeit nachteilig für das System. Um diese Fragen zu klären, wurde im Forschungsprojekt „IR-Bau“⁶⁹ über zwei Heizperioden eine sozialwissenschaftliche Nutzerbefragung zur Behaglichkeit und Bedienbarkeit unter den Bewohnern des Gebäudes K76 durchgeführt. Eine Befragung der Nutzer bietet zudem an, Aspekte zu möglichen technischen Verbesserungen - wie zum Beispiel zur optimalen Oberflächentemperatur der IR-Heizungen, zur Positionierung der Heizungen im Raum oder zur Positionierung der Raumthermostate im Raum - zu untersuchen.

5.2.1 Fragestellungen zu Behaglichkeit und Bedienbarkeit von IR-Heizungen

Nachfolgende grundlegende Fragestellungen wurden in der Nutzerbefragung untersucht:

- Wird die IR-Heizung in hochgedämmten Wohngebäuden als behaglich wahrgenommen?
- Wird die IR-Heizung in hochgedämmten Wohngebäuden als gut bedienbar wahrgenommen?
- Gibt es weitere Einflussfaktoren (z.B. die Lage der Wohnung im Haus, die Ausrichtung der Wohnung, etc...), die sich in Zusammenhang mit der IR-Heizung negativ auf die Behaglichkeit auswirken?
- Gibt es, begründet in der veränderten Technologie zur Raumbeheizung, Unterschiede bei der als behaglich angenommenen Temperatur zwischen der neuen und der vorherigen Wohnsituation?

5.2.2 Beschreibung der Untersuchungsmethode

Zur Ermittlung der tatsächlichen Behaglichkeit und Bedienbarkeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „IR-Bau“ ein Onlinefragebogen entwickelt. Zwar birgt eine Onlinebefragung das Risiko, dass Störfaktoren - wie z.B. Ablenkungen, unterschiedliche Tageszeiten, Sonneneinstrahlung, verschiedene Endgeräte zur Beantwortung der Fragen etc. - weniger zuverlässig vermieden werden können. Die Onlinebefragung bietet jedoch die wesentlichen Vorteile, dass die Befragung anonym und zu einem vom Teilnehmer frei wählbaren Zeitpunkt durchgeführt werden kann. Der Onlinefragebogen wurde in Zusammenarbeit mit Frau Nicole Conrad von der HTWG Konstanz, die Teil des Teams im „IR-Bau“- Projekt war, entwickelt. Die Durchführung und Auswertung der Onlinebefragung erfolgte durch Frau Conrad alleine.

Da nicht jeder Mensch unter gleichen thermischen Bedingungen sich gleich behaglich fühlt, wurde die Behaglichkeit und das Wahrnehmen der Bedienbarkeit bereits vor Umzug der Teilnehmer in das neue Gebäude K76 noch in deren „alten“ Wohnungen, zusammen mit der Messung der jeweiligen klimatischen Bedingungen, abgefragt und gemessen. So besteht die Möglichkeit, die Werte aus der vorigen Wohnung mit denen aus dem K76 zu vergleichen.

Für die Befragungen kamen zwei Arten von Fragebögen zum Einsatz. Eine „lange Version“, in der die grundlegenden Eigenschaften der räumlichen Bedingungen aufgenommen wurden. Die

69 [Heider et al., 2020]

Beantwortung der langen Version dauert etwa 20 Minuten. Sie musste nur einmal in der „alten“ Wohnung und dann nochmals bei Umzug ins K76 ausgefüllt werden. In der „kurzen Version“ wurde im monatlichen Intervall über die Heizperiode die aktuelle Behaglichkeit und die von den Teilnehmern gemessenen klimatischen Bedingungen erfasst. Die Beantwortung der kurzen Version dauerte nur etwa 5 Minuten. Die Fragen waren für alle Teilnehmer in den jeweiligen Befragungsrunden immer gleich.

Acht Bewohner des K76 im Alter zwischen 40 und 70 Jahren haben an der Befragung teilgenommen. Die Teilnehmer bekamen keine Entlohnung. Insgesamt wurden nachfolgende Befragungsrunden durchgeführt:

2017	2 Befragungsrunden vor dem Umzug
2017 / 2018	3 Befragungsrunden im K76
2018 / 2019	5 Befragungsrunden im K76

So konnten 16 Datensätze aus der Zeit vor dem Umzug erfasst werden und 64 Datensätze aus der Zeit im K76.

5.2.3 Eingesetzte Messinstrumente

Zur Messung der klimatischen Bedingungen in den privaten Räumen der Befragungsteilnehmer kamen folgende Messgeräte zum Einsatz:

- TFA – „KlimaLoggPro“ Wetterstation mit Außensensor
- Testo – „830“ Infrarotthermometer
- Trotec – „BZ30“ CO2 Datenlogger

Alle Messgeräte wurden vor Ausgabe kalibriert.

5.2.4 Ergebnisse der Befragung

Wird die IR-Heizung in hochgedämmten Wohngebäuden als behaglich wahrgenommen?

Die Teilnehmer der Befragung bewerteten die Gesamt-Behaglichkeit in ihren Wohnungen als „eher behaglich“ bis „behaglich“. Die Bewertung der Behaglichkeit stieg im Verlauf der Befragungen an. In den letzten Befragungsrunden wurde die Behaglichkeitssituation im Durchschnitt mit „behaglich“ bewertet (s. auch Abb. 136 auf S. 164).

Nachfolgende Temperaturen wurden in den Räumen im K76 im Durchschnitt von den Teilnehmern gemessen:

Ø 20,4 °C, Median bei 21 °C, min: 18,6 °C - max: 22 °C

Wird die IR-Heizung in hochgedämmten Wohngebäuden als gut bedienbar wahrgenommen?

Die Regelung der Infrarotheizungen wurde über alle Befragungsrunden im Durchschnitt mit „gut bedienbar“ bewertet (s. auch Abb. 137 auf S. 164).

IR-BAU: K76 Nutzerbefragung

Auswertung – Behaglichkeit

- \emptyset eher behaglich bis behaglich
- Median bei behaglich
- min: neutral - max: sehr behaglich

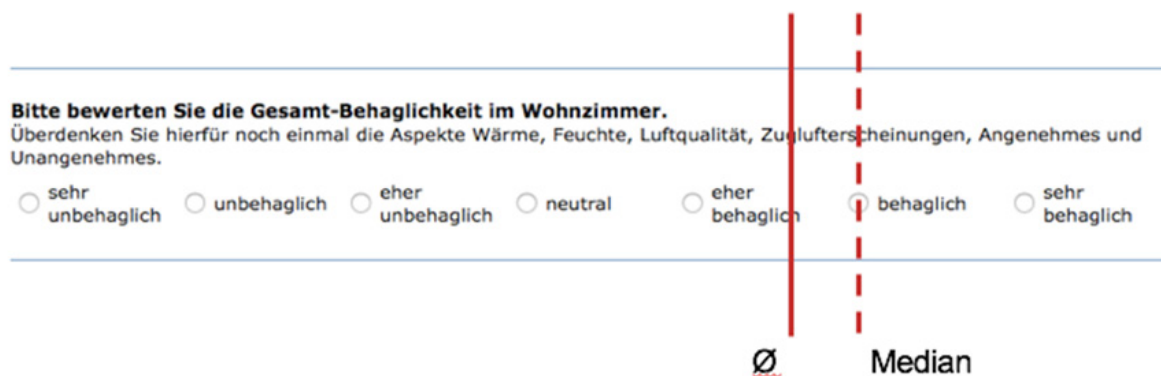


Abb. 136 Auswertung Nutzerbefragung - Behaglichkeit ⁷⁰

Auswertung - Bedienbarkeit

- \emptyset gut bedienbar
- Median bei gut bedienbar
- min: eingeschränkt bedienbar - max: sehr gut bedienbar

Wie bewerten Sie die Bedienbarkeit Ihrer Heizung?

sehr gut bedienbar

gut bedienbar

bedienbar

eingeschränkt bedienbar

nicht bedienbar

Abb. 137 Auswertung Nutzerbefragung - Bedienbarkeit ⁷¹

⁷⁰ [Heider et al., 2020, S. 70]

⁷¹ [ebd., S. 70]

Gibt es weitere Einflussfaktoren (z.B. die Lage der Wohnung im Haus, die Ausrichtung der Wohnung, etc...), die sich in Zusammenhang mit der IR-Heizung negativ auf die Behaglichkeit auswirken?

Von allen Teilnehmern der Befragung wurde die Behaglichkeit über alle Befragungsrunden relativ ähnlich eingeschätzt. Da die Wohnungen der Teilnehmer über das gesamte Gebäude verteilt liegen, zeigt dies, dass sich die individuellen Einflussfaktoren nicht negativ auf die Behaglichkeit auswirken.

Gibt es, begründet in der veränderten Technologie zur Raumbeheizung, Unterschiede bei der als behaglich angenommenen Temperatur zwischen der neuen und der vorherigen Wohnsituation?

Die Teilnehmer der Befragung stufen nach dem Umzug ins K76 eine niedrigere Raumlufttemperatur als behaglich ein als zuvor in ihrer „alten“ Wohnsituation.

5.2.5 Fazit Behaglichkeit K76

Die sozialwissenschaftliche Nutzerbefragung, die im Rahmen des Projekts „IR-BAU“ durchgeführt wurde zeigt, dass die Teilnehmer der Studie mit der Behaglichkeit und Bedienbarkeit der IR-Heizungen zufrieden sind. Die Behaglichkeit wird im Durchschnitt als „eher behaglich“ bis „behaglich“ bewertet. Die gemessenen Lufttemperaturen liegen im Bereich üblicher Raumtemperaturen. Die Bedienbarkeit wird im Durchschnitt als „gut bedienbar“ bewertet.

Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl und der starken Bindung der Teilnehmer an das Forschungsprojekt „IR-Bau“ lässt die Befragung jedoch noch keine pauschale Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu. Dazu wären weitere Studien mit mehr Teilnehmern notwendig.

6 Ökologische und ökonomische Betrachtungen zum Projekt K76

6.1 Gesamtökologische Bewertung über 50 Jahre

Eine der Leitfragen dieser Arbeit ist, ob Infrarotheizungssysteme gegenüber Wärmepumpensystemen mit Fußbodenheizung ökologische, aber auch ökonomische Vorteile aufweisen können. Auf Grundlage der vorangegangenen Detailuntersuchungen zu den Effizienzunterschieden der beiden Systeme wird nun im folgenden Kapitel die Frage untersucht, wie sich der Vergleich der gesamtökologischen Bewertung in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung darstellt.

6.1.1 Randbedingungen für die ökologische Bewertung

Die nachfolgenden Berechnungen wurden im Rahmen des „IR-Bau“-Projekts durchgeführt. Am Beispiel des Gebäudes K76 wurden zwei Varianten erstellt: Eine Variante mit zentraler Luft/Wasser-Wärmepumpe, hydraulischer Wärmeverteilung, Fußbodenheizung im Heizestrich und zentraler Warmwassererzeugung und eine Variante mit Infrarotheizungen und dezentralen Direkt-durchlauferhitzern zur Warmwassererzeugung. Beide Systeme beinhalten eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Dabei werden beide Varianten zunächst ohne Zubau von Photovoltaik miteinander verglichen. In einem zweiten Schritt wird die IR-Heizungsvariante - wie im K76 realisiert - mit einer PV-Anlage kombiniert. Der alleinige Zubau der PV bei der IR-Heizung erfolgt, da hier die Anfangsinvestkosten aufgrund der geringeren Komplexität des Systems deutlich geringer sind. Das so frei gewordene Kapital kann gewinnbringend in den Zubau einer PV-Anlage bei der IR-Heizung genutzt werden. Diese Thematik wird in den Kapiteln 7.1.5 und 7.2.1 genauer erläutert.

Die Baukonstruktion und die Materialien des Projekts K76 bilden für beide Modelle die Grundlage. Die spezifischen ökologischen Kriterien der Materialien wurden für die Berechnung der Ökobaudat⁷² (Stand 2016) entnommen und mit dem vom BBSR bereitgestellten Tool „eLCA“ zusammengesetzt. Mit Hilfe des Bilanzierungsprogramms „BKI-Energieplaner 19“ wurden für beide Varianten der Endenergiebedarf und der Stromertrag der Photovoltaikanlage ermittelt. Die ökologische Bilanzierung der Baukonstruktion des Gebäudes K76 im Rahmen des Forschungsprojekts „IR-Bau“ erfolgte durch Frau Anne-Kristin Wagner vom Büro ee-concept. Der „GWP“-Wert für die Infrarotheizungspaneele wurde von der Firma „Greendelta“ berechnet. Die ökologische Gesamtbilanzierung erfolgte in Zusammenarbeit mit Frau Wagner.

Der Betrachtungszeitraum für die Ökobilanz wurde auf 50 Jahre festgelegt. Der Austausch von technischen Komponenten und Bauteilschichten auf Grund von altersbedingtem Verschleiß wurde in der Berechnung berücksichtigt. Die spezifische zu erwartende Lebensdauer von Bauteilen und technischen Komponenten wurden dem „Leitfaden für Nachhaltiges Bauen des BMUB und der VDI 2076“ entnommen. Da nicht genau abzusehen ist, wie sich der CO₂ Ausstoß bei der Stromerzeugung über die nächsten 50 Jahre entwickelt, wurde sowohl für den Strombezug aus dem Netz als auch für die Gutschrift für eingespeisten PV-Strom vereinfacht der gleiche Wert von 0,617 kg CO₂/kWh_{END} angenommen. Für den Vergleich wurden die Lebenszyklusmodule Herstellung (A1-A3), Instandhaltung (B1-B3) und Betrieb (B6) betrachtet.

72 [www.oekobaudat.de]

6.1.2 Ökologische Bewertung über 50 Jahre, IR-Variante ohne PV

Das Ergebnis der Berechnung in Abb. 138 für die Module Herstellung (A1-A3) und Instandhaltung (A1-A3) zeigt auf, dass die Variante Wärmepumpe für KG 300 und KG 400 ein zunächst in etwa doppelt so hohes Treibhauspotential aufweist wie die Variante IR-Heizung. Die reduzierte technische Komplexität und der damit verbundene geringere Materialaufwand für die IR-Heizungsvariante (kein hydraulisches Verteilnetz, kein Pufferspeicher, keine großflächige Wärmeübergabe über Fußbodenheizungen) und auch der geringere Wartungs- und Instandsetzungsaufwand führt hier zu einer deutlichen Reduzierung des Treibhauspotentials.

Abb. 139 zeigt jedoch, dass ein Energiekonzept mit IR-Heizung **ohne** PV-Anlage im Betrieb ein deutlich höheres Treibhauspotential gegenüber der WP-Variante aufweist.

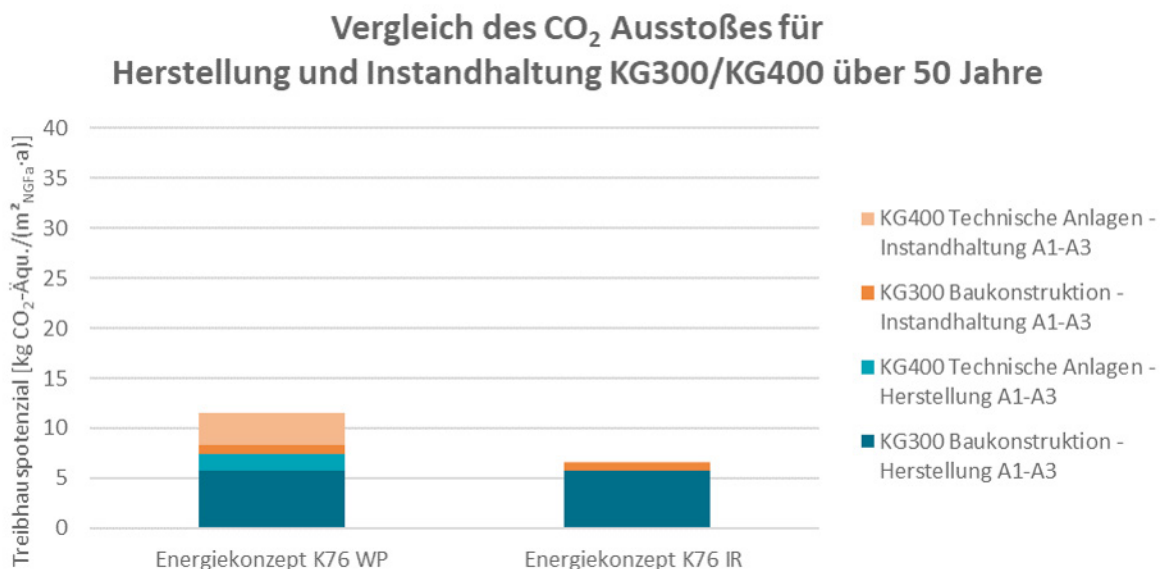


Abb. 138 Vergleich CO₂ Ausstoß für Herstellung und Instandhaltung KG 300/KG 400 über 50 Jahre, IR-Variante **ohne PV** ⁷³

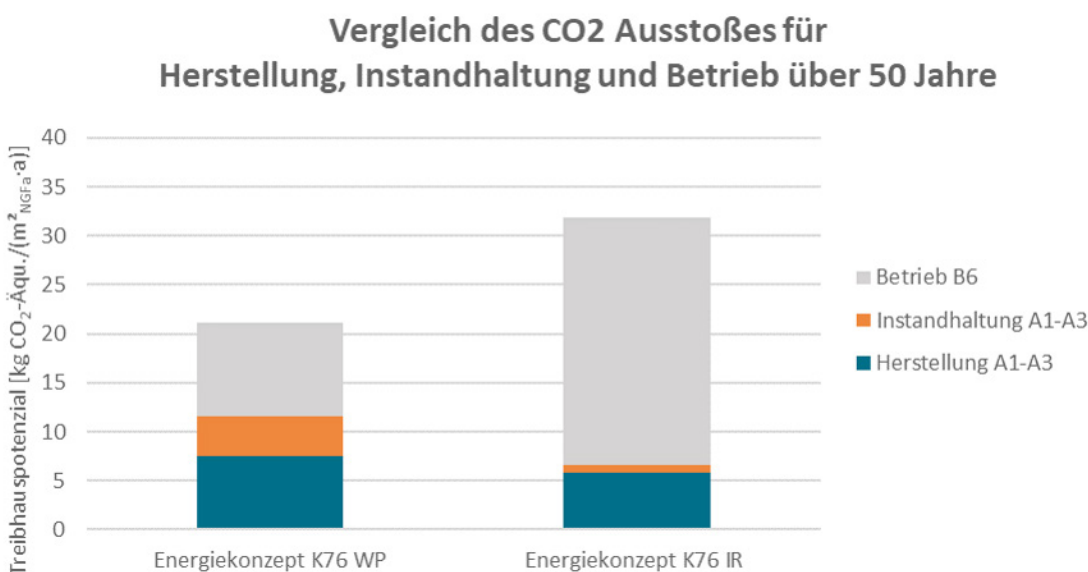


Abb. 139 Vergleich des CO₂ Ausstoßes für Herstellung, Instandhaltung und Betrieb über 50 Jahre , IR-Variante **ohne PV** ⁷⁴

73 [Heider et al., 2020, S. 171]

74 [ebd., S. 172]

6.1.3 Ökologische Bewertung über 50 Jahre, IR-Variante mit PV

In Kombination **mit** einer PV-Anlage steigt das Treibhauspotential für KG 400 bei der IR-Variante zunächst an, da das Treibhauspotential für die zusätzliche PV-Anlage hinzugerechnet werden muss (s. Abb. 140). Im Betrieb (B6) verursachen jetzt jedoch beide Varianten ein etwa nur noch gleich hohes Treibhauspotential. Die installierte PV-Anlage kompensiert das zunächst höhere Treibhauspotential der IR-Heizungsvariante durch den direkten Eigenverbrauch des lokal regenerativ erzeugten Stroms sowie durch die Netzeinspeisung des Überschusses und damit die Verdrängung von konventionellem Strom aus dem Stromnetz (s. Abb. 141).

Zusammen mit dem im Vergleich zur Wärmepumpenvariante geringeren Treibhauspotential aus den Modulen Herstellung und Instandhaltung, weist die Variante IR-Heizung über den Zeitraum von 50 Jahren bessere ökologische Kennwerte auf als die Variante Wärmepumpe (s. Abb. 141).

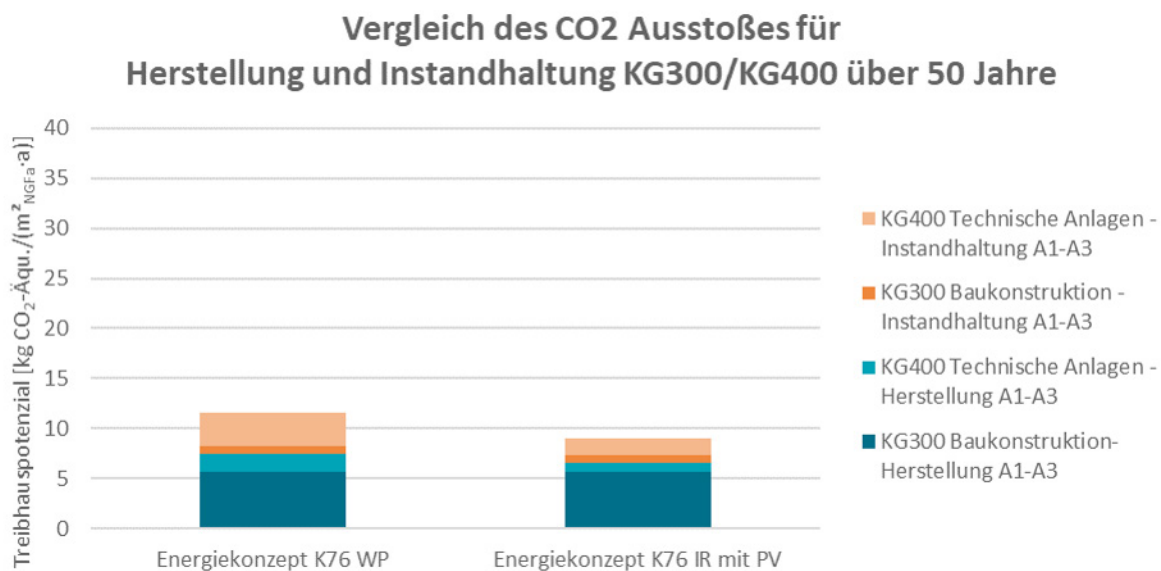


Abb. 140 Vergleich CO₂ Ausstoß für Herstellung und Instandhaltung KG 300/KG 400 über 50 Jahre, IR-Variante **mit PV** ⁷⁵

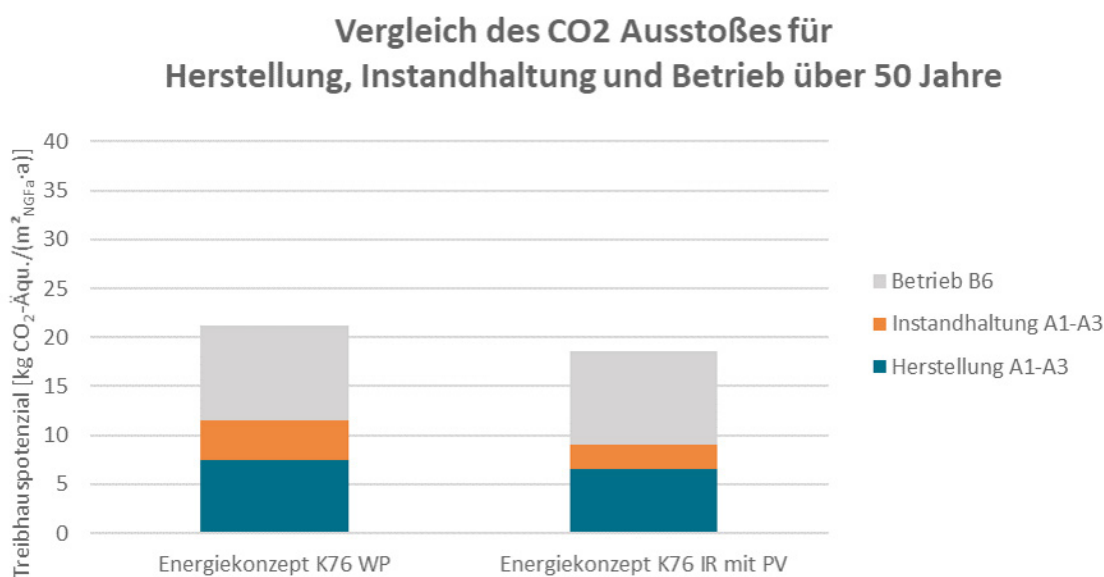


Abb. 141 Vergleich des CO₂ Ausstoßes für Herstellung, Instandhaltung und Betrieb über 50 Jahre , IR-Variante **mit PV** ⁷⁶

⁷⁵ [Heider et al., 2020, S. 172]

⁷⁶ [ebd., S. 173]

6.1.4 Fazit ökologische Bewertung über 50 Jahre

Die Leitfrage zur ökologischen Bilanz kann beantwortet werden. Die ökologische Bilanzierung am Beispiel des Projekts K76 stellt dar, dass ein Infrarot-System aus ökologischer Sicht (in Abhängigkeit der Gebäudegröße und der Dämmqualität) gegenüber einem Luft-Wärmepumpensystem über einen Zeitraum von 50 Jahren zunächst schlechter abschneidet.

In Kombination mit einer Photovoltaik-Anlage erzielt die IR-Heizungsvariante (im Falle des K76) jedoch über einen Zeitraum von 50 Jahren in der ökologischen Bilanz deutlich bessere Werte als die Wärmepumpenvariante. Dies macht deutlich, dass ein IR-Heizungssystem aus ökologischer Sicht nie ohne ausreichend große PV-Anlage geplant und realisiert werden darf.

In der vorliegenden Berechnung betrug die Eigenverbrauchsrate des selbsterzeugten Stroms ungefähr 40 %. Gelänge es, durch eine optimierte Regelung den Eigenverbrauchsgrad zu erhöhen, würde dies die ökologischen Vorteile des IR-PV-Konzepts weiter erhöhen. Auch wurde nur ein Teil der beim IR-System eingesparten Anfangsinvestkosten für die Wärmeerzeuger in den Zubau einer Photovoltaikanlage investiert. Wären hier die vollen Differenzkosten zur WP-Variante in den Zubau einer PV-Anlage investiert worden, würde auch dies die ökologischen Vorteile des IR-PV-Konzepts noch weiter verbessern.

6.2 Ökonomische Bewertung der Energiekonzepte am K76 über 50 Jahre

Eine zweite Leitfrage dieser Arbeit ist, ob IR-Heizungssysteme neben ökologischen Vorteilen auch ökonomische Vorteile aufweisen können. Im folgenden Kapitel soll daher die Frage untersucht werden, wie sich der Vergleich der gesamtökonomischen Bewertung in einer Lebenszyklusbeurteilung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für Herstellung, Instandhaltung und Betrieb darstellt? Wie bei der ökologischen Bewertung wurden die nachfolgenden Berechnungen im Rahmen des „IR-Bau“-Projekts durchgeführt. Es wurde dabei wieder das Gebäude K76 als Beispiel verwendet und die zwei Varianten IR-Heizung und Wärmepumpen-System werden miteinander verglichen.

6.2.1 Randbedingungen für die ökonomische Bewertung

Für den wirtschaftlichen Vergleich werden die technischen Anlagen für die Gebäudebeheizung, die Warmwassererzeugung und die Stromerzeugung der beiden Varianten betrachtet und deren Wirtschaftlichkeit nach den Vorgaben der VDI 2067 berechnet. Die Investitionskosten für die Wärmepumpenvariante sind dem BKI-Kostenplaner (Version 21) entnommen (s. Anhang). Die Investitionskosten für IR-Heizungen entstammen der Schlussrechnung aus dem Projekt K76. Die Kosten pro kW installierter IR-Heizung betragen hier rund 1.200 Euro (Brutto) inklusive dezentraler Raumregelung, Montage der Heizungen und Regelung. Die Nutzungsdauern, Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Bedienung werden für beide Varianten nach der VDI 2067 angesetzt.

Für den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren wird die Einspeisevergütung (12 ct/kWh) für den Photovoltaikstrom als konstant angenommen. Die nach aktuellem Gesetz geforderte zusätzliche Zahlung von 40 % der EEG-Umlage pro kWh auf eigenverbrauchten Strom bei PV-Anlagen über 10 kWp Leistung wurde vernachlässigt. Zum einen bewirkt eine Änderung dieses Faktors nur eine geringe Änderung des Gesamtergebnisses, zum anderen wird die EEG-Umlage vermutlich in den kommenden Jahren deutlich sinken, da alte kostenintensive PV-Anlagen zunehmend aus der Förderung herausfallen. Für beide Modelle wurden die gleichen Zinsfaktoren, Preissteigerungsraten und der gleiche Betrachtungszeitraum von 50 Jahren angenommen. Folgende Parameter wurden für die Berechnung gewählt:

Allgemeine Faktoren		Preissteigerungsfaktoren	
Bezugsfläche [m ²]	1360 m ²	Instandsetzungszahlungen	4,0%
Zinsfaktor	4,0%	betriebsgebundene Zahlungen	4,0%
Betrachtungszeitraum	50 Jahre	verbrauchsgebundene Zahlungen	3,0%

Tabelle 40 Allgemeine Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung, Variante 50 kW (K76)

Positionen Variante IR-Heizung 50 kW	Investition	Nutzungsdauer (Tn,a)	Aufwand für			Kosten pro Stunde (€/h)
			Instandhaltung (fK, %)	Aufwand für Wartung (%)	Aufwand für Bedienung (h/a)	
Heizen - Elektrostrahlungsheizung	60.000 €	50	0,0	0,0	0	50
Warmwasser - Durchlauferhitzer	8.322 €	15	1,0	1,0	0	50
Warmwasser - Boiler	1.400 €	20	2,0	1,0	0	50
Stromerzeugung - PV (ca. 36,2 kWp)	47.060 €	25	0,7	0,6	0	50

Tabelle 41 Annahmen zum Energiekonzept IR-Heizung, Variante 50 kW (K76)

Positionen Variante Wärmepumpe 50 kW	Investition	Aufwand für				Kosten pro Stunde (€/h)
		Nutzungs-dauer (Tn,a)	Instand-haltung (fk, %)	Aufwand für Wartung (%)	Aufwand für Bedienung (h/a)	
Heizen + Warmwasser Wärmepumpe (Luft-Wasser)	41.220 €	18	1,0	1,5	5	50
Heizen - Ausdehnungsgefäß	1.881 €	15	1,0	1,0	0	50
Heizen - Umwälzpumpe	1.056 €	10	2,0	1,0	0	50
Heizen - Wärmedämmung Rohrleitungen	7.754 €	25	1,0	0,0	0	50
Heizen - Rohrleitungen	12.146 €	40	1,0	0,0	0	50
Heizen - Pufferspeicher	5.283 €	20	1,0	1,0	0	50
Heizen - Fußbodenheizung	57.707 €	50	1,0	0,0	0	50
Warmwasser - Warmwasserspeicher	3.572 €	20	1,0	1,0	0	50
Warmwasser - Rohrleitungen	5.222 €	30	2,0	0,0	0	50
Warmwasser - Dämmung Rohrleitungen	4.947 €	20	1,0	0,0	0	50
Warmwasser - Zirkulationspumpe	291 €	10	2,0	1,0	0	50
Hautechnikraum (15m ² ; 1000€/m ²)	15.000 €	50	1,0	1,0	0	50

Tabelle 42 Annahmen zum Energiekonzept Wärmepumpe, Variante 50 kW (K76)

6.2.2 Ökonomische Bewertung der Energiekonzepte, IR-Variante ohne PV

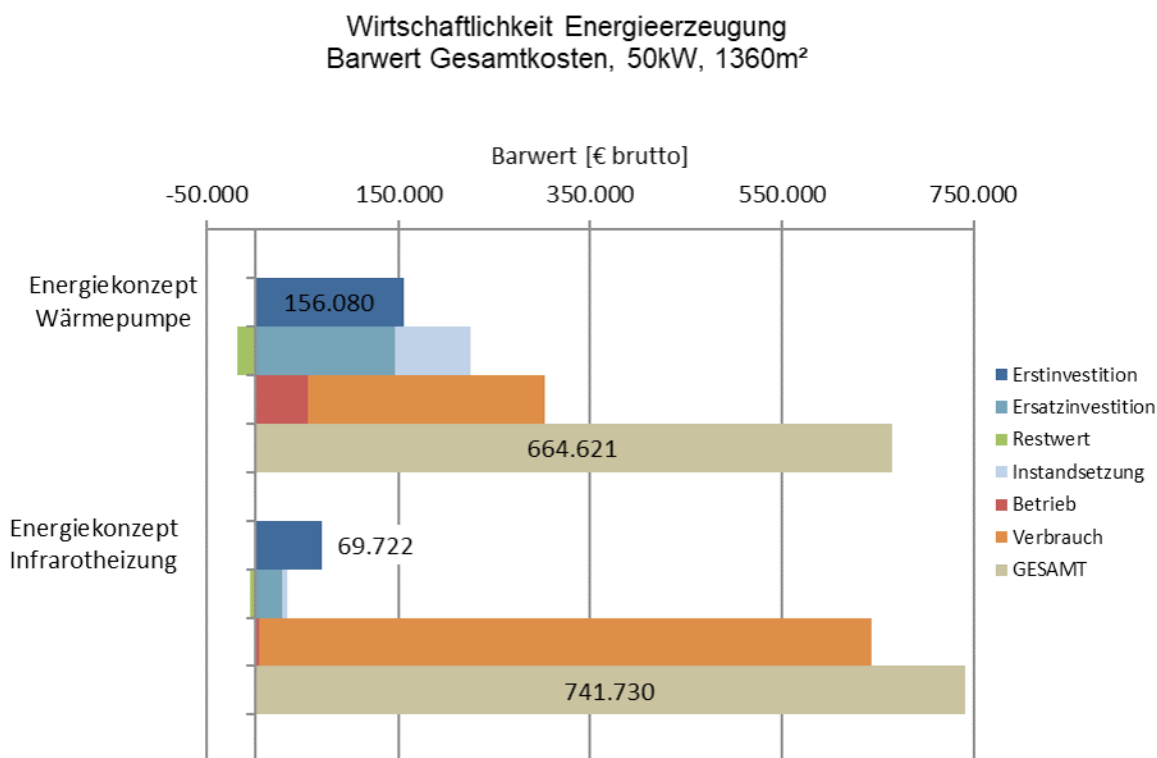


Abb. 142 Vergleich Wirtschaftlichkeit K76 WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante ohne PV ⁷⁷

Abb. 142 auf S. 172 zeigt den wirtschaftlichen Vergleich der beiden Wärmeerzeugungsvarianten. Die Infrarotheizungsvariante wurde hier ohne PV-Anlage gerechnet. Die Variante Wärmepumpe generiert einerseits höhere Investitions-, Betriebs- und Instandsetzungskosten, dafür aber geringere Verbrauchskosten. Die Variante IR-Heizung ist in der Anfangsinvestition deutlich güns-

⁷⁷ [Heider et al., 2020, S. 175]

tiger als die Wärmepumpen-Variante. Die Verbrauchskosten sind jedoch bei der IR-Heizung ohne PV-Anlage deutlich höher. Insgesamt ergibt sich, dass eine IR-Heizung unter den hier angenommenen Rahmenbedingungen ohne PV-Anlage im gesamten Lebenszyklus deutlich teurer ist als ein vergleichbares Wärmepumpenkonzept.

6.2.3 Ökonomische Bewertung der Energiekonzepte, IR-Variante mit PV

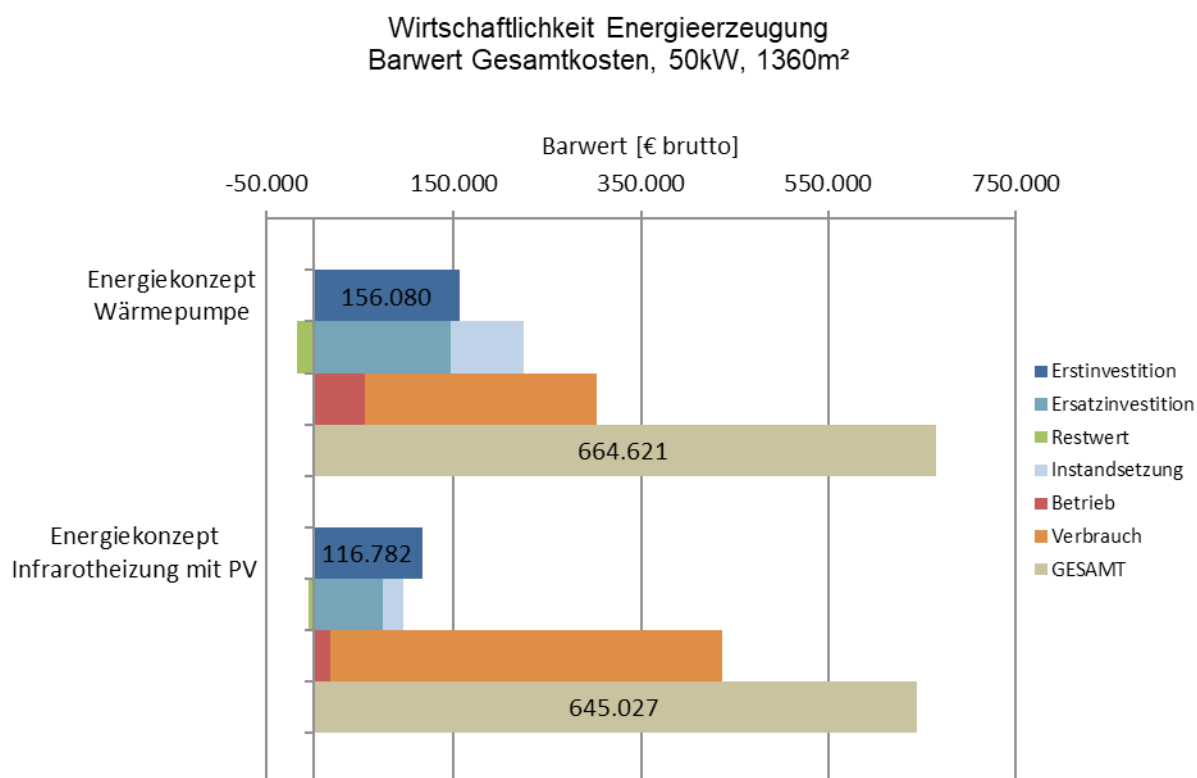


Abb. 143 Vergleich Wirtschaftlichkeit K76 WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre , IR-Variante mit PV ⁷⁸

Abb. 143 auf S. 173 zeigt wieder den wirtschaftlichen Vergleich der beiden Wärmeerzeugungsvarianten. Diesmal wurde für die IR-Heizungsvariante das real im Projekt K76 gebaute Energiekonzept mit der Kombination aus IR-Heizung und Photovoltaikanlage berechnet. Die Anfangsinvestitionskosten für die IR-Heizungsvariante steigen durch die Ergänzung der Photovoltaikanlage, sind aber noch unter denen der WP-Variante, die Betriebskosten reduzieren sich jedoch deutlich. Insgesamt weist unter diesen Randbedingungen die Variante Infrarotheizung mit Photovoltaik deutlich geringere Lebenszykluskosten auf.

Geringere Preissteigerungsraten würden sich dabei zugunsten des Wärmepumpensystems auswirken. Bei Annahme geringerer Raten wäre die Variante IR-Heizung nur im Vorteil, wenn ein höherer Anteil oder die vollen Differenzkosten zur WP-Variante in den Ausbau der Photovoltaikanlage investiert würden.

78 [Heider et al., 2020, S. 175]

6.2.4 Ökonomische Bewertung Variante 600 m² / 20kW

In einer zweiten Berechnung wurde die Wirtschaftlichkeit für ein Gebäude mit geringerer Fläche und Heizlast untersucht, da vermutet wurde, dass die Wirtschaftlichkeit von IR-PV-Systemen bei kleinen Gebäuden gegenüber WP-Systemen zunimmt. Dabei liegen den Modellen die gleichen Randbedingungen zu Grunde wie in der vorhergehenden Berechnung, lediglich die Investitionskosten sind auf die entsprechende Bezugsgröße angepasst. Folgende Parameter wurden für die Berechnung gewählt:

Allgemeine Faktoren		Preissteigerungsfaktoren	
Bezugsfläche [m ²]	600 m ²	Instandsetzungszahlungen	4,0%
Zinsfaktor	4,0%	betriebsgebundene Zahlungen	4,0%
Betrachtungszeitraum	50 Jahre	verbrauchsgebundene Zahlungen	3,0%

Tabelle 43 Allgemeine Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung, Variante 20 kW

Positionen Variante IR-Heizung 20 kW	Investition	Nutzungsdauer (Tn, a)	Aufwand für			Kosten pro Stunde (€/h)
			Instandhaltung (fK, %)	Aufwand für Wartung (%)	Aufwand für Bedienung (h/a)	
Heizen - Elektrostrahlungsheizung	24.000 €	50	0,0	0,0	0	50
Warmwasser - Durchlauferhitzer	3.121 €	15	1,0	1,0	0	50
Warmwasser - Boiler	600 €	20	2,0	1,0	0	50
Stromerzeugung - PV (ca. 14,5 kWp)	18.824 €	25	0,7	0,6	0	50

Tabelle 44 Annahmen zum Energiekonzept IR-Heizung, Variante 20 kW

Positionen Variante Wärmepumpe 20 kW	Investition	Nutzungsdauer (Tn, a)	Aufwand für			Kosten pro Stunde (€/h)
			Instandhaltung (fK, %)	Aufwand für Wartung (%)	Aufwand für Bedienung (h/a)	
Heizen + Warmwasser Wärmepumpe (Luft-Wasser)	21.238 €	18	1,0	1,5	5	50
Heizen - Ausdehnungsgefäß	228 €	15	1,0	1,0	0	50
Heizen - Umwälzpumpe	563 €	10	2,0	1,0	0	50
Heizen - Wärmedämmung Rohrleitungen	2.774 €	25	1,0	0,0	0	50
Heizen - Rohrleitungen	3.908 €	40	1,0	0,0	0	50
Heizen - Pufferspeicher	3.522 €	20	1,0	1,0	0	50
Heizen - Fußbodenheizung	27.865 €	50	1,0	0,0	0	50
Warmwasser - Warmwasserspeicher	2.382 €	20	1,0	1,0	0	50
Warmwasser - Rohrleitungen	2.345 €	30	2,0	0,0	0	50
Warmwasser - Dämmung Rohrleitungen	2.182 €	20	1,0	0,0	0	50
Warmwasser - Zirkulationspumpe	0 €	10	2,0	1,0	0	50
Haustechnikraum (10m ² ; 1000€/m ²)	10.000 €	50	1,0	1,0	0	50

Tabelle 45 Annahmen zum Energiekonzept Wärmepumpe, Variante 20 kW

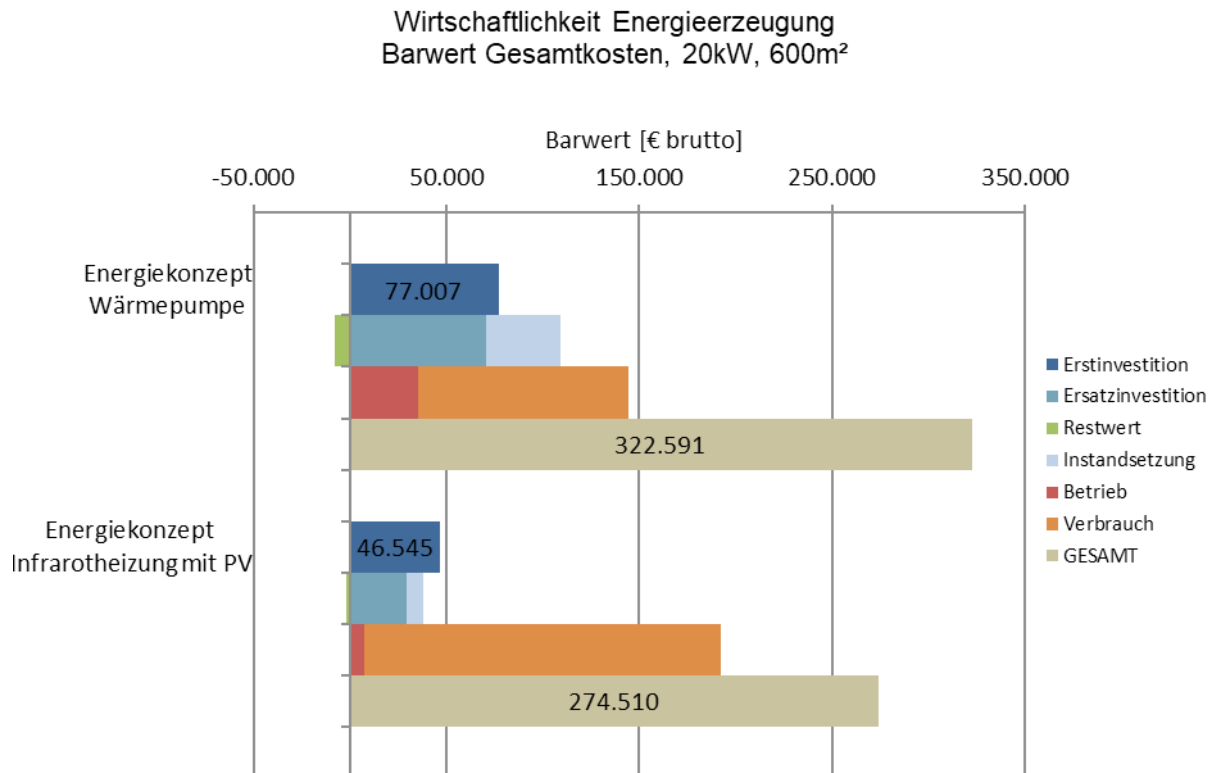


Abb. 144 Vergleich Wirtschaftlichkeit 600 m² WHG WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante mit PV ⁷⁹

Die Variante IR-Heizung in Kombination mit einer PV-Anlage stellt sich über den gesamten Lebenszyklus wieder deutlich wirtschaftlicher dar als die Variante Wärmepumpe. Lag die Differenz im Barwert zwischen Wärmepumpe und IR-Heizung bei der Untersuchung der 50 kW-Variante noch bei nur 3 %, steigt nun die Differenz im Barwert bei der 20 kW-Variante zu Gunsten der IR-Heizung auf 15 % an. Der Vergleich der beiden Varianten lässt darauf schließen, dass sich ein Infrarotkonzept umso wirtschaftlicher darstellt, je kleiner und besser gedämmt das Gebäude bzw. je geringer der Wärmeumsatz ist.

6.2.5 Fazit ökonomische Bewertung über 50 Jahre

So lässt sich auch die zweite Leitfrage beantworten. Die Lebenszykluskosten über 50 Jahre können für ein Infrarot-PV-System mit dezentraler Warmwassererzeugung (abhängig von Gebäudegröße, Dämmqualität und Anlagenpreis) im Vergleich zu einem Luft-Wärmepumpensystem mit zentraler Warmwassererzeugung deutlich günstiger sein.

Die Wirtschaftlichkeit der Variante IR-Heizung wird zum einen durch die geringen Anschaffungskosten der IR-Heizung ermöglicht. Zum anderen hilft der von der Photovoltaikanlage produzierte Strom, die Betriebskosten der IR-Heizung zu senken und so die Wirtschaftlichkeit auch im Lebenszyklus zu verbessern. Der nicht für die Heizung benötigte Strom kann selbst genutzt oder ins öffentliche Netz eingespeist und vermarktet werden. Im Sommer kann der Strombedarf für die Warmwassererzeugung, bei Einsatz einer intelligenten Regelung, fast vollständig durch den eigenproduzierten Strom gedeckt werden.

Die Berechnung des „kleineren“ Gebäudes (600 m² / 20 kW) zeigt, dass die wirtschaftlichen Vorteile für das IR-PV-System zunehmen, je geringer der Wärmeumsatz ist. Diese Thematik wird in Kapitel 7.1.4 eingehender untersucht.

⁷⁹ [Heider et al., 2020, S. 176]

Anzumerken ist, dass die Potentiale für den PV-Zubau in beiden Varianten (50 kW / 20 kW) nicht voll ausgeschöpft wurden. Nach der Überlegung, dass die kompletten Differenzkosten zwischen Wärmepumpenvariante und IR-Heizungsvariante in eine PV-Anlage investiert werden sollten, könnte die PV-Anlage in beiden Varianten deutlich größer dimensioniert werden. Mit einer größeren PV-Anlage würden sich die wirtschaftlichen Vorteile der IR-Heizungsvarianten in beiden Fällen weiter vergrößern. Welche Auswirkungen ein parallel erfolgender Zubau von Photovoltaik bei der Wärmepumpenvariante hätte, wird in Kapitel 7.1.5 beschrieben.

Auch in der vorliegenden ökonomischen Berechnung betrug die Eigenverbrauchsrate des selbst-erzeugten Stroms wieder etwa 40 %. Mit der bereits in Kapitel 5.1.5 angestellten Überlegung, den Eigenverbrauch mit Hilfe einer optimierten Regelung zu erhöhen, würden sich auch die wirtschaftlichen Vorteile der IR-PV-Variante weiter erhöhen.

7 Optimierung der Rahmenbedingungen für IR-Heizungen in der Planung

7.1 Vorteilhaftes Rahmenbedingungen für IR-Heizungen

Die Ergebnisse der in Kapitel 6.1 und 6.2 durchgeführten ökologischen und ökonomischen Berechnungen gelten für das Pilotprojekt K76 mit seinen spezifischen Rahmenbedingungen und bestimmten Annahmen. Es gibt jedoch eine Vielzahl von Parametern, die sich auf die ökologische und ökonomische Bewertung eines Gebäudes auswirken können:

- Investitionskosten WP-System
- Investitionskosten IR-Heizung
- Investitionskosten PV- Anlage / Speicher
- Effizienz der PV-Anlage
- Energiekosten Strombezug
- Einspeisevergütung PV- Strom
- Eigenverbrauchsanteil PV- Strom
- Gebäudestandort
- Größe der beheizten Fläche
- Thermische Qualität der Gebäudehülle
- Heizlast des Gebäudes
- Nutzung des Gebäudes (Lastprofil)
- Nutzungshäufigkeit des Gebäudes
- Nutzungszeiten des Gebäudes
- Erwartete Nutzungsdauer des Gebäudes
- Größe der PV-Anlage
- Effizienz der Wärmepumpe
- Effizienz der IR-Heizung
- CO₂-Kennwert Haustechnik Herstellung/Instandhaltung
- CO₂ Kennwert Betrieb
- CO₂ Gutschrift PV-Strom
- Betrachtungszeitraum
- Zinssätze / Preissteigerungsraten

7.1.1 Parameterstudie veränderte Rahmenbedingung

Im Folgenden wird anhand von Parameterstudien untersucht, wie sich die Änderung einzelner ausgewählter Parameter auf die Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz auswirken. Ausgangsbasis bildet hierbei das untersuchte Gebäude K76 mit den dort angenommenen Parametern.

Änderung des Endenergiebedarfs

In Abb. 145 und Abb. 146 wird aufgezeigt, wie sich eine Änderung von $\pm 25\%$ des Endenergiebedarfs gegenüber dem bisherigen Endenergiebedarf des Gebäudes K76 auf die ökonomische und ökologische Bilanz auswirken würde. Dies bildet annähernd unterschiedliche Qualitäten der thermischen Gebäudehülle ab oder auch ein günstiges bzw. ungünstiges Nutzerverhalten.

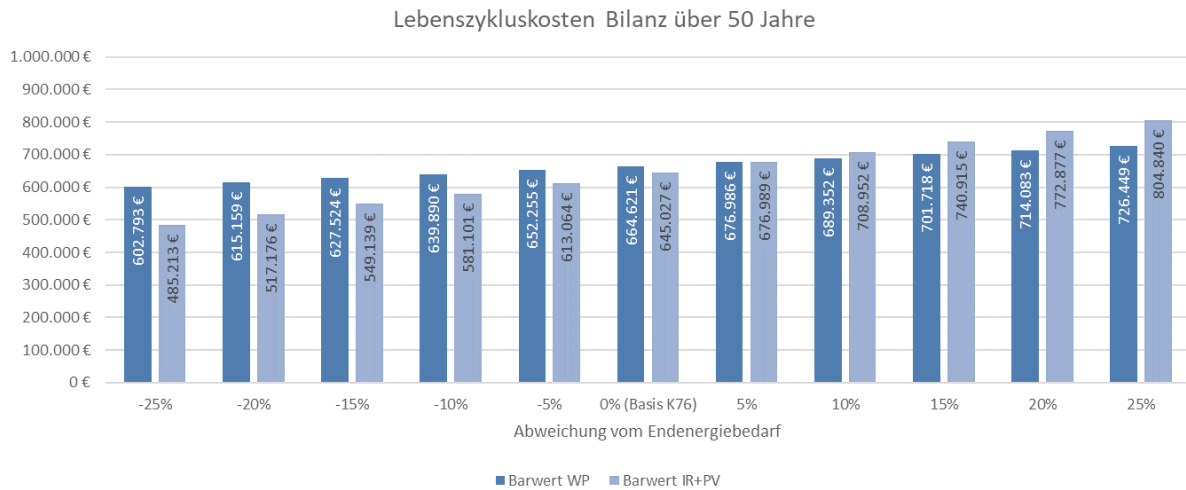


Abb. 145 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Abweichung vom Endenergiebedarf

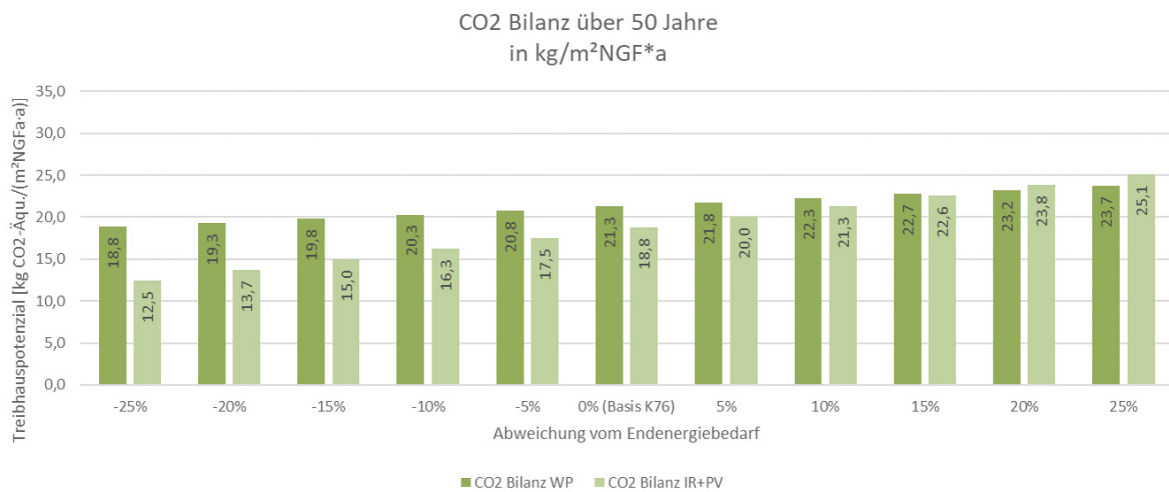


Abb. 146 Änderungen der CO2 Bilanz bei Abweichung vom Endenergiebedarf

Änderung der Effizienz der Wärmepumpe

Abb. 147 und Abb. 148 stellen dar, wie sich eine Änderung der Effizienz einer möglichen Luft-/Wasser-Wärmepumpe gegenüber der bisher angenommenen Effizienz auf die ökonomische und ökologische Bilanz auswirken würde.

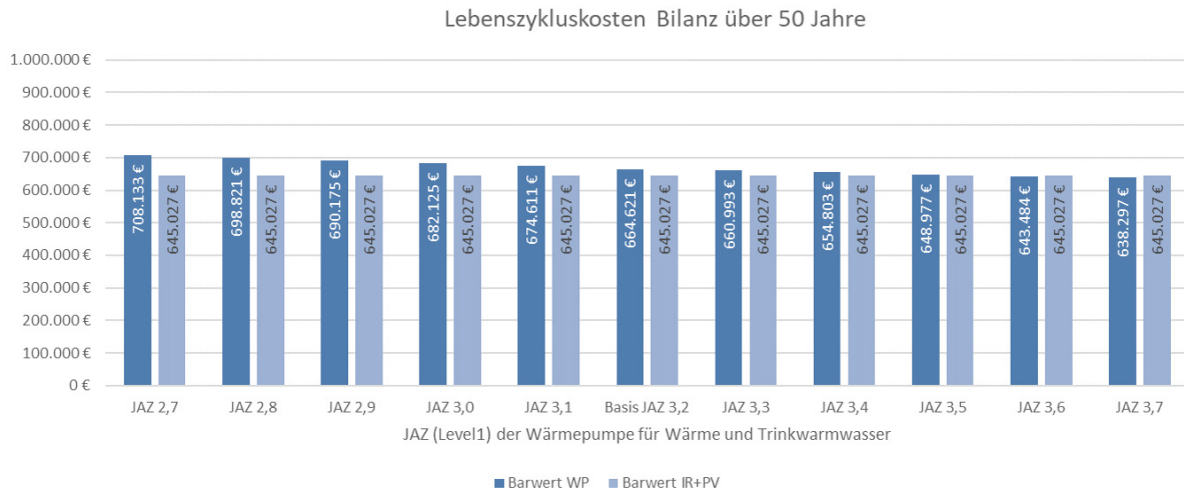


Abb. 147 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Änderung der Effizienz der WP

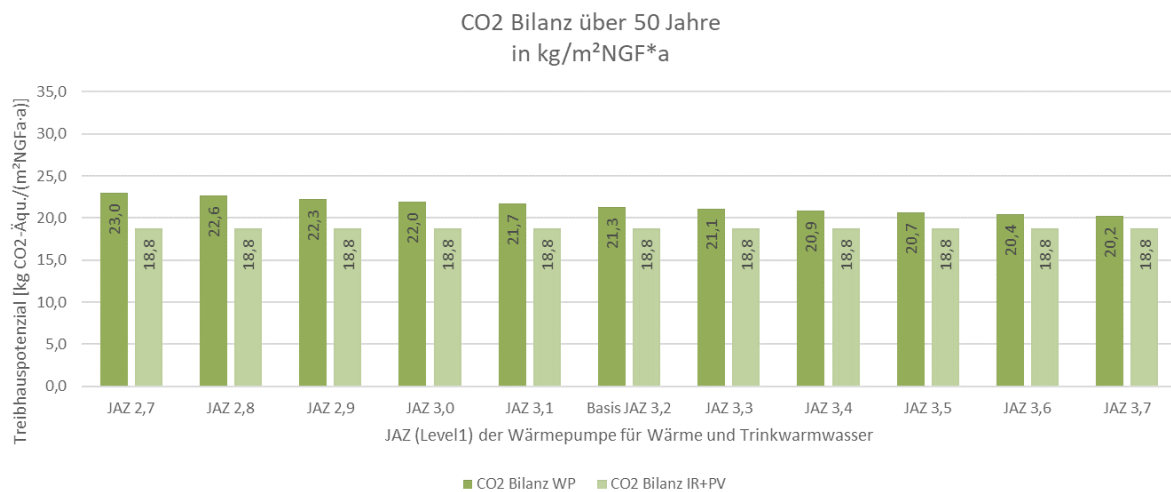


Abb. 148 Änderungen der CO2 Bilanz bei Änderung der Effizienz der WP

Änderung der Energiepreissteigerungsrate

Abb. 149 zeigt, wie sich eine Änderung der Energiepreissteigerungsrate auf die ökonomische Bilanz auswirken würde. Die Änderung hat keinen Einfluss auf die ökologische Bilanz.

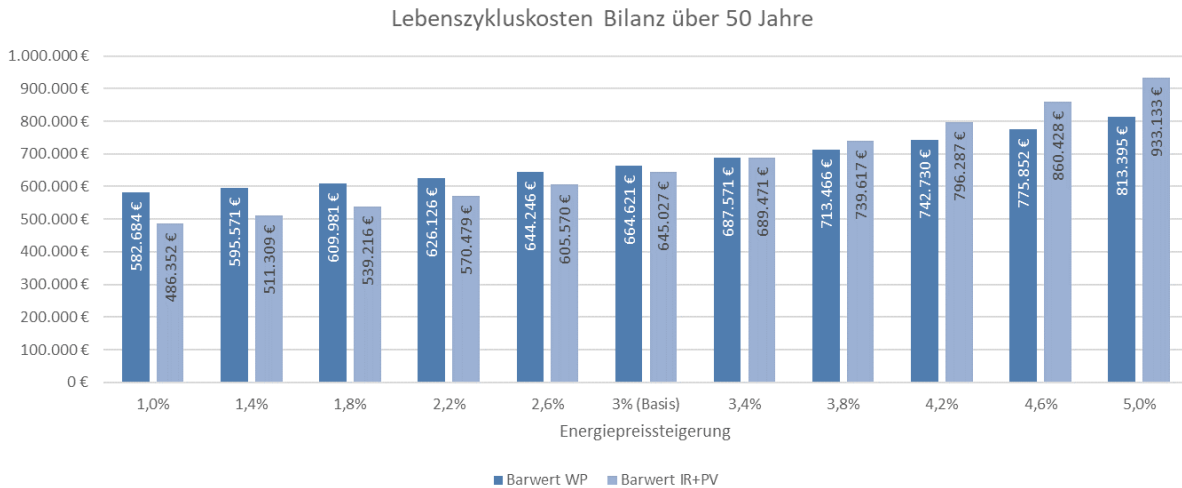


Abb. 149 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommenen Energiepreissteigerungsraten

Änderung des Eigenverbrauchsanteils am erzeugten PV- Strom

Abb. 150 zeigt, wie sich eine Änderung des Eigenverbrauchs am selbsterzeugten PV-Strom bei der IR-Heizung auf die ökonomische Bilanz auswirken würde. Da der eigengenutzte Strom in der Ökobilanz gleich gewertet wird wie der eingespeiste, hat die Änderung keinen Einfluss auf die ökologische Bilanz.

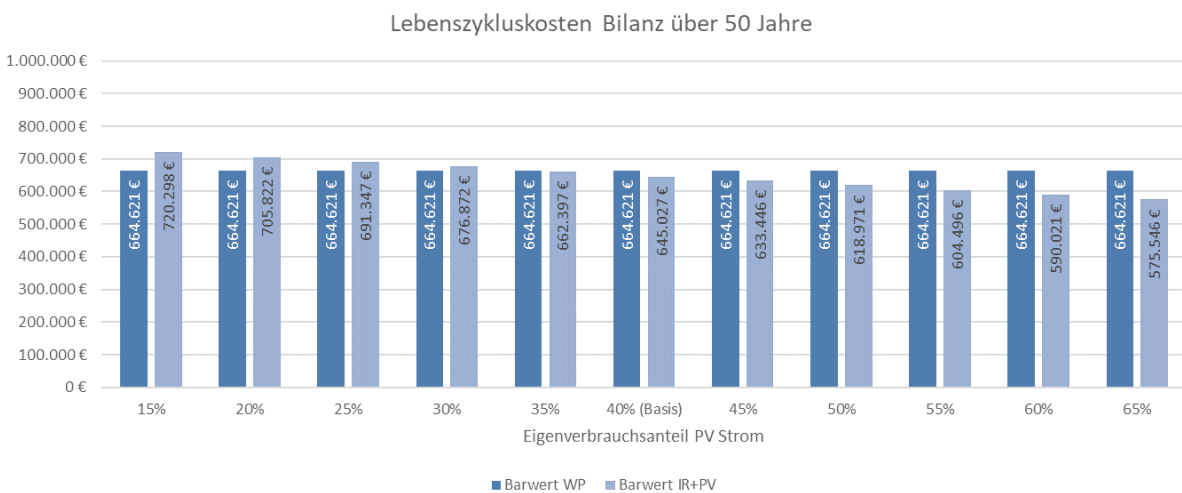


Abb. 150 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommenen Eigenverbrauchsraten des selbst erzeugten PV- Stroms

Änderung der Einspeisevergütung für PV-Strom

Abb. 151 zeigt, wie sich eine Änderung der Einspeisevergütung für den selbst erzeugten PV-Strom auf die ökonomische Bilanz auswirken würde. Die Änderung hat keinen Einfluss auf die ökologische Bilanz.

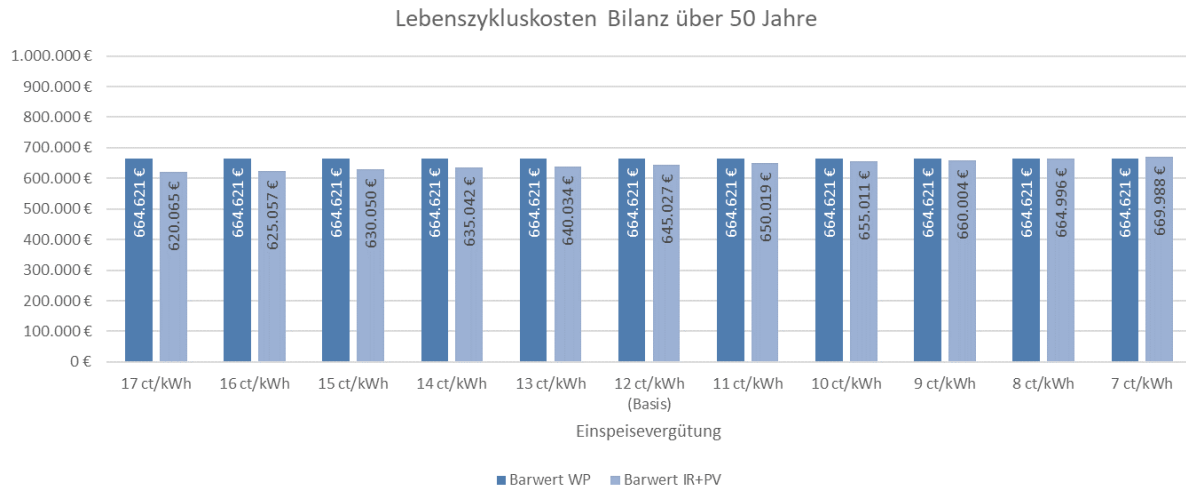


Abb. 151 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommener Einspeisevergütung

Änderungen durch Zubau von Photovoltaik in Abhängigkeit des Anteils der Differenzkosten von WP-System zu IR-Heizung

Abb. 152 und Abb. 153 zeigen die Auswirkungen von unterschiedlich großem Zubau von Photovoltaik bei der IR-Heizungsvariante in Abhängigkeit des Anteils der Differenzkosten zwischen IR-Heizungssystem und Wärmepumpensystem auf die ökonomische und ökologische Bilanz. Im realisierten Fall (Basis) wurden 56 % der eingesparten Kosten in eine PV-Anlage investiert.

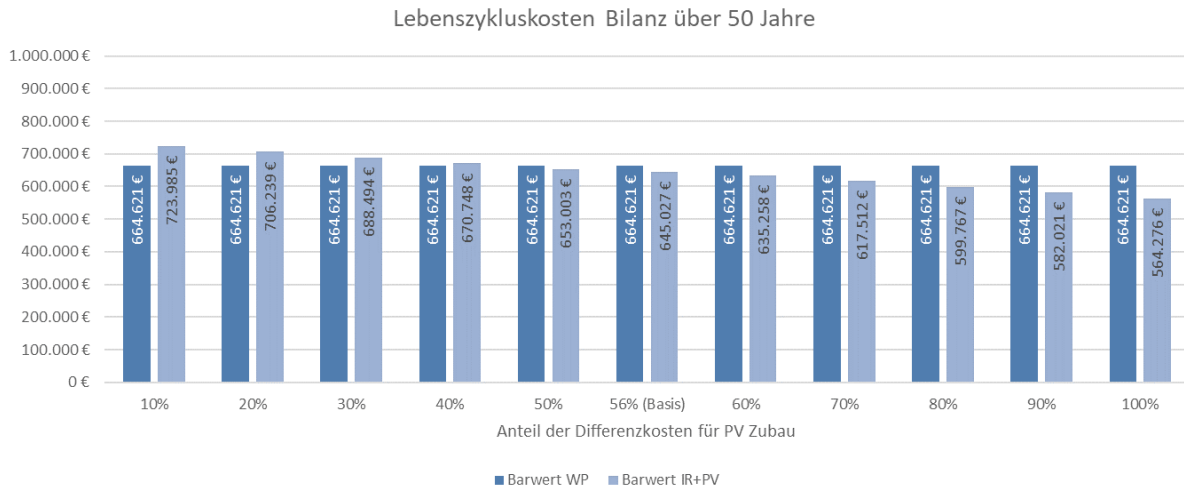


Abb. 152 Änderungen der Wirtschaftlichkeit durch unterschiedlich hohen Zubau von Photovoltaik in Abhängigkeit des Anteils an den Differenzkosten

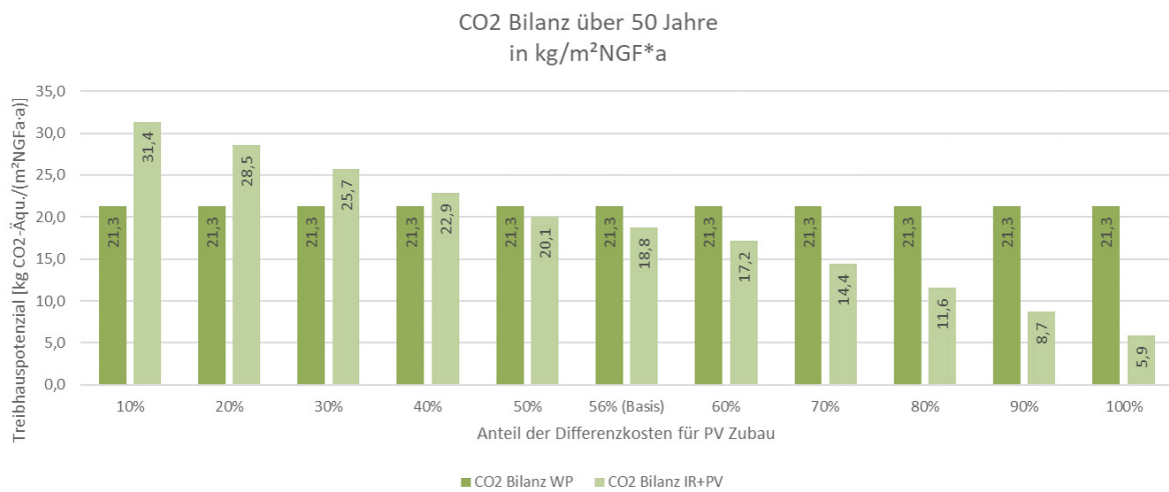


Abb. 153 Änderungen der CO2 Bilanz durch unterschiedlich hohen Zubau von Photovoltaik in Abhängigkeit des Anteils an den Differenzkosten

7.1.2 Bewertung der Parameter nach wirtschaftlichen Auswirkungen

In Tabelle 46 werden die maximalen Differenzen der Barwerte bei Änderung eines Parameters für die beiden Systeme IR-Heizung und Wärmepumpe zusammenfassend dargestellt.

	WP-System	IR-System
Energiepreissteigerung	231.449 €	448.208 €
Endenergiebedarf	123.936 €	320.350 €
Zubau PV in Abhängigkeit der Differenzkosten	0 €	154.815 €
Eigenverbrauchsrate	0 €	145.195 €
Effizienzänderung Wärmepumpe	69.994 €	0 €
Einspeisevergütung	0 €	49.924 €

Tabelle 46 Wirtschaftliche Auswirkungen der Parameteränderungen

Wie Tabelle 46 aufzeigt, haben der Energiepreis und der Energiebedarf den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Systeme.

Zunächst scheint es so, als hätten der Zubau der Photovoltaik und die erreichte Eigenverbrauchsrate nur geringen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Bedenkt man jedoch, dass sich diese zwei Faktoren direkt auf eine Energiepreissteigerung auswirken und sogar eine Energiepreissenkung für die IR-Variante erwirken, wird klar, dass diese zwei Faktoren - neben dem Energiebedarf - die größten Stellschrauben sind, auf die Planer oder Bauherren aktiv Einfluss nehmen können. Je größer also die Differenz in den Anfangsinvestitionskosten zwischen Wärmepumpensystem und IR-Heizungssystem, desto mehr PV kann zugebaut werden. Je besser die Regelung der IR-Heizung auf einen hohen Eigenverbrauch ausgelegt ist, desto höher die Eigenverbrauchsrate.

Eine mögliche Variation der Effizienz der Wärmepumpe oder die Änderung der Einspeisevergütung auf produzierten PV-Strom haben nur geringen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Systeme.

7.1.3 Bewertung der Parameter nach ökologischen Auswirkungen

In Tabelle 47 werden die maximalen Differenzen des CO₂ Ausstoßes bei Änderung eines Parameters für die beiden Systeme IR-Heizung und Wärmepumpe dargestellt.

	WP-System	IR-System
Zubau PV in Abhängigkeit der Differenzkosten	0,0 kg CO ₂ / m ² a	24,7 kg CO ₂ / m ² a
Endenergiebedarf	4,9 kg CO ₂ / m ² a	12,6 kg CO ₂ / m ² a
Effizienzänderung Wärmepumpe	2,8 kg CO ₂ / m ² a	0,0 kg CO ₂ / m ² a

Tabelle 47 Ökologische Auswirkungen der Parameteränderungen

Aus ökologischer Sicht ist der Zubau der Photovoltaik der entscheidende Faktor. Der Energiebedarf hat einen geringeren Einfluss. Die Variation der Effizienz der Wärmepumpe hat einen sehr geringen Einfluss auf die Ökobilanz.

7.1.4 Auswirkungen der Änderungen der Gebäudegröße

In der folgenden Parameteruntersuchung wird die Gebäudegröße geändert und die Differenzkosten zwischen Wärmepumpe und IR-Heizung komplett in eine Photovoltaikanlage investiert. Damit ändern sich gleich mehrere andere Einflussfaktoren:

- Die beheizte Fläche wird kleiner und damit der Energiebedarf geringer.
- Die Anfangsinvestitionskosten der Wärmeerzeugungssysteme verändern sich. Bei der Wärmepumpe wird der Preis pro kW installierter Heizleistung höher, je geringer die Heizleistung ist. Bei der IR-Heizung bleibt der Preis / kW gleich.
- Durch die steigenden Differenzkosten kann in kleinen Gebäuden im Verhältnis zur installierten Heizleistung bei der IR-Heizung mehr Photovoltaik zugebaut werden.
- Wird die installierte PV-Anlage im Verhältnis zur installierten Heizleistung größer, steigt der Eigenversorgungsgrad mit PV-Strom und der aus dem Netz zu beziehende und zu bezahlende Endenergiebedarf sinkt. Im Gegenzug sinkt der Eigenverbrauchsgrad am gesamt erzeugten PV- Strom und es wird mehr Strom ins Netz eingespeist.
- Der Preis pro kWp installierter Photovoltaik-Anlage steigt jedoch, je kleiner die Anlage ist.

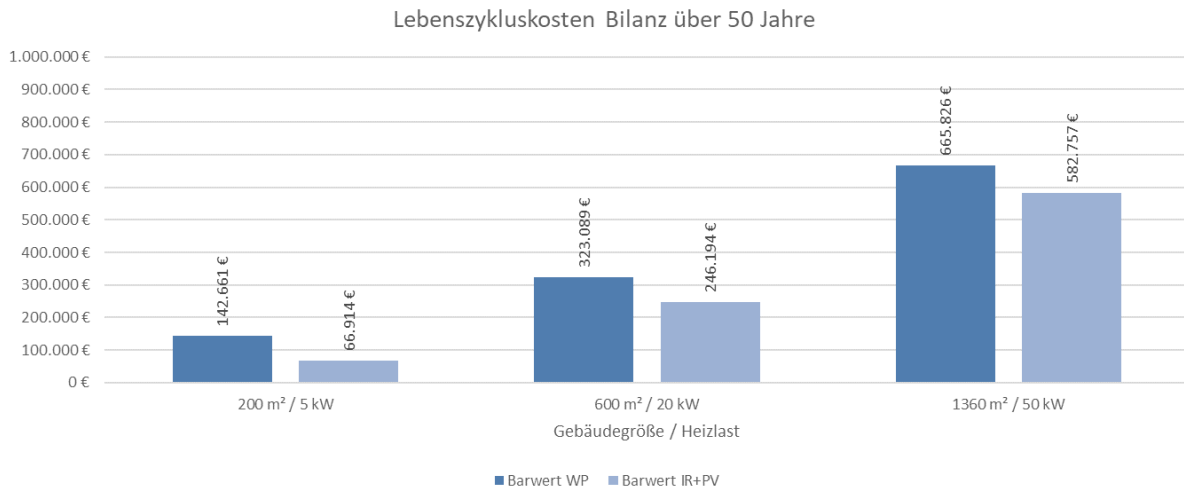


Abb. 154 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Verringerung der Gebäudegröße

	200 m² / 5 kW	600 m² / 20 kW	1360 m² / 50 kW
Barwert Wärmepumpe	142.661 €	323.089 €	665.826 €
Barwert IR-Heizung	66.914 €	246.194 €	582.757 €
Abweichung IR	-53%	-24%	-12%

Tabelle 48 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Verringerung der Gebäudegröße

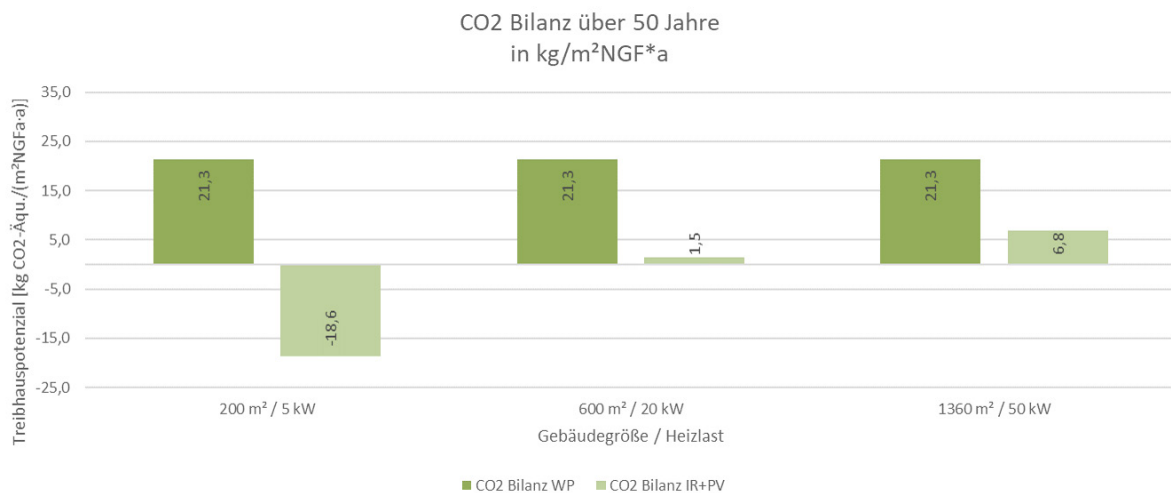


Abb. 155 Änderungen der CO2 Bilanz bei Verringerung der Gebäudegröße

	200 m² / 5 kW	600 m² / 20 kW	1360 m² / 50 kW
Wärmepumpe	21,3 kg CO2/m²a	21,3 kg CO2/m²a	21,3 kg CO2/m²a
IR-Heizung + PV	-18,6 kg CO2/m²a	1,5 kg CO2/m²a	6,8 kg CO2/m²a

Tabelle 49 Änderungen der CO2 Bilanz bei Verringerung der Gebäudegröße

7.1.5 Zubau von Photovoltaik auch bei der Wärmepumpenvariante

In der folgenden Parameteruntersuchung wird abgebildet, wie sich ein Zubau von Photovoltaik bei der Wärmepumpenvariante auf die ökologische und ökonomische Bilanz auswirken würde. Da mit einem Zubau von Photovoltaik bei der Wärmepumpenvariante auch immer die Differenzkosten zur IR-Variante steigen würden, wird der IR-Variante Photovoltaik in gleicher Größe zugebaut. In der Basisvariante wurde der IR-Heizungsvariante bereits eine PV-Anlage in Abhängigkeit der Differenzkosten zugebaut.

Abb. 156 und Abb. 157 zeigen, dass ein Zubau von Photovoltaik bei der Wärmepumpenvariante nur geringe Unterschiede in der ökonomischen und ökologischen Bilanz bewirken, da durch den Zubau die Differenzkosten zur IR-Heizungsvariante steigen und als Konsequenz auch bei der IR-Heizungsvariante Photovoltaik in gleicher Größe zugebaut werden kann.

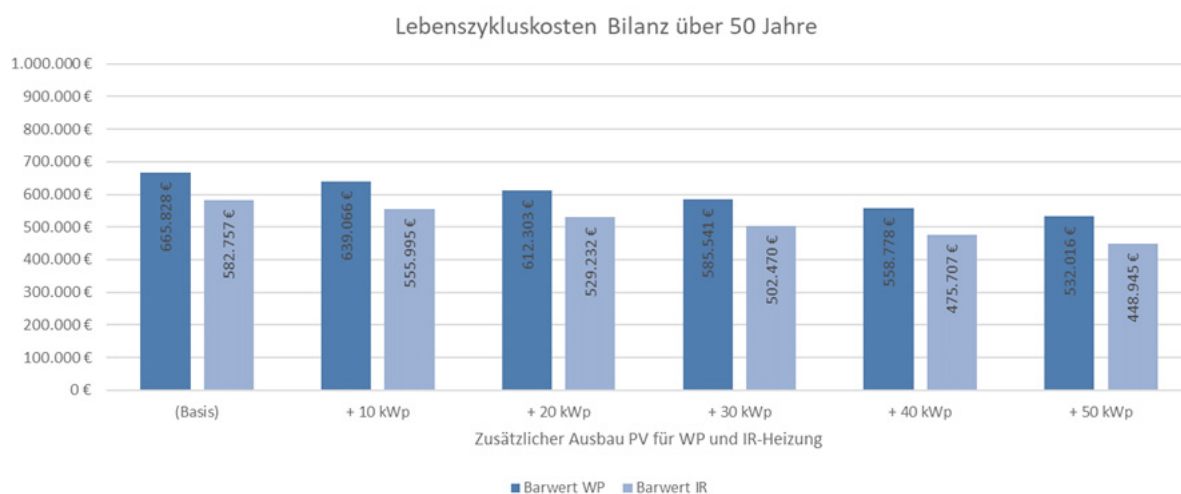


Abb. 156 Änderung der Wirtschaftlichkeit bei gleichmäßigem Zubau von Photovoltaik

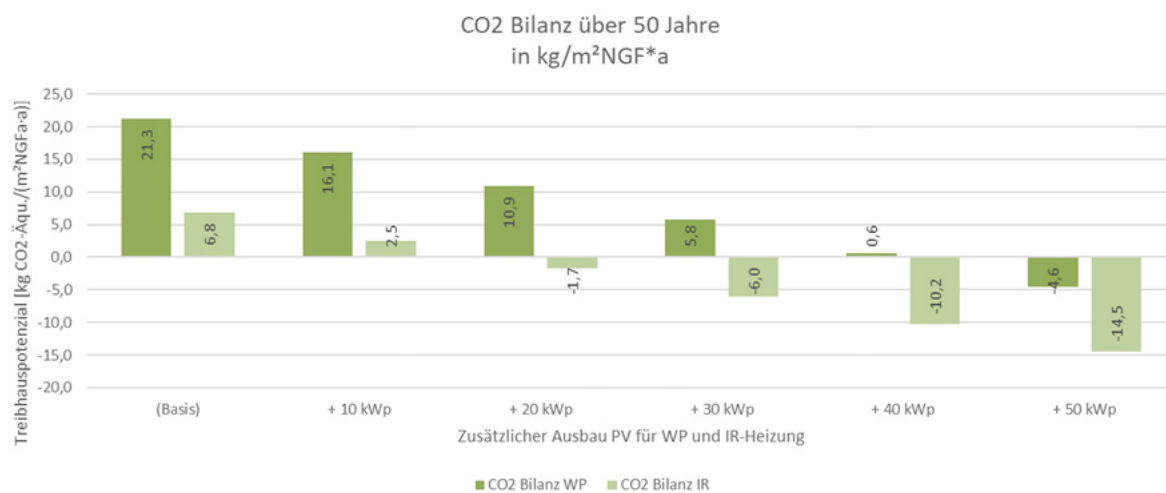


Abb. 157 Änderung der ökologischen Bilanz bei gleichmäßigem Zubau von Photovoltaik

7.1.6 Fazit Rahmenbedingungen für IR-Heizungen

Die ökologischen und ökonomischen Vorteile eines IR-Systems nehmen zu, je kleiner und besser gedämmt ein Gebäude, je geringer also der Energieumsatz ist. Als Einsatzgrenze hat sich abgezeichnet, dass in sehr gut gedämmten Wohngebäuden ($< 30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ Jahresheizwärmebedarf) bis etwa 1.500 m^2 - 2.000 m^2 beheizter Wohnfläche, eine IR-Heizung - in Kombination mit einer Photovoltaikanlage - Vorteile in ökologischer und ökonomischer Sicht aufweisen kann. Dies ist jedoch immer von den genauen projektspezifischen Rahmenbedingungen abhängig. Zu beachten ist auch, dass es bei größeren Gebäuden unter Umständen nicht mehr möglich ist, die wirtschaftlich sinnvolle PV-Anlagengröße auf den Hüllflächen des Hauses an effizienten Positionen anzubringen.

Die größten Stellschrauben zur Optimierung der IR-Variante, auf die Planer oder Bauherren bei der Planung aktiv Einfluss nehmen können, sind - neben dem Energiebedarf des Gebäudes - der Zubau der Photovoltaik und eine Optimierung der Eigenverbrauchsrate. Diese zwei Faktoren wirken sich direkt auf die Energiepreissteigerung aus und können im optimalen Fall sogar eine Energiepreissenkung für die IR-Variante erwirken. **Bei Einsatz von IR-Heizungen zur Gebäudebeheizung sollte daher die Kombination mit einer ausreichend großen PV-Anlage Pflicht sein!**

Eine mögliche Effizienzsteigerung der Wärmepumpe hat hingegen nur einen geringen Einfluss auf den ökologischen und ökonomischen Vergleich der beiden Systeme.

7.2 Optimierung eines IR-Heizsystems durch PV, Regelung und Speicher

In Kapitel 7.1.2 wurde aufgeführt, dass die größten Stellschrauben zur Optimierung eines IR-PV-Systems, auf die Planer oder Bauherren bei der Planung aktiv Einfluss nehmen können - neben dem Energiebedarf des Gebäudes - der Zubau von Photovoltaik und eine Optimierung der Eigenverbrauchsrate sind. Im nachfolgenden Kapitel soll nun aufgezeigt werden, welche Möglichkeiten es zur Optimierung gibt.

7.2.1 Optimierung mithilfe von Photovoltaik

Üblicherweise werden nach VDI 2067 in einer wirtschaftlichen Vergleichsrechnung verschiedener Haustechnikvarianten immer nur die Anfangsinvestitionskosten der Wärmeerzeuger und deren, je nach Effizienz anfallenden Betriebskosten miteinander verglichen. Es wird nicht davon ausgegangen, dass alle Varianten die gleichen Anfangskosten haben. Ist ein System in den Anfangsinvestitionskosten günstiger als ein anderes, wird das eingesparte Geld so behandelt, als würde es auf dem Finanzmarkt investiert und entsprechend verzinst. Dies bringt der Variante mit geringeren Anfangsinvestitionskosten so nur geringe Vorteile.

Gibt es nun jedoch die Möglichkeit, den Differenzbetrag zwischen teurer und günstiger Haustechnikvariante gewinnbringend zu investieren, z. B. in eine Photovoltaikanlage, ist es sinnvoll und zulässig, die Varianten bei den Anfangsinvestitionskosten gleichzusetzen und den Differenzbetrag zu nutzen, um bei der günstigen Variante das frei werdende Kapital in eine Photovoltaikanlage zu investieren.

Die Berechnungen haben dargelegt, dass Photovoltaikanlagen für IR-Heizungssysteme ein elementarer Bestandteil sein müssen. Analog dazu, wie ein Wärmepumpensystem als Kombination aus Wärmeerzeuger und Umweltwärmequelle (Luft, Wasser, Erdreich) angesetzt wird (s. Abb. 158), sollte ein IR-Heizungssystem als Kombination aus Wärmeerzeuger und Umweltenergiequelle (z.B. Strom aus PV-Anlage) gesehen werden (s. Abb. 159).

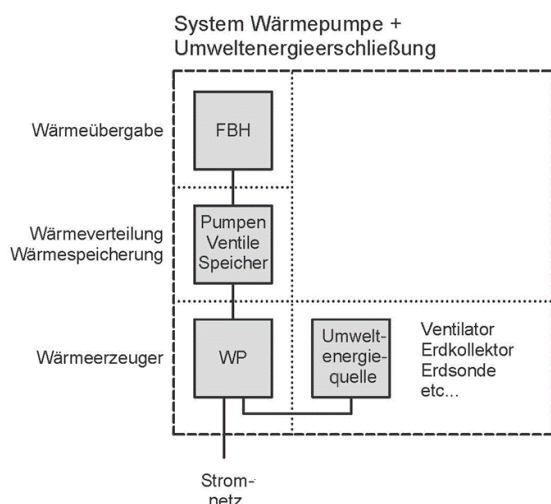


Abb. 158 System Wärmepumpe

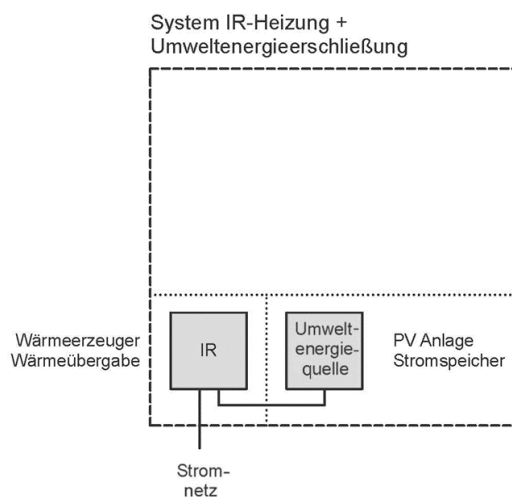


Abb. 159 System IR-PV Heizung

Die Verbindung mit einer Photovoltaikanlage steigert den ökonomischen Vorteil der IR-Heizung. Es erhöht zwar die Investitionskosten, dafür senken aber die Ersparnisse bei eigenverbrauchtem Strom und die Erlöse aus der Einspeisung die Betriebskosten. Dies macht das Gesamtsystem wirtschaftlicher.

Aus ökologischen Gesichtspunkten ist eine Kombination mit einer PV-Anlage zwingend notwendig. Der höhere Energieverbrauch des Wärmeerzeugers beim IR-Heizungssystem lässt sich nur durch einen höheren Anteil an gewonnener Umweltenergie rechtfertigen.

Es stellt sich nun die Frage, wie das ergänzende PV-System in Bezug zur IR-Heizung dimensioniert werden muss. Ein Beispiel hierzu: Während die Wärmepumpe bei einem beispielhaften Einfamilienhaus (200 m², Heizwärmebedarf 20 kWh/m²) von den 4.000 kWh im Jahr benötigter Wärme ungefähr 2.700 kWh aus der Umwelt bezieht, produziert die IR-Heizung in Kombination mit einer 10 kWp PV-Anlage zu gleichen oder sogar geringeren Investitionskosten etwa 10.000 kWh Strom.

Es gibt grundsätzlich mehrere Möglichkeiten, wie die Größe der PV-Anlage bei einer IR-Heizung bestimmt werden könnte:

- Über die Jahresbilanz des CO₂ Ausstoßes im Verhältnis zu einem Wärmepumpen-System:
Eine Möglichkeit wäre, die PV-Anlage so zu dimensionieren, dass das IR-Heizungssystem in der Jahresbilanz auf Heizungsebene die gleiche CO₂ Bilanz aufweist wie ein vergleichbares Wärmepumpensystem.
- Über die Jahresbilanz des CO₂ Ausstoßes der IR-Heizung:
Eine zweite Möglichkeit wäre, die PV-Anlage so zu dimensionieren, dass die PV-Anlage in der Jahresbilanz auf Heizungsebene die gleiche Menge CO₂ durch regenerativ erzeugten Strom einspart wie durch das IR-Heizungssystem ausgestoßen wird.
- Über den Anfangsinvestitionspreis:
Nutzt man die Differenzkosten zwischen IR-Heizungssystem und Wärmepumpensystem und investiert dieses Geld in den Ausbau einer PV-Anlage, ergibt sich eine bestimmte maximal mögliche PV-Anlagengröße.
- Über den sich ergebenden Reststrombedarf über die Heizperiode im Vergleich zu einem WP-System:
Eine weitere Möglichkeit ist, die PV-Anlage so zu dimensionieren, dass über die Heizperiode bei der IR-Heizungsvariante nur die gleiche Menge Strom aus dem Netz bezogen wird wie bei der Wärmepumpenvariante. Dabei dürfen jedoch die Gesamtsystemkosten nicht höher sein als bei der Wärmepumpenvariante ohne PV. Damit wäre gleichzeitig die Bedingung erfüllt, dass die IR-Heizungsvariante den gleichen Primärenergiebedarf aufweist wie die Wärmepumpenvariante.

Die ersten beiden Möglichkeiten sind am einfachsten zu erreichen, haben jedoch den Nachteil, dass nur die Jahresbilanz berücksichtigt wird. Hier kommt zum Tragen, dass eine PV-Anlage ihren Strom hauptsächlich im Sommer erzeugt, die Wärmepumpe ihre Umweltenergie genau dann nutzt, wenn die Wärme gebraucht wird. Hier könnte der mehr erzeugte Strom dazu beitragen, die fossile Energieerzeugung im Sommer weitestgehend zu verdrängen. Sobald geeignete Speichersysteme zur Verfügung stehen, um Strom langfristig zu speichern, kann der Sommerstrom - mit entsprechenden Umwandlungsverlusten - für den Winter eingespeichert werden.

Solange diese Speicher jedoch noch nicht existieren, muss in der Heizperiode bei der IR-Variante mehr nicht regenerativ erzeugter Strom aus dem Netz bezogen werden.

Hier setzen Möglichkeiten drei und vier an. Ziel ist es, hier den Netzstrombezug durch die Nutzung von eigenerzeugtem PV-Strom über die Heizperiode auf das Niveau des Netzbezugs einer Wärmepumpe zu reduzieren. Somit wären die ökologischen Auswirkungen der IR-Heizungsvariante im Winter gleich wie bei einer Wärmepumpenvariante. Zusätzlich ergibt sich jedoch der Vorteil, dass im Sommer ein großer Stromüberschuss produziert wird, der flexibel genutzt werden kann. Dabei darf die gesamte Anfangsinvestitionssumme des IR-PV-Systems jedoch die Anfangsinvestitionskosten eines vergleichbaren Wärmepumpensystems nicht überschreiten.

7.2.2 Optimierung mithilfe einer optimierten Regelung

Erste Simulationen in „Polysun“ stellen dar, dass eine Reduzierung des Reststrombezugs auf das Niveau einer Wärmepumpe - bei kleinen, gut gedämmten Gebäuden mit einer wirtschaftlich vertretbaren PV-Anlagengröße und einer auf Eigenverbrauch optimierten Regelung der IR-Heizung - möglich wäre. Eine denkbare Regelstrategie wurde bereits in Kapitel 5.1.5 beschrieben. Hier besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf, um die Regelung in der Praxis zu testen und zu optimieren.

7.2.3 Optimierung mithilfe eines Stromspeichers

Der Einsatz von kleinen Batteriespeichern in Kombination mit IR-Heizungen und Photovoltaikanlage ist in Hinsicht auf eine höhere Eigenverbrauchsrate des PV-Stroms im Winter hingegen meist nicht sinnvoll. Mit einer entsprechenden Regelung wird der überwiegende Teil des im Winter produzierten Stroms ohnehin direkt für die Energieversorgung des Hauses genutzt. Im Sommer und in den Übergangszeiten kann ein Batteriespeicher jedoch helfen, die Eigenverbrauchsrate des Haushaltsstroms zu erhöhen. Sobald kostengünstige Speichersysteme verfügbar sind, die eine Speicherung größerer Energiemengen ermöglichen, wären diese für IR-Heizungssysteme eine optimale Ergänzung.

7.2.4 Mögliche Bilanzräume bei der Restenergiebezugsbetrachtung

Nutzt man die EnEV zur Bilanzierung, wäre es eine Möglichkeit, ein Gebäude ohne Trinkwarmwasser in den zwei Varianten IR-Heizung und Luft-WP zu bilanzieren und die PV-Anlage bei der IR-Heizung so anzusetzen, dass sich bei beiden Varianten der gleiche Primärenergiebedarf ergibt.

Zu klären ist jedoch noch, über welchen Bilanzraum man den Restenergiebezug aus dem Netz betrachtet:

- den Restenergiebezug der Heizung
- den Restenergiebezug von Heizung und Warmwasserbereitung
- den Restenergiebezug von Heizung, Warmwasserbereitung und Haushaltsstrom
- oder zusätzlich noch den Netzstrombezug, der aus eventueller Elektromobilität resultiert

Nimmt man den Gesamt-Bilanzraum an, reduziert sich die nötige PV-Anlagengröße bei der IR-Variante, um auf den gleichen Netzstrombezug zu kommen wie die WP-Variante, da die WP-Variante nur Strom verbraucht, die PV-Anlage der IR-Variante aber im Sommer den Strombedarf für Warmwasser, Haushaltsstrom und Elektromobilität oft direkt decken kann.

7.2.5 Fazit Optimierung

Infrarotheizungssysteme sollten immer als eine Einheit aus Wärmeerzeuger (Infrarotheizung) und Umweltenergiequelle (Photovoltaikanlage) gesehen werden. Die deutlich geringeren Anfangsinvestitionskosten für die Wärmeerzeugung gegenüber einem Wärmepumpensystem erlauben es, bei einem IR-System eine Photovoltaikanlage zuzubauen und trotzdem nur die gleichen oder sogar geringeren Anfangsinvestitionskosten wie bei einem vergleichbaren Wärmepumpensystem zu erreichen.

Sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht erweist sich, dass die Erhöhung der Eigenverbrauchsrate des von der PV-Anlage erzeugten Stroms deutliche Vorteile bietet. Erste Untersuchungen in Richtung einer auf Eigenverbrauch optimierten Regelung der IR-Heizungen lassen erkennen, dass man mit dem IR-PV-System in der Heizperiode den gleichen oder sogar geringeren Netzstrombezug erreichen kann, den ein Wärmepumpensystem hätte. Dies zu gleichen oder geringeren Anfangsinvestitionskosten, besserer Gesamtwirtschaftlichkeit und hohen Stromproduktionsüberschüssen im Sommer. Die Überschüsse im Sommer können dazu beitragen, die fossile Energieproduktion im Sommerhalbjahr überflüssig zu machen oder, sobald die geeigneten Speichertechnologien bestehen, den Strom für den Winter einzuspeichern.

Kleine dezentrale Stromspeicher bringen, im Hinblick auf eine Erhöhung des Eigenverbrauchsgrades des im Winter lokal produzierten PV-Stroms, nur geringen Nutzen, da in Kombination mit einer optimierten Regelung, ein Großteil des im Winter produzierten Stroms direkt verbraucht werden kann. Zur Erhöhung des Eigenverbrauchsgrades im Sommer kann ein dezentraler Stromspeicher jedoch einen Beitrag leisten.

8 Zusammenfassung / Weiterer Forschungsbedarf

8.1 Zusammenfassung

Grundlegende Fragestellungen zum Infrartheizungssystem konnten in dieser Arbeit erfolgreich beantwortet werden. Es wurde aufgezeigt, dass Infrartheizungssysteme aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften Vorteile gegenüber Fußbodenheizungssystemen bieten, die eine Reduzierung der Übergabeverluste bewirken. Bei optimierter Regelung nach operativer Temperatur reduziert sich so der Erzeugernutzwärmebedarf bei IR-Heizungen um circa 5 – 10 % gegenüber optimal ausgeführten und geregelten Fußbodenheizungssystemen. Dies wirkt sich auch auf den Endenergiebedarf aus. Die Differenz im Strombedarf zwischen Wärmepumpensystem und IR-Heizung ist geringer, als nach der Level 3 Arbeitszahl der Wärmepumpe zu vermuten wäre. Im Vergleich bleibt das Wärmepumpensystem jedoch das deutlich effizientere System zur Wärmeerzeugung, jedoch auch zu deutlich höheren Anfangsinvestitionskosten.

Nutzt man diese Differenz in den Anfangsinvestitionskosten, um bei der Infrartheizung eine Photovoltaikanlage zuzubauen, erhält man ein System, das zwar ineffizienter Wärme erzeugt, jedoch dafür eine große Menge regenerativ erzeugten Stroms produzieren kann. Diese lokal erzeugte Umweltenergie kann teilweise direkt von der IR-Heizung genutzt werden. Infrartheizungssysteme sollten daher immer, ähnlich wie bei einer Wärmepumpe, als eine Einheit aus Wärmeerzeuger (Infrartheizung) und Umweltenergiequelle (Photovoltaikanlage) gesehen werden. Die Photovoltaikanlage bei einer IR-Heizung sollte so dimensioniert werden, dass zusammen mit einer auf Eigenverbrauch optimierten Regelung der Netzstrombezug einer Wärmepumpe über die Heizperiode erreicht wird.

Nur in Kombination mit einer Photovoltaikanlage können Infrartheizungssysteme deutliche ökologische als auch ökonomische Vorteile in kleinen und gut gedämmten Wohngebäuden aufweisen. Diese Annahme konnte auch in der Begleitforschung des Projekts K76 bestätigt werden. Gleichzeitig erwies sich bei der begleitenden Nutzerbefragung im K76, dass die Bewohner das IR-Heizungssystem als behaglich und gut bedienbar empfinden. Generell fügen sich Infrartheizungen als strombasierte Heizsysteme gut in die Entwicklung der Energiewende ein. Zusätzlich zu den bereits beschriebenen ökologischen und ökonomischen Vorteilen weisen IR-Heizungen auch erhebliche Vorteile in den Bereichen Installationsaufwand, Wartungsaufwand, Bedienbarkeit, Flexibilität und Rückbaubarkeit gegenüber Wärmepumpensystemen auf.

Die ökonomische und ökologische Einsatzgrenze von Infrartheizungen liegt bei sehr gut gedämmten Wohngebäuden ($< 30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ Jahresheizwärmebedarf) bei circa 1.500 m^2 - 2.000 m^2 beheizter Wohnfläche. Dies ist jedoch immer von den genauen projektspezifischen Rahmenbedingungen und dem gewählten Bilanzraum abhängig. Je kleiner und besser gedämmt ein Haus ist, desto größer können die wirtschaftlichen Vorteile eines IR-Heizsystems gegenüber einem Wärmepumpensystem sein.

So kann die Ausstattung von sehr gut gedämmten neugebauten Ein- und Zwei- oder kleinen Mehrfamilienhäusern oder die thermische Sanierung und Umrüstung solcher Gebäude auf IR-PV-Systeme mit vertretbarem finanziellen Aufwand dazu beitragen, die Sektorenkopplung um-

zusetzen und den Ausbau der regenerativ erzeugten Energie in Deutschland massiv voranzutreiben. Kleine Gebäude könnten mit ihren Energieüberschüssen im Sommer auch große Gebäude mit Wärmepumpensystemen mit Strom mitversorgen, sobald geeignete saisonale Energiespeicher vorhanden sind. Dabei würden die Gebäudeeigentümer bei den Investitionskosten nicht stärker und - über den gesamten Lebenszyklus gesehen - sogar geringer finanziell belastet als bei der Umstellung auf Wärmepumpensysteme.

Die Kosten für Photovoltaikanlagen sind in den letzten Jahren rapide gesunken. Auch für die Zukunft ist zu erwarten, dass diese Entwicklung anhält. Geringere Kosten für PV-Anlagen würden die ökonomischen und damit auch ökologischen Vorteile des IR-PV-Systems in Zukunft weiter verbessern. Genauso könnten auch die Kosten für IR-Heizungen bei Produktion größerer Stückzahlen künftig sinken.

Wie sich eine teilweise Umstellung der Gebäudebeheizung auf IR-Heizungen auf die Netzinfrastruktur in Deutschland auswirken würde, muss noch untersucht werden. Hierbei ist auch die Frage der Warmwasserbereitung bei IR-Systemen zu klären. Bisher wurde bei Gebäuden mit IR-Heizung in der Regel ein Direktdurchlauferhitzer zur Warmwasserbereitung angesetzt. Da Durchlauferhitzer eine sehr hohe elektrische Anschlussleistung haben, könnte es sich im Sinne der Netzdienlichkeit als vorteilhaft erweisen, zur Warmwasserbereitung dezentrale Elektroboiler mit Speicher oder dezentrale Brauchwarmwasserwärmepumpen zu verwenden, um Lastspitzen oder Lastanforderungen zu Zeiten ohne solare Stromproduktion zu vermeiden.

Ebenso würde eine teilweise Umstellung der Gebäudebeheizung auf IR-Heizungen auch die Anforderungen an den Flächenbedarf für Photovoltaik-Anlagen erhöhen. Ob der notwendige zusätzliche Zubau von PV-Anlagen bei Einsatz von IR-Heizungen sozialverträglich umsetzbar ist, muss noch geklärt werden. Nach aktuellen Studienergebnissen sind die Flächenpotentiale dafür in Deutschland vermutlich ausreichend vorhanden.^{80 81 82}

8.2 Weiterer Forschungsbedarf

Im Laufe der Arbeit hat sich gezeigt, dass weiterer Forschungsbedarf besteht, um das Potential von IR-Heizungen umfassender beurteilen zu können. Untersuchungen zu den nachfolgenden Themen könnten die Systemeffizienz, die Behaglichkeit, den Planungsprozess und die Netzdienlichkeit eines IR-Heizsystems weiter optimieren:

Auswirkungen der materialspezifischen und konstruktiven Eigenschaften der IR-Heizelemente auf den Strahlungswirkungsgrad und die Effizienz im Betrieb

Die vorgenommenen Untersuchungen haben ergeben, dass die am Markt verfügbaren IR-Heizungen große Unterschiede in den Strahlungseigenschaften aufweisen. Wie würde sich der Einsatz von optimierten Infrartheizungsmodulen auf die Effizienz im Betrieb auswirken?

Optimierung der thermischen Behaglichkeit im Raum beim Einsatz von IR-Heizungen

Es stellte sich heraus, dass für den effizienten Betrieb einer IR-Heizung eine Deckenmontage von Vorteil ist. Jedoch führt eine Deckenmontage bei IR-Heizungen mit hoher Oberflächentemperatur aufgrund der sehr lokalen Wärmeabgabe zu Strahlungsasymmetrien im Raum und damit unter

80 [Fath, 2017,]

81 [Wirth, 2019]

82 [LUBW, 2019]

Umständen zu Unbehaglichkeit. So ist zum Beispiel zu klären, ob sich durch Verminderung der Oberflächentemperatur und gleichzeitig größerer Heizfläche die Behaglichkeit bei deckenaufgehängten IR-Modulen verbessern lässt und ob sich die Effizienz bei wandaufgehängten IR-Heizungen durch konstruktive Änderungen am Element auch verbessern lässt.

Benötigtes Fachwissen für Planer und Bauherren zur Optimierung des Entscheidungsprozesses, der Planung und der Realisierung von IR-Heizkonzepten

Untersucht werden muss, welche neuen Fragestellungen im Zusammenhang mit IR-Heizsystemen entstehen und wie diese systematisch geklärt werden können. Wichtige Aspekte sind zum Beispiel: Wirtschaftlichkeit, ökologische Verträglichkeit, Wahl des Anbieters, Anzahl der Module, Anordnung der Module im Raum, gestalterische Integration, Flexibilität, IR-Heizungsstromnetz mit elektrischer Absicherung, Kabelführung, Leitungen zur Regelung und Verbrauchserfassung, zentrale oder dezentrale Heizungssteuerung, Position und Art der Sensoren zur Raumregelung ect..

Entwicklung eines Qualitätsstandards anhand zu definierender Kriterien zur Vergleichbarkeit der am Markt angebotenen IR-Heizungssysteme

Kriterien wären hier zum Beispiel: Strahlungswirkungsgrad, Aufheizzeit, Recyclingfähigkeit, Regelbarkeit, Montageoptionen, Betriebstemperatur, Maximaltemperatur, Gewicht etc..

Warmwasserbereitung bei IR-Heizungen

Bei zentralen Wärmeerzeugern erfolgt Wärme- und Warmwasserbereitung in der Regel in einem System. Bei IR-Heizungen ist dies nicht möglich. Im Gebäude K76 werden zur Warmwasserbereitung meist Direktdurchlauferhitzer genutzt. Es hat sich zwar gezeigt, dass der Gesamtenergieumsatz deutlich unter dem erwarteten Wert lag, die hohe Anschlussleistung der Direktdurchlauferhitzer führte im K76 jedoch zu Mehrkosten beim Hausanschluss und zu einer Reduzierung der Netzdienlichkeit durch hohe Lastspitzen. Mögliche Alternativen wären z.B. Elektroboiler oder dezentrale Brauchwarmwasserwärmepumpen.

Auswirkungen verschiedener Gebäudetypologien auf die ökologische und ökonomische Effizienz eines IR-Heizungssystems

Das Gebäude K76 wurde messtechnisch begleitet und die Auswertung hat ergeben, dass das IR-Heizungssystem sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile gegenüber einem WP-System bietet. Der Abstand zum Vergleichssystem Wärmepumpe war hier jedoch nur gering. Die Erkenntnisse aus dem Projekt führen zu der Annahme, dass andere Gebäudetypologien deutlich größere Vorteile für IR-Heizsysteme bieten:

Ein- /Zweifamilienhaus

- In kleinen gut gedämmten Ein- und Zweifamilienhäusern sind die Unterschiede in den Systemkosten zwischen WP-System und IR-System deutlich größer. Bei gleichen Anfangsinvestitionskosten kann so im Verhältnis zum Wärmeenergiebedarf eine größere PV-Anlage, mit Stromspeicher, zugebaut werden als in einem großen Wohngebäude. Dies erhöht die ökologischen und ökonomischen Vorteile der IR-Heizung gegenüber der WP-Heizung deutlich.
- Der Einsatz einer Brauchwarmwasserwärmepumpe erhöht die Netzdienlichkeit des Systems und steigert die Wirtschaftlichkeit weiter.

Bürogebäude

- Durch höhere interne Wärmelasten ist der Heizbedarf in einem gut gedämmten Bürogebäude tendenziell geringer als in einem vergleichbaren Wohngebäude. Die reduzierten Betriebskosten können die wirtschaftlichen Vorteile eines IR-Systems erhöhen.
- Das Anwesenheitsprofil der Nutzer und damit das Wärmebedarfsprofil deckt sich im Tagesverlauf mit den Zeiten möglicher solarer Wärmegewinne und Stromerzeugung. In der Nacht und am Wochenende kann die Raumtemperatur durch die geringe Trägheit des IR-Systems sehr flexibel abgesenkt werden. Diese Aspekte können zu einer weiteren Reduzierung der Betriebskosten und zu einem höheren Eigendeckungsgrad mit regenerativ erzeugtem Strom führen.
- Gibt es in einem Bürogebäude fest definierte Arbeitsplätze bzw. Bereiche, kann mit IR-Heizungen eine lokale Behaglichkeit hergestellt werden, ohne den gesamten Raum zu erwärmen.
- IR-Heizungen bieten größtmögliche Flexibilität bei späterem Umbau oder Rückbau. In temporären Bauten reduzieren sich die Kosten für Auf- und Rückbau. Nach dem Rückbau lassen sich IR-Heizungen einfach weiter nutzen.

Optimierung der Netzdienlichkeit eines IR-Systems

Um ein IR-System ökologisch und ökonomisch optimal betreiben zu können, muss der Verbrauch des lokal regenerativ erzeugten Stroms maximiert werden. Die Kombination von IR-Heizung, PV-Anlage und Stromspeicher bieten zusammen mit einer sehr flexiblen Regelbarkeit der IR-Heizungen großes Optimierungspotential.

Auswirkungen auf das Gesamt-Energiesystem in Deutschland bei vermehrtem Einsatz von IR-Heizungen

Zur Optimierung der Netzdienlichkeit (Eigenversorgung / Netzbezug in Menge und Zeitpunkt) müssen neben den Verbrauchskennwerten auch die Auswirkungen auf die gesamte Netzinfrastruktur Deutschlands untersucht werden. Insbesondere die tendenziell höheren Strombedarfe in der Heizperiode und gegebenenfalls höhere Lastspitzen müssen in ihrer Wirkung auf den Netzausbau und Speicherbedarf optimiert werden. In der Folge können Planungsempfehlungen, z.B. zur Dimensionierung von Photovoltaiksystemen und Stromspeicher sowie zur Optimierung der Steuerung und Regelung, abgeleitet werden und geprüft werden, ob die Flächen für den zusätzlich erforderlichen Ausbau von Photovoltaik verfügbar sind.

Literaturverzeichnis

[DIN 1345, 1993]

DIN 1345: „Thermodynamik - Grundbegriffe“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1993

[DIN EN ISO 7726, 2002]

DIN EN ISO 7726: „Umgebungs-klima Instrumente zur Messung physikalischer Größen“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002

[DIN EN ISO 7730, 2006]

DIN EN ISO 7730: „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006

[DIN EN 14511-1, 2019]

DIN EN 14511-1: „Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Teil 1: Begriffe“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019

[DIN EN 14511-3, 2019]

DIN EN 14511-3: „Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen für die Raumbeheizung und -kühlung und Prozess-Kühler mit elektrisch angetriebenen Verdichtern – Teil 3: Prüfverfahren“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019

[DIN EN 15218, 2013]

DIN EN 15218: „Luftkonditionierer und Flüssigkeitskühlsätze mit verdunstungsgekühltem Verflüssiger und elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumkühlung – Begriffe, Prüfbedingungen, Prüfverfahren und Anforderungen“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013

[DIN EN 15804, 2020]

DIN EN 15804: „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2020

[DIN V 18599-2, 2016]

DIN 18599-2: „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016

[DIN V 18599-5, 2011]

DIN 18599-5: „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011

[DIN V 18599-5, 2016]

DIN 18599-5: „Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2016

[DIN EN 60675-3, 2021]

DIN EN 60675-3: „Elektrische Haushalt-Direktheizgeräte – Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaft, Teil 3: Zusätzliche Bestimmungen für die Messung des Strahlungswirkungsgrades“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021

[DIN EN 60751, 2009]

DIN EN 60751: „Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009

[Discovery / K76]

Diagramme mit spezifischen Messwerten des Projekts K76 von der Online Plattform des „Smart Metering“ Anbieters „Discovery“
www.discovery.com
Discovery GmbH, Stand 2018

[Drexel, Eberle, Kalttheier, 2014]

Drexler, Christof; Eberle, Alfons; Kalttheier, Stephen: „Erweiterung der Einsatzgrenzen bewährter Passivhaustechnik - smartEXT“
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wolfurt / Wien, 2014

[Erhorn, Bergmann, 2015]

Erhorn, Hans; Bergmann, Antje: Energieeffizienter Neubau von Wohngebäuden - Begleitforschung und Querauswertung von Modellvorhaben (Phase 2); Abschlussbericht (IBP-Bericht WB 175/2015, Stuttgart, 2015

[Fath, 2017]

Fath, Karoline: “Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings”
KIT Karlsruhe, 2017

[Fischer, 2019]

Fischer, Rolf: „Elektrotechnik - Für Maschinenbauer sowie Studierende technischer Fächer“
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2019

[Glück, 1990]

Glück, Bernd: “Bausteine der Heizungstechnik, Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren“
Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin, 1990

[Haack et al., 2017]

Haack, Bertil; Tippe, Ulrike; Stobernack, Michael; Wendler, Tilo: „Mathematik für Wirtschaftswissenschaftler - Intuitiv und praxisnah“
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2017

[Hausladen, Meyer, 1999]

Hausladen, Gerhard; Meyer, Christoph: „Optimierung der Anordnung von Heizflächen und Lüftungselementen mittels Strömungssimulation“
Forschungsbericht der Universität Kassel, Kassel 1999

[Heider et al., 2020]

Heider, Jan; Conrad, Nicole; Stark, Thomas; Abdulganiev, Aleksej; Kosack, Peter; Wagner, Anne-Kristin: „Projektabschlussbericht Forschungsprojekt „IR-Bau“, Potenzial von Infrarot-Heizsystemen für hocheffiziente Wohngebäude“
Hochschule Konstanz Technik, Wirtschaft und Gestaltung (HTWG), Fakultät Architektur und Gestaltung, Fachgebiet Energieeffizientes Bauen, Konstanz 2020

[Heschl, 2016]

Heschl, Christian; Langerwisch, St.; Brenner, M.: „Untersuchungsergebnisse zur Wärmeabgabe von Redwell Heizungen.“ FH-Burgenland GmbH, (A) Pinkafeld 2016

[Ingenieurbüro Seelbach]

EnEV Berechnung des Projekts K76 nach Baufertigstellung
Ingenieurbüro Seelbach

[Kosack, 2009]

Kosack, Peter: "Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich",
Forschungsbericht der TU Kaiserslautern, Kaiserslautern 2015

[Klauz, Plüss, Menti, 2010]

Klauz, Sebastian; Plüss, Iwan; Menti, Urs-Peter: „Vergleich Energieeffizienz: Infrarot-Heizung vs. Wärmepumpen-Heizung“,
Forschungsbericht der Hochschule Luzern, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik im Auftrag der Energiefachstellenkonferenz Ostschweiz, Horw 2010

[Kübler, 2001]

Kübler, Thomas: „Infrarotheiztechnik für Großräume“
Vulkan Verlag GmbH, Essen, 2001

[Lenz, Schreiber, Stark, 2010]

Lenz, Bernhard; Schreiber, Jürgen; Stark, Thomas: "Nachhaltige Gebäudetechnik"
Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 2010

[LUBW, 2019]

<https://www.energieatlas-bw.de/sonne/freiflachen/potenzialanalyse>
<https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflachen/potenzialanalyse/ergebnisse>
Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Stand 08/2019

[Nau, 2004]

Nau, Matthias: "Elektrische Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern"
Jumo GmbH & Co. KG, Fulda, 2004

[Papadopoulos, 2010]

Papadopoulos, Agis M.: "Redwell Vergleichsstudie 2010 - Redwell Infrarot-Heizgeräte im Vergleich zu konventionellen Heizgeräten"
Redwell Manufaktur GmbH, Hartberg (A), 2010

[Pistohl, 2007]

Pistohl, Wolfram: „Handbuch der Gebäudetechnik / Band 2“
Werner Verlag – Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln, 2007

[Recknagel, Sprenger, Albers, 2019]

Recknagel, Hermann., Sprenger, Eberhard, Albers, Karl-Joseph, „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik“.
Deutscher Industrieverlag, München, 2019

[Richter, 2006]

Richter, Wolfgang: „Handbuch der thermischen Behaglichkeit – Sommerlicher Kühlbetrieb, Projekt F 2071“
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund/Berlin/Dresden, 2007

[Rüdissler et al., 2018]

Rüdissler, Daniel; Pertschy, Reinhard; Wagner, Waldemar; Höfler, Karl; Deopito, Marcus:
„Abschlussbericht -InfraMess- Begleituntersuchung für ein Infrarot-Heizsystem und ein fernwärmebasiertes Radiatorensystem, Wohnanlage Kaindorf a.d. Sulm“
AEE - Institut für Nachhaltige Technologien (AEE INTEC), Gleisdorf 2018

[SLBW, 2018]

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: „Im Blickpunkt: Energie in Baden-Württemberg“
Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, www.statistik-bw.de, Stuttgart 2018

[VDI 2067-1, 2012]

VDI 2067-1: „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung“
VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG)
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012

[VDI 4650-1, 2019]

VDI 4650-1: „Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen“
VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG)
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019

[von Euw, Alimpic, Hildebrand 2012]

Von Euw, Reto; Alimpic, Zoran; Hildebrand, Kurt: “Gebäudetechnik – Systeme integral planen”, Hrsg.: Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE der Schweiz, 2012

[werk.um architekten]

Projektspezifischer Grundriss K76, bereitgestellt von werk.um architekten Darmstadt.
werk.um architekten GbR, www.werkum.de

[Winiewska, Mailach, Oschatz, 2019]

Winiewska, Bernadetta; Mailach, Bettina; Oschatz, Bert: "Energetische Effizienz und Wirtschaftlichkeit der elektrischen Direktheizung", ITG Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden Forschung und Anwendung GmbH, Dresden 2019

[Wirth, 2019]

Wirth, Harry: „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“; Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2019

[Weißmann, Graubner, 2015]]

Weißmann, Claudia; Graubner, Carl-Alexander: „Ökonomische und ökologische Lebenszyklusanalyse eines Plus-Energie-Gebäudes mit elektrischem Beheizungssystem“; Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2015

[www.janitza.de, Stand 04/2020]

www.janitza.de/mid-messgeraete-richtlinie.html
Janitza electronics GmbH, Stand 04/2020

[Zimmermann, Zimmermann 2012]

Zimmermann, Thomas; Zimmermann, Martina; „Lehrbuch der Infrarotthermographie“
Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen ohne Quellenangabe sind eigene Abbildungen.

Abb. 1 Vergleich der notwendigen Systemkomponenten bei Wärmepumpen- und Infrarotheizungs-Systemen	18
Abb. 2 Süd / West Ansicht K76	31
Abb. 3 Grundriss K76, thermische Hülle	32
Abb. 4 Infrarotheizungen K76 links und rechts sowie Lüftungsleitung	33
Abb. 5 Ergebnisse der EnEV-Berechnung nach Fertigstellung	34
Abb. 6 Südsicht Gebäude 6	37
Abb. 7 Grundriss Gebäude 6 mit Lage der 4 Laborräume	38
Abb. 8 Querschnitt Gebäude 6 mit Lage der Laborräume	38
Abb. 9 Laborraum T1 mit wassergeführter Fußbodenheizung	39
Abb. 10 Hydraulikschema Wärmepumpen-System Laborräume Ehoch4	40
Abb. 11 Luft/Wasser-Wärmepumpe	40
Abb. 12 Technikraum für Wärmepumpe mit Pufferspeicher	40
Abb. 13 Laborraum T2 mit elektrischer Fußbodenheizung	41
Abb. 14 Laborraum T3 mit IR-Heizung an der Decke	41
Abb. 15 Laborraum T4 mit IR-Heizung an der Wand	42
Abb. 16 Südfassade Gebäude 6 mit Einzellüftern	42
Abb. 17 Messtechnikschema Laborräume Ehoch 4	44
Abb. 18 Anordnung der IR- und Lufttemperatursensoren im Schnitt zur Messung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur und zur Berechnung der operativen Raumtemperatur	45
Abb. 19 Anordnung der 16 IR-Sensoren in Laborraum T3	45
Abb. 20 Flächenbedarf für 1 kW Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des IR-Systems (Temperatur der gegenüberliegenden Fläche 20 °C, Emissionsgrad 0,9)	53
Abb. 21 Ausbreitung der IR-Strahlung im Halbraum unter einer IR-Heizungsplatte	55
Abb. 22 Beispielhafte Verteilung der Strahlungsleistung im Raum	56
Abb. 23 Abnahme der Strahlungsleistung / m ² über die Entfernung	56
Abb. 24 PPD in Abhängigkeit von PMV [DIN 7730, S.9]	60
Abb. 25 Behagliche Raumtemperatur in Abhängigkeit von Aktivität (in „met“) und äquivalentem Wärmeleitwiderstand der Kleidung (in „clo“) sowie zulässige Abweichungen bei $-0,5 \leq \text{PMV} \leq 0,5$ (ausgewähltes Beispiel für $\text{PPD} \leq 10\%$) als unterschiedlich markierte (weiß/grau) Flächen.	61
Abb. 26 Zone der Behaglichkeit in Abhängigkeit zur Lufttemperatur und der Temperatur der abstrahlenden Flächen.	62
Abb. 27 Bilanzgrenze am Beispiel einer Sole-Wasser-Wärmepumpenheizungsanlage	64
Abb. 28 Genauigkeitsklassen von Widerstandsthermometern	68
Abb. 29 Anschlussarten von Platin-Widerstandstempersensoren	69
Abb. 30 Kalibrierung der Temperatursensoren im Wasserbad	70
Abb. 31 Globesonde und abgeschirmter Lufttemperatursensor	71
Abb. 32 Schematischer Aufbau des Globethermometers	71

Abb. 33 Pyrometer (IR-Thermometer) zur Messung der Oberflächentemperaturen im Raum (Eigenbau mit MLX90614ESF-BAA Sensoren)	73
Abb. 34 Pyranometer SMP 10-A von Kipp und Zohnen in Fensterebene der Laborräume	75
Abb. 35 Beispielhafter Temperaturverlauf bei einer Zweipunktregelung	76
Abb. 36 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2017/2018	81
Abb. 37 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2017/2018	81
Abb. 38 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2017/2018	82
Abb. 39 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2017/2018	82
Abb. 40 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2017/2018	83
Abb. 41 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2017/2018	83
Abb. 42 Lufttemperaturschichtung Raum T1-T4, Messphase 1 HP 2017/18	85
Abb. 43 Mittlere Dauer der Heizphasen Raum T1-T4 HP 2017/2018	86
Abb. 44 Unterschiede in der Einschalthäufigkeit bei E-FBH und IR-Heizung bei unterschiedlicher Hysterese	86
Abb. 45 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2018/2019	87
Abb. 46 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2018/2019	87
Abb. 47 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2018/2019	88
Abb. 48 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2018/2019	88
Abb. 49 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2018/2019	89
Abb. 50 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2018/2019	89
Abb. 51 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 4, Heizperiode 2018/2019	90
Abb. 52 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 4, Heizperiode 2018/2019	90
Abb. 53 Wärmeverbrauch Raum T1-T3, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019	91
Abb. 54 Wärmeverbrauch Raum T2 und T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019	91
Abb. 55 Stromverbrauch Raum T1-T3, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019	92
Abb. 56 Stromverbrauch Raum T2 und T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019	92
Abb. 57 Gemessene und berechnete operative Temperatur bei Betrieb einer IR-Heizung in Laborraum T3 im Vergleich	93
Abb. 58 Übersicht der Messphasen in Heizperiode 2018 / 2019	94
Abb. 59 Vergleich der nächtlichen Luft – und Oberflächentemperaturen zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) in Messphase 3, HP 2018/2019	95
Abb. 60 Innenoberflächentemperaturen Raum T1 (WP/FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, Messphase 3, HP 2018/2019	95
Abb. 61 Verlauf der berechneten operativen Temperaturen Raum T1 (WP/FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, Messphase 3, HP 2018/2019	96
Abb. 62 Operative Temperaturen tagsüber, Messphase 3, HP 18/19	96

Abb. 63 Operative Temperaturen nachts, Messphase 3, HP 18/19	96
Abb. 64 Vergleich der nächtlichen Luft – und Oberflächentemperaturen zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) über die gesamte HP 2018/2019	97
Abb. 65 Innenoberflächentemperaturen Raum T1 (FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, gesamte HP 2018/2019	97
Abb. 66 Vergleich der operativen Temperaturen nachts und tagsüber, gesamte HP 2018 / 2019	98
Abb. 67 Temperaturverlauf der Oberflächentemperaturen auf der Vorderseite der IR-Heizung und der darüber liegenden Deckenflächen.	104
Abb. 68 Aufteilung der Differenzen der Transmissionswärmeverluste von Raum T1 (WP/FBH) im Verhältnis zu Raum T3 (IR-Decke) in Messphase 3, HP 18/19	105
Abb. 69 Dämmsituation der IR-Heizung und der FBH in den Laborräumen in Ehoch4 im Vergleich.	106
Abb. 70 Verlauf der Innenoberflächentemperaturen T1/T3 MIT Heizflächen	107
Abb. 71 Verlauf der Innenoberflächentemperaturen T1/T3 OHNE Heizflächen	108
Abb. 72 Verlauf der Lufttemperaturen in Raum T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke) bei Regelung nach operativer Temperatur, MP 08.03.19 – 14.03.2019	111
Abb. 73 Gemessene Lufttemperaturen K76 Heizperiode 2018 / 2019	112
Abb. 74 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 1 (6 Tage/im Mittel 4,5°C)	114
Abb. 75 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 1	114
Abb. 76 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 2 (11 Tage/im Mittel 11,0°C)	114
Abb. 77 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 2	114
Abb. 78 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 3 (5 Tage / im Mittel 7,2 °C)	114
Abb. 79 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 3	114
Abb. 80 Gemessene absolute Wärme- bzw. Stromverbräuche Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den simulierten Werten	115
Abb. 81 Gemessene absolute Wärmeverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	116
Abb. 82 Gemessene absolute Stromverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den simulierten Werten	116
Abb. 83 Gemessene und simulierte Level 1 Arbeitszahlen der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich	117
Abb. 84 Gemessene und simulierte Level 3 Arbeitszahlen der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich	117
Abb. 85 Differenzen im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke) gemessen und simuliert im Vergleich.	118
Abb. 86 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen Laborraum T1 (WP/FBH) / Laborraum T3 (IR-Decke), Validierungsphase 1 im Vergleich.	119
Abb. 87 Verlauf der simulierten Lufttemperaturen Laborraum T1 (WP/FBH) / Laborraum T3 (IR-Decke), Validierungsphase 1 im Vergleich.	119
Abb. 88 Verlauf der gemessenen Temperaturen Aufheizphase IR-Heizung	120
Abb. 89 Verlauf der simulierten Temperaturen Aufheizphase IR-Heizung	120
Abb. 90 Vergleich der simulierten Innenoberflächentemperaturen T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke)	121
Abb. 91 Absoluter Wärmeverbrauch Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert	122
Abb. 92 Absoluter Stromverbrauch Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert	122
Abb. 93 Absoluter Strom / Wärmeverbrauch Laborraum T3 (IR-Decke), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert	123

Abb. 94 Absolute Verbrauchswerte Strom / Wärme Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke) HP 18/19 gemessen / simuliert	124
Abb. 95 Differenzen Strom / Wärme Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke), HP 18/19 gemessen / simuliert	124
Abb. 96 Absolute Verbrauchswerte Jahressimulation Laborräume Ehoch4 HP 18/19	125
Abb. 97 Verhältnisse der simulierten Jahresverbrauchswerte Laborräume Ehoch4 HP 18/19	125
Abb. 98 3D Darstellung der simulierten Laborräume aus IDA ICE	126
Abb. 99 3D Darstellung der vervielfältigten Laborräume aus IDA ICE	126
Abb. 100 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T1 (WP/FBH) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.2018	132
Abb. 101 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T2 (E-FBH) während der Aufheiz- phase 03.12.18 – 04.12.2018	133
Abb. 102 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T3 (IR-Decke) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.18	133
Abb. 103 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen während intermittierendem Betrieb bei gleichem Start der Vorheizzeit	134
Abb. 104 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen während intermittierendem Betrieb bei früherem Start der Vorheizzeit für die Fußbodenheizung	134
Abb. 105 3D Darstellung der simulierten Laborräume aus IDA ICE	135
Abb. 106 Vertikale Aufhängung	137
Abb. 107 Horizontale Aufhängung an der Decke	138
Abb. 108 Temperatursensoren Vorderseite	139
Abb. 110 Strahlungswirkungsgrade untersuchter IR-Heizungen	139
Abb. 109 Temperatursensoren Rückseite	139
Abb. 111 Verhältnisse von Vorder- zu Rückseitentemperatur bei untersuchten IR-Heizungen	140
Abb. 112 Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit verschiedener IR-Heizungen bei Deckenaufhängung	141
Abb. 113 Optimierter Aufbau einer IR-Heizung	143
Abb. 114 Aufsicht Versuchsaufbau Abstrahlwinkel	144
Abb. 116 Temperaturverteilung auf dem Holzschenkel	144
Abb. 115 Versuchsaufbau Abstrahlwinkel	144
Abb. 117 Bild des Holzschenkels mit der IR-Kamera aufgenommen	144
Abb. 118 Abstrahlwinkel IR-Heizung	145
Abb. 119 Gemessener Abstrahlwinkel IR-Heizung im Vergleich zur Simulation der FH Burgenland (links)	146
Abb. 120 Simulation der Verteilung der Strahlungstemperatur einer IR-Heizung, Seitenansicht	146
Abb. 121 Wohnungsweiser Strombedarf für Warmwasser HP 2017/2018	150
Abb. 122 Wohnungsweiser Strombedarf für Lüftung HP 2017/2018	150
Abb. 123 Wohnungsweiser Strombedarf für IR-Heizung HP 2017/2018	150
Abb. 124 Beispiel einer detaillierten, wohnungsweisen Übersicht der Verbrauchsdaten	152
Abb. 125 Positionierung Funksensoren	153
Abb. 126 Vergleich des Strombedarfs für Warmwasser pro Jahr	154
Abb. 127 Vergleich des Strombedarfs für Lüftung pro Jahr	154
Abb. 128 Vergleich des Strombedarfs für Heizung pro Jahr	154
Abb. 129 Vergleich der spezifischen Verbräuche HP 2017/2018 / HP 2018/2019	155
Abb. 130 Lufttemperaturen im Verhältnis zum Heizungsstromverbrauch	157
Abb. 131 Lastgang K76 Winter / 21. Dezember 2018, 0-24 Uhr	158
Abb. 132 Lastgang K76 Frühling / 21. März 2018, 0-24 Uhr	158
Abb. 133 Lastgang K76 Sommer / 21. Juni 2018, 0-24 Uhr	158
Abb. 134 Gemessener PV-Stromertrag / IR-Stromverbrauch K76 HP 2018/2019	159

Abb. 135 Theoretisch mögliche Steigerung des Eigenverbrauchs durch einen 66 kWh-Stromspeicher	160
Abb. 136 Auswertung Nutzerbefragung - Behaglichkeit	164
Abb. 137 Auswertung Nutzerbefragung - Bedienbarkeit	164
Abb. 138 Vergleich CO ₂ Ausstoß für Herstellung und Instandhaltung KG 300/KG 400 über 50 Jahre, IR-Variante ohne PV	168
Abb. 139 Vergleich des CO ₂ Ausstoßes für Herstellung, Instandhaltung und Betrieb über 50 Jahre , IR-Variante ohne PV	168
Abb. 140 Vergleich CO ₂ Ausstoß für Herstellung und Instandhaltung KG 300/KG 400 über 50 Jahre, IR-Variante mit PV	169
Abb. 141 Vergleich des CO ₂ Ausstoßes für Herstellung, Instandhaltung und Betrieb über 50 Jahre , IR-Variante mit PV	169
Abb. 142 Vergleich Wirtschaftlichkeit K76 WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante ohne PV	172
Abb. 143 Vergleich Wirtschaftlichkeit K76 WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante mit PV	173
Abb. 144 Vergleich Wirtschaftlichkeit 600 m ² WHG WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante mit PV	175
Abb. 145 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Abweichung vom Endenergiebedarf	178
Abb. 146 Änderungen der CO ₂ Bilanz bei Abweichung vom Endenergiebedarf	178
Abb. 147 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Änderung der Effizienz der WP	179
Abb. 148 Änderungen der CO ₂ Bilanz bei Änderung der Effizienz der WP	179
Abb. 149 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommenen Energiepreissteigerungsraten	180
Abb. 150 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommenen Eigenverbrauchsraten des selbst erzeugten PV- Stroms	180
Abb. 151 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommener Einspeisevergütung	181
Abb. 152 Änderungen der Wirtschaftlichkeit durch unterschiedlich hohen Zubau von Photovoltaik in Abhängigkeit des Anteils an den Differenzkosten	182
Abb. 153 Änderungen der CO ₂ Bilanz durch unterschiedlich hohen Zubau von Photovoltaik in Abhängigkeit des Anteils an den Differenzkosten	182
Abb. 154 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Verringerung der Gebäudegröße	185
Abb. 155 Änderungen der CO ₂ Bilanz bei Verringerung der Gebäudegröße	185
Abb. 156 Änderung der Wirtschaftlichkeit bei gleichmäßigem Zubau von Photovoltaik	186
Abb. 157 Änderung der ökologischen Bilanz bei gleichmäßigem Zubau von Photovoltaik	186
Abb. 158 System Wärmepumpe	188
Abb. 159 System IR-PV Heizung	188

Tabellenverzeichnis

Alle Tabellen ohne Quellenangabe sind eigene Tabellen.

Tabelle 1 Fragestellungen Forschungsstrang wissenschaftliche Begleitforschung K76	30
Tabelle 2 Randbedingungen zur EnEV-Berechnung	33
Tabelle 3 Endenergiebedarf K76 nach EnEV-Berechnung	34
Tabelle 4 Fragestellungen Forschungsstrang Wissenschaftliche Begleitforschung K76	36
Tabelle 5 Fragestellungen Forschungsstrang Berechnungen / Simulationen	46
Tabelle 6 Nächtliche Lüftungswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	100
Tabelle 7 Nächtliche Lüftungswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	100
Tabelle 8 Nächtliche Infiltrationswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	100
Tabelle 9 Nächtliche Infiltrationswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	100
Tabelle 10 Nächtliche Transmissionswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	101
Tabelle 11 Nächtliche Transmissionswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	101
Tabelle 12 Transmissionswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	102
Tabelle 13 Transmissionswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	102
Tabelle 14 Lüftungswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	103
Tabelle 15 Lüftungswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	103
Tabelle 16 Infiltrationswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	103
Tabelle 17 Infiltrationswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	103
Tabelle 18 Berechnete Differenzen im Wärmeverbrauch zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke)	103
Tabelle 19 Gemessene Innenoberflächentemperaturen K76	109
Tabelle 20 Abweichung der simulierten Wärme- und Stromverbräuche in Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	115
Tabelle 21 Abweichung der simulierten Wärmeverbräuche Laborraum T3 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	116
Tabelle 22 Abweichung der simulierten Stromverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	116
Tabelle 23 Abweichung der simulierten Level 1 Arbeitszahl der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	117
Tabelle 24 Abweichung der simulierten Level 3 Arbeitszahl der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	117
Tabelle 25 Abweichungen der Differenzen im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke) gemessen und simuliert im Vergleich.	118
Tabelle 26 Abweichung der simulierten von den gemessenen Wärmeverbrauchswerten Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19	122
Tabelle 27 Abweichung der simulierten von den gemessenen Stromverbrauchswerten Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19	122

Tabelle 28 Abweichung der simulierten von den gemessenen Stromverbrauchswerten Laborraum T3 (IR-Decke), MP 1-4 HP 18/19	123
Tabelle 29 Abweichung der simulierten von den gemessenen gesamt Wärme- und Stromverbrauchswerten Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke), HP 18/19	124
Tabelle 30 Simulierte Verbrauchsunterschiede zweier Laborräume	126
Tabelle 31 Simulierte Verbrauchsunterschiede vielfältiger Laborräume	126
Tabelle 32 Berechnung der Übergabeverluste nach DIN 18599-5 - 2016	128
Tabelle 33 Berechnung der Übergabeverluste nach DIN 18599-5 - 2011	129
Tabelle 34 Ergebnisse der EnEV-Berechnung der Laborräume in Ehoch4, Gebäudebestand	131
Tabelle 35 Ergebnisse der EnEV-Berechnung der Laborräume in Ehoch4, verbesserte Dämmung / optimierte Technik	131
Tabelle 36 Simulierte Verbrauchsunterschiede bei intermittierendem Betrieb	135
Tabelle 37 Vergleich Endenergieverbrauch K76 nach EnEV / HP 2017/2018	151
Tabelle 38 Vergleich Endenergieverbrauch K76 nach EnEV / HP 2018/2019	155
Tabelle 39 Vergleich Endenergieverbrauch K76 berechnet / gemessen witterungsbereinigt	156
Tabelle 40 Allgemeine Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung, Variante 50 kW (K76)	171
Tabelle 41 Annahmen zum Energiekonzept IR-Heizung, Variante 50 kW (K76)	171
Tabelle 42 Annahmen zum Energiekonzept Wärmepumpe, Variante 50 kW (K76)	172
Tabelle 43 Allgemeine Annahmen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung, Variante 20 kW	174
Tabelle 44 Annahmen zum Energiekonzept IR-Heizung, Variante 20 kW	174
Tabelle 45 Annahmen zum Energiekonzept Wärmepumpe, Variante 20 kW	174
Tabelle 46 Wirtschaftliche Auswirkungen der Parameteränderungen	183
Tabelle 47 Ökologische Auswirkungen der Parameteränderungen	184
Tabelle 48 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Verringerung der Gebäudegröße	185
Tabelle 49 Änderungen der CO2 Bilanz bei Verringerung der Gebäudegröße	185

Anhang

Kostenberechnung Wärmepumpen Systeme

Kostenberechnung Wärmepumpen Systeme

Quelle: BKI Kostenplaner Version 21

Variante 50 KW / 1360 m²

	EP	Menge	GP
WP Heizen			
WP Luft 20-35 KW	27.479,99 €	1,5 Stk	41.219,99 €
WP Luft 10-20 KW	21.237,80 €		
WP kleiner 10 kW	18.080,00 €		
Summe WP Heizen			41.219,99 €
Anschlussleitungen			
Ausdehnungsgefäß über 500 L	1.881,10 €	1 Stk	1.881,10 €
Ausdehnungsgefäß unter 500 L	228,14 €		
Umwälzpumpe ab 5 m ³ /h	1.055,72 €	1 Stk	1.055,72 €
Umwälzpumpe bis 5m ³ /h	563,09 €		
Umwälzpumpe bis 2,5 m ³ /h	329,36 €		
Dreiwegeventil DN 40	473,79 €	1 Stk	473,79 €
Schmutzfänger	71,53 €	1 Stk	71,53 €
Schnellentlüfter	28,88 €	20 Stk	577,60 €
Zeigerthermometer	20,14 €	2 Stk	40,28 €
Manometer	57,46 €	1 Stk	57,46 €
Kugelhahn DN40	48,40 €	10 Stk	484,00 €
Kugelhahn DN25	26,72 €	32 Stk	855,04 €
Verteilleitungen C-Stahl DN40	39,22 €	111 m	4.353,42 €
Steigstrang C-Sthl DN40	39,22 €	72 m	2.823,84 €
Anbindeleitungen C-Stahl DN25	25,09 €	96 m	2.408,64 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN40	30,55 €	183 m	5.590,65 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN25	22,54 €	96 m	2.163,84 €
Summe Anschlussleitungen			22.836,91 €
Pufferspeicher			
Heizungspufferspeicher bis 1000 L	3.522,24 €	1,5 Stk	5.283,36 €
Summe Pufferspeicher			5.283,36 €
Fußbodenheizung			
Rohrleitungen FBH PE-X 17-2mm, 15 cm Verlegeabstand	4,00 €	8160 m	32.640,00 €
Verteilschrank 5 Heizkreise Unterputz	492,11 €	16 Stk	7.873,76 €
Heizkreisverteiler 5 Heizkreise	352,05 €	16 Stk	5.632,80 €
Tacker EPS Systemträger FBH	6,00 €	1360 m ²	8.160,00 €
Wärmemengenzähler	200,00 €	17 Stk	3.400,00 €
Summe Fußbodenheizung			57.706,56 €
Haustechnikraum / Aufstellung WP			
Technikraum	1.500,00 €	10 m ²	15.000,00 €
Summe Technikraum			15.000,00 €
Summe Heizungsanlage Brutto			142.046,82 €
Mehraufwand zentrale Trinkwarmwasserbereitung			
Trinkwarmwasserspeicher	2.381,65 €	1,5 Stk	3.572,48 €
Warmwasserleitung Metallverbund DN20	15,23 €	183 m	2.787,09 €
Warmwasserleitung Metallverbund DN15	10,81 €	96 m	1.037,76 €
Warmwasser-Zirkulationspumpe	291,28 €	1 Stk	291,28 €
Absperrventil DN20	82,21 €	17 Stk	1.397,57 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN15	14,70 €	96 m	1.411,20 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN20	19,32 €	183 m	3.535,56 €
Summe TWW Brutto			14.032,94 €
Summe Gesamtanlage Brutto			156.079,75 €

Variante 20 KW / 600 m²

	EP	Menge	GP
WP Heizen			
WP Luft 20-35 KW			
WP Luft 10-20 KW	21.237,80 €	1 Stk	21.237,80 €
WP kleiner 10 kW			
Summe WP Heizen			21.237,80 €
Anschlussleitungen			
Ausdehnungsgefäß über 500 L			
Ausdehnungsgefäß unter 500 L	228,14 €	1 Stk	228,14 €
Umwälzpumpe ab 5 m ³ /h			
Umwälzpumpe bis 5m ³ /h	563,09 €	1 Stk	563,09 €
Umwälzpumpe bis 2,5 m ³ /h			
Dreiwegeventil DN 40			
Schmutzfänger	71,53 €	1 Stk	71,53 €
Schnellentlüfter	28,88 €	1 Stk	28,88 €
Zeigerthermometer	20,14 €	1 Stk	20,14 €
Manometer	57,46 €	1 Stk	57,46 €
Kugelhahn DN40			
Kugelhahn DN25	26,72 €	24 Stk	641,28 €
Verteilleitungen C-Stahl DN40	25,09 €	49 m	1.228,67 €
Steigstrang C-Sthl DN40	25,09 €	32 m	796,98 €
Anbindeleitungen C-Stahl DN25	25,09 €	42 m	1.062,64 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN40	22,54 €	81 m	1.819,77 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN25	22,54 €	42 m	954,64 €
Summe Anschlussleitungen			7.473,21 €
Pufferspeicher			
Heizungspufferspeicher bis 1000 L	3.522,24 €	1 Stk	3.522,24 €
Summe Pufferspeicher			3.522,24 €
Fußbodenheizung			
Rohrleitungen FBH PE-X 17-2mm, 15 cm Verlegeabstand	5,00 €	3600 m	18.000,00 €
Verteilschrank 5 Heizkreise Unterputz	492,11 €	6 Stk	2.952,66 €
Heizkreisverteiler 5 Heizkreise	352,05 €	6 Stk	2.112,30 €
Tacker EPS Systemträger FBH	6,00 €	600 m ²	3.600,00 €
Wärmemengenzähler	200,00 €	6 Stk	1.200,00 €
Summe Fußbodenheizung			27.864,96 €
Haustechnikraum / Aufstellung WP			
Technikraum	1500	6 m ²	9.000,00 €
Summe Technikraum			9.000,00 €
Summe Heizungsanlage Brutto			69.098,21 €
Mehraufwand zentrale Trinkwarmwasserbereitung			
Trinkwarmwasserspeicher	2.381,65 €	1 Stk	2.381,65 €
Warmwasserleitung Metallverbund DN20	15,23 €	81 m	1.229,60 €
Warmwasserleitung Metallverbund DN15	10,81 €	42 m	457,84 €
Warmwasser-Zirkulationspumpe	291,28 €	1 Stk	291,28 €
Absperrventil DN20	82,21 €	8 Stk	657,68 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN15	14,70 €	42 m	622,59 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN20	19,32 €	81 m	1.559,81 €
Summe TWW Brutto			7.200,44 €
Summe Gesamtanlage Brutto			76.298,65 €

Variante 5 KW / 200 m²

	EP	Menge	GP
WP Heizen			
WP Luft 20-35 KW			
WP Luft 10-20 KW			
WP kleiner 10 kW	18.080,00 €	0,5 Stk	9.040,00 €
Summe WP Heizen			9.040,00 €
Anschlussleitungen			
Ausdehnungsgefäß über 500 L			
Ausdehnungsgefäß unter 500 L	228,14 €	1 Stk	228,14 €
Umwälzpumpe ab 5 m ³ /h			
Umwälzpumpe bis 5 m ³ /h			
Umwälzpumpe bis 2,5 m ³ /h	329,36 €	1 Stk	329,36 €
Dreiwegeventil DN 40			
Schmutzfänger	71,53 €	1 Stk	71,53 €
Schnellentlüfter	28,88 €	1 Stk	28,88 €
Zeigerthermometer	20,14 €	1 Stk	20,14 €
Manometer	57,46 €	1 Stk	57,46 €
Kugelhahn DN40			
Kugelhahn DN25	26,72 €	14 Stk	374,08 €
Verteilleitungen C-Stahl DN40	25,09 €	16 m	409,56 €
Steigstrang C-Sthl DN40	25,09 €	11 m	265,66 €
Anbindeleitungen C-Stahl DN25	25,09 €	14 m	354,21 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN40	22,54 €	27 m	606,59 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN25	22,54 €	14 m	318,21 €
Summe Anschlussleitungen			3.063,82 €
Pufferspeicher			
Heizungspufferspeicher bis 1000 L	3.522,24 €	1 Stk	3.522,24 €
Summe Pufferspeicher			3.522,24 €
Fußbodenheizung			
Rohrleitungen FBH PE-X 17-2mm, 15 cm Verlegeabstand	6,00 €	1200 m	7.200,00 €
Verteilschrank 5 Heizkreise Unterputz	492,11 €	2 Stk	984,22 €
Heizkreisverteiler 5 Heizkreise	352,05 €	2 Stk	704,10 €
Tacker EPS Systemträger FBH	6,00 €	200 m ²	1.200,00 €
Wärmemengenzähler	200,00 €	1 Stk	200,00 €
Summe Fußbodenheizung			10.288,32 €
Haustechnikraum / Aufstellung WP			
Technikraum	1.500,00 €	4 m ²	6.000,00 €
Summe Technikraum			6.000,00 €
Summe Heizungsanlage Brutto			31.914,38 €
Mehraufwand zentrale Trinkwarmwasserbereitung			
Trinkwarmwasserspeicher	2.381,65 €	0,5 Stk	1.190,83 €
Warmwasserleitung Metallverbund DN20	15,23 €	27 m	409,87 €
Warmwasserleitung Metallverbund DN15	10,81 €	14 m	152,61 €
Warmwasser-Zirkulationspumpe			
Absperrventil DN20	82,21 €	3 Stk	246,63 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN15	14,70 €	14 m	207,53 €
Rohrdämmung, MW Alukaschiert DN20	19,32 €	27 m	519,94 €
Summe TWW Brutto			2.727,40 €
Summe Gesamtanlage Brutto			34.641,78 €