

Forschungsprojekt „IR-Bau“

Potenzial von Infrarot-Heizsystemen für hocheffiziente Wohngebäude

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.11

Projektabschlussbericht: Stand: 02/2020



gefördert durch:



Bundesministerium
des Innern, für Bau
und Heimat

ZUKUNFTBAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



*Autoren: Jan Heider M.A., Dipl.-Ing. Nicole Conrad B.Sc., Prof. Dr. Thomas Stark,
Aleksiej Abdulganiev B.A. (HTWG Konstanz), Dr. Peter Kosack (TU Kaiserslautern),
Dipl.-Ing. Anne-Kristin Wagner (ee concept)*

Steckbrief Projekt IR-BAU

Das Projekt wurde mit Mitteln des Innovationsprogramms **Zukunft Bau** des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SWD-10.08.18:7-17.11)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Projektstart war 01.04.2017, die Projektlaufzeit betrug 30 Monate.

Forschungsnehmer ist die HTWG Konstanz, Fakultät Architektur und Gestaltung,
Fachgebiet Energieeffizientes Bauen, Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark.

Projektteam HTWG:

Projektleitung:

Jan Heider M.A., Architekt + Energieberater (IF-Bau),

Unterstützung bei Planung, Einbau und Betrieb der Mess- und Regelungstechnik:

Aleksej Abdulganiev B.Eng., Elektroniker für Energie- und Gebäudetechnik

Planung, Durchführung und Auswertung der Nutzerbefragung in K76:

Dipl. Ing. Nicole Conrad, Architektin, B.Sc. Psychologie,
Dozentin HTWG, Universität Konstanz

Weitere Unterstützer:

Johannes Kimmerle M.A., Manuel Staus

Das Projektteam umfasst nachfolgende Partner aus Forschung und Industrie:

Technische Universität Kaiserslautern (Beratung Laborräume & Begleitforschung)
Dr. Peter Kosack

Bosch Thermotechnik GmbH (Ausstattung & Beratung Wärmepumpensystem)
Dr. Uwe Limbeck, Dr. Mark Arnold

ee concept GmbH (LCC und LCA Berechnung)
Dipl.-Ing. Anne Wagner, Prof. Dr. Angèle Tersluisen, Dr. Martin Zeumer,

Ehoch4 GmbH (Bereitstellung Laborräume Ehoch4)
Jürgen Gaugel, Petra Hahn-Wiggenhauser

Genossenschaft K76 (Unterstützung Begleitforschung K76)
Stellvertretend: Kirsten Wiegmann, Andreas Knauf, Thomas Ahl,
Dipl.-Ing. Andreas Noback

Redwell Manufaktur GmbH (Ausstattung und Beratung Infrarotheizungen)
Michael Ringbauer MBA, Christian Röck MBA, DI (FH) Barbara Faigel, Peter Soler

werk.um architekten GbR (Unterstützung Begleitforschung K76)
Dipl.-Ing. Arne Steffen, Dipl.-Ing. Thomas Lueckgen

Nachfolgende Sponsoren haben das Projekt unterstützt:

ABB STRIEBEL & JOHN GmbH (Schaltschrank)



Danfoss GmbH (Elektrische Fußbodenheizung)



ELTAKO GmbH (Stromzähler)



Geberit Vertriebs GmbH (Hydraulikleitungen)



inVENTer GmbH (Dezentrales Lüftungssystem)



Folgende weitere Unternehmen haben das Projekt unterstützt:

DRAGO Automation GmbH (A/D Wandler Temperaturmessung)

Nabenhauer GmbH & Co.KG (Unterstützung beim Einbau des WP-Systems)

Hochschule Biberach HBC (Unterstützung Sensorkalibrierung)

quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG (Einbau und Material für Heizestrich und Innenputz)

WDV-Molliné GmbH (Wärmemengenzähler)

Ziegel Zentrum Süd e.V. (Ziegeltrennwände für Laborräume)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	9
1 Einleitung	17
1.1 Projektthese	19
1.2 Forschungsfragen	20
1.3 Untersuchungsmethodik	21
2 Grundlagen:	23
2.1 Thermodynamische Grundlagen zur Infrarotstrahlung	24
2.2 Strahlungsleistung einer IR-Heizung	26
2.3 Strahlungswirkungsgrad einer IR-Heizung	27
2.4 Abstrahlverhalten und Strahlungsintensität über die Entfernung	28
2.5 Thermische Behaglichkeit und operative Temperatur	30
2.6 Energetische Bilanzierung von Wärmepumpen	35
3 Wissenschaftliche Begleitforschung K76	39
3.1 Beschreibung Gebäude K76	40
3.2 Energiekonzept K76	42
3.3 Konzeption Begleitforschung K76	46
3.4 Untersuchte Fragestellungen	47
3.4.1 Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude	47
3.4.2 Optimierung des IR-Heizsystems durch PV und Stromspeicher	57
3.4.3 Behaglichkeit und Bedienbarkeit im realen Wohngebäude	61
3.4.4 Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	73
3.4.5 Lufttemperatur bei IR-Heizungen	74
3.5 Fazit Begleitforschung K76	75
4 Labormessungen	79
4.1 Beschreibung der Laborräume	80
4.2 Beschreibung der eingesetzten Wärmeerzeuger	82
4.3 Beschreibung der eingesetzten Messtechnik	87
4.4 Untersuchte Fragestellungen	91
4.4.1 Strombedarfsdifferenzen verschiedener Wärmeerzeuger im Realbetrieb	91
4.4.2 Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizsystemen	119
4.4.3 Verbesserung der Wärmedämmqualität der Bauteile durch IR-Heizung	120

4.4.4	Reduzierte Lufttemperatur bei einer IR-Heizung	121
4.4.5	Mögliche Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen	122
4.4.6	Abstrahlwinkel einer plattenförmigen Infrarotheizung	127
4.4.7	Strahlungswirkungsgrad verschiedener IR-Heizungen	130
4.4.8	Einfluss von Strahlungswirkungsgrad und Aufheizzeit auf die Effizienz	137
4.4.9	Fußbodenheizung: Strahlungs- oder Konvektionsheizung	138
4.5	Fazit Labormessungen	139
5	Berechnungen / Simulationen	143
5.1	Simulation der Laborräume	144
5.2	Vergleich Messungen / Simulationen, Validierung der Simulationen	145
5.3	Untersuchte Fragestellungen	160
5.3.1	Übergabeverluste einer IR-Heizung	160
5.3.2	Mögliche Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen	168
5.3.3	Bilanzierung Life Cycle Assessment (LCA) und Life Cycle Costing (LCC)	170
5.3.4	Vergleich der gesamtökologischen Bewertung (LCA) über 50 Jahre	171
5.3.5	Vergleich der gesamtökonomischen Bewertung (LCC) über 50 Jahre	174
5.3.6	Einflussgrößen für IR-Heizsysteme	177
5.3.7	Optimierung eines IR-Heizsystems durch PV und Speicher	188
5.3.8	Können IR-Systeme eine Alternative zu WP-Systemen sein?	192
5.4	Fazit Berechnungen / Simulationen	193
6	Fazit / Ausblick:	197
	Literaturverzeichnis:	203
	Abbildungsverzeichnis:	207
	Tabellenverzeichnis:	213
	Anhang:	215

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt IR-Bau hat sich im Zeitraum von 2017 bis 2019 mit der Frage auseinandergesetzt, ob Infrartheizungen (Elektrodirektheizungen) im Sinne einer Low-Tech-Lösung in sehr gut gedämmten Wohngebäuden aus ökonomischer und ökologischer Sicht eine Alternative zu Wärmepumpensystemen sein können. Die Fragestellungen wurden im Projekt mit Hilfe der drei folgenden wissenschaftlichen Methoden untersucht:

- Wissenschaftliche Begleitung des Pilotprojektes K76 mit messtechnischer Auswertung und Nutzerbefragung.
- Durchführung von Messungen in Laborräumen unter Laborbedingungen zu spezifischen Fragestellungen.
- Erstellung von Simulationsmodellen, die die Laborräume abbilden und durch die Messungen validiert werden können.

Zu folgenden Leitfragen konnten im Projekt neue Erkenntnisse gewonnen werden:

1. Welche effektiven Rauminnenoberflächentemperaturen stellen sich im Betrieb bei IR-Heizsystemen ein?

Die These, dass die Rauminnenoberflächentemperaturen in einem mit IR-Heizung beheizten Raum höher sind als in einem Raum mit Fußbodenheizung konnte nicht bestätigt werden. Zwar ist die mittlere Oberflächentemperatur, zusammen mit den Heizflächen der IR-Heizungen, höher als im Fußbodenheizungsraum, ohne die Heizflächen der IR-Heizung sind die Oberflächentemperaturen jedoch geringer als in einem Fußbodenheizungsraum. Die gleiche Tendenz konnte auch bei den Messungen der Innenoberflächentemperaturen im Gebäude K76 beobachtet werden. Somit schließt sich aus, dass die Bauteile eines mit IR-Heizung beheizten Raumes trockener sind und dadurch bessere Dämmqualitäten erreichen als die Bauteile eines mit Fußbodenheizung beheizten Raumes. Ebenso treten somit aber auch keine erhöhten Transmissionswärmeverluste durch höhere Temperaturdifferenzen an den Bauteilen auf.

Oberflächen wie Holz oder glatter Beton können eventuell 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 Wandoberflächentemperaturen wären dabei kälter, was zu einer weiteren Reduzierung der Transmissionswärmeverluste führen würde. Daher wäre zu prüfen, ob der Einsatz von stärker IR-reflektierenden Oberflächen die Effizienz eines IR-Heizungssystems verbessern könnte. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

2. Welche Reduktion der Lufttemperatur lässt sich durch erhöhte Oberflächentemperaturen bei Infrarot-Heizelementen realisieren, um dieselben operativen Temperaturen sicherzustellen?

Die These, dass die Lufttemperatur in einem mit IR-Systemen beheizten und nach identischer operativer Raumtemperatur geregelten Raum geringer ist als bei einem vergleichbar geregelten Raum mit Fußbodenheizung konnte bestätigt werden. Die Lufttemperatur lag in den Laborräumen im mit IR-System beheizten Raum im Mittel ca. 0,6 K unter der Lufttemperatur des Fußbodenheizungsraums. Dies führt bei gleicher Behaglichkeit zu einer Reduktion der Lüftungswärmeverluste.

3. Welche Einsparungen im Energiebedarf lassen sich durch die optimal an das Nutzerverhalten anpassbare Regelung bei IR-Heizungen erzielen?

Wie bereits vermutet, konnten Laborraummessungen bestätigen, dass Infrarotheizungen sehr reaktionsschnell die Temperatur im Raum regeln können. Vorteilhaft bei Infrarotheizungen ist, dass sie kaum thermische Speichermasse besitzen und sie thermisch von der Baukonstruktion entkoppelt sind. Dies führt, zusammen mit einer stufenlos regelbaren Leistungsabgabe, dazu, dass die Wärmeabgabe der Heizungen optimal auf die Wärmebedarfsanforderungen des Raums reagieren kann.

Bei Laborraummessungen mit eingestelltem intermittierendem Betrieb zeigte sich eine Zunahme der Verbrauchsdifferenzen zwischen Fußbodenheizungsraum und Infrarotheizungsraum von 15 %. Als Regler wurde hier jedoch eine „intelligente“ Raumregelung verwendet, die selbstständig die nötige Aufheizzeit zum Erreichen einer Solltemperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt hat. Für die elektrische Fußbodenheizung und die IR-Heizung funktionierte diese Regelung sehr gut. Da die Wärmepumpe aufgrund ihres von der Heizkurve abhängigen modulierenden Betriebs keine konstante Leistung geliefert hat, konnte auch die Regelung keine genaue Aufheizzeit ermitteln. Dies führte dazu, dass der Fußbodenheizung auch außerhalb der vorgesehenen Heizzeiten Wärme zugeführt wurde.

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

4. Welche effektiven Übergabeverluste können bei Infrarotheizungen zur Berechnung angesetzt werden?

Die Laborraummessungen in Verbindung mit den Simulationsmodellen haben ergeben, dass Infrarotheizungssysteme gegenüber wassergeführten, im Heizstrich verlegten Fußbodenheizungen mindestens 50 % geringere Übergabeverluste haben. 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 heute 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 Fußbodenheizungssystem. Diese Art der Regelung konnte jedoch noch nicht im Simulationsmodell abgebildet werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

5. Welche Bedeutung hat der Strahlungswirkungsgrad einer IR-Heizung für die Effizienz des IR-Heizsystems und wie hoch ist der Strahlungswirkungsgrad bei am Markt verfügbaren IR-Modulen?

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 gezeigt. Der Strahlungswirkungsgrad variiert je nach Hersteller zwischen 40 % und 70 %. Es fehlt bislang eine Normierung, die allgemein definiert, wie der Strahlungswirkungsgrad und damit die Güte einer IR-Heizung bestimmt wird.

Bei der Konstruktion von Infrarotheizungen ist eine optimale rückseitige Dämmung für den Strahlungswirkungsgrad entscheidend. Weiterhin hat auch die Position im Raum einen Einfluss auf den Strahlungswirkungsgrad. Hier hat sich gezeigt, dass sich eine Deckenaufhängung der Systeme 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 jedoch noch weiterer Forschungsbedarf.

6. Wie groß ist die effektive Differenz des Strombedarfs im Betrieb für die Wärmeversorgung von Räumen im Realbetrieb inklusive Hilfsenergie zwischen A: Infrarotheizsystem, B: Im Boden integriertem Direktstrom-Heizelement (Niedertemperatur) und C: Luftwärmepumpe mit Fußbodenheizung?

Bei Vergleichsmessungen in Laborräumen über mehrere Monate in der Heizperiode 2018 / 2019 und einer Regelung nach operativer Raumtemperatur hat die deckenaufgehängte Infrarotheizung ca. 2,9 mal mehr Strom und die elektrische Fußbodenheizung (Trockenbau) ca. 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.

Da die Laborräume jedoch zwei maßgebliche Besonderheiten aufweisen (nur südorientierte Räume, Räume unterhalb der Laborräume außerhalb der Bilanzgrenze) lassen sich die Ergebnisse nicht unmittelbar auf übliche Gebäude übertragen. Simulationen und Berechnungen auf Grundlage der Laborraummessungen ergeben einen Stromverbrauchsunterschied von ca. 3,1 bis 3,3 zwischen Wärmepumpen- und Infrarotheizungssystem. 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.

7. Welche Verbrauchswerte für die IR-Heizung ergeben sich in einem realen Gebäude?

Der witterungsbereinigte Endenergieverbrauch der Infrarotheizungen im Pilotprojekt K76 lag in der ersten Heizperiode 2017/2018 bei 25,7 kWh/m²a, in der zweiten Heizperiode 2018/2019 bei 21,2 kWh/m²a. Damit entspricht der Verbrauch bereits in der zweiten Heizperiode dem zuvor nach EnEV berechneten Wert. Eventuell sinkt dieser auch in den kommenden Heizphasen mit zunehmender Trocknung der Baukonstruktion weiter. Eine Optimierung und Umstellung der Regelung auf operative Temperatur als Regelgröße könnte den Energieverbrauch weiter senken.

8. Wie wird die Behaglichkeit und Bedienbarkeit einer IR-Heizung im realen Betrieb bewertet?

Die Nutzerbefragung der Bewohner des Pilotprojekts K76 hat ergeben, dass die Bewohner das Infrarotheizsystem als thermisch behaglich und gut bedienbar empfinden.

9. Wie stellt sich der Vergleich der gesamtökologischen Bewertung dar, in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung?

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, ein IR-System mit einer Photovoltaikanlage zu ergänzen, bei gleichen oder sogar geringeren Anfangsinvestitionskosten als bei einem vergleichbaren Wärmepumpensystem.

Hier stellt sich also die Grundsatzfrage: Bringt es größere ökonomische und ökologische Vorteile, mit dem vorhandenen Kapital den Energieverbrauch durch effiziente Wärmeerzeugung (Wärmepumpe) zu reduzieren oder mit dem Kapital die lokale regenerative Energieproduktion (Photovoltaik) zu erhöhen?

Für das Projekt K 76 wurden entsprechende vergleichende LCA-Berechnungen durchgeführt. Aus ökologischer Sicht kann demnach ein Infrarot-PV-System (in Abhängigkeit zur Gebäudegröße und Dämmqualität) gegenüber einem Luft-Wärmepumpensystem über einen Zeitraum von 50 Jahren deutliche Vorteile aufweisen. Die Kombination mit einer Photovoltaik-Anlage am Gebäude macht die IR-Heizung in der einfachen Jahresbilanz deutlich besser als die Wärmepumpenvariante. Erste Untersuchungen in Richtung einer auf Eigenverbrauch optimierten Regelung der IR-Heizungen zeigen, dass es möglich ist, mit dem IR-PV-System in der Heizperiode den gleichen oder sogar geringeren Netzstrombezug zu erreichen, den ein Wärmepumpensystem hätte. Dieser Ansatz führt zu maximal gleichen oder geringeren Anfangsinvestitionskosten, niedrigeren Lebenszykluskosten und hohen Stromproduktionsüberschüssen außerhalb der Heizperiode. Die Überschüsse im Sommer

können dazu beitragen, fossile Stromproduktion im Sommerhalbjahr zu ersetzen oder, sobald geeignete Speichertechnologien zur Verfügung stehen, für den Winter eingespeichert werden.

10. Wie stellt sich der Vergleich der gesamtökonomischen Bewertung dar, in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung?

Ebenso wurden für das Projekt K 76 entsprechend vergleichende LCC-Berechnungen durchgeführt. Die Lebenszykluskosten über 50 Jahre können demnach 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 IR-Heizung profitiert dabei von geringen Anschaffungskosten, der von der Photovoltaikanlage produzierte Strom senkt die Betriebskosten des Gebäudes oder kann ins öffentliche Netz eingespeist und vermarktet werden.

11. Bei welchen Randbedingungen bezüglich spezifischem Heizwärmebedarf, Gesamtwärmeumsatz und Stromkosten können IR-Heizsysteme Vorteile aufweisen?

Die Gebäudegröße bzw. der spezifische Energieumsatz für Gebäudeheizung hat einen wesentlichen Einfluss auf die LCA und LCC-Kennwerte. Je größer das Gebäude bzw. je höher die Energiedichte, desto stärker wirkt sich der Effizienzvorteil des Wärmepumpensystems aus. Als Grenze hat sich gezeigt, dass in sehr gut gedämmten (< 30 kWh/m²a Jahresheizwärmebedarf) Wohngebäuden bis ca. 1500 m² - 2000 m² beheizter Wohnfläche eine IR-Heizung Vorteile in ökologischer und ökonomischer Sicht aufweisen kann. Dies ist jedoch immer von den genauen projektspezifischen Rahmenbedingungen abhängig. Je kleiner und besser gedämmt ein Haus ist, desto größer sind die wirtschaftlichen Vorteile eines IR-Heizsystems gegenüber einem Wärmepumpensystem.

12. Wie lässt sich das Infrarot-Heizsystem durch Einbindung von Photovoltaiksystemen und dezentraler Stromspeicher in ökologischer und ökonomischer Hinsicht optimieren?

Kleine dezentrale Stromspeicher bringen, in 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 ohnehin direkt verbraucht werden kann. Zur Erhöhung des Eigenverbrauchsgrades im Sommer kann ein dezentraler Stromspeicher jedoch einen Beitrag leisten.

13. Können IR-Heizungen zur Gebäudebeheizung unter bestimmten Rahmenbedingungen eine sinnvolle Alternative zu Wärmepumpensystemen sein?

Infrarotsysteme weisen gegenüber Wärmepumpensystem in der Regel deutlich geringere Investitionskosten auf. Eine wesentliche Erkenntnis des Projektes ist, dass diese freiwerdenden Mittel oder ein Anteil davon zwingend in die Erzeugung von

erneuerbarem Strom investiert werden muss. Am besten eignet sich hier ein Photovoltaiksystem. Die Installation von IR-PV-Systemen in sehr gut gedämmten neu gebauten Ein- und Mehrfamilienhäusern oder die thermische Sanierung und Umrüstung von Ein- und Mehrfamilienhäusern auf IR-PV-Systeme kann dazu beitragen, den Ausbau der regenerativ erzeugten Energie in Deutschland massiv voranzutreiben.

Kleine Gebäude könnten mit ihren Energieüberschüssen große Gebäude mit Wärmepumpensystemen mit Strom mitversorgen. Dabei würden die Hauseigentümer bei den Investitionskosten nicht stärker oder sogar geringer finanziell belastet, als bei der Umstellung auf Wärmepumpensysteme.

Wie sich eine großmaßstäbliche Umstellung der Gebäudebeheizung auf IR-Heizungen auf die Netzinfrastruktur in Deutschland auswirken würde und ob der Ausbau der zusätzlich benötigten Photovoltaikflächen sozialverträglich machbar ist, muss noch untersucht werden. Nach aktuellen Studienergebnissen sind die Flächenpotenziale dafür in Deutschland vermutlich ausreichend vorhanden.

1 Einleitung

Die Entwicklungen zur Energiewende in Deutschland zeigen einen klaren Trend zu elektrischen Systemen mit Strom als Energiequelle. Neben dem angestrebten Wandel im Verkehrssektor zum Ausbau der elektrischen Mobilität gewinnt Strom auch für die Wärmeerzeugung für Heizung und Trinkwarmwasser zunehmend an Bedeutung. Dies trifft besonders im Bereich von Gebäuden mit hoher Energieeffizienz zu: Über 80 Prozent der realisierten Pilotprojekte im Rahmen der Effizienzhaus Plus-Initiative nutzen Strom als Energieträger zur Wärmebereitstellung.¹ Dominierend sind hier Wärmepumpen mit unterschiedlichen Arten von Wärmequellen. Gegenüber einer direkten Erwärmung durch Strom können bei Wärmepumpensystemen JAZ-Werte zwischen 3 und 5 erzielt werden, was in der Regel zu einer deutlichen Einsparung an Strom führt. Dies erfordert jedoch einen nicht unerheblichen technischen und finanziellen Aufwand:

- Wärmeerzeuger (Wärmepumpe)
- Wärmequellenerschließung (Luftwärmetauscher, Erdsonden etc.)
- Wärmetauscher und Wärmespeicher (Schichtenspeicher, Speicherkaskade, Trinkwasserstation etc.)
- Wassergeführte Wärmeverteilsysteme (Hydraulik mit Pumpen, Ventilen, Regelung, Zirkulationsleitung etc.)
- Wassergeführte Wärmeübergabesysteme (Heizkörper, Fußbodenheizung etc.)
- Messdatenerfassung zur Überprüfung der Effizienz und zur Abrechnung (Strombezug, Wärmemengenzähler für Wärmeerzeugung, Wärmeabgabe im Raum etc.)

Dies ist weiterhin verbunden mit einem entsprechenden Aufwand für Inbetriebnahme, Wartung und Instandhaltung sowie erforderlicher Fläche bzw. Raum für Gebäudetechnik. Dies verstärkt sich, wenn das Wärmepumpensystem zur Effizienzsteigerung mit weiteren Technologien ergänzt wird (Solarthermie, Eisspeicher etc.). Dem abnehmenden Energieumsatz steht also eine zunehmende Komplexität der Gebäudetechnik gegenüber. Infrarot-Heizelemente im Raum bilden hingegen die denkbar einfachste Art der Wärmeversorgung:

- Der Energieträger Strom wird unmittelbar ohne Zwischenstufen direkt beim Bedarf in reine Nutzenergie umgewandelt.
- Es ist, außer der ohnehin üblichen Stromversorgung der Wohneinheit, keine spezielle Infrastruktur erforderlich.
- Das Heizsystem kann mit minimalem Aufwand verändert, verkleinert, erweitert, ersetzt oder rückgebaut werden.
- Die Art der Wärmeabgabe ist strahlungsdominiert und erzeugt höhere Oberflächentemperaturen im Raum, was nach allgemeiner Erkenntnis hinsichtlich der Behaglichkeit vorteilhaft ist.
- Das System ermöglicht eine raum- oder zonenweise unmittelbare Kontrolle des Nutzers auf Funktion und Leistung.

¹ [Erhorn, 2015]

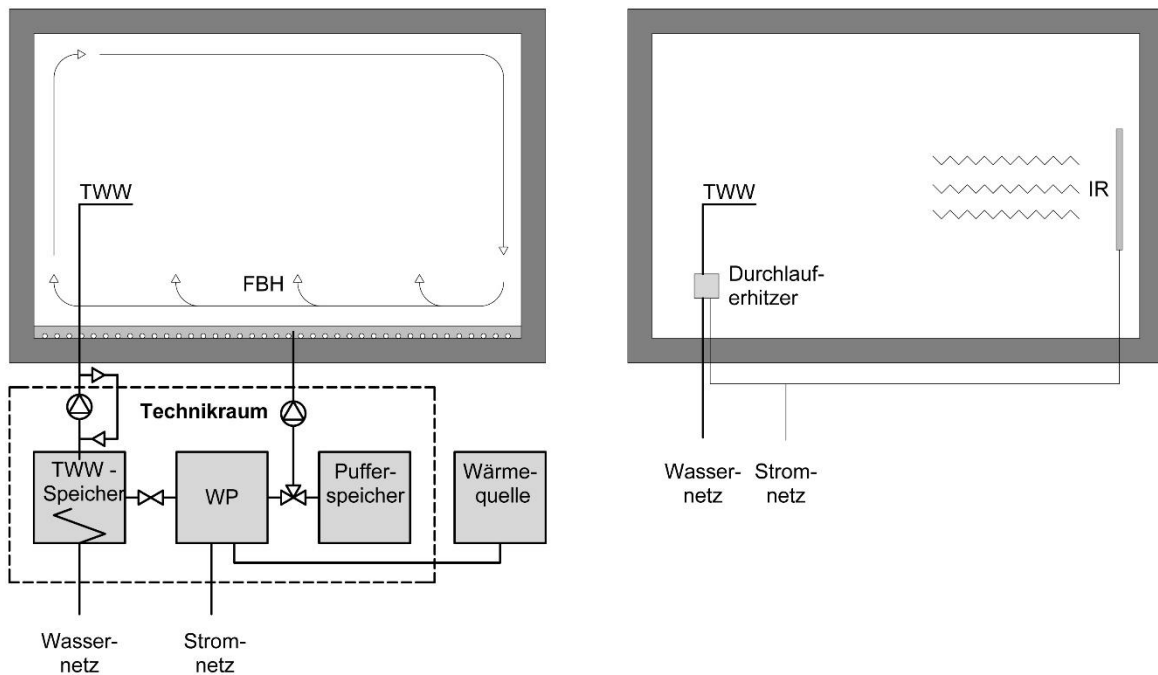


Abb. 1 Vergleich Material- und Installationsaufwand WP/IR

Infrarot-Heizsysteme wurden bislang auf wissenschaftlicher Basis nur rudimentär behandelt. Untersuchungen zur Effizienz und auch Vergleiche zu Wärmepumpensystemen wurden in der Vergangenheit in mehreren Studien untersucht.^{2 3} Die Ergebnisse lassen jedoch zahlreiche Fragen offen, die für einen objektiven Vergleich erforderlich sind und bilden keine belastbaren Grundlagen für die Planung in der Baupraxis.

Für einen ganzheitlichen Vergleich von Systemansätzen fehlen bislang entsprechende Grundlagen in Hinblick auf reale Effizienz im Betrieb, Auswirkung auf die Behaglichkeit sowie Betrachtung der gesamten Lebenszykluskennwerte zur Wirtschaftlichkeit und ökologischer Bewertung unter Einbezug der Herstellungsenergie. Durch wissenschaftliche Begleitung eines Modellvorhabens und parallel durchgeführten vergleichenden Laboruntersuchungen mit entsprechenden Simulationen soll diese Lücke im Rahmen des Projektes geschlossen werden.

² [Kosack, 2009]

³ [Klauz, 2010]

1.1 Projektthese

Die Grundthese des Projektes besteht in der Annahme, dass Infrarot-Heizsysteme gegenüber konventionellen, konvektionsdominierten Heizsystemen auf wasserbasierten Verteil- und Übergabesystemen (im speziellen Wärmepumpensystemen) bei bauphysikalisch hocheffizienten Wohngebäuden deutliche Vorteile in ökonomischer und ökologischer Hinsicht aufweisen können.

In ökonomischer Hinsicht ermöglichen IR-Systeme erhebliche Einsparungen bei der Investition, die sich in einer Betrachtung der Lebenszykluskosten positiv bemerkbar machen. Hier verfolgt das Projekt das Ziel, zu klären, bei welchen Randbedingungen hinsichtlich spezifischem Energiebedarf, absolutem Energieumsatz und Strompreis IR-Systeme gegenüber wassergeführten Wärmepumpenanlagen im Vorteil sein können.

In ökologischer Hinsicht ist die Berücksichtigung der so genannten "grauen Energie" von Bedeutung. Bei energieeffizienten Wohngebäuden beträgt der Anteil der Gebäudetechnik an der gesamten Herstellungsenergie des Gebäudes in der Regel über 20 Prozent.⁴ In der ökologischen Bewertung wirkt sich bei IR-Systemen positiv aus, dass der Energieaufwand für Herstellung, Installation und Wartung erheblich reduziert ist. Der höhere Strombedarf im Betrieb von IR-Systemen gegenüber wassergeführten Wärmepumpenanlagen kann somit eventuell kompensiert werden. Ziel des Projektes ist es, hierzu eine verbesserte Datengrundlage zu schaffen.

Weiterhin wird im Projekt der Frage nachgegangen, ob bei IR-Heizungen systembedingt Einsparungen in der Endenergie gegenüber dem Heizwärmebedarf angesetzt werden können. Zur Berechnung der Endenergie wird bei Systemen mit Elektrodirektheizung nach DIN 4701 eine Erzeuger-Aufwandzahl von 1,0 angenommen, Untersuchungen ermitteln einen Wert von 1,05.⁵ Folgende Thesen, die eine mögliche Anpassung dieses Kennwerts in Aussicht stellen, sollen im Projekt überprüft werden:

- Nach üblicher Theorie können durch höhere Oberflächentemperaturen die Raumlufttemperaturen gegenüber konvektiver Wärmeübergabe reduziert werden. Hierdurch können geringere Transmissionswärmeverluste über die Bauteile sowie reduzierte Lüftungswärmeverluste realisiert werden.
- Die höheren Oberflächentemperaturen führen zu einer Minderung des Feuchteanteils in den Außenbauteilen, wodurch sich die Wärmeleitfähigkeit und die entsprechenden Transmissionswärmeverluste über die Bauteile reduzieren.
- Durch die strahlungsdominierte Wärmeübertragung können die inneren Speichermassen der Raumboflächen effektiver genutzt werden.
- Durch die extrem kurze Regelungszeit zur Wärmeabgabe können Schwankungen durch solare und interne Wärmegewinne sehr effektiv genutzt werden.
- Die unmittelbare und sehr schnelle Wärmebereitstellung ermöglicht eine an das Nutzerverhalten angepasste Wärmeversorgung. Im Umkehrschluss hat in diesem System der Nutzer durch sein Verhalten den maximalen Einfluss auf den Energieverbrauch des Gebäudes.

⁴ [Von Euw, 2012]

⁵ [Klauz, 2010]

1.2 Forschungsfragen

Folgende Leitfragen wurden im Projekt untersucht:

1. Welche effektiven Rauminnenoberflächentemperaturen stellen sich im Betrieb bei IR-Heizsystemen ein?
2. Welche Reduktion der Lufttemperatur lässt sich durch erhöhte Oberflächentemperaturen bei Infrarot-Heizelementen realisieren, um dieselben operativen Temperaturen sicherzustellen?
3. Welche Einsparungen im Energiebedarf lassen sich durch die extrem an das Nutzerverhalten anpassbare Regelung bei IR-Heizungen erzielen?
4. Welche effektiven Übergabeverluste können bei Infrarotheizungen zur Berechnung angesetzt werden?
5. Welche Bedeutung hat der Strahlungswirkungsgrad einer IR-Heizung für die Effizienz des IR-Heizsystems und wie hoch ist der Strahlungswirkungsgrad bei am Markt verfügbaren IR-Modulen?
6. Wie groß ist die effektive Differenz des Strombedarfs im Betrieb für die Wärmeversorgung von Räumen im Realbetrieb inklusive Hilfsenergie zwischen A: Infrarotheizsystem, B: Integriertem Direktstrom-Heizelement (Niedertemperatur) und C: Luftwärmepumpe und Fußbodenheizung?
7. Welche Verbrauchswerte für die IR-Heizung ergeben sich in einem realen Gebäude?
8. Wie wird die Behaglichkeit einer IR-Heizung im realen Betrieb bewertet?
9. Wie stellt sich der Vergleich der **gesamtökologischen** Bewertung dar, in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung?
10. Wie stellt sich der Vergleich der **gesamtwirtschaftlichen** Bewertung dar, in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung?
11. Bei welchen Randbedingungen bezüglich spezifischem Heizwärmebedarf, Gesamtwärmeumsatz und Stromkosten können IR-Heizsysteme Vorteile aufweisen?
12. Wie lässt sich das Infrarot-Heizsystem durch Einbindung von Photovoltaiksystemen und dezentraler Stromspeicher in ökologischer und ökonomischer Hinsicht optimieren?
13. Können IR-Heizungen zur Gebäudebeheizung unter bestimmten Rahmenbedingungen eine sinnvolle Alternative zu Wärmepumpensystemen sein?

1.3 Untersuchungsmethodik

Die Fragestellungen wurden mithilfe von drei wissenschaftlichen Methoden, die parallel über den gesamten Projektzeitraum angewandt wurden, bearbeitet:

- Wissenschaftliche Begleitung des **Pilotprojektes K76** (Mehrfamilienhaus in Darmstadt) mit messtechnischer Auswertung und Nutzerbefragung.
- Durchführung von Messungen in **Laborräumen** unter Laborbedingungen zu spezifischen Fragestellungen auf dem Gelände der Ehoch4 GmbH.
- Erstellung von **Simulationsmodellen**, die sowohl das Pilotprojekt als auch die Laborräume abbilden und durch die Messungen validiert wurden. Auf dieser Grundlage konnten unterschiedliche Szenarien untersucht werden.

Tabelle 1 zeigt, mit welcher der drei wissenschaftlichen Methoden die einzelnen Forschungsfragen beantwortet wurden.

Forschungsfrage	Pilotprojekt K76	Laborräume Ehoch4	Simulationen
1. Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	x	x	
2. Verhalten der Lufttemperatur bei IR-Heizungen	x	x	
3. Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen		x	x
4. Übergabeverluste bei IR-Heizungen			x
5. Strahlungswirkungsgrad von IR-Heizungen		x	
6. Stromverbrauchsdifferenzen IR/WP im realen Betrieb		x	x
7. Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude	x		
8. Behaglichkeit und Bedienbarkeit im realen Wohngebäude	x		
9. Gesamtökologische Bewertung über 50 Jahre (LCC)			x
10. Gesamtökonomische Bewertung über 50 Jahre (LCA)			x
11. Vorteilhafte Randbedingungen für IR-Heizsysteme			x
12. Optimierung eines IR-Heizsystems durch PV und Speicher			x
13. Können IR-Systeme eine Alternative zu WP Systemen sein?			x

Tabelle 1 Mit welcher Methodik wird welche Forschungsfrage beantwortet

2 Grundlagen:

Verwendete Abkürzungen:

E-FBH:	Elektrische Fußbodenheizung
FBH:	Fußbodenheizung
HP:	Heizperiode
IR:	Infrarot
KG:	Kostengruppe
MP:	Messphase
PV:	Photovoltaik
T1-T4:	Laborraum T1-T4
VD:	Validierungsphase
WP:	Wärmepumpe

2.1 Thermodynamische Grundlagen zur Infrarotstrahlung

Grundsätzlich gibt es drei Arten, wie Wärme übertragen werden kann:

- Wärmeleitung (Transmission)
- Wärmeströmung (Konvektion)
- 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, d.h., sie kann sich 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.

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 andern 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 andern Körper ab, als er empfängt. Die Differenz wird Netto-Strahlungsfluss / Strahlungsleistung genannt.⁶

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“ (Kirchhoffsches Strahlungsgesetz).⁷ 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:⁸

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

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

⁶ [Zimmermann, Zimmermann 2012, S.37]

⁷ [Kübler 2001, S.28]

⁸ [Glück, 1990, S.150]

Um die Strahlungsleistung eines nichtschwarzen Strahlers gegenüber einem Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt näherungsweise zu berechnen, kann die Formel zum Strahlungsaustausch verwendet werden:⁹

$$P = \sigma \cdot A \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

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
T_2 :	die absolute Temperatur der bestrahlten Fläche

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.

⁹ [Glück, 1990, S.164]

2.2 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 Wärme abgebenden 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 25) berechnen.

Die Temperatur der Wärme abgebenden 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.

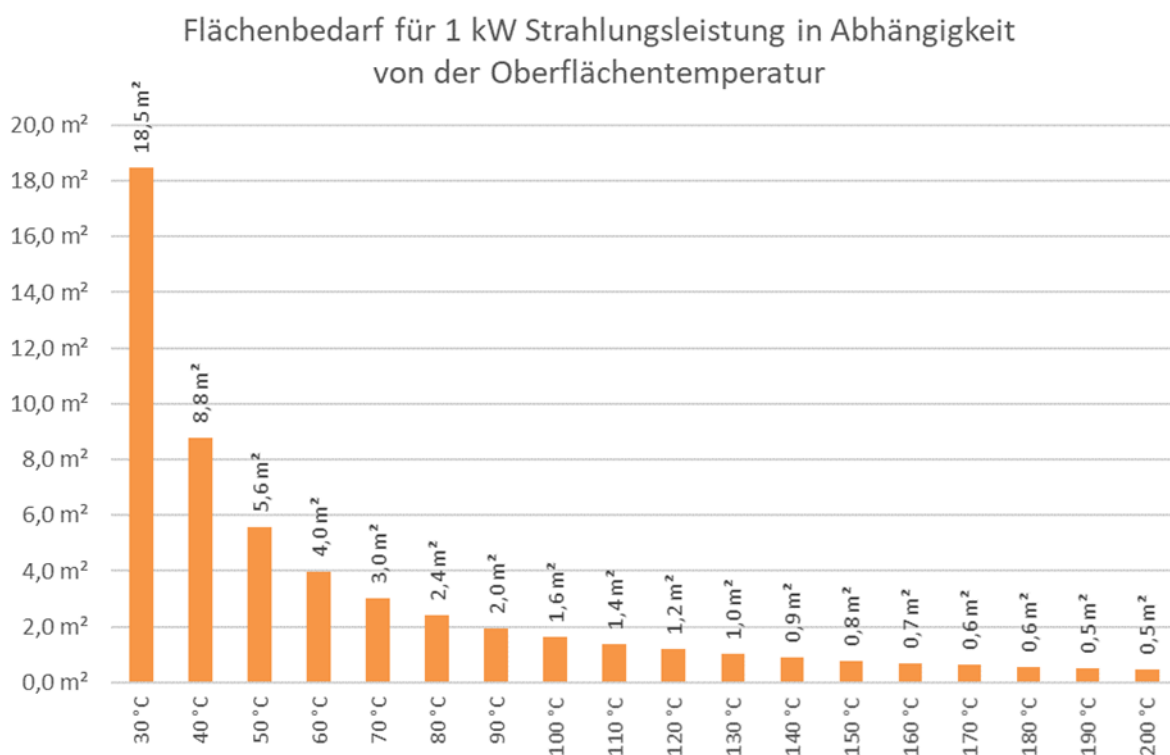


Abb. 2 Flächenbedarf für 1 kW Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des IR-Systems (Temperatur der gegenüberliegenden Fläche 20 °C)

2.3 Strahlungswirkungsgrad einer IR-Heizung

Die Infrarotheizung soll ihre Wärme, im Gegensatz zur Konvektionsheizung, primär über Wärmestrahlung an den Raum abgeben. Dementsprechend muss versucht werden, 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 stationären Betriebszustand 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 abhängig. Der Strahlungswirkungsgrad spiegelt damit die Güte bzw. Effizienz einer Infrarotheizung wieder.

Es gibt bislang keine Norm, die eine Infrarotheizung und den erforderlichen Strahlungswirkungsgrad definiert. Folgt man der Erklärung der „Interessensgemeinschaft Infrarot Deutschland e.V.“ in ihren FAQs kommt man zu dem Schluss, dass eine Strahlungsheizung einen überwiegenden Teil ihrer Wärme durch Strahlung abgeben muss.¹⁰ Somit sollte eine IR-Heizung also einen Strahlungswirkungsgrad von mindestens 51 % aufweisen.

Die „DIN EN IEC 60675-3, Elektrische Haushalt-Direktheizgeräte - Prüfverfahren zur Bestimmung der Gebrauchseigenschaft - Teil 3: Zusätzliche Bestimmungen für die Messung des Strahlungswirkungsgrades“ ist aktuell (11/2019) noch in der Entwicklung. In ihr wird ein einheitliches Verfahren zur Bestimmung des Strahlungswirkungsgrads von IR-Heizungen und eine damit verbundene Klassifizierung der IR-Heizungen hinsichtlich ihrer Strahlungsqualitäten geregelt werden.

¹⁰ [www.ig-infrared.com, 09/2019]

2.4 Abstrahlverhalten und Strahlungsintensität über die Entfernung

Eine gedachte, liegende plattenförmige Infrartheizung 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 dabei diffus in einem Abstrahlwinkel von ca. 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 Raumwinkel von 120°. Die gedachte Innenoberfläche der Halbkugel, auf die sich die Wärmestrahlung bei unterschiedlichen Radien verteilt, lässt sich wie folgt berechnen:

$$A = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2}{3}$$

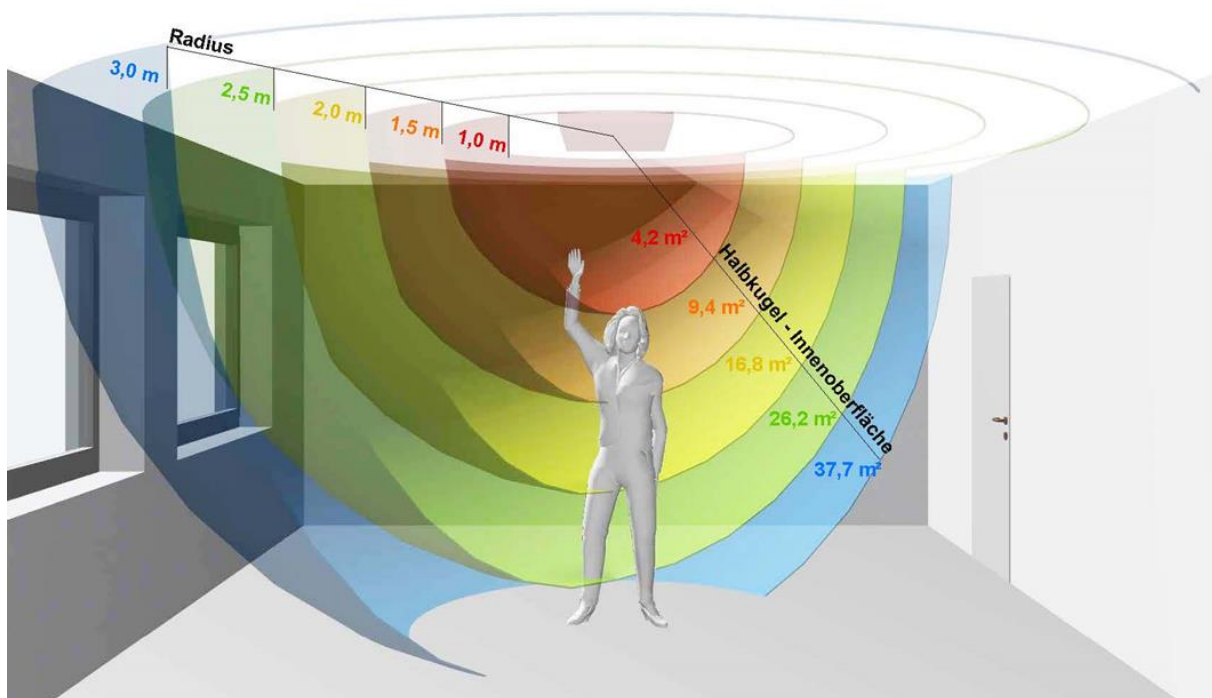
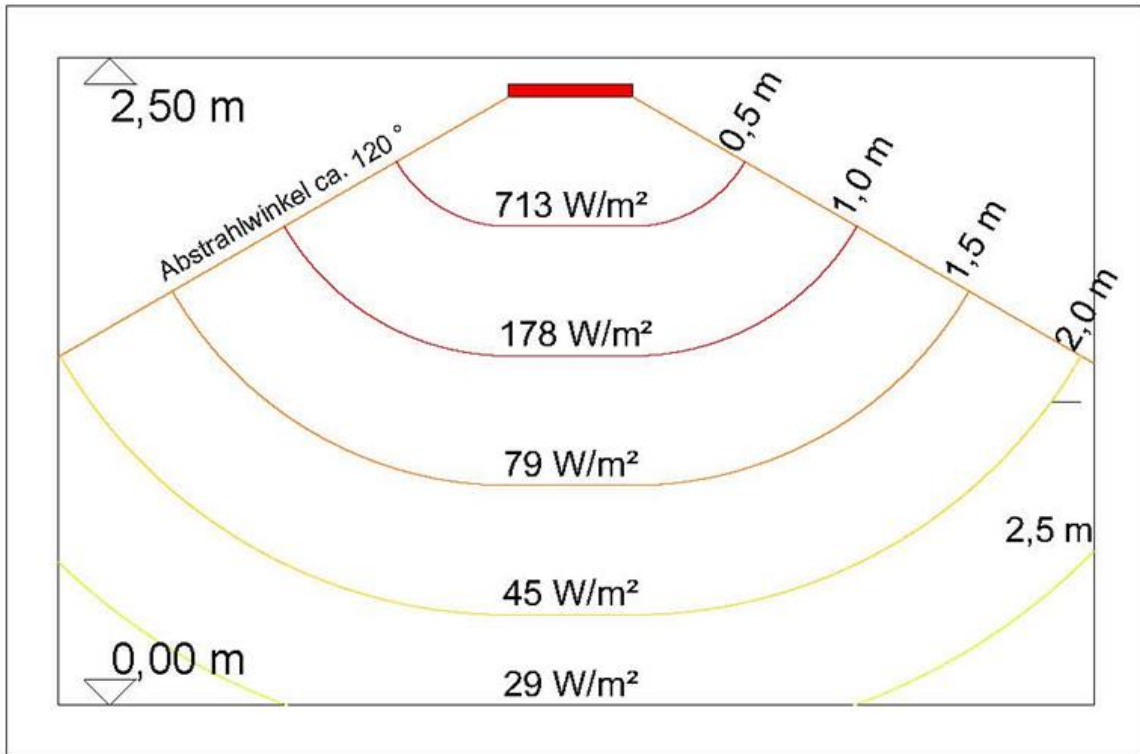


Abb. 3 Ausbreitung der IR-Strahlung im Halbraum unter einer IR-Heizungsplatte

Die Strahlungsintensität pro m² ist demnach 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. 60 %

Abb. 4 Strahlungsleistung im Raum

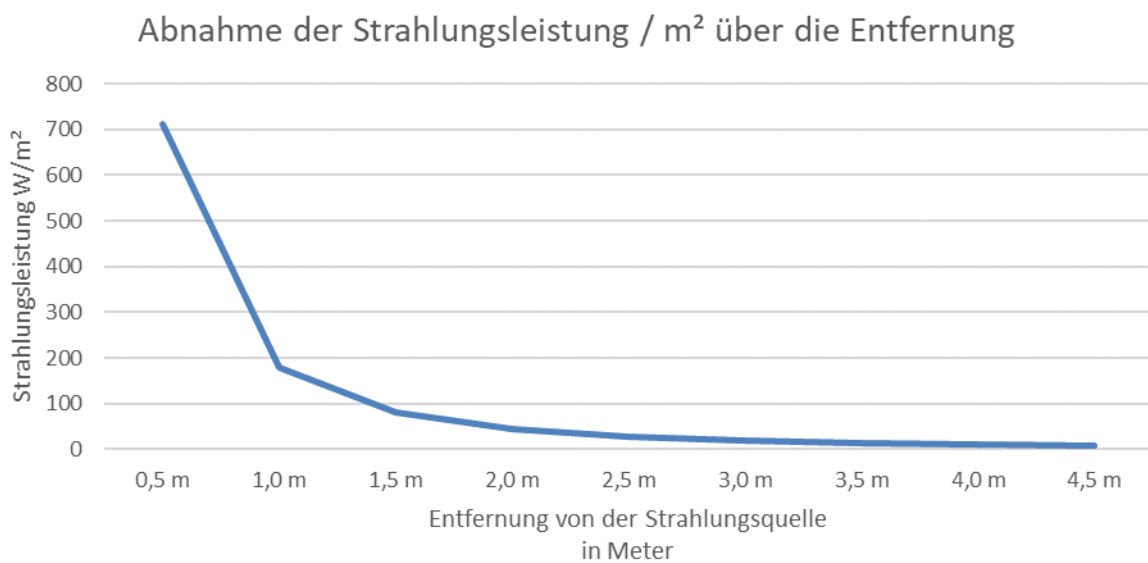


Abb. 5 Abnahme der Strahlungsleistung / m² über die Entfernung

2.5 Thermische Behaglichkeit und operative Temperatur

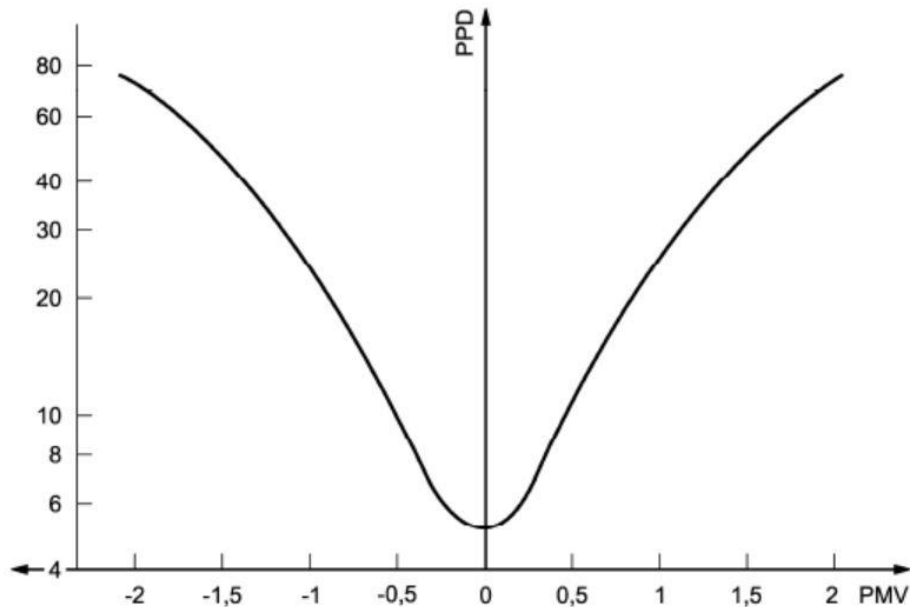
Der Mensch ist ständig darauf angewiesen, seine Körpertemperatur auf einem bestimmten Niveau zu halten. Über seine Körperoberfläche steht er in Kontakt mit seiner Umgebung. Verliert er über seine Körperoberfläche genauso viel Energie wie er empfängt, befindet er sich im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung und fühlt sich behaglich. Verliert er mehr als er empfängt, empfindet er seine Umgebung als zu kalt, erhält er dagegen mehr als er verliert, empfindet er sie zu warm.

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:¹¹

- 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. 6 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.

¹¹ [DIN EN ISO 7730, S.7]



Legende

- PMV Vorausgesagtes mittleres Votum
 PPD Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen, %

Abb. 6 PPD in Abhängigkeit von PMV [DIN 7730, S.9]

Zusätzlich zu den Faktoren, die in die PMV- Berechnung einfließen, gibt es weitere Randbedingungen, die sich auf die lokale thermische Behaglichkeit auswirken. Die DIN 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 Unbehaglichkeit 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.“¹²

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:¹³

- Der vertikale Lufttemperaturunterschied sollte kleiner 2 °C sein.
- Der Unterschied zwischen warmen und kalten Fußbodenflächen sollte kleiner 10 °C sein.
- Ist die Decke wärmer als die sonstigen Umgebungsflächen, sollte die Differenz kleiner 5 °C sein.

¹² [DIN EN ISO 7730, S.10]

¹³ [DIN EN ISO 7730, S.20/21]

- Ist eine Wand kühler als die sonstigen Umgebungsflächen, sollte die Differenz kleiner 10 °C sein.
- Ist die Decke kühler als die sonstigen Umgebungsflächen, sollte die Differenz kleiner 14 °C sein.
- Ist eine Wand wärmer als die sonstigen Umgebungsflächen, sollte die Differenz kleiner 23 °C betragen.

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 selber 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:¹⁴

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

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

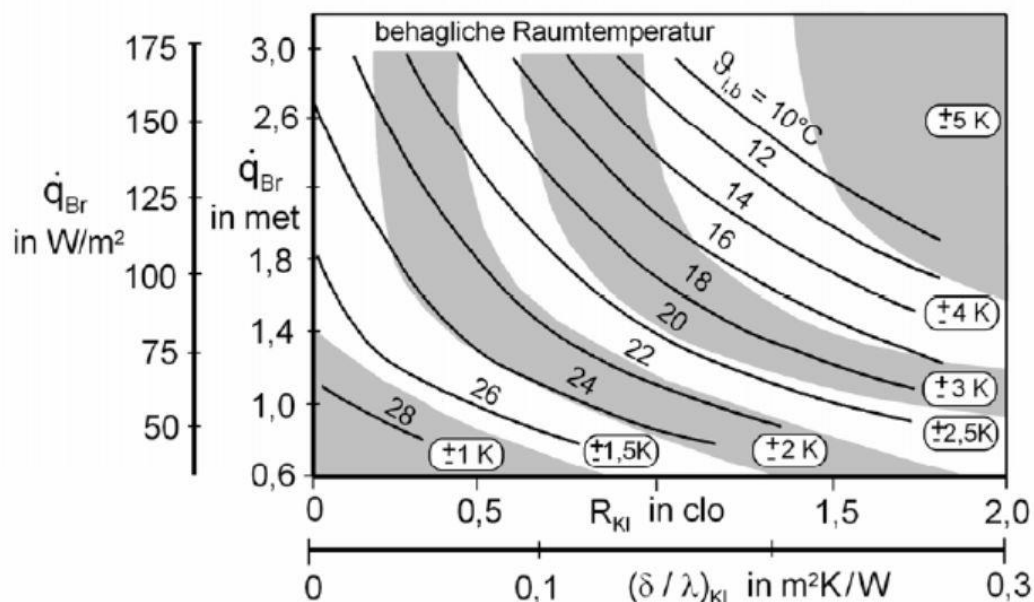


Abb. 7 Behagliche Raumtemperatur in Abhängigkeit von Aktivität (in „met“) und äquivalentem Wärmeleitwiderstand der Kleidung (in „clo“) sowie zulässige Abweichungen bei $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$ (ausgewähltes Beispiel für PPD $\leq 10\%$) als unterschiedlich markierte (weiß/grau) Flächen.¹⁵

¹⁴ [Richter, 2006, S.20]

¹⁵ [Richter, 2006, S.20]

Ob eine operative Temperatur von z. B. 20 °C als behaglich empfunden wird, ist dabei jedoch immer abhängig vom Bekleidungs- und Aktivitätsgrad (s. Abb. 7).

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.“*¹⁶

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.¹⁷

Abb. 8 beschreibt anschaulich die Abhängigkeit der operativen Temperatur von der Lufttemperatur und der Temperatur der Raumschließungsflächen (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.

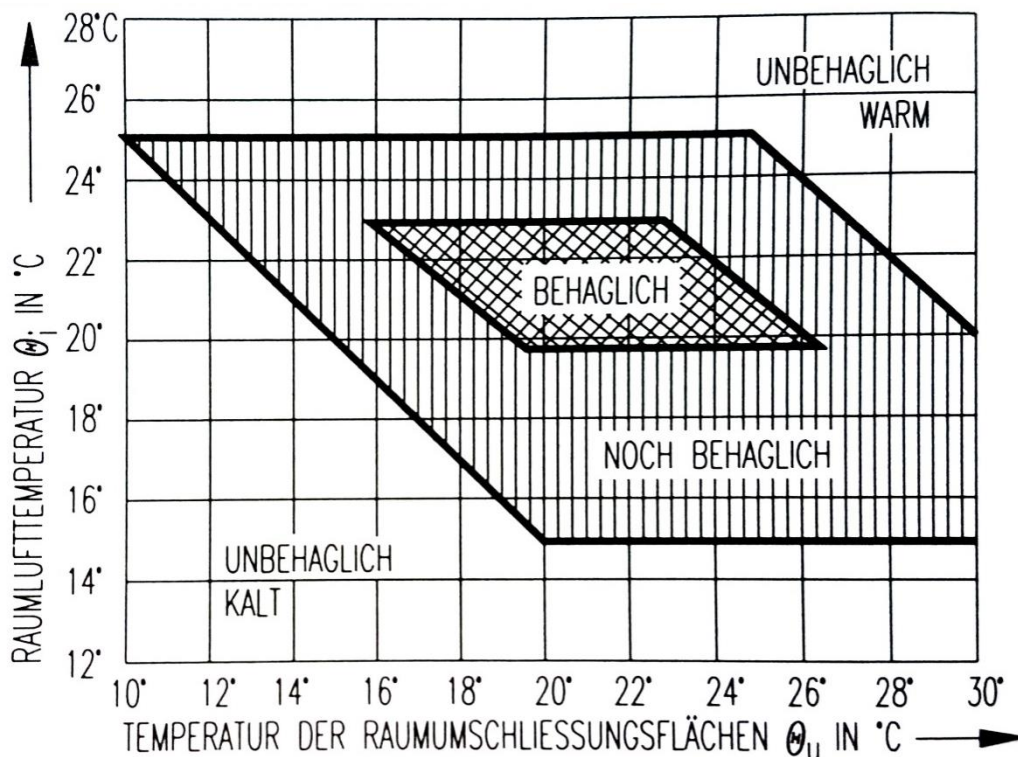


Abb. 8 Zone der Behaglichkeit in Abhängigkeit zur Lufttemperatur und der Temperatur der abstrahlenden Flächen.¹⁸

¹⁶ [EN ISO 7726, S.58]

¹⁷ [EN ISO 7726, ebd.]

¹⁸ [Pistohl, 2007, H8]

Die operative Temperatur kann mit einer geschwärzten Hohlkugel (Globesonde) (s. Abb 9) 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 (empfundenen) Raumtemperatur.¹⁹

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.

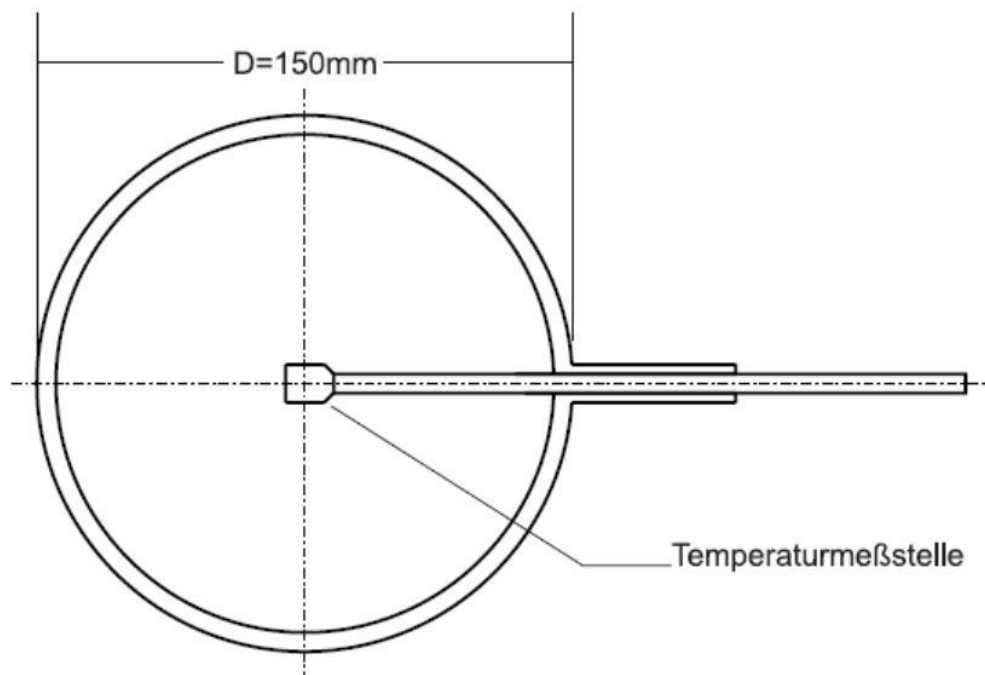


Abb. 9 Schematischer Aufbau des Globethermometers ²⁰

Anstelle einer Globesonde kann zur Ermittlung der operativen Temperatur auch eine getrennte Messung und anschließende Verrechnung der Lufttemperatur und der Flächenstrahlungstemperatur erfolgen.²¹ Bei der Messung der Lufttemperatur ist dabei jedoch zu beachten, dass der Lufttemperatursensor vor direkter Einstrahlung abgeschirmt wird.²²

Allgemeiner Hinweis: Nach DIN 1304 werden Temperaturen mit der Einheit Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Temperaturunterschiede dagegen in Kelvin (K) angegeben.

¹⁹ [Recknagel, Sprenger, Schramek, 2019, S.358]

²⁰ [Hausladen, Meyer, 1999, S.23]

²¹ [EN ISO 7726, S.27]

²² [EN ISO 7726, S.17]

2.6 Energetische Bilanzierung von Wärmepumpen

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

Leistungszahl / COP:

Die Leistungszahl / COP (en: coefficient of performance) einer Wärmepumpe beschreibt: „Das Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu aufgenommener elektrischer Antriebsleistung zu einem bestimmten Zeitpunkt und für bestimmte Temperaturverhältnisse. Aussage: Effizienz der Anlage bei Prüfbedingungen.“²³

Die COP bzw. Leistungszahl im Heizbetrieb einer Wärmepumpe ist wie folgt definiert:

„Verhältnis der Heizleistung zur effektiven Leistungsaufnahme des Gerätes“²⁴

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.“²⁵*

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.“²⁶

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:

„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. 10). Die vorliegende Richtlinie berechnet die Jahresarbeitszahl für die Bilanzgrenze der Wärmepumpenanlage, bei der die Antriebsleistung für die

²³ [Lenz, Schreiber, Stark, 2010, S.26]

²⁴ [DIN EN 14511-1, S.10]

²⁵ [DIN EN 15218, S.5]

²⁶ [DIN EN 14511-3, 2019, S.11]

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)²⁷

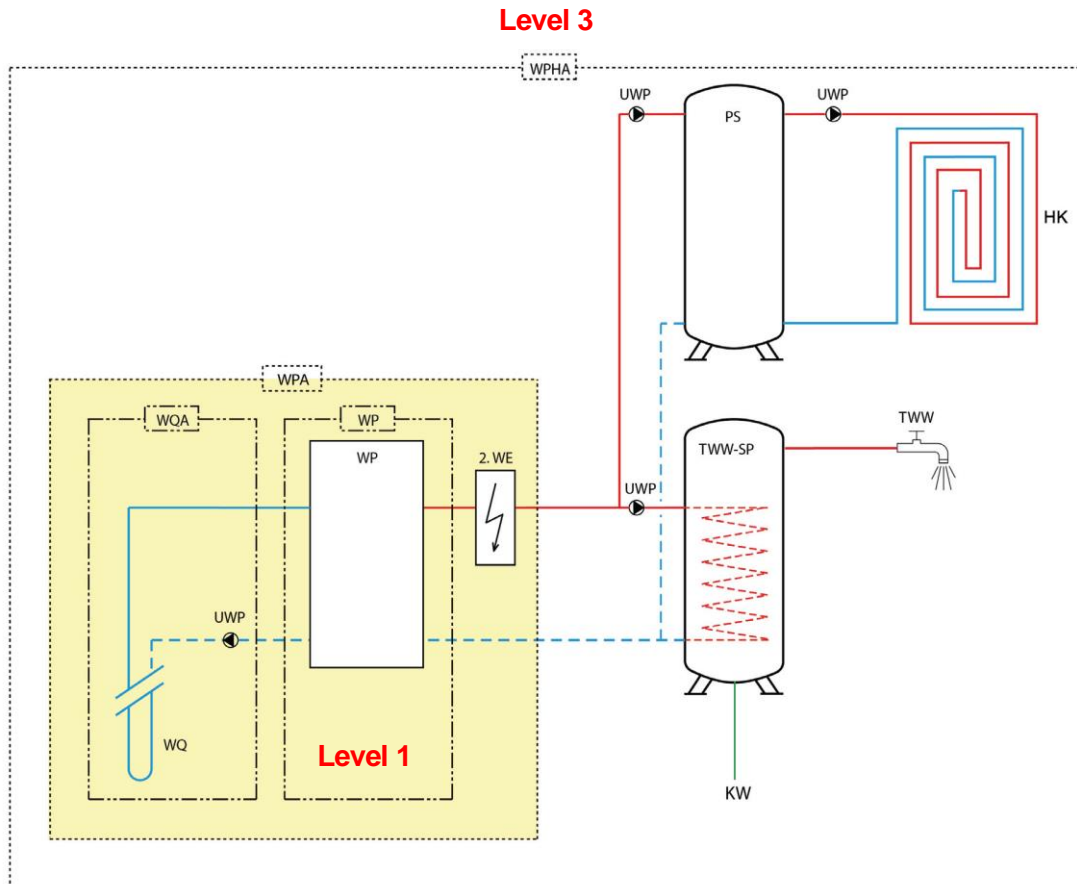


Abb. 10 Bilanzgrenze am Beispiel einer Sole-Wasser-Wärmepumpenheizungsanlage²⁸

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 Wärmequellenanlage

Wird ein Raum direkt elektrisch 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 Strom- und Wärmebedarf bilanziert werden, der zur Deckung des Nutzwärmebedarfs eines Raumes notwendig ist. Für die Ermittlung einer Jahresarbeitszahl darf also nicht allein von dem Bilanzraum „WPA“ (Level 1, s. Abb. 10) ausgegangen werden, den die VDI 4650 nutzt, sondern es muss der Bilanzraum „WPHA“ (Level 3, s. Abb. 10) angesetzt werden.

²⁷ [VDI 4650, Blatt1, S.11]

²⁸ [VDI 4650, Blatt1, S.12]

Dieser Bilanzraum berücksichtigt alle Stromverbräuche und Wärmeverluste, die zur Versorgung eines Raumes mit der erforderlichen Nutzwärme notwendig sind, also die Leitungs- und Speicherverluste, 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.

Nachfolgend wird der Bilanzraum „WP“ als „Level 1“ und der Bilanzraum „WPHA“ als „Level 3“ definiert (s. Abb. 10).

3 Wissenschaftliche Begleitforschung K76

Im Forschungsstrang „Wissenschaftliche Begleitforschung K76“ wurden folgende Fragestellungen untersucht:

Forschungsfrage	Pilotprojekt K76	Laborräume Ehoch4	Simulationen
1. Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	x	x	
2. Verhalten der Lufttemperatur bei IR-Heizungen	x	x	
3. Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen		x	x
4. Übergabeverluste bei IR-Heizungen			x
5. Strahlungswirkungsgrad von IR-Heizungen		x	
6. Stromverbrauchsdifferenzen IR/WP im realen Betrieb		x	x
7. Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude	x		
8. Behaglichkeit und Bedienbarkeit im realen Wohngebäude	x		
9. Gesamtökologische Bewertung über 50 Jahre (LCC)			x
10. Gesamtökonomische Bewertung über 50 Jahre (LCA)			x
11. Vorteilhafte Randbedingungen für IR-Heizsysteme			x
12. Optimierung des IR-Heizsystems durch PV und Speicher	x		x
13. Können IR-Systeme eine Alternative zu WP-Systemen sein?			x

Tabelle 2 Fragestellungen Forschungsstrang Wissenschaftliche Begleitforschung K76

3.1 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 ca. 40 Bewohner in 15 Wohneinheiten zwischen 50 und 120 m². Zusätzlich gibt es eine Gemeinschaftswohnung, die von allen Bewohnern des Hauses genutzt werden kann.



Abb. 11 Süd / West Ansicht K76

Die L-förmige Struktur des Gebäudes bildet einen kleinen Innenhof. Das Gebäude wird über ein innenliegendes Treppenhaus mit Aufzug und außenliegenden einläufigen Treppen mit 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. 12 Grundriss K76 Thermische Hülle [werk.um architekten, darmstadt]

3.2 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 das Infrartheizungssystem. 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 das sowieso benötigte Wohnungsstromnetz war für den Betrieb der Heizungen keine weitere Infrastruktur nötig. Die Abrechnung erfolgt über den Wohnungsstromzähler im Keller. Die Investitionskosten sowie der Aufwand an grauer Energie für Heizraum, zentraler Wärmeerzeuger, Wärmequellenerschließung, Pufferspeicher, Pumpen, Ventile, Leitungen samt Leitungsdämmung, Wärmemengenzähler und dessen Ablesung, Heizkreisverteiler, Fußbodenheizung und Heizstrich 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 für die IR-Heizung gelegt werden müssen. In künftigen Projekten wäre dieses Vorgehen zu bevorzugen.



Abb. 13 Infrartheizungen K76 links und rechts sowie Lüftungsleitung

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 entfällt 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 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 direktelektrische System von einer 36,2 kWp Photovoltaikanlage auf dem Flachdach.

Die EnEV-Berechnung wurde von einem externen Planungsbüro nach DIN 4701 mit der Software EVA durchgeführt. Es wurden die Parameter / Randbedingungen entsprechend Abb. 14 verwendet.

Parameter / Randbedingungen EnEV-Berechnung	
Innentemperatur (nach EnEV):	19 °C
Gebäudevolumen beheizt:	5125,42 m ³
Nutzfläche An (Energiebezugsfläche):	1640,10 m ²
AV 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

Abb. 14 Randbedingungen zur EnEV-Berechnung

Die EnEV-Berechnung nach Fertigstellung des Gebäudes kam zu nachfolgenden Ergebnissen:

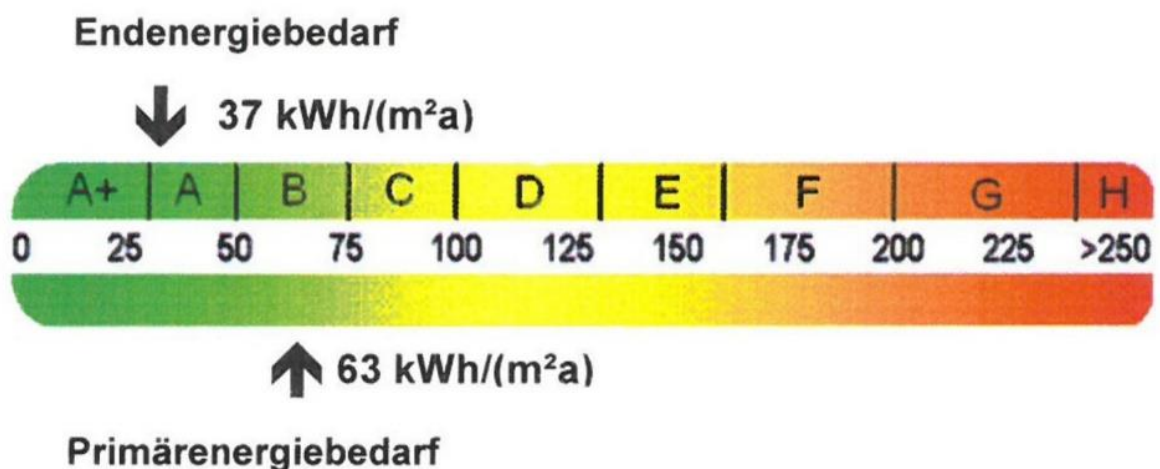


Abb. 15 Ergebnisse der EnEV-Berechnung nach Fertigstellung

Aufgegliedert nach Verbrauchern ergibt sich nachfolgender Endenergiebedarf:

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

Tabelle 3 Endenergiebedarf K76 nach EnEV-Berechnung

3.3 Konzeption Begleitforschung K76

Für die differenzierte Messung der Stromverbräuche von IR-Heizung, Durchlauferhitzer und Lüftung wurden für das Projekt 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 Sicherheit der Daten wird täglich ein Backup über eine Kombination aus Raspberry PI und der Loxberry Software gemacht.

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 machen. Außerdem wurden sie aufgefordert, mit Hilfe von durch die HTWG bereitgestellten mobilen Messinstrumenten Angaben zur aktuellen Außen- und Innentemperatur, zur relativen Luftfeuchte, zum CO₂-Gehalt der Raumluft und zu den aktuellen Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen zu machen.

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 abgefragt, 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. Mit Hilfe der aufgezeichneten Daten waren Rückschlüsse auf eventuell auftretende Verbrauchsunterschiede bei den Heizungen der unterschiedlichen Wohnungen möglich

3.4 Untersuchte Fragestellungen

3.4.1 Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude

Welche Verbrauchswerte für die IR-Heizung ergeben sich in einem realen Gebäude?

Messergebnisse Heizperiode 2017/2018

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die wohnungsweisen Verbräuche von IR-Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung. In Heizperiode 2017 / 18 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 bislang Hochrechnungen auf Basis der Teilmessungen von Oktober 2017 bis Mai 2018.

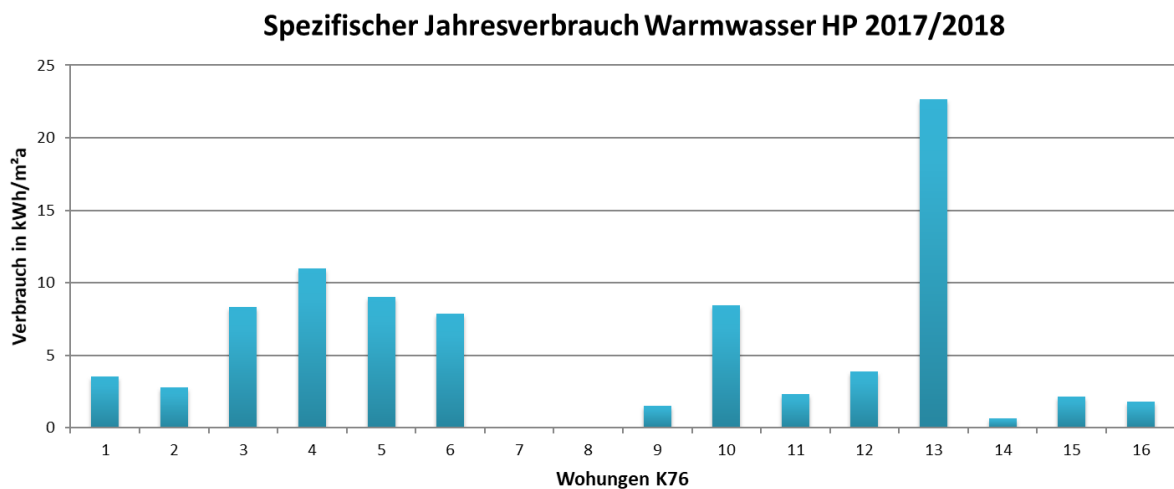


Abb. 16 Wohnungsweiser Strombedarf für Warmwasser HP 2017/2018

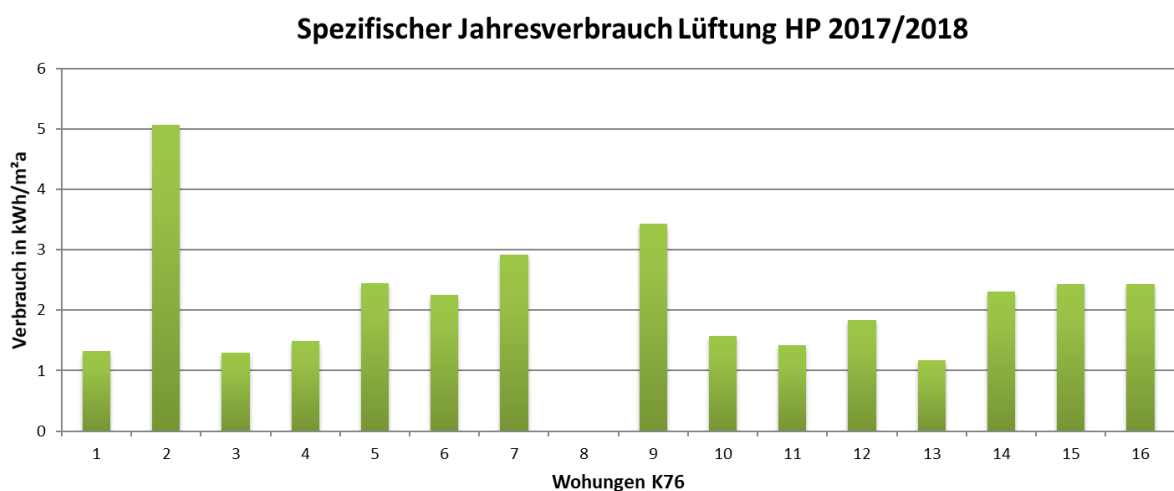


Abb. 17 Wohnungsweiser Strombedarf für Lüftung HP 2017/2018

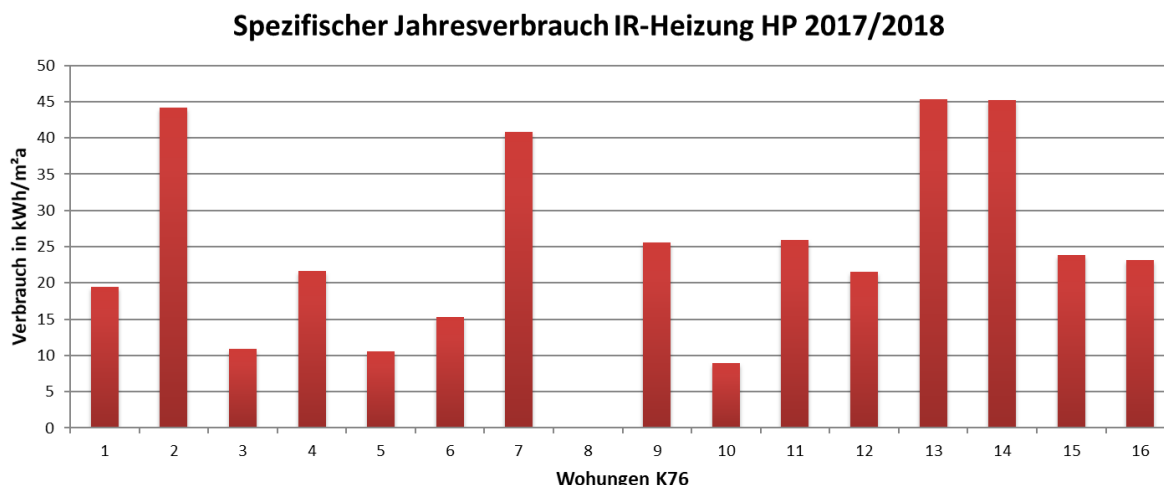


Abb. 18 Wohnungsweiser Strombedarf für IR-Heizung HP 2017/2018

Aufgegliedert nach Verbrauchern ergab sich nachfolgender Endenergieverbrauch im Vergleich zur Berechnung nach EnEV:

Jahresverbräuche:	EnEV-Berechnung:	HP 2017/2018
Lüftung:	2,6 kWh/(m²a)	1,9 kWh/(m²a)
Warmwasser:	14,0 kWh/(m²a)	6,9 kWh/(m²a)
Heizung:	20,3kWh/(m²a)	23,4kWh/(m²a)
Summe:	36,9kWh/(m²a)	32,3 kWh/(m²a)

Tabelle 4 Vergleich Endenergieverbrauch K76 nach EnEV / HP 2017/2018

Interpretation der Messergebnisse 2017/2018

Die Messdaten bzw. Hochrechnungen zeigen, dass die nach EnEV berechneten Verbräuche im Mittel nur leicht überschritten, im Falle von Warmwasser und Lüftung sogar deutlich unterschritten wurden. Grundsätzlich kann man erkennen, dass das IR-Konzept im Mittel 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 und der Behaglichkeit zufrieden. 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. 19). 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.

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.

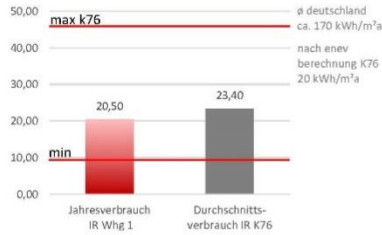
Da die EnEV mit 19 °C Raumtemperatur rechnet, die tatsächlichen Raumtemperaturen jedoch eher bei 20°C-22°C liegen, ist der reale Verbrauch gegenüber der EnEV auch aus diesen Gründen in der Regel etwas höher.

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

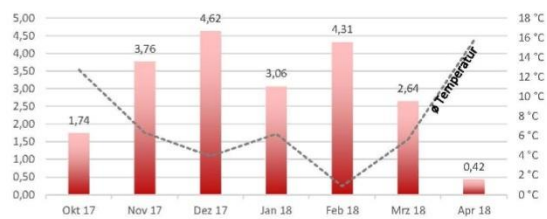
Anzahl der Bewohner:
Größe der Wohnung:
Energiebezugsfläche A_n nach EnEV:

IR-Heizung

Vergleich zum Durchschnitt (kWh/m²)

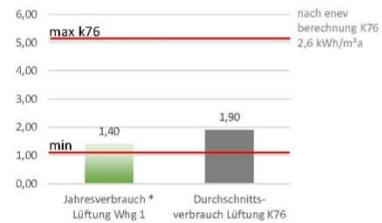


Gemessene Monatsverbräuche IR-Heizung (kWh/m²)



Lüftung

Vergleich zum Durchschnitt (kWh/m²)

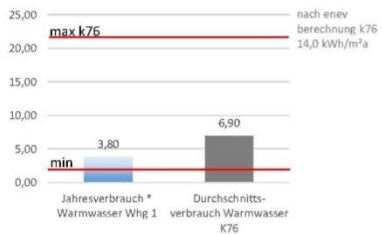


Gemessene Monatsverbräuche Lüftung (kWh/m²)

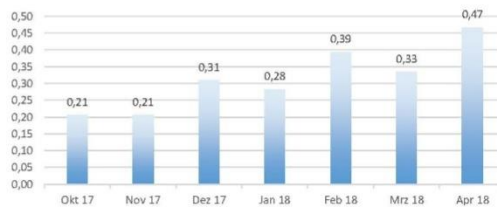


Warmwasser

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. 19 Detaillierte, wohnungswise Übersicht der Verbrauchsdaten

Messergebnisse Heizperiode 2018/2019

In der zweiten Heizperiode 2018 / 2019 waren alle Wohnungen im K 76 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. 20). So konnte ermittelt werden, nach welcher Temperatur die Thermostate regeln und inwieweit Raumtemperatur und Energieverbrauch korrelieren.



Abb. 20 Positionierung Funksensoren

Bei den Sensoren handelt es sich um „Xiaomi Aqara“ Sensoren. Sie senden die Daten per „ZigBee“ Funkstandard an vier „Xiaomi Multifunktionsgateways“, von denen jeweils eines 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 zeigen die wohnungsweisen Verbräuche von IR-Heizung, Warmwasserbereitung und Lüftung in Heizperiode 2018/2019:

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

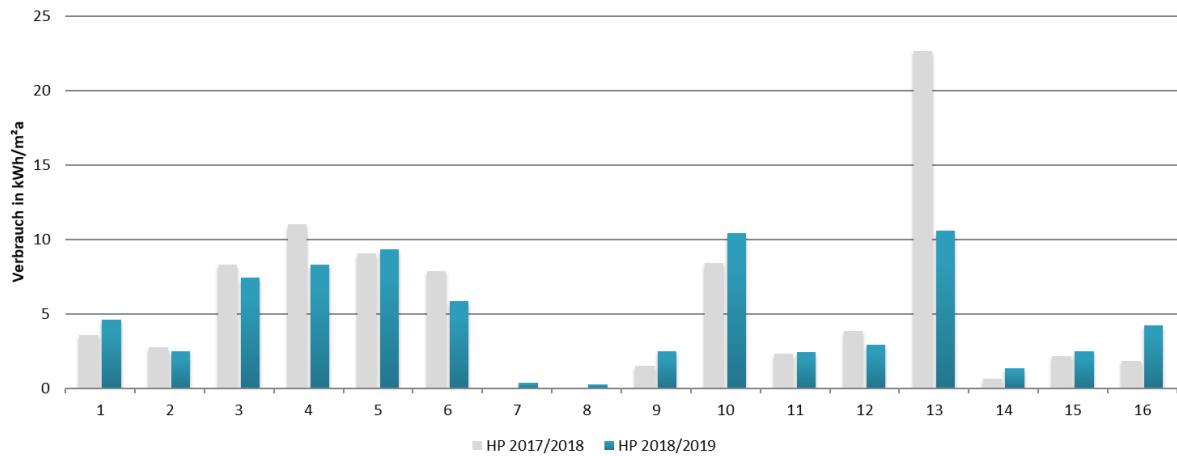


Abb. 21 Vergleich des Strombedarfs für Warmwasser pro Jahr

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

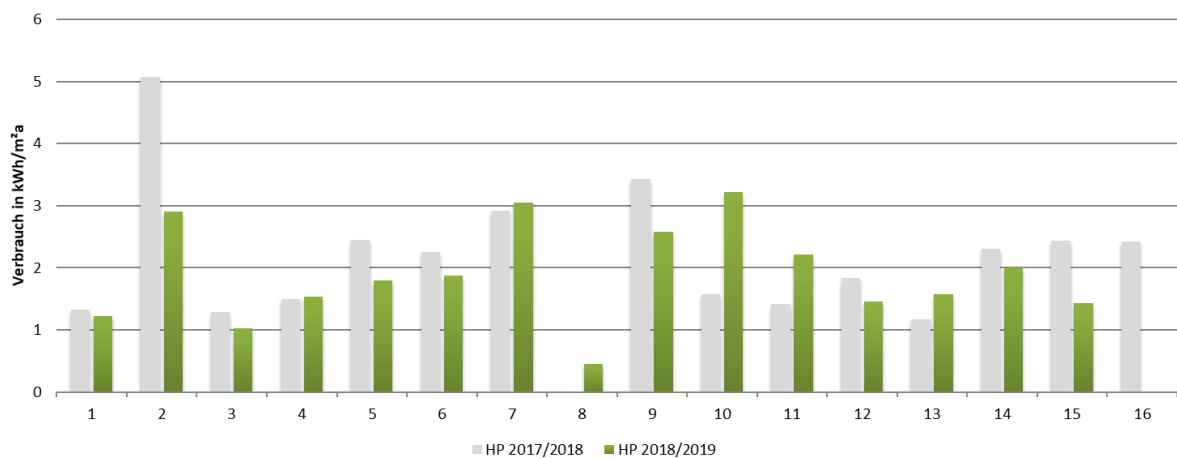


Abb. 22 Vergleich des Strombedarfs für Lüftung pro Jahr

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

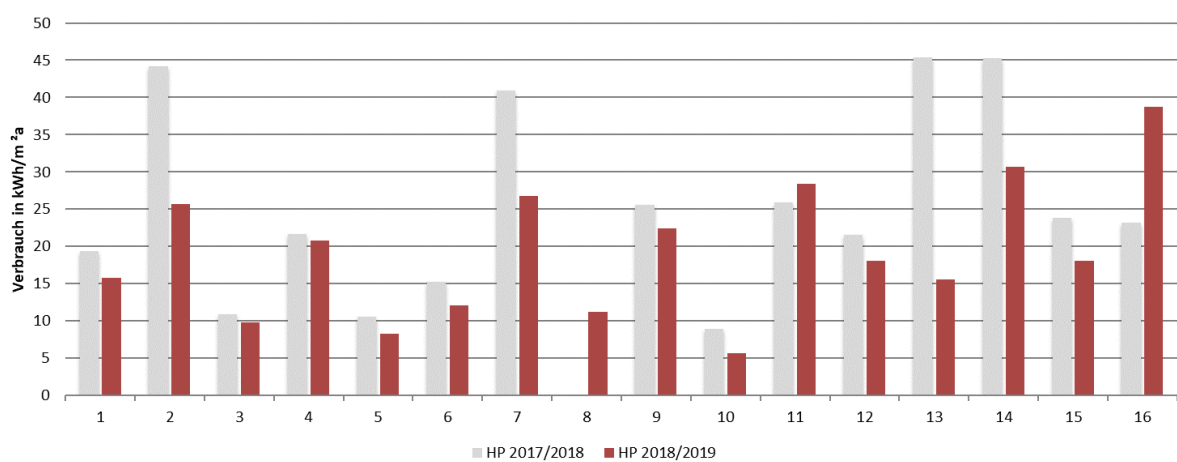


Abb. 23 Vergleich des Strombedarfs für Heizung pro Jahr

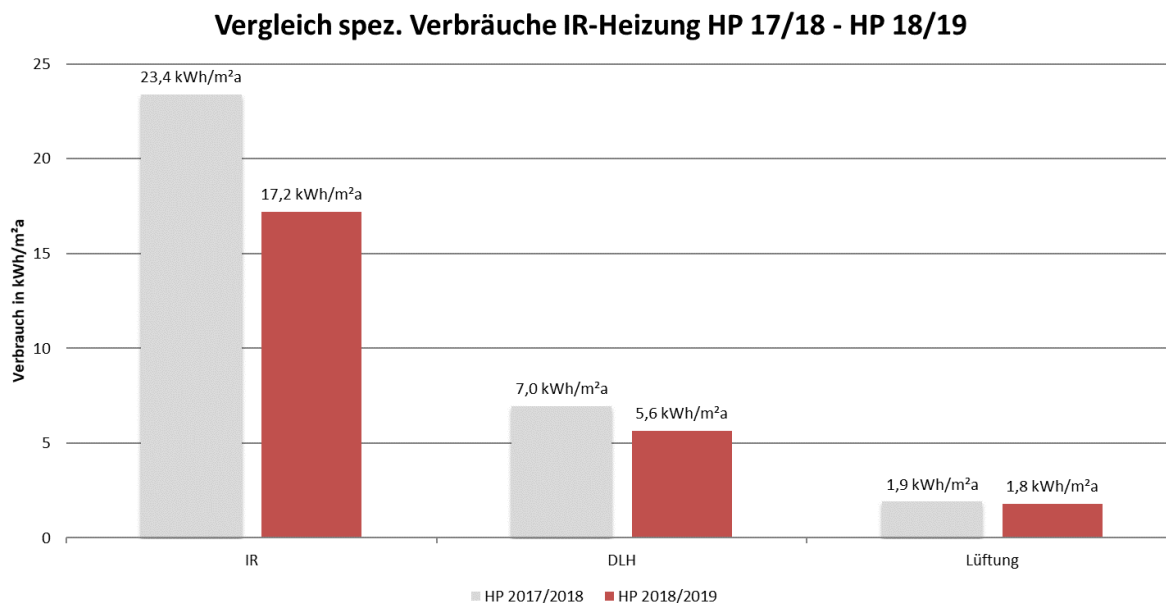


Abb. 24 Vergleich der spezifischen Verbräuche HP 2017/2018 / HP 2018/2019

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/(m²a)	1,9 kWh/(m²a)	1,8 kWh/(m²a)
Warmwasser:	14,0 kWh/(m²a)	6,9 kWh/(m²a)	5,6 kWh/(m²a)
Heizung:	20,3kWh/(m²a)	23,4 kWh/(m²a)	17,2 kWh/(m²a)
Summe:	36,9 kWh/(m²a)	32,3 kWh/(m²a)	24,6 kWh/(m²a)

Tabelle 5 Vergleich Endenergieverbrauch K76 nach EnEV / HP 2018/2019

Die Messwerte für den Stromverbrauch der IR-Heizung waren in den vorangegangenen Tabellen noch nicht witterungsbereinigt. Führt man die Witterungsbereinigung mit Hilfe 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)
IR-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 6 Vergleich Endenergieverbrauch K76 berechnet / gemessen witterungsbereinigt

Interpretation Messergebnisse 2018/2019

Abb. 24 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 zeigt 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. 22 sieht man, dass z.B. in Wohnung 2 der Stromverbrauch für die Lüftung sich 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.

Auch 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. 25 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. 25 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.

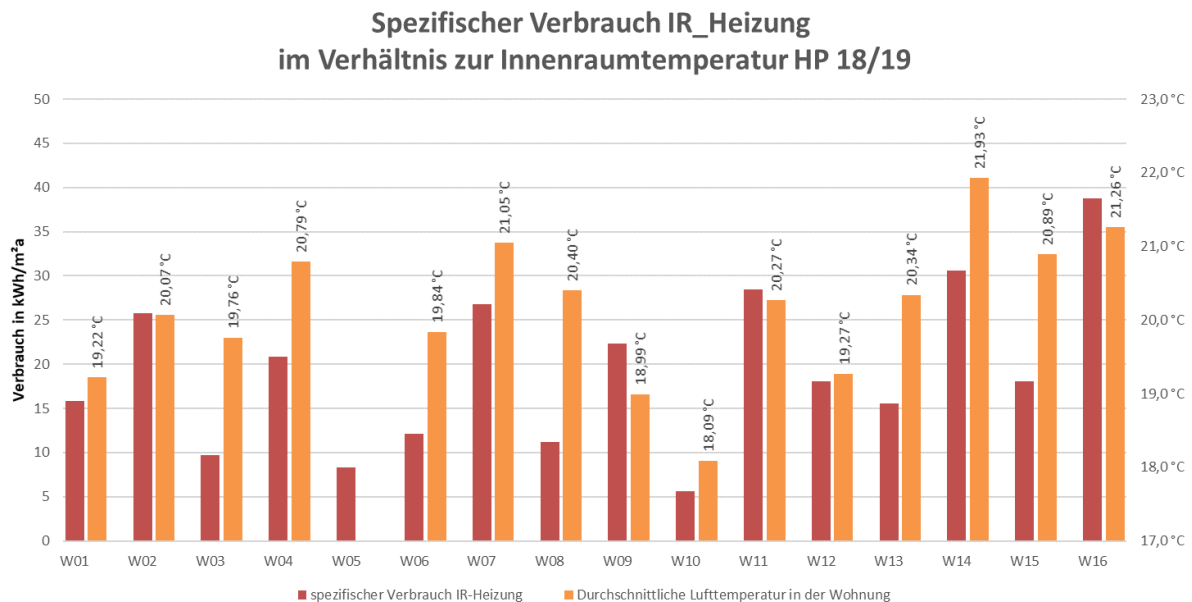


Abb. 25 Lufttemperaturen im Verhältnis zum Heizungsstromverbrauch

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 jedoch 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 zeigt, dass der Verbrauch der Bewohner weniger als die Hälfte des typischen Verbrauchs von 40 Litern pro 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 dieses Forschungsprojekts.

3.4.2 Optimierung des IR-Heizsystems durch PV und Stromspeicher

Wie lässt sich das Infrarot-Heizsystem durch Einbindung von Photovoltaiksystemen und dezentraler Stromspeicher in ökologischer und ökonomischer Hinsicht optimieren?

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.

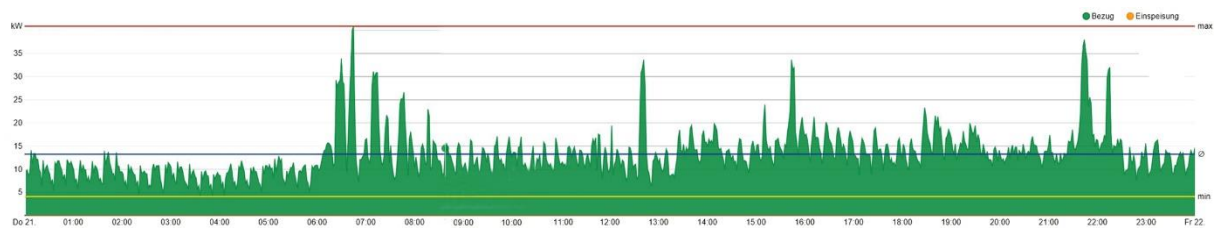


Abb. 26 Lastgang K76 Winter / 21. Dezember 2018, 0-24 Uhr [discovery.com]

In Abb. 26 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.

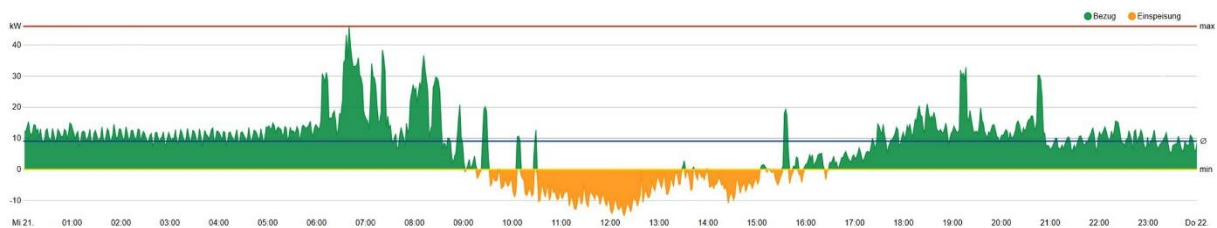


Abb. 27 Lastgang K76 Frühling / 21. März 2018, 0-24 Uhr [discovery.com]

Abb. 27 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. 28 Lastgang K76 Sommer / 21. Juni 2018, 0-24 Uhr [discovery.com]

Abb. 28 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. 27, die morgendlichen und abendlichen Lastspitzen, die durch den Betrieb der Durchlauferhitzer entstehen. Diese liegen wieder außerhalb der Zeiten, in denen PV-Strom produziert wird.

Betrachtet man Zählerdaten von Erzeugung und Verbrauch zeigt sich, dass bei einem Jahresertrag der PV-Anlage (10/2017 - 10/2018) von ca. 34.000 kWh, 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 ca. 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 zeigt sich, 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 gedeckt werden.

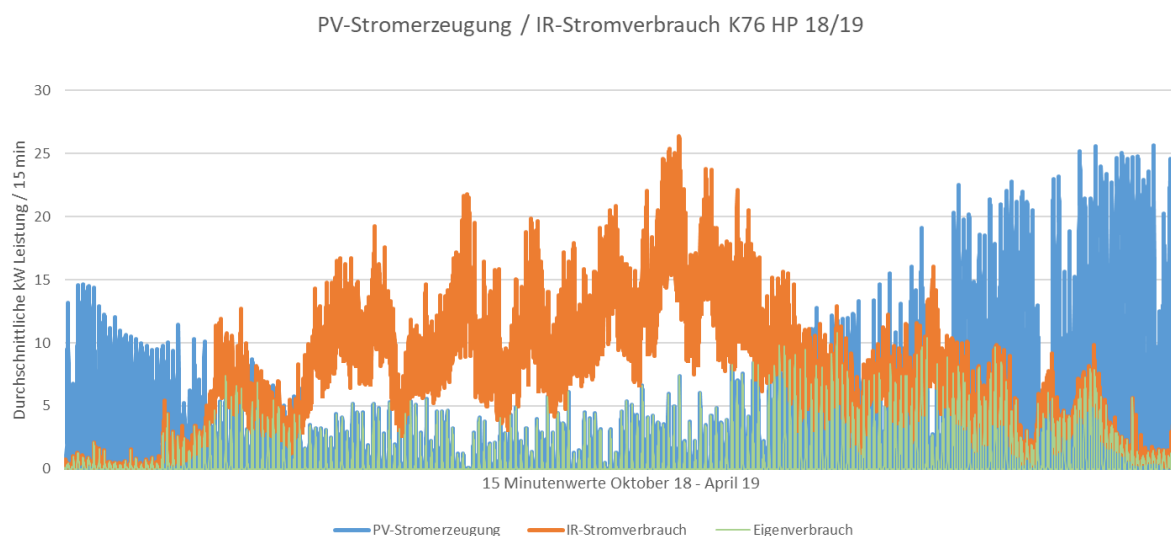


Abb. 29 Gemessener PV-Stromertrag / IR-Stromverbrauch K76 HP 2018/2019

Für die ökologische Bewertung eines IR-Heizungssystems ist es wichtig, 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, würde dies den Eigenversorgungsgrad von ca. 13 % auf ca. 19 % erhöhen.

In Abb. 30 sieht 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 ca. 150-250 kWh pro Nacht. Ein Stromspeicher, der in der Lage ist, diesen Bedarf zu decken, wäre zu heute üblichen Preisen wirtschaftlich nicht vertretbar.

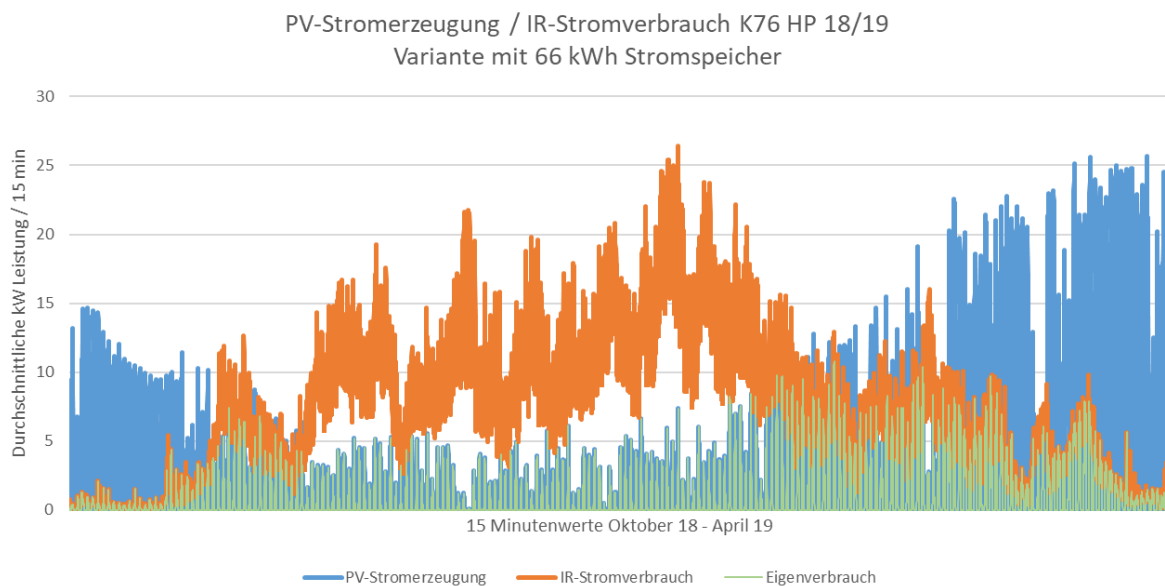


Abb. 30 Theoretisch mögliche Steigerung des Eigenverbrauchs durch einen 66 kWh Stromspeicher

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 wichtig, 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 wichtig zu prüfen, ob sich die Wärmeerzeugung der IR-Heizung auf Zeiten mit solarer Einstrahlung verlegen ließe. So könnte z.B. 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 evtl. 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.

Erste Simulationen mit der Simulationssoftware „Polysun“ zeigen, dass eine auf Eigenverbrauch optimierten 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.

3.4.3 Behaglichkeit und Bedienbarkeit im realen Wohngebäude

Wie wird die Behaglichkeit und Bedienbarkeit einer IR-Heizung im realen Betrieb bewertet?

Einleitung

Neben technischen Aspekten ist die Klärung der Behaglichkeit von IR-Systemen von zentraler Bedeutung. Sollte die Behaglichkeit des Raumklimas über den Einsatz von Infrarotstrahlungsheizungen nicht gegeben sein, würde dieser Nachteil ggf. alle ökologischen und ökonomischen Vorteile überwiegen. Eine nicht zufriedenstellende Bedienbarkeit dieser Technologie würde ebenfalls andere Vorteile stark schmälern. Die Untersuchung der Behaglichkeit und Bedienbarkeit bietet zusätzlich die Möglichkeit, in Hinblick auf technische Verbesserungen, wie beispielsweise die effektivere Positionierung der einzelnen technischen Komponenten, wichtige Hinweise für den zukünftigen Einsatz dieser Technologie zu gewinnen. Im Forschungsprojekt IR-Bau wurde über drei Heizperioden eine sozialwissenschaftliche Begleitforschung und Nutzerbefragung am realen Objekt, dem Wohngebäude K76 in Darmstadt, durchgeführt. Dankenswerterweise sagten mehrere Bewohner des Projekts K76 ihre Teilnahme an dieser begleitenden Untersuchung zu.

Fragestellungen

Da in Bezug auf die Nutzung von Infrarotstrahlungsheizungen in hochgedämmten Wohngebäuden wie im Projekt K76 noch kaum auf bestehende Untersuchungsergebnisse zurückgegriffen werden kann, ergeben sich für diese Untersuchung vier ganz grundlegende Fragestellungen:

1. Ist die Infrarotstrahlungsheizung für hochgedämmte Wohngebäude aus der Perspektive der **Behaglichkeit** eine sinnvolle Technologie für die Beheizung?
2. Ist die Infrarotstrahlungsheizung für hochgedämmte Wohngebäude aus der Perspektive der **Bedienbarkeit** eine sinnvolle Technologie für die Beheizung?
3. Wirken sich **weitere Einflussfaktoren** (z.B. die Ausrichtung der Wohnung) negativ auf die Behaglichkeit aus?
4. Gibt es Differenzen bezüglich der „**behaglichen Temperatur**“ zwischen der neuen und der vorherigen Wohnsituation, die durch die Nutzung der veränderten Technologie begründet werden können?

Hypothesen

Aus diesen Fragestellungen ergaben sich vier Hypothesen für die sozialwissenschaftliche Begleitforschung:

Hypothese 1:

In den Wohnräumen des hochgedämmten Wohngebäudes K76 kann mit Hilfe von Infrarotstrahlungsheizungen ein behagliches Raumklima erzeugt werden.

Hypothese 2:

Die in den Räumen des Wohngebäudes K76 eingesetzte Steuerungstechnik der Infrarotstrahlungsheizungen ist für die Nutzer gut bedienbar.

Hypothese 3:

Weitere Einflussfaktoren (wie z.B. Ausrichtung der Wohnung...) wirken sich nicht negativ auf die Behaglichkeit der Wohnsituation aus.

Hypothese 4:

Im Gebäude K76 stufen die Nutzer eine etwas geringere durchschnittliche Raumlufttemperatur als in der vorherigen Wohnsituation als behaglich ein.

Methode

Um die tatsächliche Behaglichkeit und Bedienbarkeit der Infrarotstrahlungsheizungen zu ermitteln, müssen die unterschiedlichen Faktoren vor Ort und in der jeweiligen Situation untersucht werden. Hierfür wurde die Nutzung eines Online-Tools zur Befragung gewählt. Obwohl hierbei mögliche Störfaktoren, wie Ablenkungen, unterschiedliche Tageszeit, Sonneneinstrahlung, verschiedene Endgeräte zur Beantwortung der Fragen etc. weniger zuverlässig ausgeschlossen werden können, ergeben sich aus der Nutzung der Online-Befragung auch erhebliche Vorteile. So konnte die Befragung anonymisiert durchgeführt werden, was die Akzeptanz der Teilnehmer erhöht und verzerrte Antworten, ähnlich einer persönlichen Befragung, verringert. Auch die Möglichkeit, die Antworten zu einem frei gewählten Zeitpunkt zu geben wurde von den Teilnehmern positiv bewertet.

Nicht jeder Mensch fühlt sich bei gleichen thermischen Bedingungen gleich wohl. Daher war es wichtig, die thermischen Bedingungen, unter denen sich die einzelnen Personen wohl fühlen, zu erfassen. Es bot sich an, diese spezifischen Bedingungen / Temperaturen bereits in den vorherigen Wohnungen zu messen, um so die Möglichkeit zu haben, sie mit den neuen Bedingungen im Projekt K76 vergleichen zu können. Für die Befragungen kamen auch aus diesem Grund zwei unterschiedliche Fragebögen zum Einsatz: eine lange Version, deren Beantwortung etwa 20 Minuten Zeit in Anspruch nahm und eine kurze Version, die in ca. 5 Minuten beantwortet werden konnte.

Die lange Version wurde genutzt, um zunächst zu Beginn des Projektes und noch vor dem Umzug in das Gebäude K76 die vorherige Wohnsituation und die jeweiligen räumlichen Bedingungen zu ermitteln und anschließend ein zweites Mal die Daten direkt nach dem Umzug in die neue Wohnsituation zu erheben.

Die kurze Version des Fragebogens enthielt nur die Fragen bezüglich der aktuellen Situation. Alle Teilnehmer beantworteten in der jeweiligen Befragungsrunde dieselben Fragen.

Versuchsteilnehmer

An der Studie nahmen 8 Bewohner des Projekts K76, 6 Männer und 2 Frauen im Alter zwischen ca. 40 und 70 Jahren teil (das Alter wurde nicht genau angegeben). Sie wurden für ihre Teilnahme nicht entlohnt.

Messinstrumente

In den privaten Räumen der Versuchsteilnehmer kamen zur Unterstützung der Untersuchung folgende Messgeräte zum Einsatz:

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

Die **TFA – „KlimaLoggPro“ Wetterstation mit Außensensor** misst die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit im Innen- und Außenraum und zeichnet die so gewonnenen Daten alle 15 Minuten auf.

Die Versuchsteilnehmer erhielten vor Versuchsbeginn folgende Anleitung zum Einsatz der Technik: Stellen Sie das Messgerät an einem Ort in ihrer Wohnung auf, der vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt ist und wenn möglich zentral im Raum auf ca. 1,00 m - 1,60 m Höhe liegt. Der Außensensor sollte in seiner Schutzhülle im Außenbereich an einem möglichst vor direkter Sonneneinstrahlung (Nordseite) und Regen geschützten Ort aufgestellt werden. Über die Tasten +/- kann zwischen der Anzeige der Werte des Außen- und Innensensors gewechselt werden. Die Batterieladung wird für eine Nutzung für circa 10-12 Monate ausreichen, daher sollten die Batterien vor Anfang jeder neuen Heizperiode ausgetauscht werden.

Das **Testo – „830“ Infrarotthermometer** misst die Oberflächentemperaturen der anvisierten Messstelle. Die gemessene Oberflächentemperatur dient zur Abschätzung der gefühlten Raumtemperatur, welche sich zur Hälfte aus der Lufttemperatur und zur anderen Hälfte aus der Durchschnittstemperatur der Umgebungsflächen zusammensetzt.

Anleitung für die Nutzer:

Das Infrarotthermometer ist sehr einfach zu bedienen. Zur Messung das Gerät bitte mit ca. 30-50 cm Entfernung im rechten Winkel zur Messstelle halten und den Auslöser am Griff betätigen.

Der **Trotec – „BZ30“ CO2 Datenlogger** misst den CO2-Gehalt der Raumluft und zeichnet ihn auf. Er dient zur Messung der Raumluftqualität, da sich der CO2-Gehalt der Raumluft sehr auf die Behaglichkeit auswirken kann. Ein CO2-Gehalt von 400 ppm wird bei frischer Außenluft gemessen. 1000–1500 ppm sollten in Wohn- und Arbeitsräumen nicht überschritten werden.

Anleitung für die Nutzer:

Durch Drücken der „Alarm“- Taste kann ein Alarm eingeschaltet werden, der bei Überschreitung von Grenzwerten ein akustisches Signal gibt. Das Gerät braucht einen Anschluss ans Stromnetz! Es hat zwar einen integrierten Akku, dieser kann aber maximal eine Zeitspanne von etwa 12 Stunden überbrücken. Um eine Unterbrechung der Aufzeichnung zu verhindern, sollte das Gerät daher nie längere Zeit vom Stromnetz getrennt sein. Stellen Sie das Messgerät an einem Ort in ihrer Wohnung auf, der vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt ist und wenn möglich zentral im Raum auf ca. 1,00 m - 1,60 m Höhe liegt.

Des Weiteren erhielten die Untersuchungsteilnehmer eine Information bezüglich der Kalibrierung der Messgeräte:

„Wieso zeigen meine Geräte unterschiedliche Raumtemperaturen an?“

Alle Sensoren weichen produktionsbedingt von der realen Temperatur ab. Durch eine Vergleichsmessung mit einem Präzisions-Messgerät bei verschiedenen Temperaturpunkten kann die jeweils spezifische Abweichung des Sensors ermittelt werden. Der gemessene Wert kann so später korrigiert werden.

Die Versuchsteilnehmer erhielten im Verlauf der Befragung Unterstützung von Seiten eines Teilnehmers, der sie bezüglich des Erhalts der Funktionsfähigkeit der Messinstrumente unterstützte. Die Daten aus den Datenloggern wurden nach der jeweiligen Heizperiode ausgelesen. Dieser Termin wurde zudem für das Auswechseln der Batterien genutzt. Die erhobenen Daten aus den Datenloggern wurden durch Codes anonymisiert.

Anonymisierung der Daten

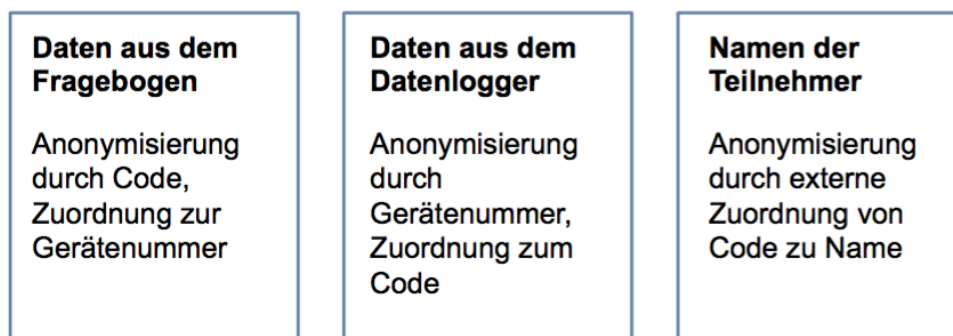


Abb. 31 Konzeption Nutzerbefragung - Anonymisierung

Geräte zur Teilnahme an der Online-Befragung

Die Teilnahme an der Online-Befragung erfolgte auf den jeweiligen privaten Geräten der Teilnehmenden. Die Untersuchung war auf allen gängigen Computern und Smartphones möglich. Welche Geräte tatsächlich genutzt wurden, ist nicht dokumentiert und floss daher nicht in die Auswertung der Daten ein.

Ablauf der Befragung

Vorbereitendes Treffen

Im Frühjahr 2017 fand in Darmstadt ein vorbereitendes Treffen mit den zukünftigen Teilnehmern der Studie zur Vorstellung der Zielsetzung und des Entwurfs der Befragung statt. Im Gespräch ergaben sich noch Anpassungen einzelner noch unklarer Formulierungen.

Pretest 1 (vor dem Umzug):

Fragebogen lange Version: Frühjahr 2017, 6 Teilnehmer

In der ersten Untersuchung, die noch vor dem Umzug der Teilnehmer in die Räume des Projekts K76 erfolgte, beantworteten die Teilnehmer Fragen zu den räumlichen Gegebenheiten und baulichen Grunddaten sowie zur subjektiven Behaglichkeit und Bedienbarkeit der vorhandenen Heizanlage.

Pretest 2 (vor dem Umzug):

Fragebogen kurze Version: Frühjahr 2017, 6 Teilnehmer

In dieser Befragungsrunde wurden Fragen zur subjektiven Behaglichkeit und Bedienbarkeit beantwortet. So wurden Daten zu 5 Wohnungen erhoben, zwei Teilnehmer bewohnten dieselbe Wohnung.

Hauptbefragung 1:

Fragebogen lange Version: Dezember 2017 / Januar 2018, 5 Teilnehmer, 1 Teilnehmer war zu diesem Zeitpunkt noch nicht im Projekt K76 eingezogen.

Erste Befragungsrunde zur Gewinnung der Basisdaten in der neuen Wohnsituation.

In dieser Runde, die kurz nach dem Umzug der Teilnehmer in die Räume des Projekts K76 erfolgte, beantworteten die Teilnehmer erneut Fragen zu den nun veränderten räumlichen Gegebenheiten und baulichen Grunddaten sowie zur subjektiven Behaglichkeit und Bedienbarkeit der vorhandenen Heizanlage.

In dieser Heizperiode verzögerten ein sehr milder Herbst und ein später Winterbeginn die Durchführung der Befragung.

Hauptbefragungen 2 und 3:

Fragebogen kurze Version: Heizperiode 2017/18, durchschnittlich 4 Teilnehmer

Beantwortung der Fragen zur Person des Teilnehmers, zur subjektiven Behaglichkeit und zur Bedienbarkeit der Infrarotstrahlungsheizungen.

Hauptbefragungen 4 - 8:

Fragebogen kurze Version: Heizperiode 2018/19, durchschnittlich 4 Teilnehmer

Beantwortung der Fragen zur Person des Teilnehmers, zur subjektiven Behaglichkeit und zur Bedienbarkeit der Infrarotstrahlungsheizungen.

Abschlussstreffen

Im Sommer 2019 fand ein Abschlussstreffen mit den Untersuchungsteilnehmern und weiteren Beteiligten in Darmstadt statt. Hier wurden die Forschungsergebnisse vorgestellt und gemeinsam diskutiert.

IR-BAU: K76 Nutzerbefragung

8 teilnehmende Parteien

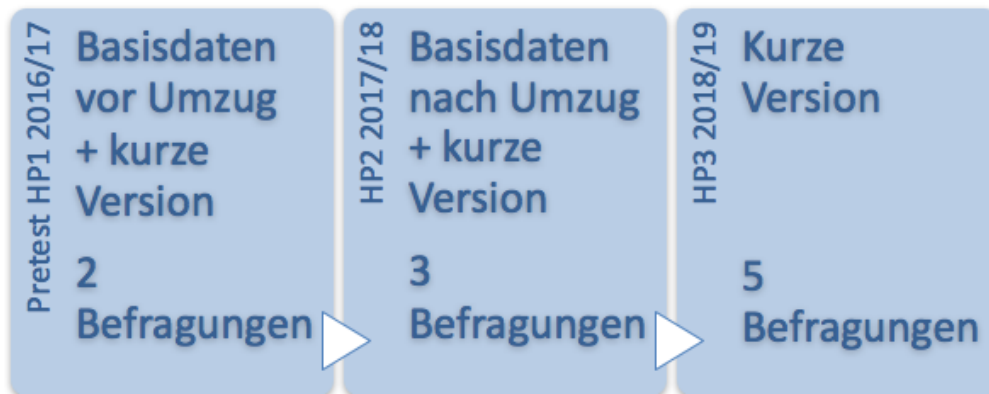


Abb. 32 Konzeption Nutzerbefragung - Teilnehmer

Online-Befragung

Bei der durchgeführten Online-Befragung handelt es sich um eine anonymisierte Umfrage via Internet, die keinen Bezug zwischen den Antworten und den Bewohnern des Projekts K76 zulässt. Sie wurde über das Programm Uni-Park durchgeführt. Die Links zur jeweiligen Umfrage wurden durch die Versuchsleiterin per E-Mail an eine extra zu diesem Zweck eingerichtete Mailadresse versandt, über die die einzelnen Teilnehmer per automatischer Weiterleitung den Zugang zum Fragebogen erhielten. Die Teilnehmer hatten nach der Zusendung des Links etwa 10 Tage Zeit für die Beantwortung der Fragen. In jeder Befragungsrunde wurde etwa 5 Tage vor Ablauf der Bearbeitungsfrist eine Erinnerungsmail verschickt. Auf Nachfrage wurde der Befragungszeitraum mehrfach verlängert.

Die Befragung enthielt vornehmlich Pflichtfragen, die erst nach einem Hinweis auf die noch ausstehende Beantwortung durch Anklicken eines speziellen Feldes übersprungen werden konnten. Die Felder zur freien Texteingabe für besondere Anmerkungen konnten optional genutzt werden. Am oberen Bildschirmrand befand sich ein Anzeiger, der die Teilnehmer über den Verlauf der Befragung informierte. Für Fragen und Anmerkungen zur Befragung wäre die Versuchsleiterin per Mail ansprechbar gewesen, dieses Angebot wurde jedoch nicht genutzt.

Struktur der Befragung

Die Befragung war wie folgt strukturiert (lange Version):

Teil 1 - Aktuelle Situation:

- Fragen zur subjektiven Behaglichkeit
- Fragen zur Bedienbarkeit der Heizung
- Fragen zu Wetterlage und Raumklima
- Fragen zur aktuellen Situation und objektiven gemessenen thermischen Bedingungen im Raum

Teil 2 - Konstante Daten:

- Fragen zur Person des Befragten
- Fragen zu den allgemeinen Nutzern
- Fragen zum typischen Raumklima

Teil 3 - Effizienz:

- Fragen zur Raumausstattung
- Fragen zum Gebäude
- Fragen zu Heizung und Energie

In der kurzen Version wurden nur die Fragen aus Teil 1 gestellt. Die Befragung enthielt eine Code-Eingabe, die ermöglichte, die Antworten einzelner Teilnehmer aus der kurzen Version den Antworten aus der langen Version bezüglich der konstanten Daten und Effizienz zuzuordnen.

Beispiele zu einzelnen Fragen (Auszug):

Fragen zur subjektiven Behaglichkeit

- zu warm / zu kalt
- zu feucht / zu trocken
- Zuglufterscheinungen
- aktuelle Bekleidung
- aktuelle Tätigkeit
- aktueller Gesundheitszustand

Angabe der objektiv gemessenen thermischen Bedingungen

- Lufttemperatur Innen
- Lufttemperatur Außen
- Temperatur der Umgebungsflächen
- relative Luftfeuchte
- CO₂-Gehalt der Raumluft
- aktuelles Wetter

Angabe der räumlichen Gegebenheiten

- Größe der Wohnung
- Größe und Ausrichtung der Fensterflächen
- Materialität
- Zusätzliche Wärmequellen

Einfluss des Nutzers auf die Heizungsregelung

- Einflussname möglich?
- Genutzt / wie häufig?

Abfrage der eingesetzten Heizungstechnik

- Bisherige Wohnsituation
- Verbräuche

Screenshot Befragung:



Teil 1 - aktuelle Situation 1A - Behaglichkeit

Im Folgenden stellen wir Ihnen Fragen zu Ihrer momentanen Behaglichkeit.

Bitte beantworten Sie diese Fragen, so wie alle folgenden, in Ihrem "Wohnzimmer".

Wie warm ist es Ihnen in diesem Moment?

- viel zu kalt zu kühl etwas kühl genau richtig etwas warm zu warm viel zu warm

Abb. 33 Konzeption Nutzerbefragung - Onlinefragebogen

Die beiden Versionen der Befragungsbögen mit allen Fragestellungen befinden sich im Anhang.

Datenerfassung und Analyse:

Die Datenerfassung und Analyse erfolgte über Microsoft Excel, da die Menge der Daten ein überschaubares Maß nicht überschritt und auch die Komplexität der Daten keine Statistik- oder spezielle Analyse-Software notwendig machte. Alle Variablen wurden auf fehlende Angaben, die Plausibilität der Werte und mögliche Fehler bei der Dateneingabe geprüft. Die Datensätze wurden mit Hilfe deskriptiver Statistik und Mittelwertsvergleichen untersucht.

Ergebnisse

Ergebnisse zu Hypothese 1

Hypothese 1:

In den Wohnräumen des hochgedämmten Wohngebäudes K76 kann mit Hilfe von Infrarotstrahlungsheizungen ein behagliches Raumklima erzeugt werden.

Diese Hypothese wurde bestätigt.

Die Nutzer werteten die Gesamt-Behaglichkeit im untersuchten Raum als „eher behaglich bis behaglich“. Im Verlauf der Messung stieg die Bewertung an, in den letzten Messungen wurde die Situation im Schnitt als „behaglich“ gewertet. Eine einzelne Messung wurde mit „unbehaglich“ angegeben, diese ist auf einen temporären technischen Defekt zurückzuführen und als „Ausreißer“ zu werten.

IR-BAU: K76 Nutzerbefragung

Auswertung – Behaglichkeit

- \bar{x} *eher behaglich bis behaglich*
- Median bei *behaglich*
- min: *neutral* - max: *sehr behaglich*

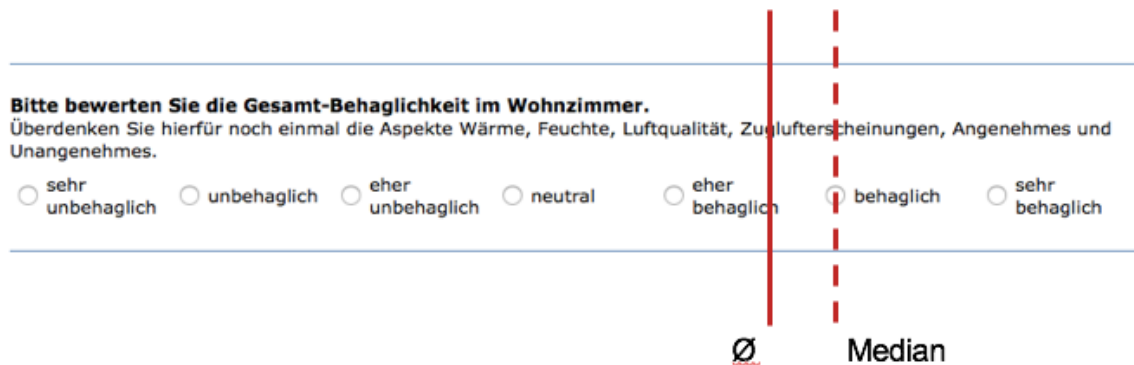


Abb. 34 Auswertung Nutzerbefragung - Behaglich

Auswertung - Temperaturen

\bar{x} 20,4 °C

Median bei 21,0 °C

min: 18,6 °C - max: 22,0 °C

Ergebnisse zu Hypothese 2

Hypothese 2:

Die in den Räumen des Wohngebäudes K76 eingesetzte Steuerungstechnik der Infrarotstrahlungsheizungen ist für die Nutzer gut bedienbar.

Diese Hypothese wurde bestätigt.

Die Bedienbarkeit der Steuerungstechnik der Infrarotstrahlungsheizungen wurde über alle Messungen im Schnitt als „gut bedienbar“ eingestuft. Der minimale Wert liegt bei „eingeschränkt bedienbar“, diese Bewertung wurde nur ein Mal in Zusammenhang mit einer technischen Störung vergeben.

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. 35 Auswertung Nutzerbefragung - Bedienbarkeit

Ergebnisse zu Hypothese 3

Hypothese 3:

Weitere Einflussfaktoren (wie z.B. Ausrichtung der Wohnung...) wirken sich nicht negativ auf die Behaglichkeit der Wohnsituation aus?

Diese Hypothese wurde bestätigt.

Da die Behaglichkeit über alle Teilnehmenden recht ähnlich eingeschätzt wurde, wirken sich die speziellen und individuellen Einflussfaktoren offensichtlich nicht negativ auf die Behaglichkeit aus. Im Durchschnitt wurde die Behaglichkeit mit „eher behaglich bis behaglich“ angegeben.

Ergebnisse zu Hypothese 4

Hypothese 4:

Im Gebäude K76 stufen die Nutzer eine etwas geringere durchschnittliche Raumlufttemperatur als in der vorherigen Wohnsituation als behaglich ein.

Die Hypothese wurde bestätigt.

Die Nutzer stufen eine niedrigere Raumlufttemperatur in der neuen Wohnsituation als behaglicher ein als die etwas höhere Raumlufttemperatur in der vorherigen Wohnsituation. In den beiden Testdurchläufen in der vorherigen Wohnsituation gaben die Teilnehmer bei einer durchschnittlichen Temperatur von 20,7 °C die Behaglichkeit ebenfalls im Durchschnitt als „neutral“ an. In der neuen Wohnsituation im Gebäude K76 gaben die Teilnehmer (bis auf

eine Ausnahme bei einer Befragungsrunde, die auf einen technischen Defekt zurückzuführen und daher als „Ausreißer“ zu werten ist) bei einer geringeren durchschnittlichen Temperatur von 20,4 °C die Behaglichkeit höher mit „eher behaglich bis behaglich“ an. Einige Teilnehmer werteten die Situation als „sehr behaglich“, was in der vorherigen Wohnsituation nicht der Fall war.

Zu beachten ist, dass bei der Bestimmung der durchschnittlichen Raumlufthtemperatur in der neuen Wohnsituation eine Messung mit einer Innenlufttemperatur von 28,3 °C als Mess- oder Tippfehler zu werten ist und daher aus der Gesamt-Durchschnittstemperatur auszuschließen ist. Würde man diese Messung in die Gesamtberechnung einbeziehen, ergäbe sich eine durchschnittliche Raumlufthtemperatur von 20,7 °C, die dann gleich zur Messung der vorherigen Wohnsituation wäre. In diesem Fall wäre die Hypothese eingeschränkt bestätigt. Der Kern der Hypothese, die höhere Bewertung der Behaglichkeit in der neuen Wohnsituation, bliebe bestehen.

Kommentare zu Behaglichkeit - Auszug:

- Wie immer: frische Luft in Verbindung mit der Wärme der IR-Heizung.
- Direkt unterhalb der Heizungen, die bei uns an der Decke hängen, ist es richtig mollig warm.
- Nach dem Filterwechsel der Lüftungsanlage hat sich die Luftqualität nochmals deutlich verbessert.
- Relativ frische Luft beim Gefühl von Wärme.
- Die Wände und Fassadenfläche empfinden wir als eher warm und den Fußboden als eher kalt.
- Wenn etwas kalt wird, dann die Füße unterm Esstisch. Im Wärmeschatten. Aber meistens haben wir Hausschuhe an.
- Unter dem Schreibtisch, an dem ich sitze, ist es etwas kühl.
- Auf der Couch kann man nur mit dicken Socken und dicker Decke liegen. Angenehme Temperaturen sind nur vorhanden, wenn im Raum gekocht wird oder man ständig in Bewegung ist. (Dieser Nutzer war der einzige, der die Situation als unbehaglich einstufte, und das nur bei einer einzigen Messung.)

Kommentare Bedienbarkeit - Auszug:

- Die Bedienbarkeit ist gut, da wir die Einstellungen weitgehend unverändert beibehalten können. Wenn man Änderungen vornimmt, wäre es komfortabler, wenn man nicht jedes Bedienteil einzeln einstellen müsste.
- Teilweise Abweichungen von Soll- und Ist-Wert um bis zu 1 °C am Bedienelement, was wir dann einfach korrigieren.
- Am Anfang war die Bedienung schwierig, mittlerweile funktioniert es gut.
- Es hat sich herausgestellt, dass die Regelung nicht korrekt funktioniert. Am Eingang ist es zu warm, über dem Esstisch immer kühler als am Eingang. Elektriker ist informiert (Störung).

Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die vorliegenden Daten zeigen, dass die Teilnehmer der Studie bis auf eine (zeitlich begrenzte) Ausnahme, die vermutlich auf eine technische Störung zurückzuführen ist, mit der durch die Infrarotstrahlungsheizung erzeugten Behaglichkeit und der Bedienbarkeit der Technik zufrieden sind. Die Behaglichkeit wird über alle Messungen recht hoch bewertet, mit wenigen Einschränkungen, wie beispielsweise kühleren Bereichen unter dem Tisch. Die durchschnittlichen Temperaturen liegen im normalen Bereich. Die Bedienbarkeit wird als gut eingestuft. Die im K76 verwendete Raumregelung ist laut den Kommentaren der Nutzer „etwas gewöhnungsbedürftig“ und teilweise anfällig für Ungenauigkeiten, was die Funktion des Heizsystems aber nicht wesentlich beeinträchtigt.

Methodenkritik

Die erhobenen Daten lassen auf Grund der geringen Teilnehmerzahl keine pauschale Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu. Zudem besteht die Möglichkeit, dass die Teilnehmer durch die starke Bindung an das Forschungs- und Bauprojekt dazu tendieren, Unannehmlichkeiten eher in Kauf zu nehmen und die Behaglichkeit und Bedienbarkeit der Technik daher höher einzustufen als dies Menschen in anderen Kontexten tun würden. Die Teilnehmer stellen mit Sicherheit keine Stichprobe dar, die die Bevölkerung in Deutschland repräsentativ spiegelt. Weitere Studien mit repräsentativeren und größeren Stichproben könnten Aufschluss darüber geben, wie die Behaglichkeit und Bedienbarkeit von Infrarotstrahlungsheizungen von den Nutzern bewertet wird.

3.4.4 Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen

Welche effektiven Rauminnenoberflächentemperaturen stellen sich im Betrieb bei IR-Heizsystemen ein?

Teil der Nutzerbefragung war die messtechnische Erfassung der Rauminnenoberflächentemperaturen mit einem Infrarotthermometer in jeder Befragungsrunde. Bei den Messungen über zwei Heizperioden haben sich folgende durchschnittliche Oberflächentemperaturen in den untersuchten Wohnungen ergeben:

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

Tabelle 7 gemessene Innenoberflächentemperaturen K76

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-Heizungsflächen betrug somit ca. 19,7 °C

3.4.5 Lufttemperatur bei IR-Heizungen

Welche Reduktion der Lufttemperatur lässt sich durch erhöhte Oberflächentemperaturen bei Infrarot-Heizelementen realisieren, um dieselben operativen Temperaturen sicherzustellen?

Abb. 36 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 liegt bei 20,04 °C.

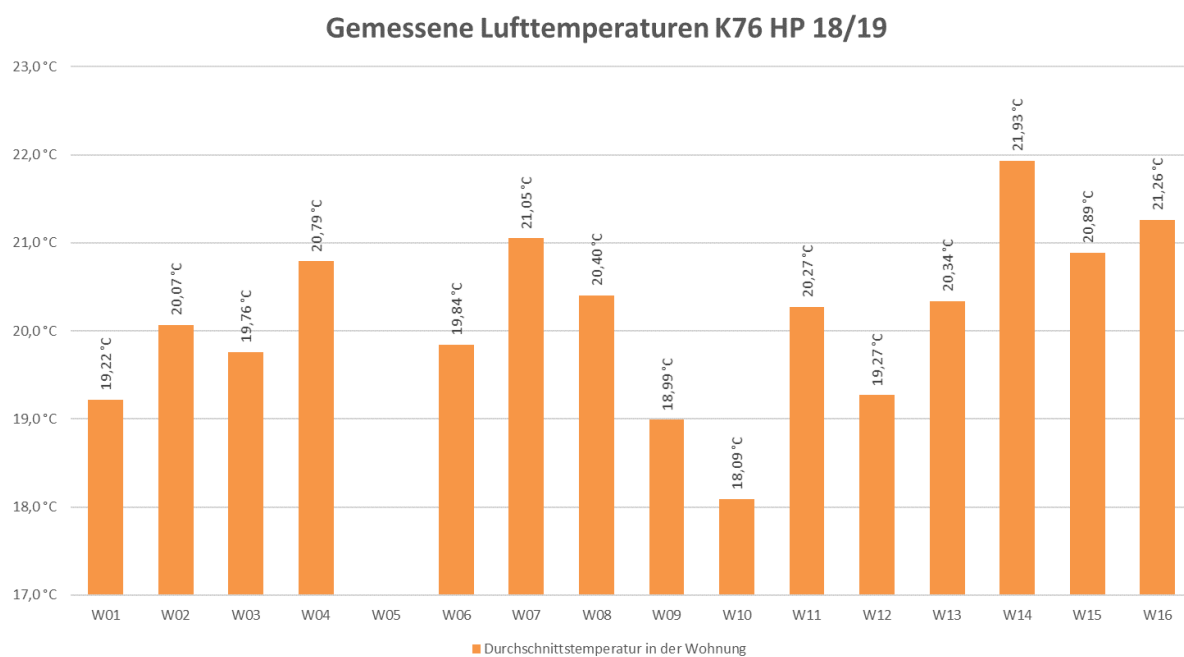


Abb. 36 Gemessene Lufttemperaturen K76 Heizperiode 2018 / 2019

3.5 Fazit Begleitforschung K76

Aus der Begleitforschung des Projektes K76 lassen sich bezüglich der relevanten Fragestellungen folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

1. Welche effektiven Rauminnenoberflächentemperaturen stellen sich im Betrieb bei IR-Heizsystemen ein?

Das Mittel der gemessenen Rauminnenoberflächentemperaturen im Gebäude K76, ohne die Oberflächen der IR-Heizungen, liegt über die zwei Heizperioden bei 19,7 °C.

2. Welche Reduktion der Lufttemperatur lässt sich durch erhöhte Oberflächentemperaturen bei Infrarot-Heizelementen realisieren, um dieselben operativen Temperaturen sicherzustellen?

Die über das gesamte Gebäude gemessenen Lufttemperaturen liegen in Heizperiode 2018 / 2019 im Mittel bei ca. 20 °C. Damit zeigt sich bei den Temperaturen im Gebäude K76 die gleiche Tendenz 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 im K76 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.

7. Welche Verbrauchswerte für die IR-Heizung ergeben sich in einem realen Gebäude?

Die Verbrauchsmessungen zeigen, dass das Konzept einer „Direktstromheizung“ grundsätzlich funktioniert. Die Werte aus der nach Baufertigstellung erstellten EnEV-Berechnung werden bei 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 zeigt sich von Heizperiode 2017 / 2018 zu Heizperiode 2018 / 2019 eine deutliche Dynamik. Die Verbräuche sind aufgrund mehrerer oben genannter Ursachen von HP 2017/18 auf HP 2018/19 um ca. 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 in K76 noch nach Lufttemperatur geregelt. Laborraummessungen haben jedoch gezeigt, 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 „ZukunftBau“ geförderten "OpTemp-Heizung"-Projekts Sensoren, die eine einfache Regelung nach operativer Raumtemperatur ermöglichen sollen.

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

8. Wie wird die Behaglichkeit und Bedienbarkeit einer IR-Heizung im realen Betrieb bewertet?

Die Nutzerbefragung der Bewohner des Pilotprojekts K76 hat ergeben, dass die Bewohner das IR-Heizsystem als thermisch behaglich und gut bedienbar empfinden.

12. Wie lässt sich das Infrarot-Heizsystem durch Einbindung von Photovoltaiksystemen und dezentraler Stromspeicher in ökologischer und ökonomischer Hinsicht optimieren?

Im Fall des Projekts K76 zeigt sich, dass die verbaute PV-Anlage dazu beiträgt, den Strombedarf der IR-Heizung auch im Winter zu decken. Die PV-Anlage ist jedoch für die Gebäudegröße zu klein dimensioniert. Eine größere Photovoltaikanlage wäre sowohl aus ökonomischer Sicht, als auch aus ökologischer Sicht sinnvoll.

Für die Warmwassererzeugung wären dezentrale Warmwasserboiler oder Brauchwarmwasserwärmepumpen mit Warmwasserspeicher in Kombination mit einer dezentralen Warmwasserrückgewinnung im Sinne der Netzdienlichkeit vorteilhaft gewesen.

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. Somit hat der Verzicht auf Stromspeicher hier nur geringe Auswirkungen auf eine mögliche Erhöhung der Eigendeckungsrate im Winter. Zur Erhöhung der Eigenverbrauchsrate im Sommer kann ein dezentraler Stromspeicher jedoch einen Beitrag leisten.

4 Labormessungen

Im Forschungsstrang „Laborräume Ehoch4“ wurden folgende Fragestellungen untersucht:

Forschungsfrage	Pilotprojekt K76	Laborräume Ehoch4	Simula- tionen
1. Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	x	x	x
2. Verhalten der Lufttemperatur bei IR-Heizungen	x	x	x
3. Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen		x	x
4. Übergabeverluste bei IR-Heizungen			x
5. Strahlungswirkungsgrad von IR-Heizungen		x	
6. Stromverbrauchsdifferenzen IR/WP im realen Betrieb		x	x
7. Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude	x		
8. Bewertung der Behaglichkeit im realen Wohngebäude	x		
9. Gesamtökologische Bewertung über 50 Jahre (LCC)	x		x
10. Gesamtökonomische Bewertung über 50 Jahre (LCA)	x		x
11. Vorteilhafte Randbedingungen für IR-Heizsysteme	x		x
12. Optimierung des IR-Heizsystems durch PV und Speicher	x		x
13. Können IR-Systeme eine Alternative zu WP-Systemen sein?	x		x

Tabelle 8 Fragestellungen Forschungsstrang Laborräume Ehoch4

4.1 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.

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

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.



Abb. 37 Südansicht Gebäude 6



Abb. 38 Grundriss Gebäude 6 mit Lage der 4 Laborräume

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 Nachbarräume, 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 m² 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.

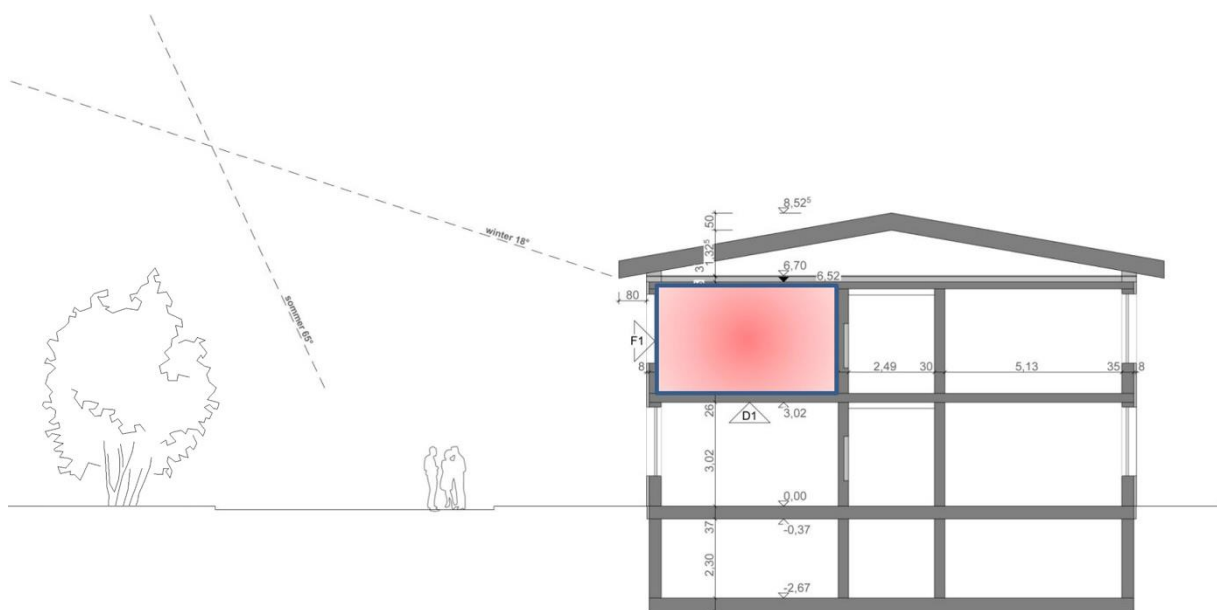


Abb. 39 Querschnitt Gebäude 6 mit Lage der Laborräume

4.2 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. 40 Laborraum T1 mit wassergeführter Fußbodenheizung

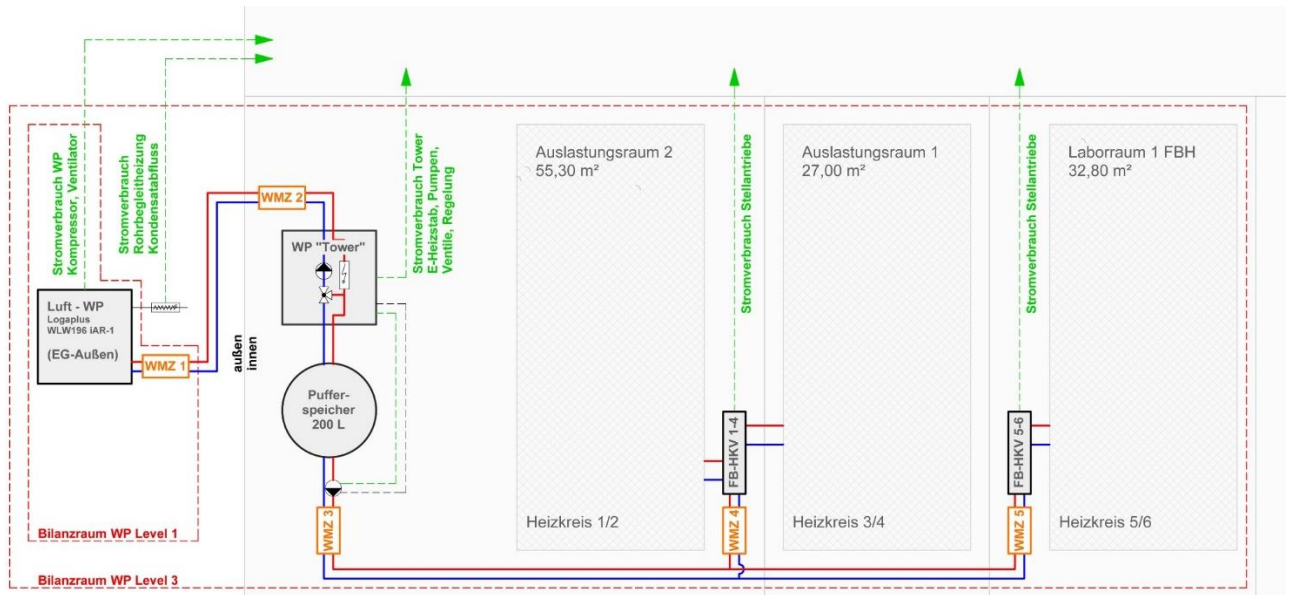


Abb. 41 Hydraulikschema Wärmepumpen-System Laborräume Ehoch4



Abb. 43 Luft/Wasser-Wärmepumpe



Abb. 42 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. 44 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. 45 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. 46 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 (Inventar iV14R) eingebaut, um einen realistischen Luftwechsel zu erhalten.



Abb. 47 Südfassade Gebäude 6 mit Einzellüftern

4.3 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 Hilfe 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 Pt100 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 Fensterebene 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. 49). Alle Sensoren sind in einem Abstand von 1,5 m von der Wand positioniert. Mit dieser Anordnung kann die Temperatur der kompletten Raumbofläche 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.

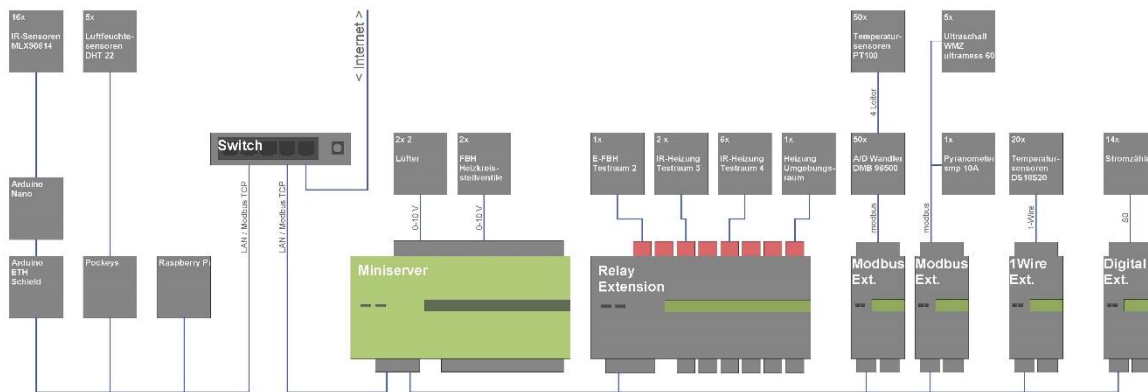
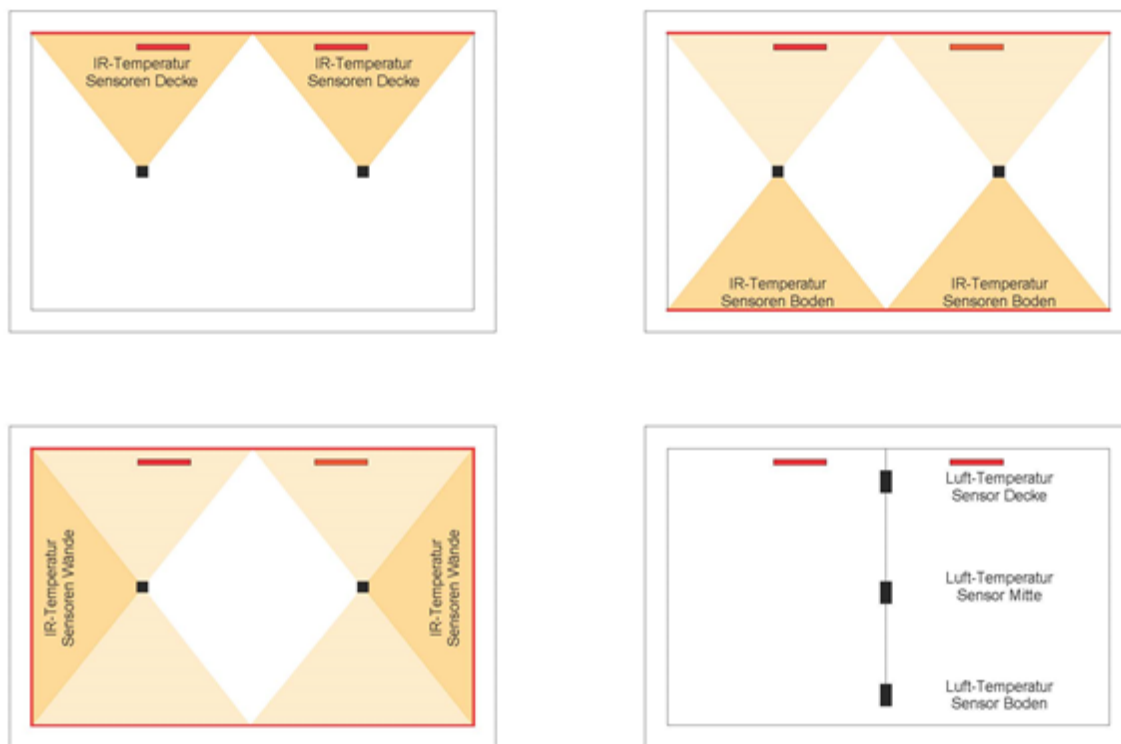


Abb. 48 Messtechnikscha Laborräume Ehoch 4

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.



Berechnung der Operativen Raumtemperatur

Abb. 49 Anordnung der IR-Sensoren zur Messung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur und zur Berechnung der operativen Raumtemperatur



Abb. 50 Anordnung der 16 IR-Sensoren in Laborraum T3

4.4 Untersuchte Fragestellungen

4.4.1 Strombedarfsdifferenzen verschiedener Wärmeerzeuger im Realbetrieb

Wie groß ist die effektive Differenz des Strombedarfs im Betrieb für die Wärmeversorgung von Räumen im Realbetrieb inklusive Hilfsenergie zwischen A: Infrarotheizsystem, B: Integriertem Direktstrom-Heizelement (Niedertemperatur) und C: Luftwärmepumpe und Fußbodenheizung?

Wie zuvor beschrieben, wurden für den direkten Vergleich im Realbetrieb vier bauphysikalisch gleiche Laborräume mit den vier Wärmeerzeugern Wärmepumpe + Fußbodenheizung, Elektrische Fußbodenheizung, IR-Heizung an der Decke und IR-Heizung an der Wand ausgestattet.

In der **Heizperiode 2017 / 18** wurden die Strom- und Wärmeverbräuche der Laborräume in drei Messphasen miteinander verglichen.

- 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 (12m³/h) mit WRG gestellt. Die Hysterese aller Heizungen wurde einheitlich auf 0,5K gestellt. Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.
- Dritte Messphase: 20.03.2018 – 01.05.2018 Die Lüftung in jedem Laborraum wurde auf kleinste Stufe (12m³/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.

- Erste Messphase: 11.11.2018 – 30.11.2018. Die Lüftung in jedem Laborraum wurde auf kleinste Stufe (12m³/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 (12m³/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 (12m³/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 (12m³/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.

Messergebnisse Heizperiode 2017 / 2018

Messphase 1: 22.12.2017 – 07.02.2018

Lüftung **55 m³/h ohne WRG**,

Hysterese FBH 0,5K; 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 Level3 der WP: 3,8

Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,5 %

Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

Wärmeverbrauch Messphase 1 HP 17/18

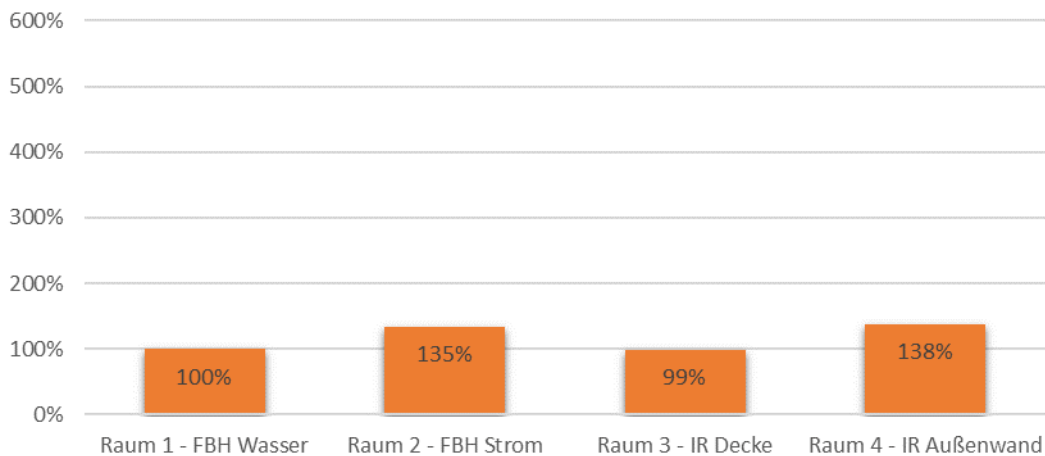


Abb. 51 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2017/2018

Stromverbrauch Messphase 1 HP 17/18

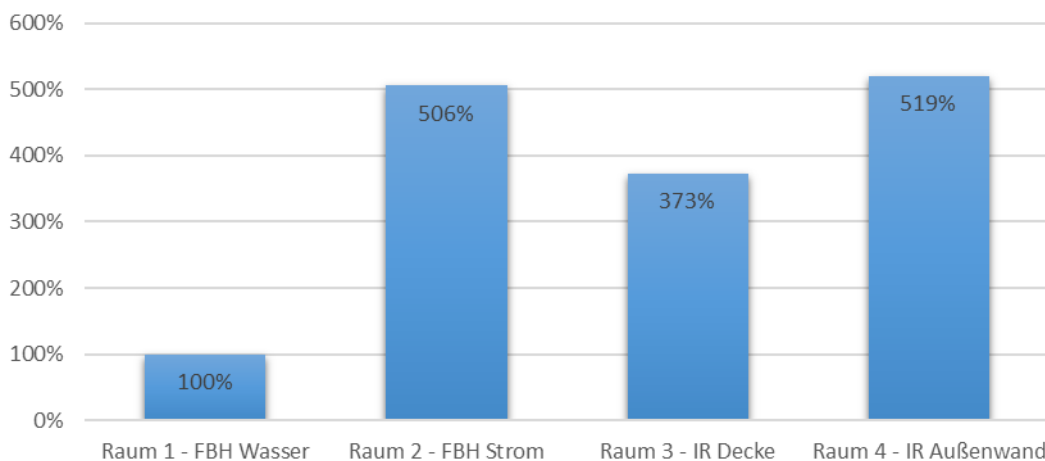


Abb. 52 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2017/2018

Messphase 2: 21.02.2018 – 20.03.2018

Lüftung 12 m²/h mit WRG,

Hysterese FBH 0,5K; 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 Level3 der WP: 3,0

Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 1,5 %

Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

Wärmeverbrauch Messphase 2 HP 17/18

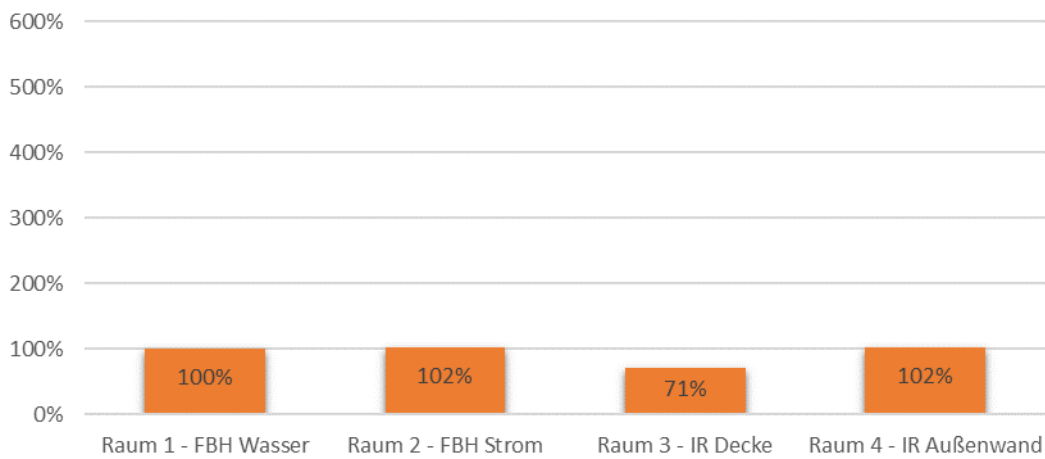


Abb. 53 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2017/2018

Stromverbrauch Messphase 2 HP 17/18

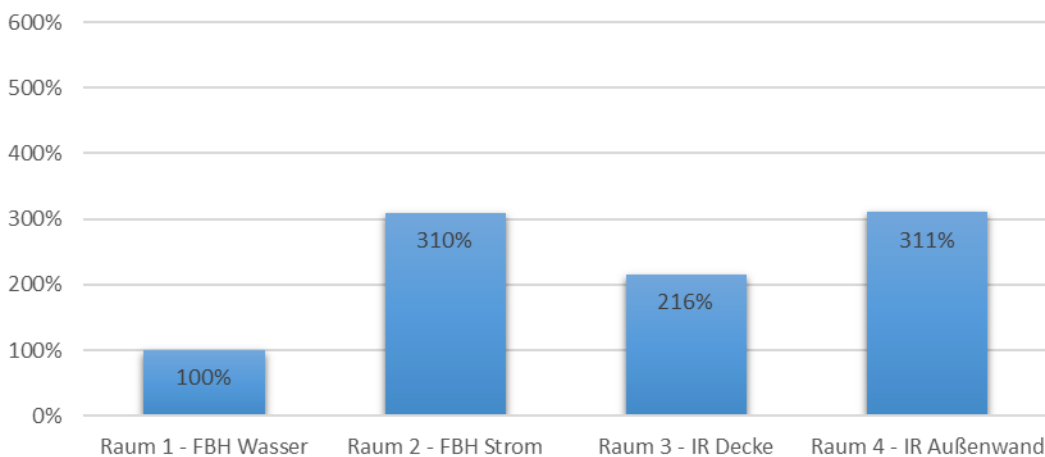


Abb. 54 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2017/2018

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 Level3 der WP: 3,1

Leitungs- und Speicherverluste Hydraulikkreis ca. 2,2 %

Regelung nach **gemessener** operativer Temperatur.

Wärmeverbrauch Messphase 3 HP 17/18

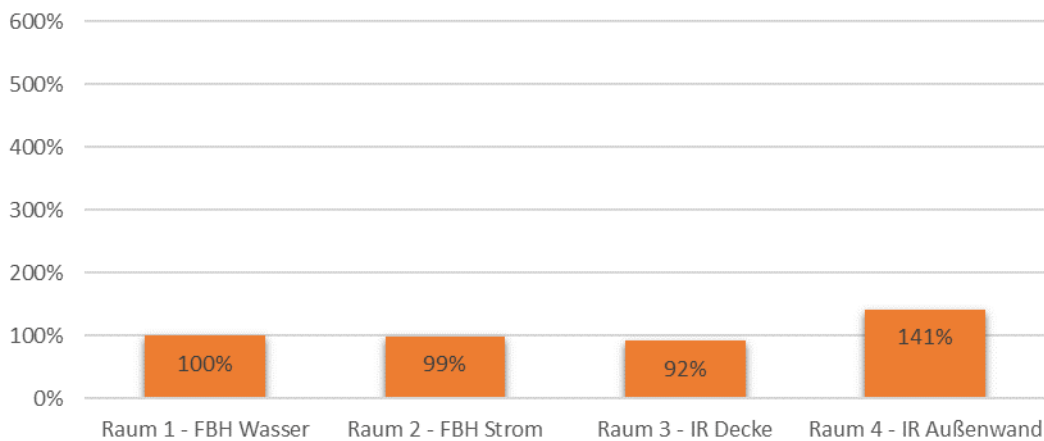


Abb. 55 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2017/2018

Stromverbrauch Messphase 3 HP 17/18

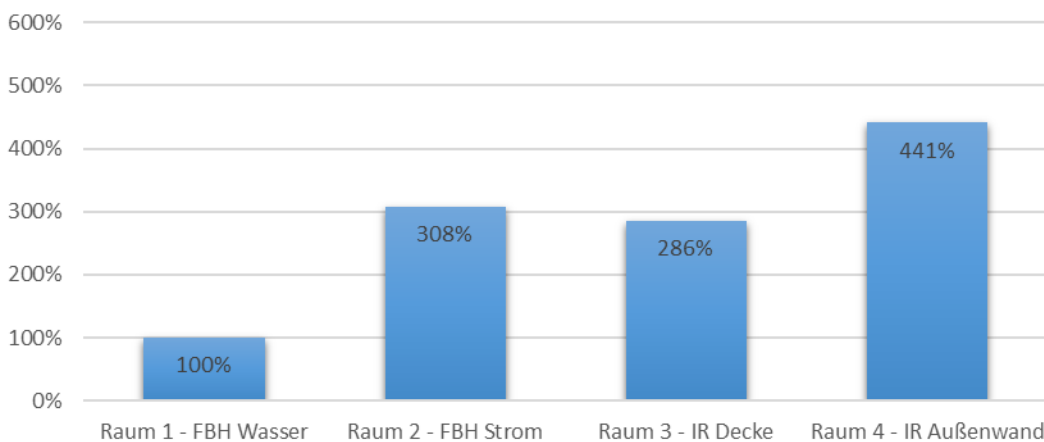


Abb. 56 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2017/2018

Interpretation der Messergebnisse Heizperiode 2017 / 2018:

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, 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.

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).

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. 58) 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. 57). 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. 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 Raums abgesaugt, entstehen entsprechende Lüftungswärmeverluste.

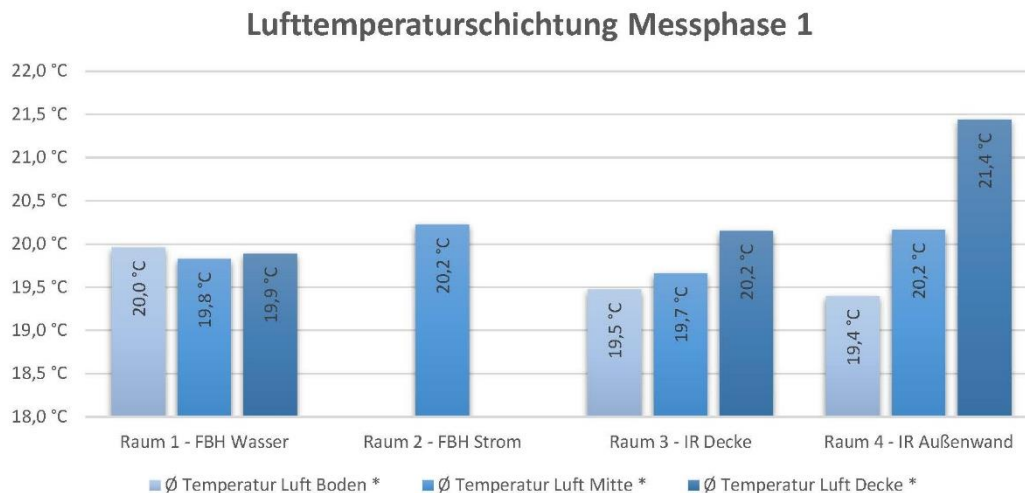


Abb. 57 Lufttemperaturschichtung Raum T1-T4, Messphase 1 HP 2017/18

Auch die Hysterese der Regelung hat 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. 59 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 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 gezeigt hat, dass die wandaufgehängten IR-Heizungen in Laborraum 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 mit einbezogen.

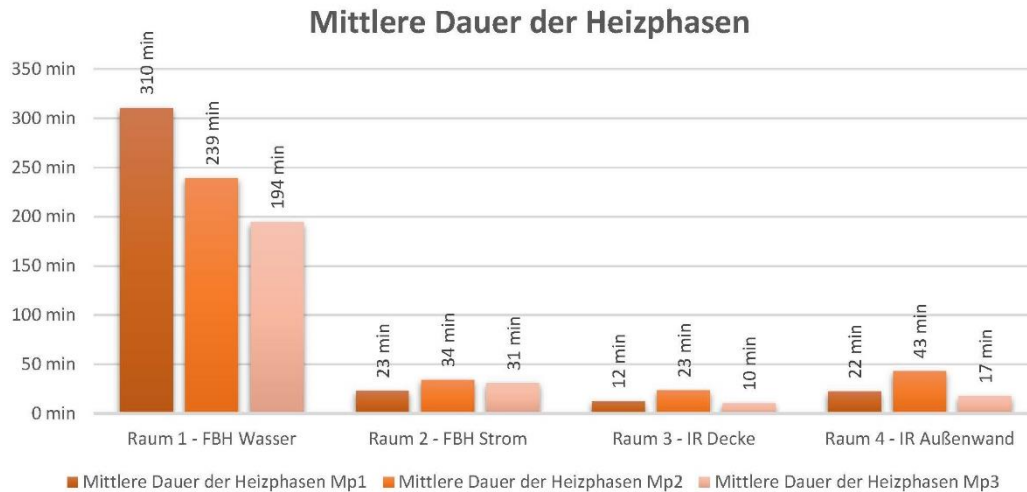


Abb. 58 Mittlere Dauer der Heizphasen Raum T1-T4 HP 2017/2018

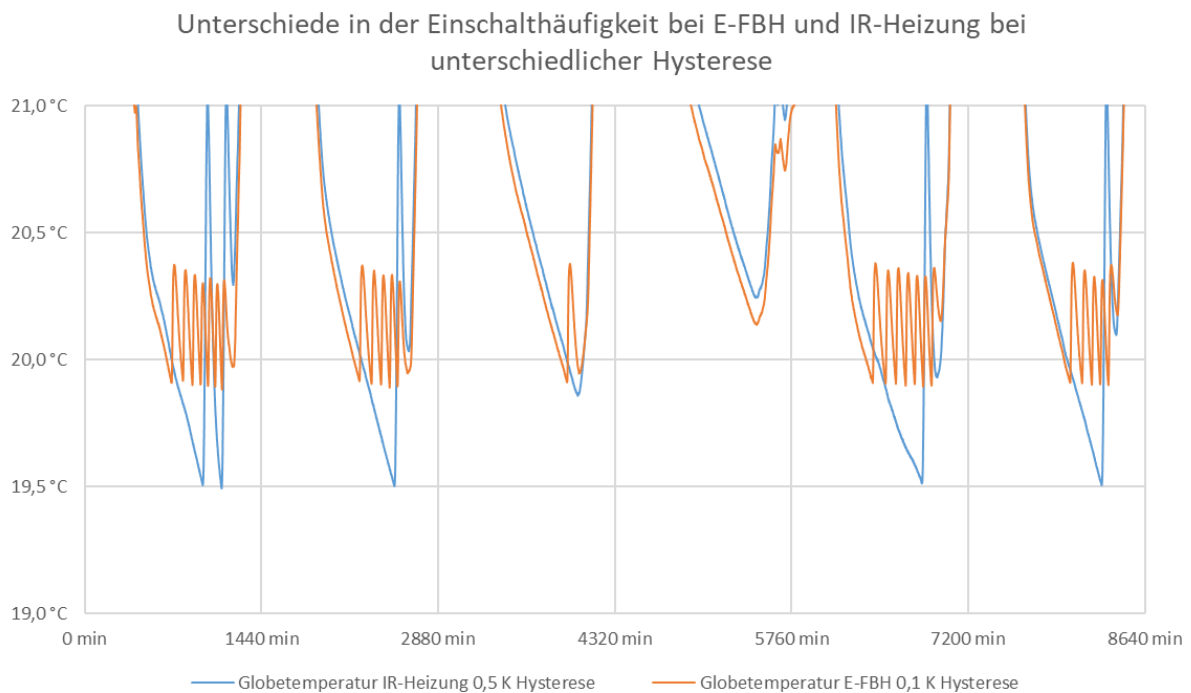


Abb. 59 Unterschiede in der Einschalthäufigkeit bei E-FBH und IR-Heizung bei unterschiedlicher Hysterese

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; IR-Wand 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.

Wärmeverbrauch Messphase 1 HP 18/19

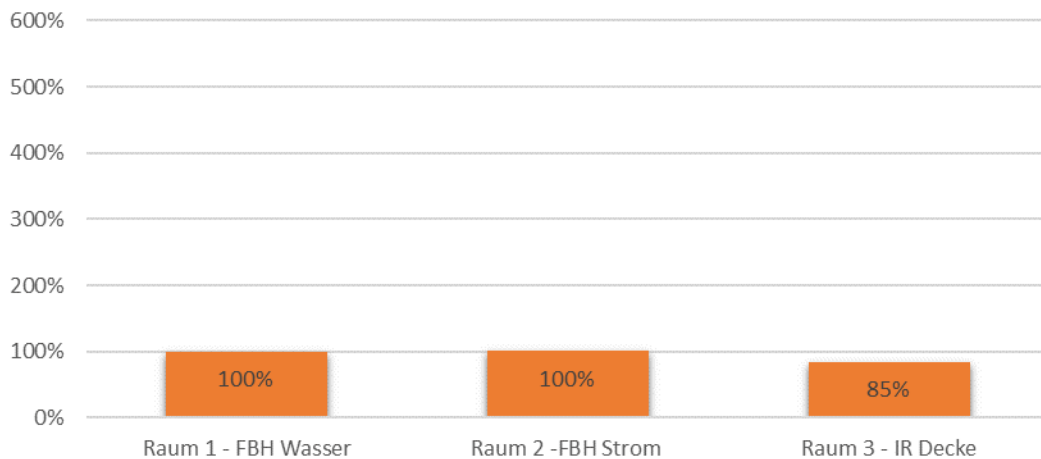


Abb. 60 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2018/2019

Stromverbrauch Messphase 1 HP 18/19

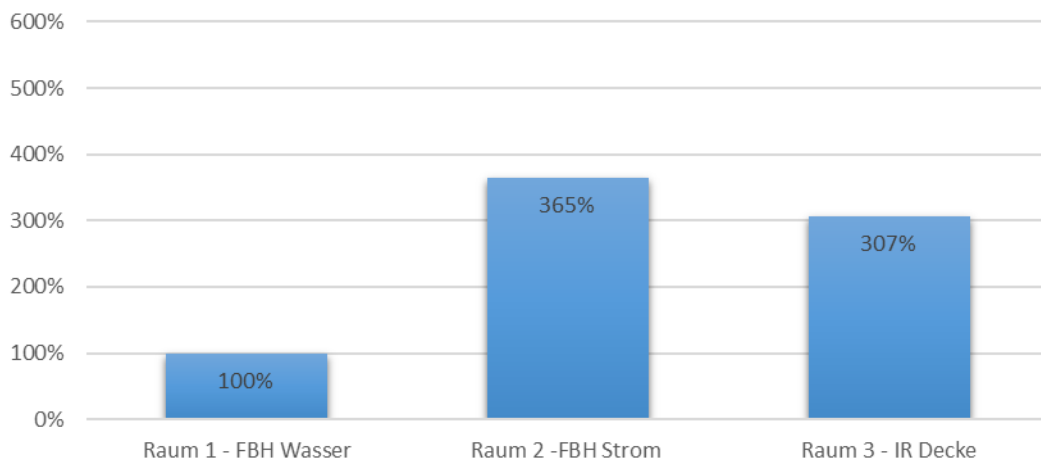


Abb. 61 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2018/2019

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; IR-Wand 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.

Wärmeverbrauch Messphase 2 HP 18/19

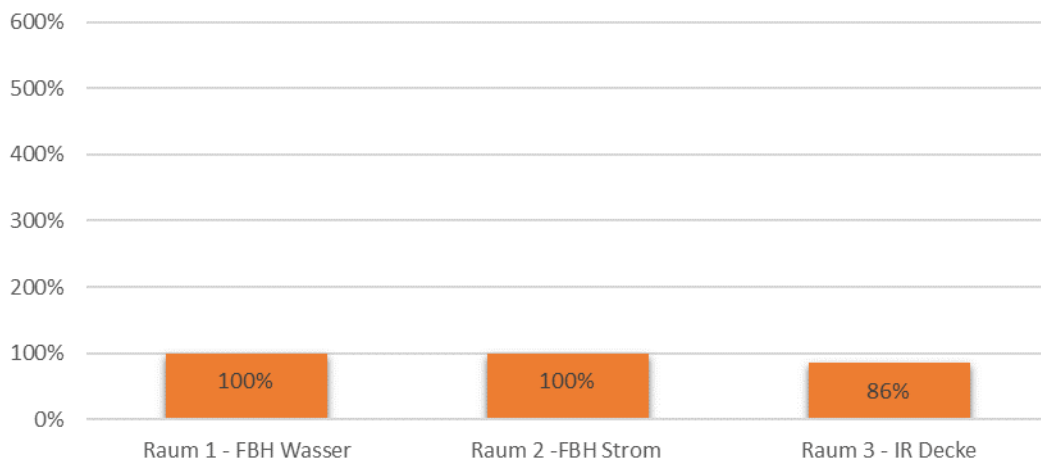


Abb. 62 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2018/2019

Stromverbrauch Messphase 2 HP 18/19

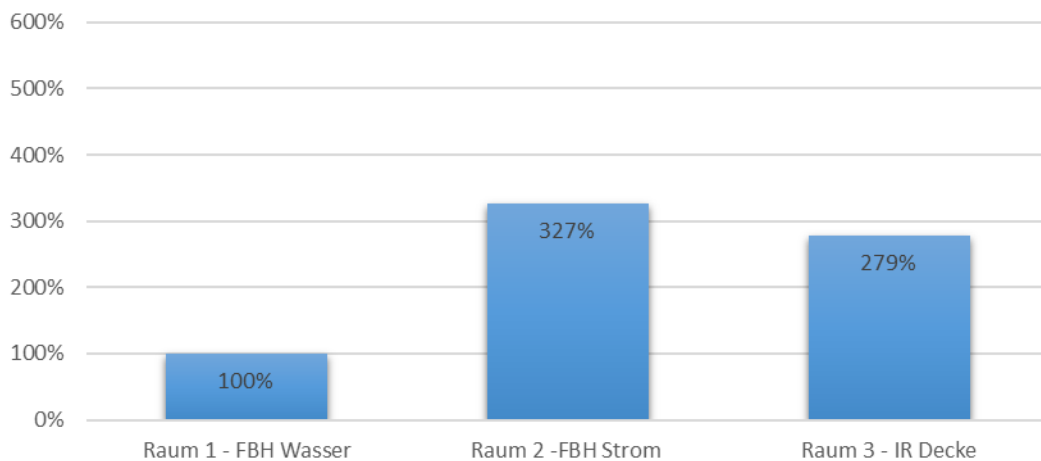


Abb. 63 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2018/2019

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; IR-Wand 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

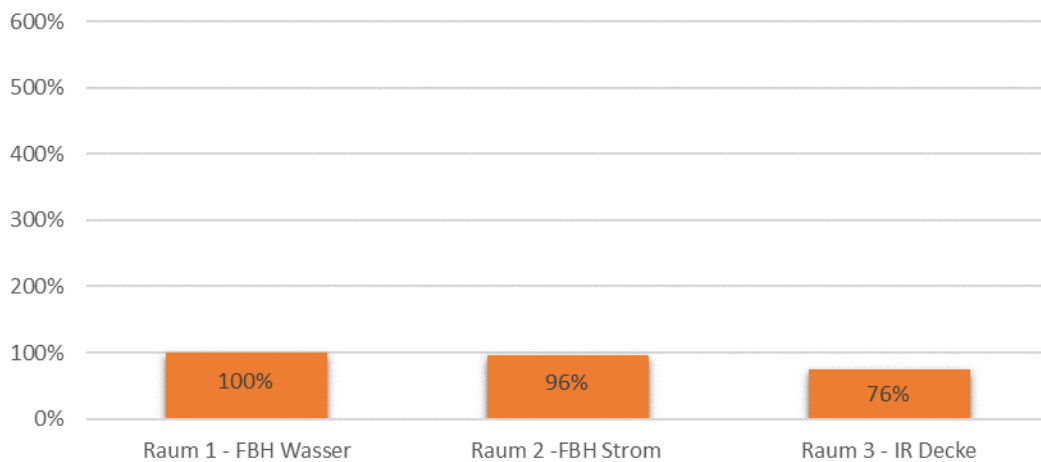


Abb. 64 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2018/2019

Stromverbrauch Messphase 3 HP 18/19

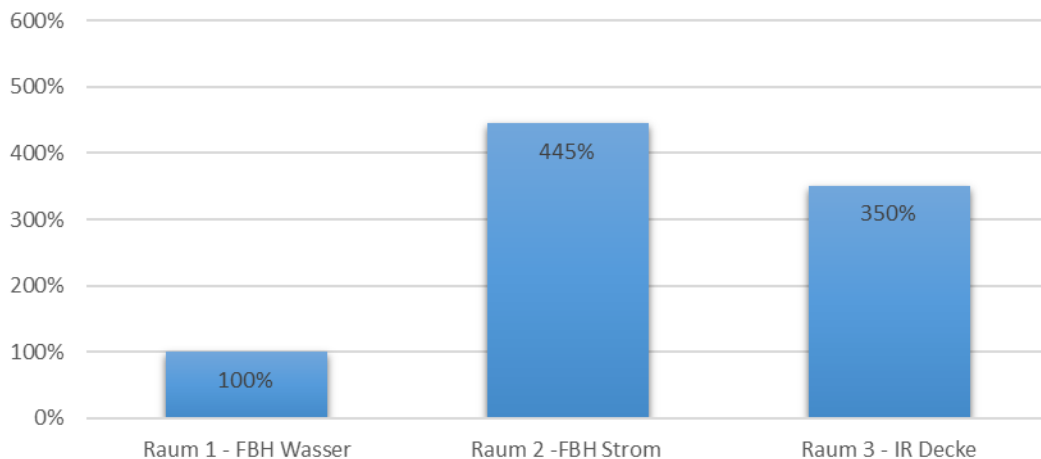


Abb. 65 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2018/2019

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; IR-Wand 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.

Wärmeverbrauch Messphase 4 HP 18/19

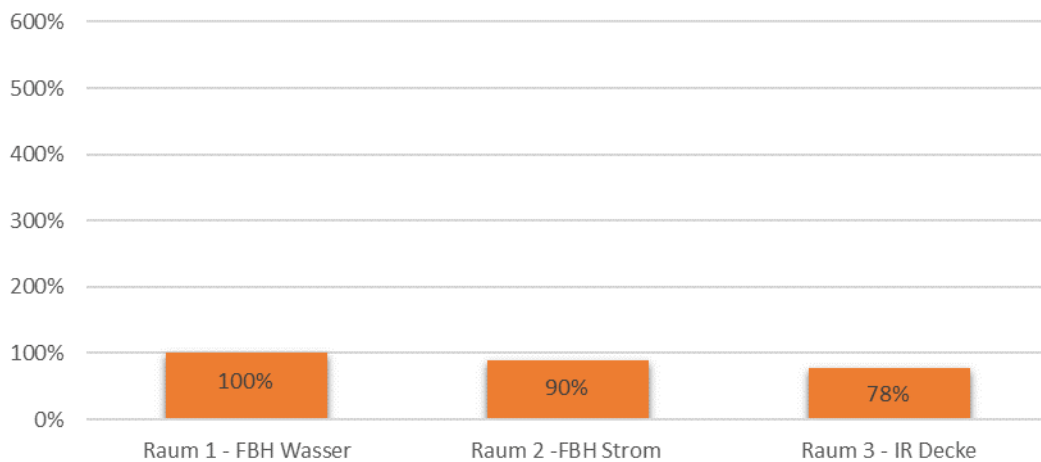


Abb. 66 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 4, Heizperiode 2018/2019

Stromverbrauch Messphase 4 HP 18/19

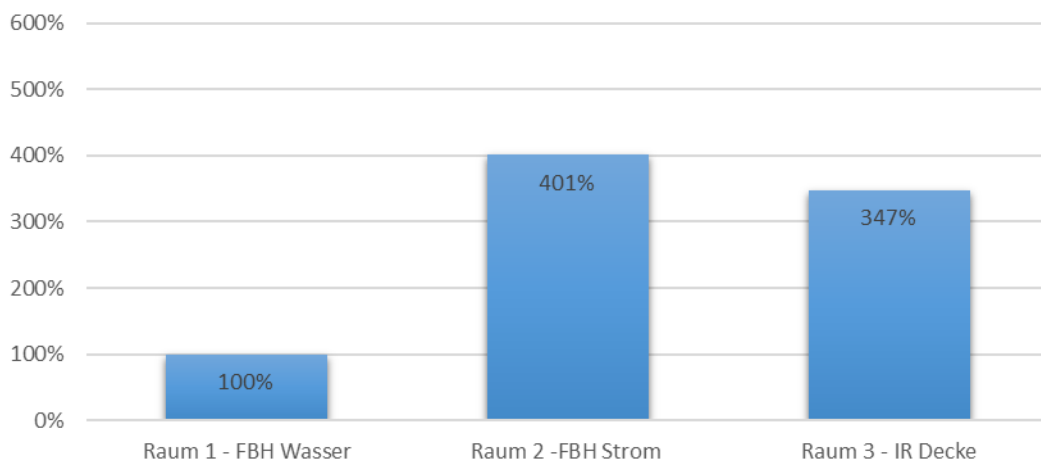


Abb. 67 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 4, Heizperiode 2018/2019

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; IR-Wand 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.

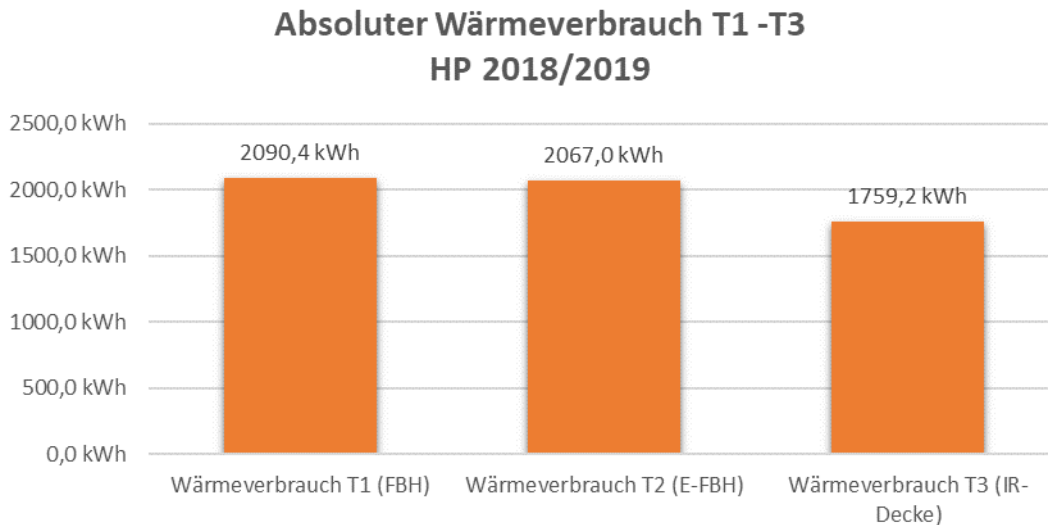


Abb. 68 Wärmeverbrauch Raum T1-T3, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019

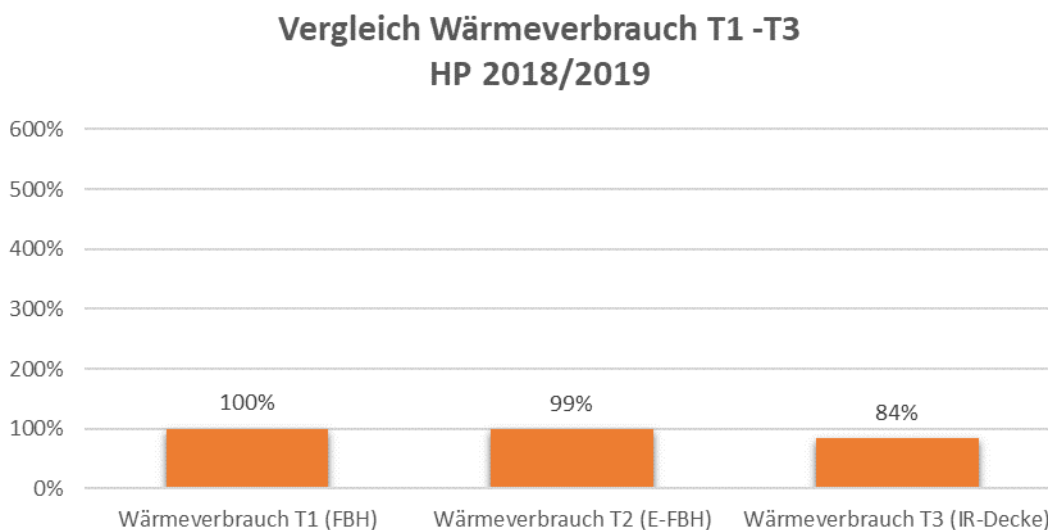


Abb. 69 Wärmeverbrauch Raum T2 und T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019

Absoluter Stromverbrauch T1 -T3 HP 2018/2019

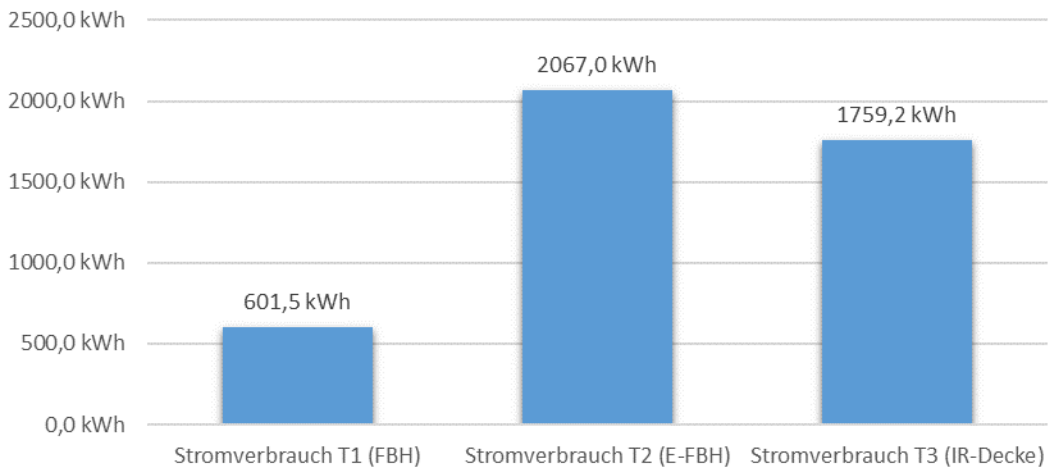


Abb. 70 Stromverbrauch Raum T1-T3, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019

Vergleich Stromverbrauch T1 -T3 HP 2018/2019

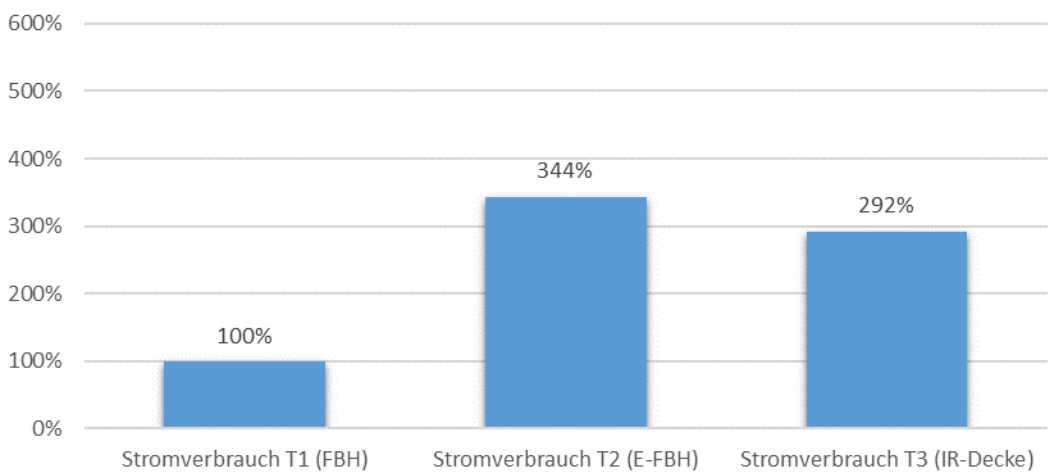


Abb. 71 Stromverbrauch Raum T2 und T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019

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 selber 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. 72). Wird das System nach gemessener operativer Temperatur geregelt, läge die tatsächliche operative Temperatur viel höher als der Sollwert. Der Stromverbrauch ist entsprechend höher.

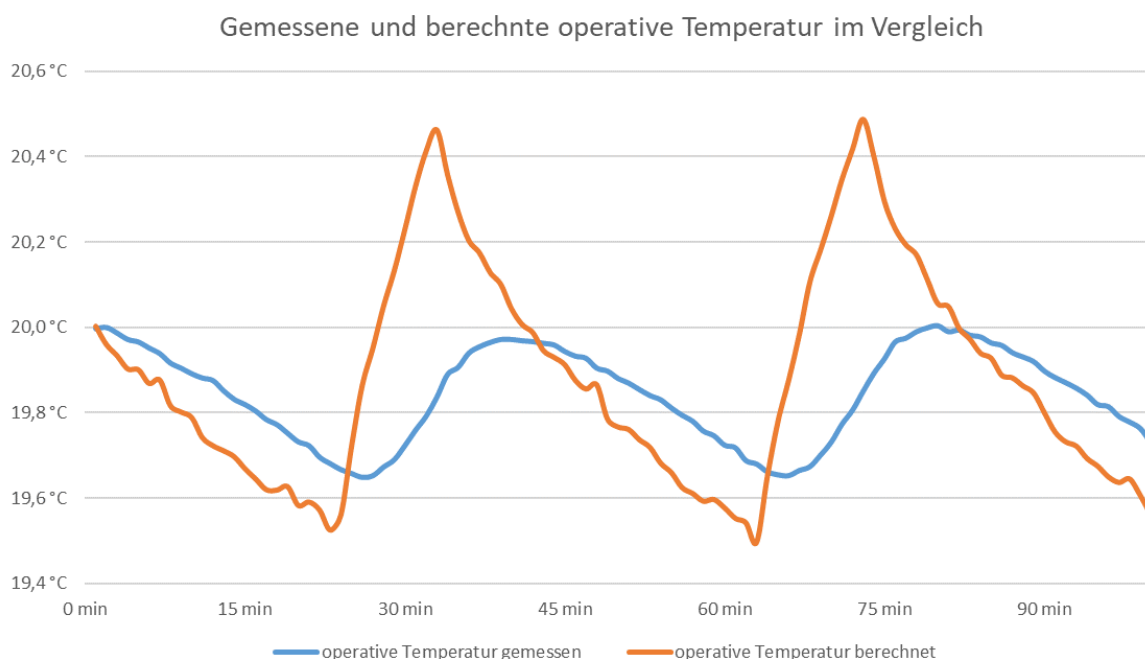


Abb. 72 Gemessene und berechnete operative Temperatur bei Betrieb einer IR-Heizung in Laborraum T3 im Vergleich

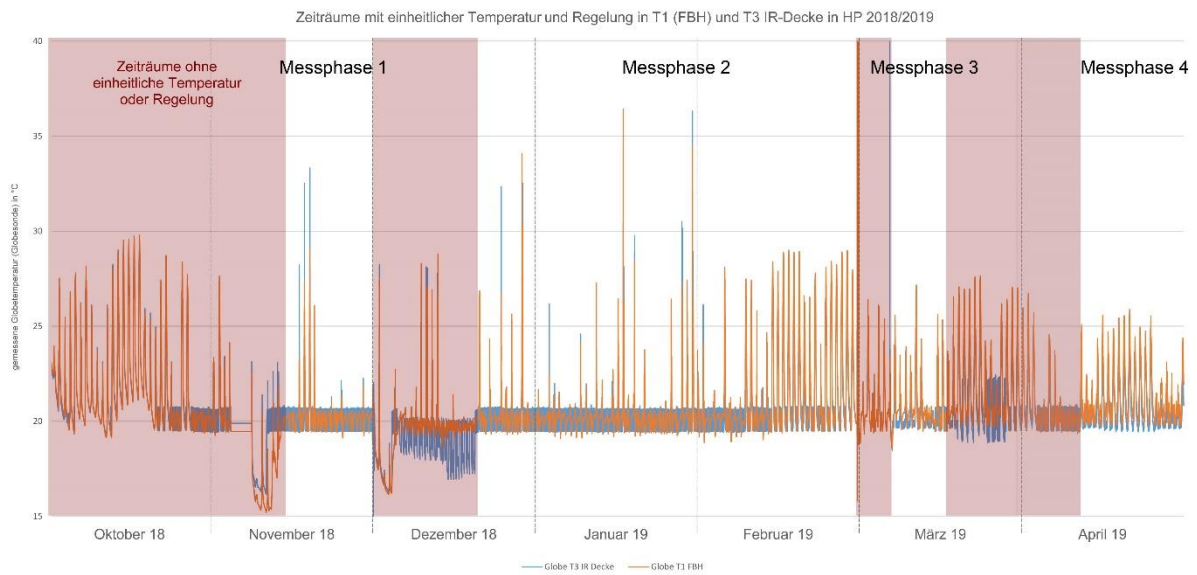


Abb. 73 Übersicht der Messphasen in Heizperiode 2018 / 2019

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.

Anhand einer detaillierten Untersuchung 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. 74), 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.

Vergleich Luft-/ Oberflächentemperaturen T1 (FBH) / T3 (IR-Decke)
08.03.19 - 14.03.19 (nachts)

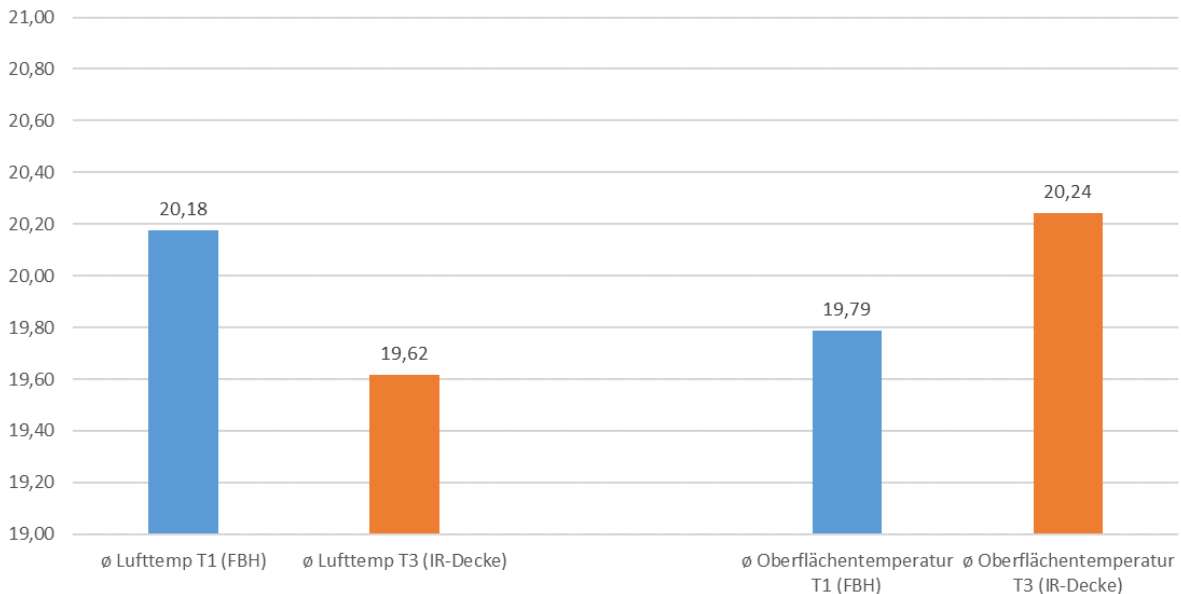


Abb. 74 Vergleich der nächtlichen Luft – und Oberflächentemperaturen zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) in Messphase 3 HP 2018/2019

Vergleicht man die gemessenen durchschnittlichen Oberflächentemperaturen im Detail (s. Abb. 75) kann man feststellen, dass die Deckentemperatur in Raum T3 (IR-Decke) wie erwartet höher ist als die Deckentemperatur 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 beinhaltet. Die tatsächliche Deckentemperatur „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).

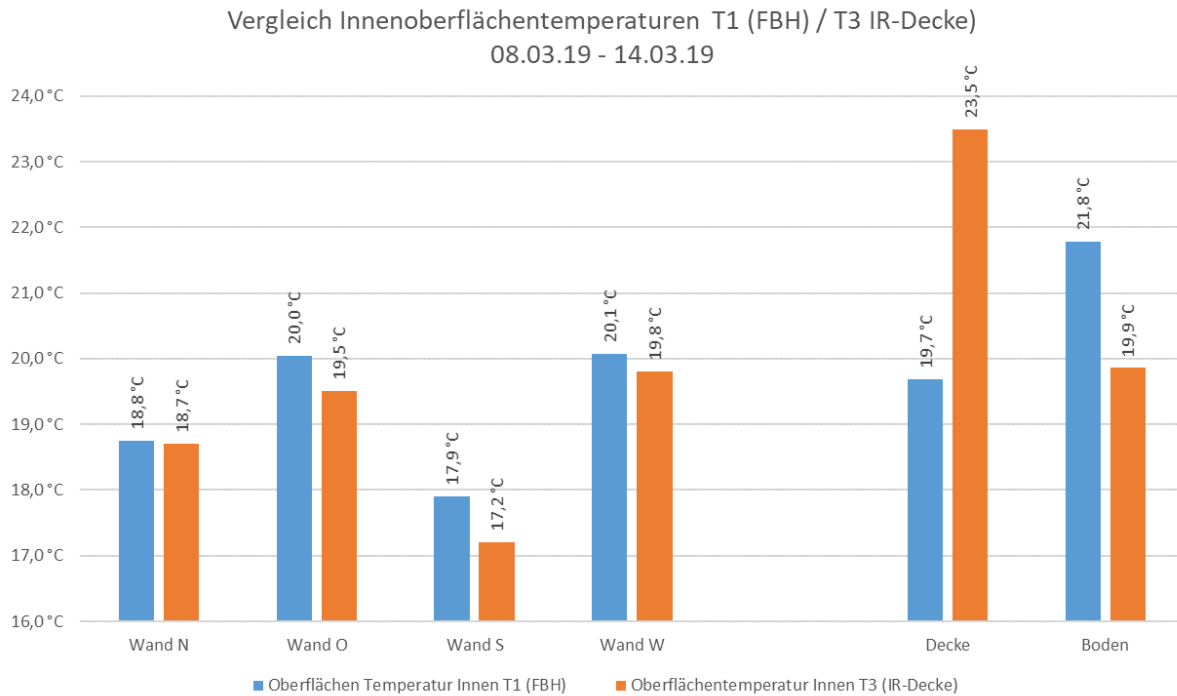


Abb. 75 Innenoberflächentemperaturen Raum T1 (WP/FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, Messphase 3, HP 2018/2019

Abb. 76 zeigt den Verlauf der operativen Temperaturen von Raum T1 (WP/FBH / blau) und Raum T3 (IR-Decke / grau) im Vergleich. Man erkennt deutlich, dass die operative Temperatur bei solarer Einstrahlung (immer 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).

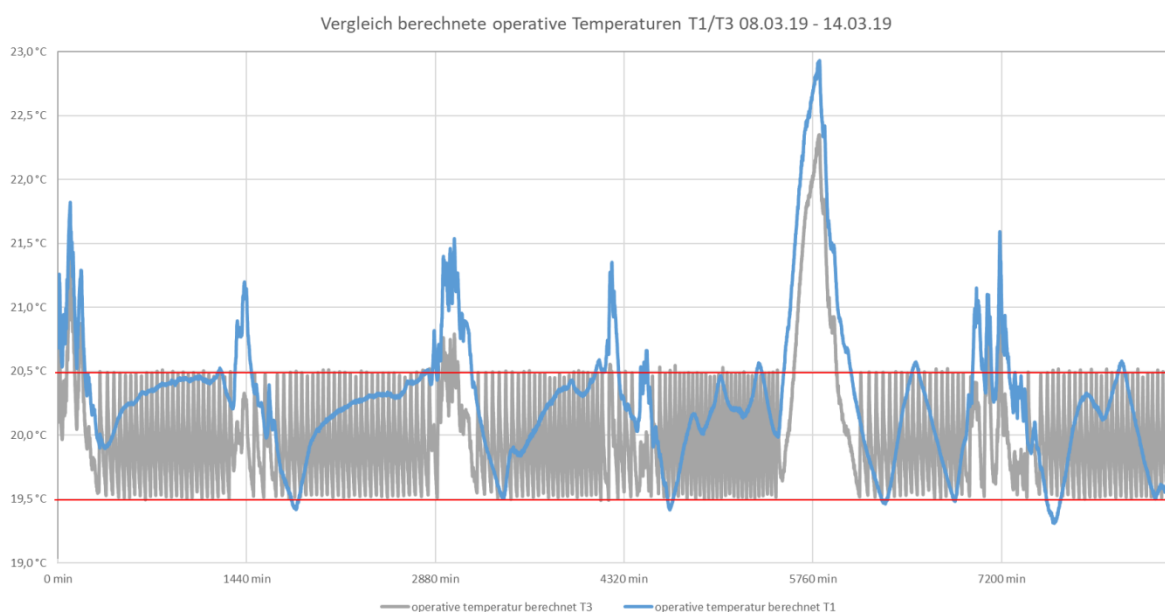


Abb. 76 Verlauf der berechneten operativen Temperaturen Raum T1 (WP/FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, Messphase 3, HP 2018/2019

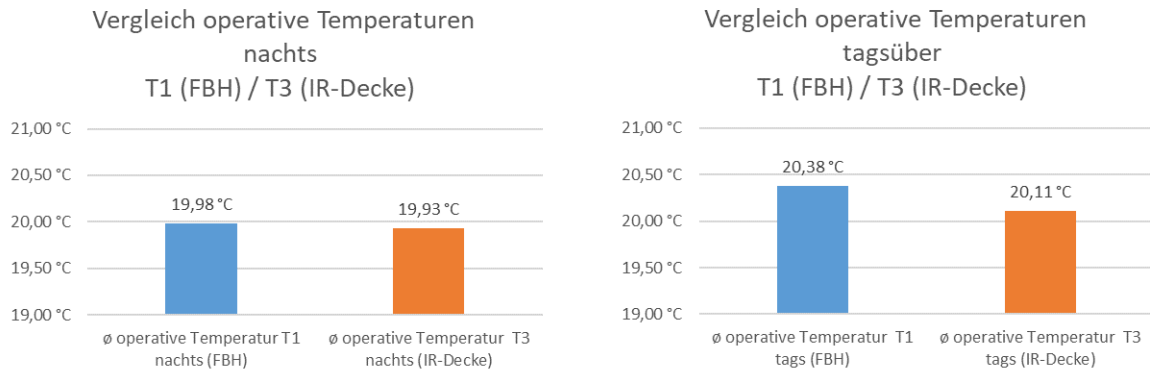


Abb. 77 Operative Temperaturen nachts, Messphase 3 HP 18/19

Abb. 78 Operative Temperaturen tagsüber, Messphase 3 HP 18/19

Dies zeigt auch der Vergleich der operativen Temperaturen in Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke). Während die Werte nachts fast identisch sind (s. Abb. 78), ist die operative Temperatur in Raum T1 (WP/FBH) tagsüber deutlich höher (s. Abb. 77). 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. 74 – Abb. 78) mit den Werten der gesamten Heizperiode 2018 / 2019 (s. Abb. 79 - Abb. 81) 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.

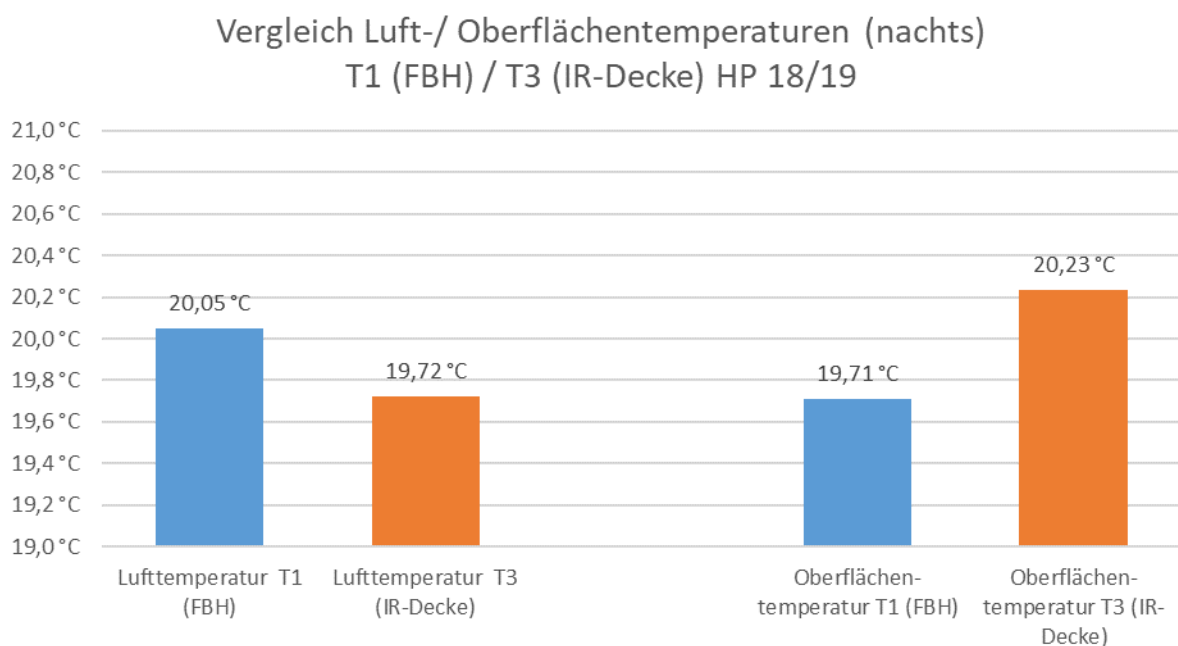


Abb. 79 Vergleich der nächtlichen Luft – und Oberflächentemperaturen zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) über die gesamte HP 2018/2019

Vergleich Innenoberflächentemperaturen T1 (FBH) / T3 (IR-Decke) HP 18/19

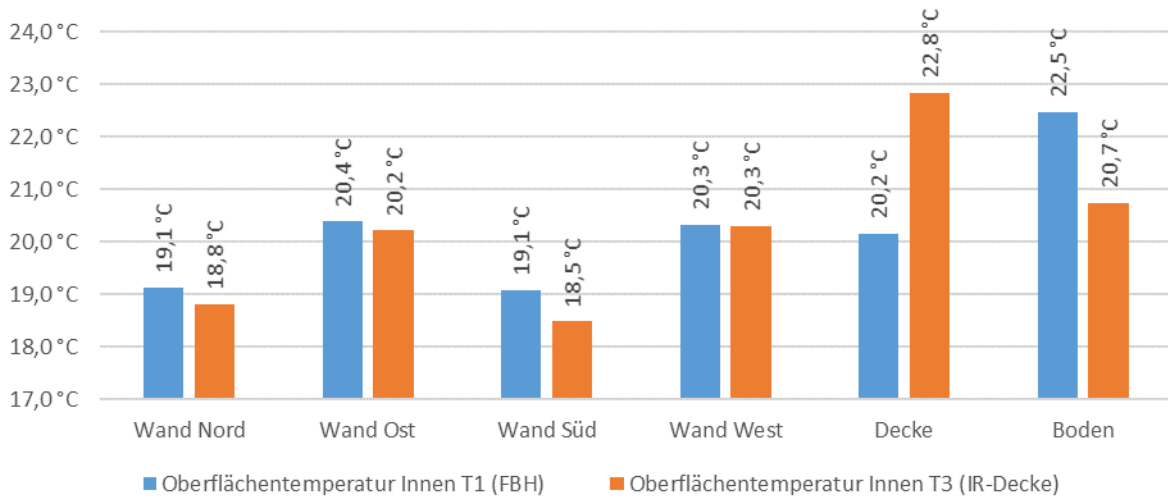


Abb. 80 Innenoberflächentemperaturen Raum T1 (FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, gesamte HP 2018/2019

Vergleich operative Temperaturen nachts / tags T1 (FBH) / T3 (IR-Decke) HP 18/19

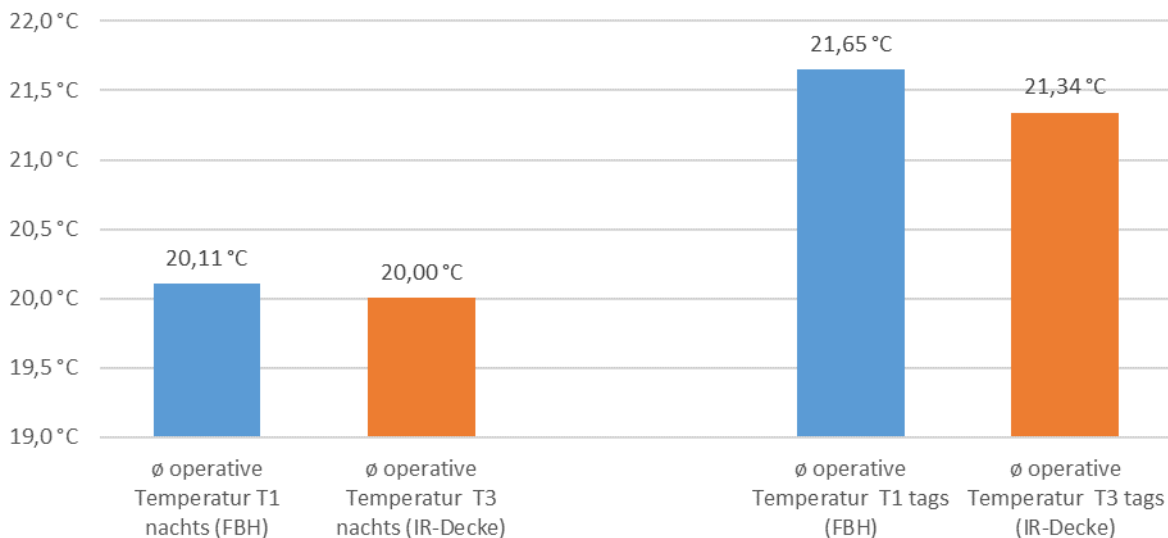


Abb. 81 Vergleich der operativen Temperaturen nachts und tagsüber, gesamte HP 2018 / 2019

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) war 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:²⁹

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

$Q_{V,mech}$	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.³⁰ Als n₅₀ 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	der Volumenstromkoeffizient
f_{ATD}	Faktor zur Berücksichtigung von Außenluftdurchlässen
f_e	vermehrte oder verminderte Infiltration durch mechanische Lüftungsanlagen
$t_{v,mech}$	tägliche Betriebsdauer der Lüftungsanlage

²⁹ [DIN 18599-2, S.61]

³⁰ [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: ³¹

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

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 3 (IR-Decke) nachfolgende Werte:

	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 9 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 10 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 11 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 12 Nächtliche Infiltrationswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

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 ca. 1,6 % der gesamten Differenz von 21,9 kWh.

³¹ [DIN 18599-2, S.48]

Für die nächtlichen Transmissionswärmeverluste in Messphase 3 ergeben sich für Raum T1 und Raum T3 nachfolgende Werte:

	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 13 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 14 Nächtliche Transmissionswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

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 ca. 76,1 % der gesamten Differenz von 21,9 kWh.

Für die Transmissions-, Lüftungs- und Infiltrationswärmeverluste am Tag ergeben sich für Raum T1 und Raum T3 in Messphase 3 nachfolgende Werte:

	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 15 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 16 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 17 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 18 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 19 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 20 Infiltrationswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19

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 ca. 15,4 % der gesamten Differenz von 21,9 kWh. Somit ergibt sich insgesamt folgende Aufstellung:

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

Damit entsprechen die berechneten Differenzen von 20,1 kWh ca. 93 % der gemessenen Gesamtdifferenz von 21,9 kWh. Die restlichen 7 % ergeben sich vermutlich aus der Mess- und Rechenungenauigkeit.

Hinweise zu den 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 Heizstrichs auf Höhe der Fußbodenheizungsrohre. Da hier keine Sensoren eingebaut waren, wurde die Estrichunterseitentemperatur in der obigen Berechnung mit Hilfe der gemessenen Vor- und Rücklaufemperatur der Fußbodenheizung näherungsweise bestimmt.
- Im IR-Heizungsraum stellt 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. 82). 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 deutlicher 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

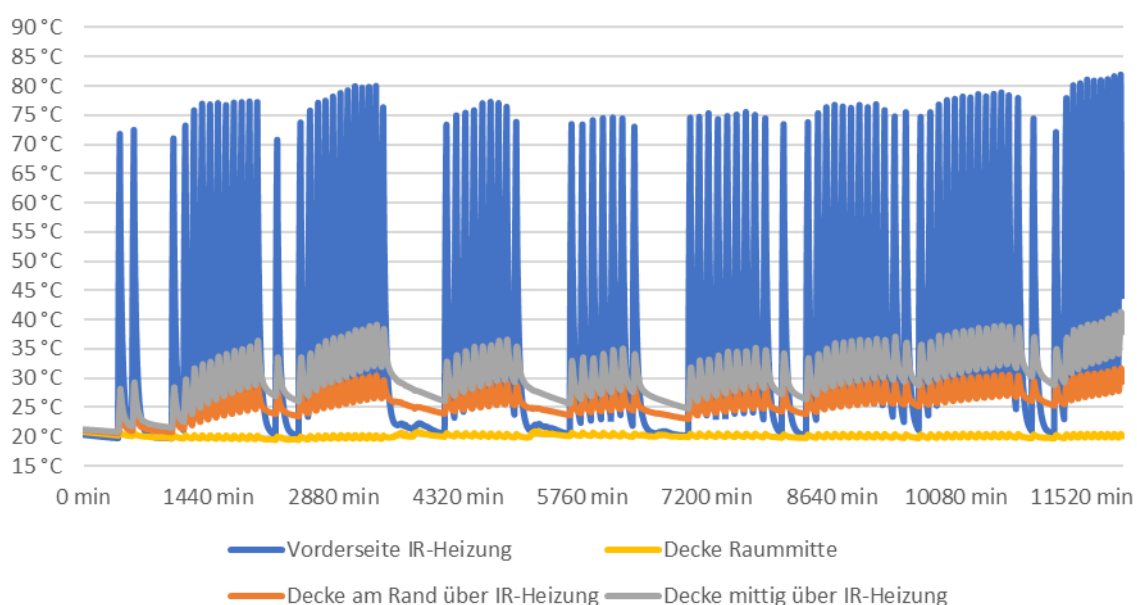


Abb. 82 Temperaturverlauf der Oberflächentemperaturen auf der Vorderseite der IR-Heizung und der darüber liegenden Deckenflächen.

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. 83) fällt auf, dass Raum T1 (WP/FBH) viel mehr Wärme durch den Boden verliert als Raum T3 (IR-Heizung). Dies ist auch nachvollziehbar, da die Fußbodenheizung im direkten thermischen Kontakt mit der sie umgebenen 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 Erdgeschoss (s. Abb. 84).

Wie sich diese Punkte auf die Effizienzunterschiede auswirken, wird in Kapitel 5 anhand eines Simulationsmodells untersucht, das durch die gemessenen Daten validiert werden konnte.

Aufteilung der Differenzen der Transmissionswärmeverluste von T1 (FBH) im Verhältniss zu T 3 (IR-Decke) 08.03.19 - 14.03.19

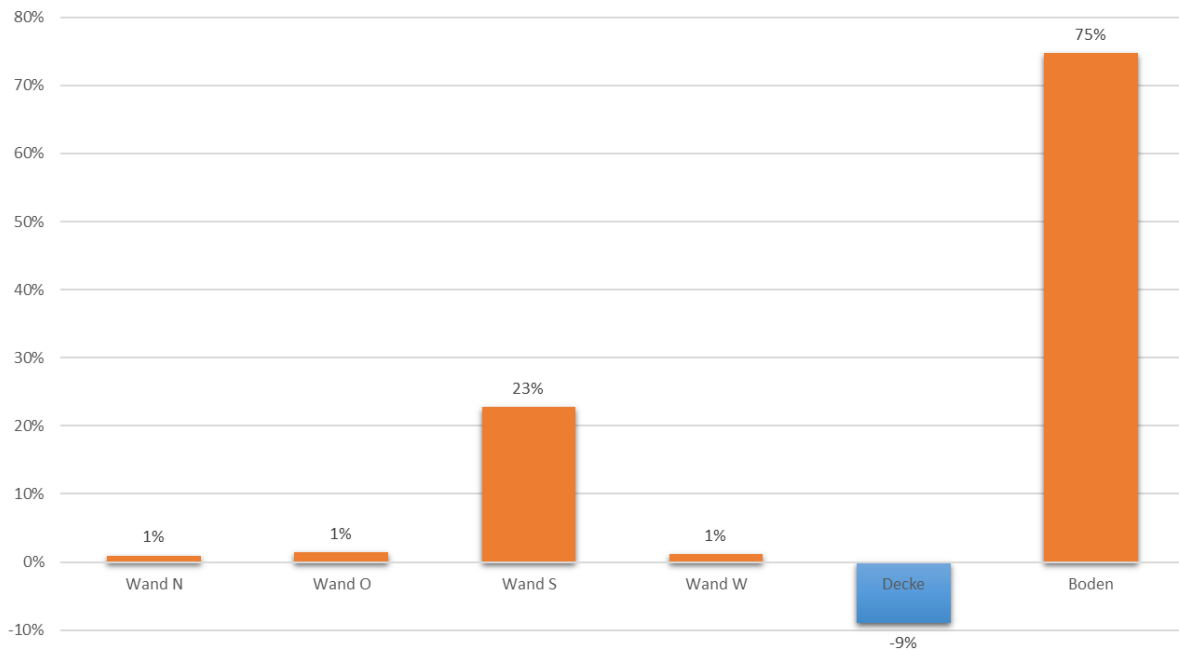


Abb. 83 Aufteilung der Differenzen der Transmissionswärmeverluste von Raum T1 (WP/FBH) im Verhältnis zu Raum T3 IR-Decke in Messphase 3 HP 18/19

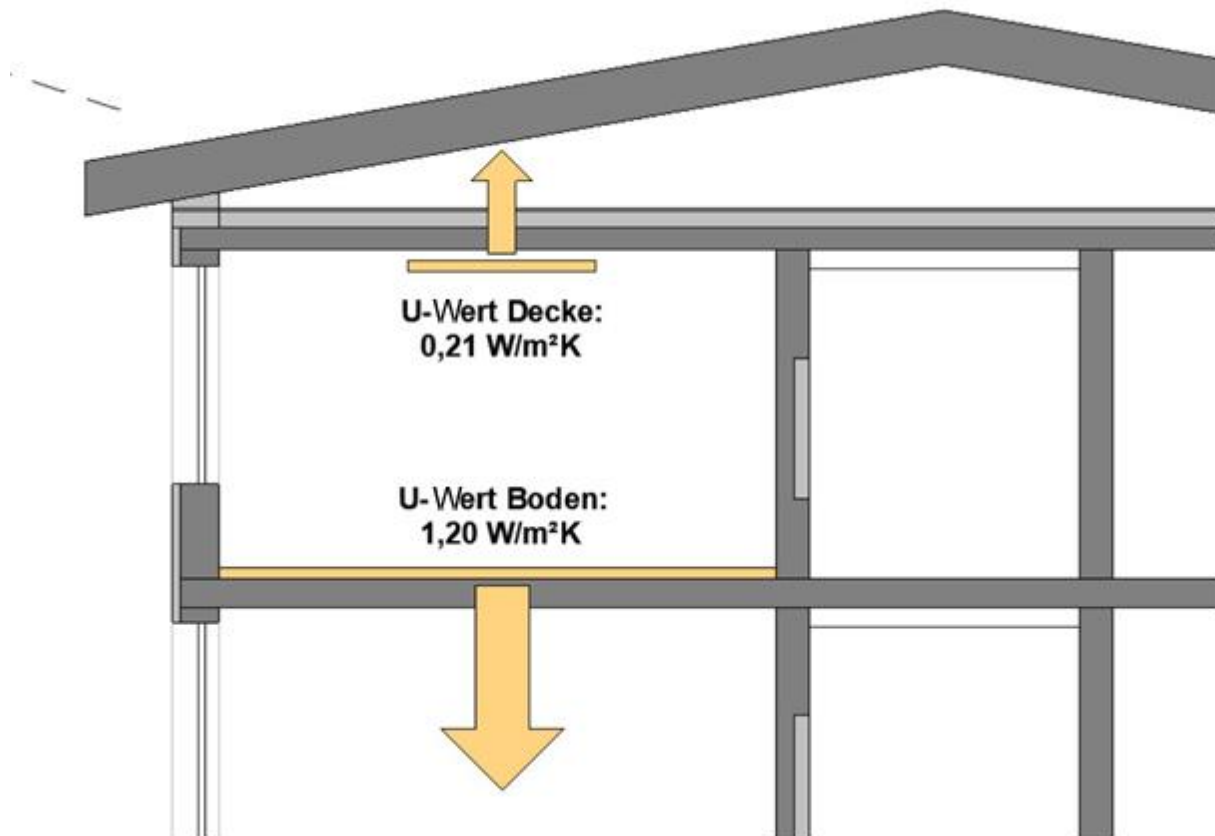


Abb. 84 Dämmsituation der IR-Heizung und der FBH in den Laborräumen in Ehoch4 im Vergleich.

4.4.2 Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizsystemen

Welche effektiven Rauminnenoberflächentemperaturen stellen sich im Betrieb bei IR-Heizsystemen ein?

Eine der Fragestellungen des Forschungsprojekts IR-Bau war, ob die Raumbooberflächen in einem mit IR-Heizungen beheizten Raum sich aufgrund der strahlungsdominierten Wärmeübertragung der IR-Heizung stärker erwärmen als bei einem konvektionsdominierten System.

In diesem Projekt lag der Schwerpunkt der Messungen auf dem Vergleich von Fußbodenheizungssystemen mit/ohne Wärmepumpe zu Infrarotheizungen. Wie im Kapitel 4.5.9 beschrieben, hat auch die Fußbodenheizung einen relativ hohen Strahlungsanteil bei ihrer Wärmeabgabe. Somit lassen die aktuellen Messergebnisse keine Aussage zum Vergleich der Oberflächentemperaturen von klassischen Konvektionsheizungen (Konvektoren) zu IR-Systemen zu.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass die mittlere Innenoberflächentemperatur, zusammen mit den Heizflächen der IR-Heizungen höher ist als im Fußbodenheizungsraum, ohne die Heizflächen der IR-Heizung sind die Oberflächentemperaturen jedoch geringer. Oberflächen wie Holz oder glatter Beton können eventuell 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 Wandoberflächentemperaturen wären dabei kälter, was zu einer weiteren Reduzierung der Transmissionswärmeverluste führen würde. Daher wäre zu prüfen, ob der Einsatz von stärker IR-reflektierenden Oberflächen die Effizienz eines IR-Heizungssystems verbessern könnte.

4.4.3 Verbesserung der Wärmedämmqualität der Bauteile durch IR-Heizung

Führt das Heizen mit einem IR-System dazu, dass die Bauteile trockener werden und damit die Wärmedämmqualität der Bauteile steigt?

Der Theorie, 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 und dies einen Austrocknungseffekt bewirkt. Wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben, sind die Temperaturen der Rauminnenoberflächen in einem mit IR-Heizung beheizten Raum jedoch im Vergleich zu einer Fußbodenheizung kälter. Somit schließt sich aus, dass die Bauteile eines mit IR-Heizung beheizten Raumes trockener sind und bessere Dämmqualitäten erreichen.

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.

4.4.4 Reduzierte Lufttemperatur bei einer IR-Heizung

Welche Reduktion der Lufttemperatur lässt sich durch erhöhte Oberflächentemperaturen bei Infrarot-Heizelementen realisieren, um dieselben operativen Temperaturen sicherzustellen?

Erfolgt die Messung der operativen Temperatur wie in Kapitel 4.3. (Abb. 49 / Abb. 50) 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 4.4.1, Abb. 74). Abb. 85 zeigt den zeitlichen Verlauf der Lufttemperaturen im gleichen Messzeitraum wie Abb. 74. 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.

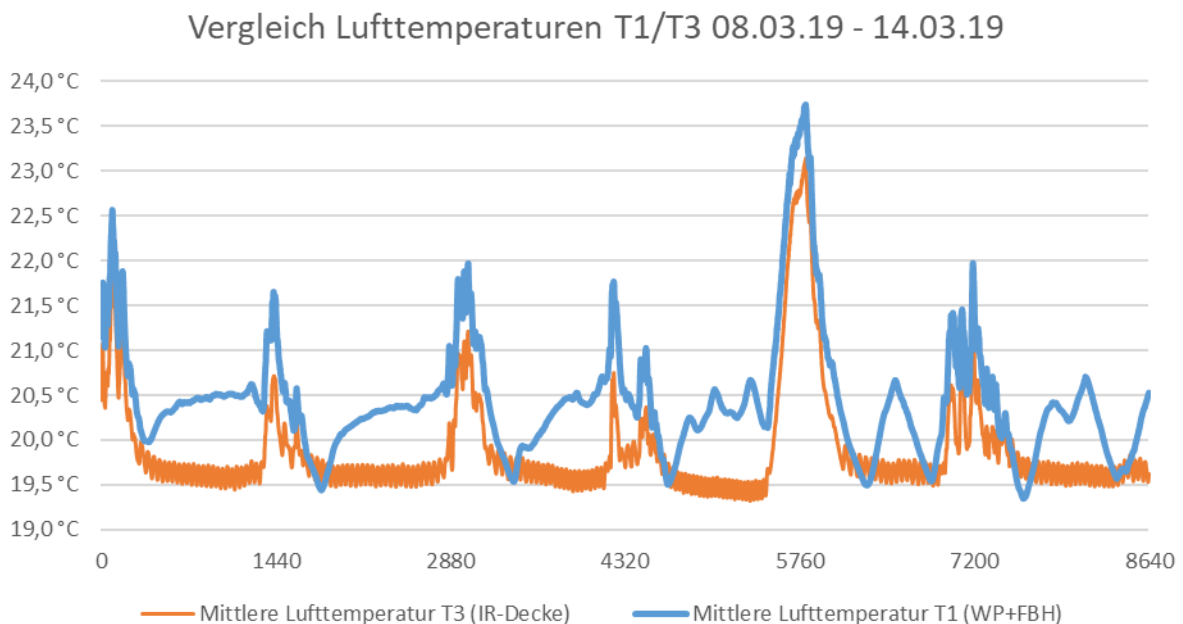


Abb. 85 Verlauf der Lufttemperaturen in Raum T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke) bei Regelung nach operativer Temperatur, MP 08.03.19 – 14.03.2019

4.4.5 Mögliche Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen

Welche Einsparungen im Energiebedarf lassen sich durch die optimal an das Nutzerverhalten anpassbare Regelung erzielen?

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. Dies ermöglicht einer IR-Heizung vergleichsweise sehr schnelle Reaktionszeiten auf Wärmebedarfsanforderungen, sowie auf interne und solare Wärmegewinne.

Die Abbildungen Abb. 86 - Abb. 88 zeigen den Verlauf der Luft- und Globetemperaturen während einer Aufheizphase von ca. 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 ca. 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 eingestellten 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.

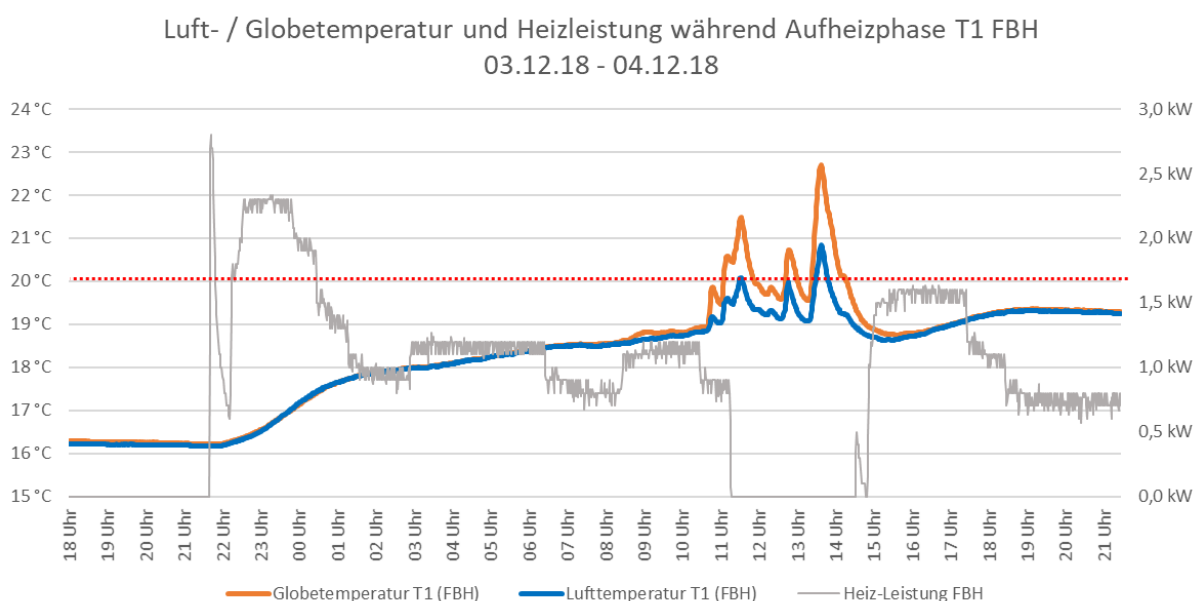


Abb. 86 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T1 (WP/FBH) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.2018

Luft- / Globetemperatur und Heizleistung während Aufheizphase T2 E-FBH
03.12.18 -04.12.18

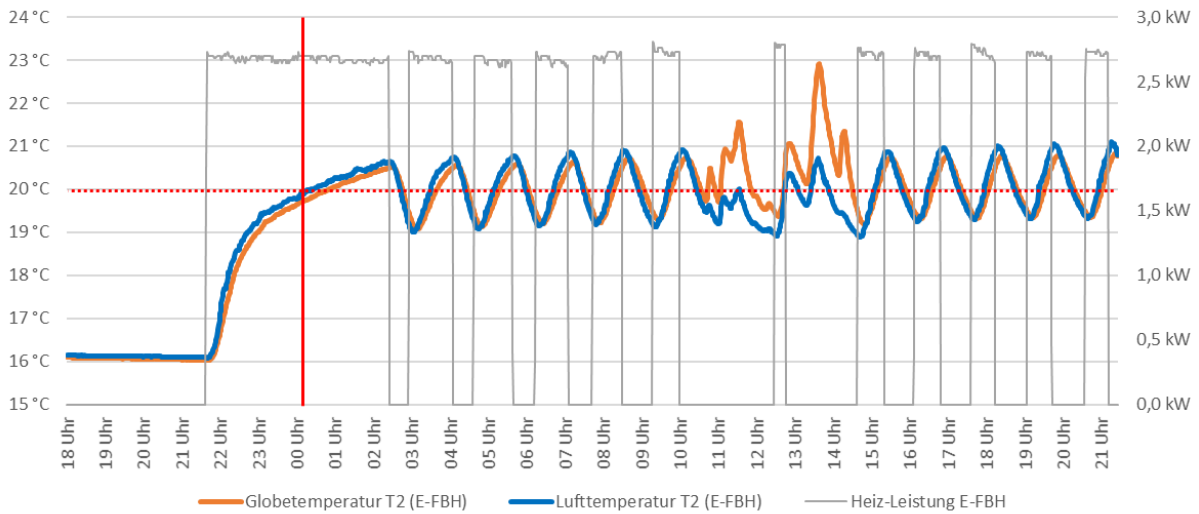


Abb. 87 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T2 (E-FBH) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.2018

Luft- / Globetemperatur und Heizleistung während Aufheizphase T3 IR Redwell
Decke 03.12.18 - 04.12.18

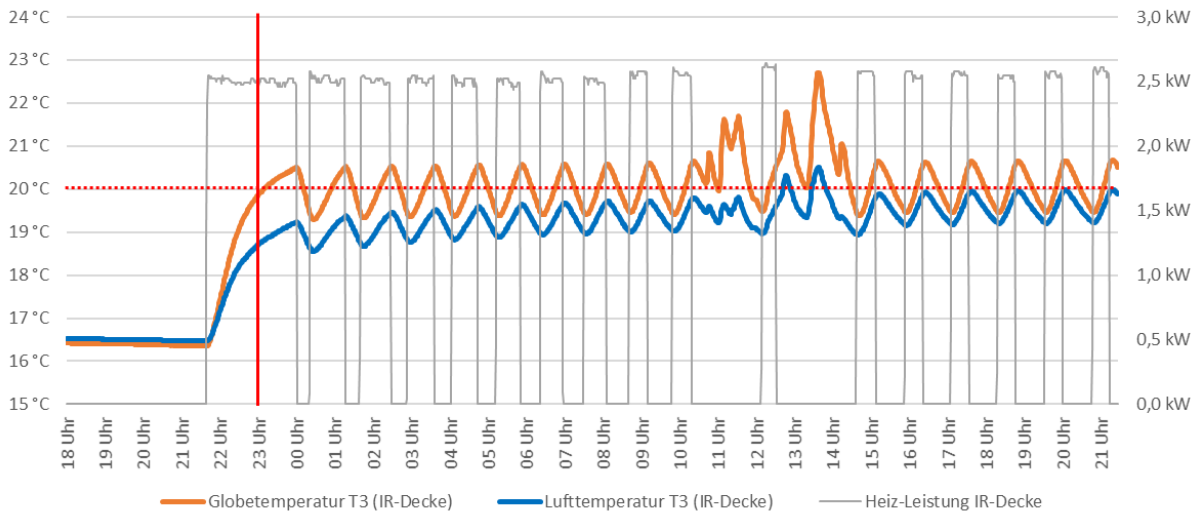


Abb. 88 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T3 (IR-Decke) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.18

Im Zeitraum vom 14.-19.12.18 wurden die Räume 1 - 3 im intermittierenden Betrieb beheizt. Als Regelvorgabe wurde gesetzt, dass das jeweilige Heizsystem den Raum zwischen 6 Uhr und 8 Uhr und zwischen 18 Uhr und 24 Uhr auf eine Solltemperatur von 20 °C erwärmen soll. Die Heizung muss entsprechend ihrer individuellen Aufheizgeschwindigkeit früher mit dem Heizen beginnen, so dass die Solltemperatur um 6 Uhr und um 18 Uhr erreicht wird. In den Zwischenzeiten durfte die Raumtemperatur bis auf 17 °C abfallen.

Abb. 89 zeigt den Verlauf der Globetemperaturen über den Messzeitraum. Die E-FBH und die IR-Heizung können flexibel auf das Anforderungsprofil reagieren und die gewünschten Solltemperaturen erreichen. Außerhalb der Heizzeiten ist ein deutlicher Temperaturabfall zu beobachten.

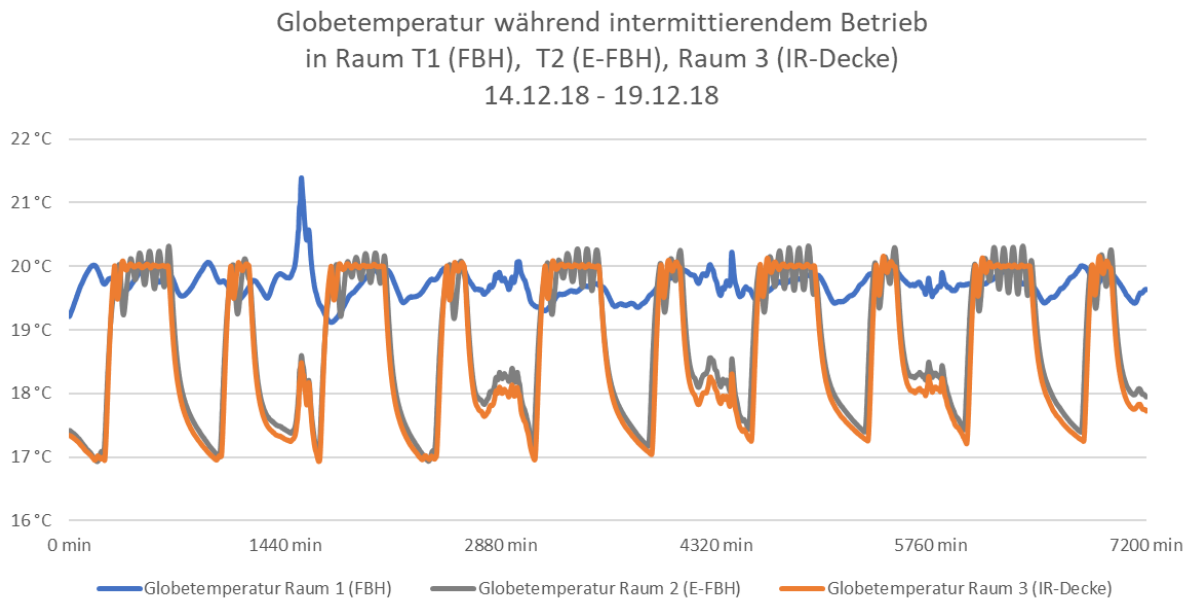


Abb. 89 Verlauf der Globetemperaturen in Raum T1 - T3 während intermittierendem Betrieb 14.-19.12.2018

Die Fußbodenheizung in Kombination mit der Wärmepumpe hat Schwierigkeiten, auf das Anforderungsprofil zu reagieren. Die un stetige Heizleistung der Wärmepumpe lässt eine genaue Dauer der nötigen Aufheizzeit bis zum Erreichen der Solltemperatur nicht zu. Ist die Fußbodenheizung warm, gibt sie aufgrund ihrer Trägheit auch dann noch Energie in den Raum ab, wenn dies nicht mehr gefordert wird. In der Folge führt die Fußbodenheizung dem Raum mehr Wärmeenergie zu als die anderen beiden Räume erhalten, erreicht dadurch aber trotzdem nur selten die Solltemperatur zum gewünschten Zeitpunkt. Abb. 90 zeigt, dass die durchschnittlichen Temperaturen im Fußbodenheizungsraum deutlich höher sind als in den zwei Räumen mit elektrischem Heizsystem. Dies hat für den Fußbodenheizungsraum höhere Transmissions-, Lüftungs- und Infiltrationswärmeverluste zur Folge.

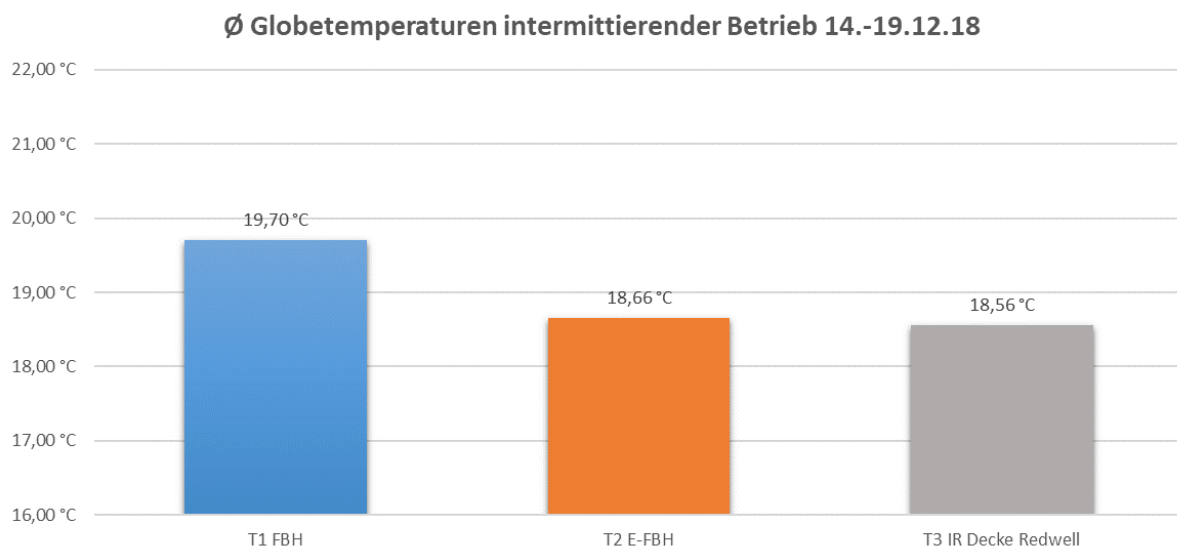


Abb. 90 Durchschnittliche Globetemperaturen während intermittierendem Betrieb vom 14.-19.12.2018

Bei den Wärmeverbräuchen zeigt sich, dass die Differenzen zwischen Fußbodenheizungsraum und IR-Heizungsraum weiter zunehmen. Liegt der Unterschied beim Wärmeverbrauch zwischen den beiden Räumen im Jahresmittel (s. Abb. 69) bei 16 %, steigt die Differenz bei intermittierendem Betrieb um weitere 15 % auf 29 % an (s. Abb. 92).

In gut gedämmten Gebäuden wird jedoch der Einfluss durch den Einsatz eines intermittierenden Betriebs abnehmen, da der Temperaturabfall in den Zeiten mit niedrigerer Temperatur geringer ausfallen wird. Diese Frage wurde im Kapitel 5.3.2 mit Hilfe von Simulationsmodellen weiter untersucht.

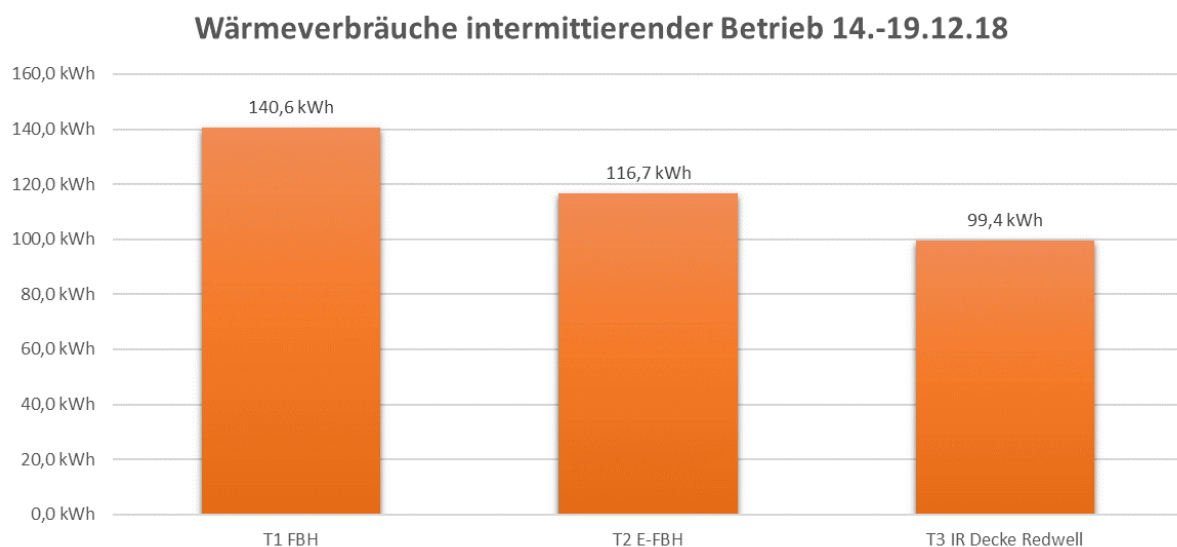
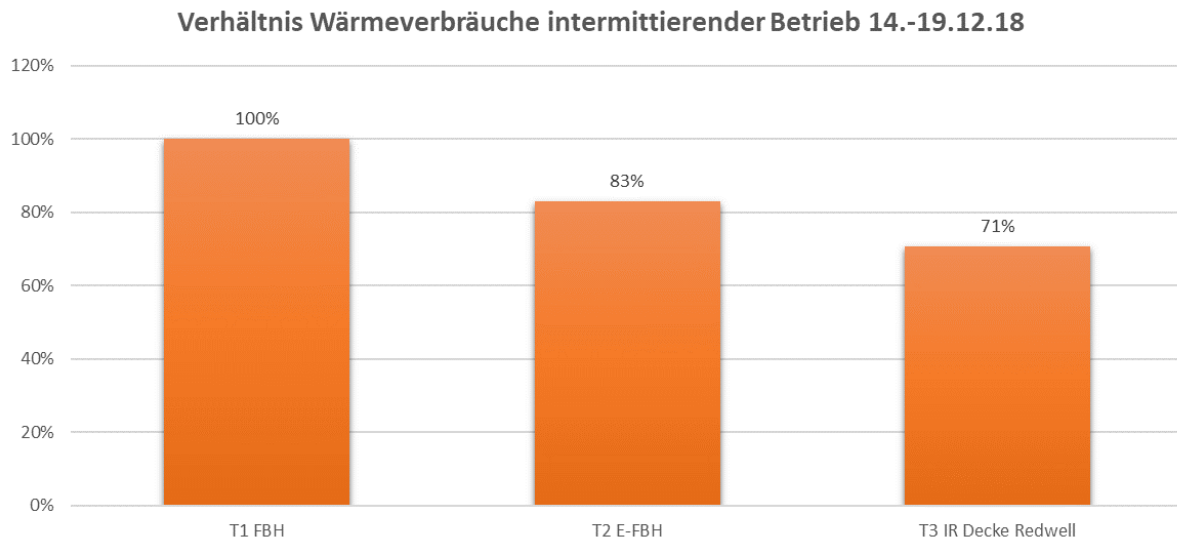


Abb. 91 Absolute Wärmeverbräuche während intermittierendem Betrieb 14-19.12.2018



**Abb. 92 Verhältnis der Wärmeverbräuche während intermittierendem Betrieb
19.12.2018**

14.-

4.4.6 Abstrahlwinkel einer plattenförmigen Infrarotheizung

Wie groß ist der Abstrahlwinkel, in dem eine plattenförmige Infrarotheizung Wärme in Form von Infrarotstrahlung abgibt?

Die FH Burgenland hatte den Abstrahlwinkel verschiedener plattenförmiger Infrarotheizungen bislang nur im Simulationsmodell untersucht (s. Abb. 99). Nachfolgend sollen die Simulationen durch experimentelle Messungen überprüft werden.

Abb. 94 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.

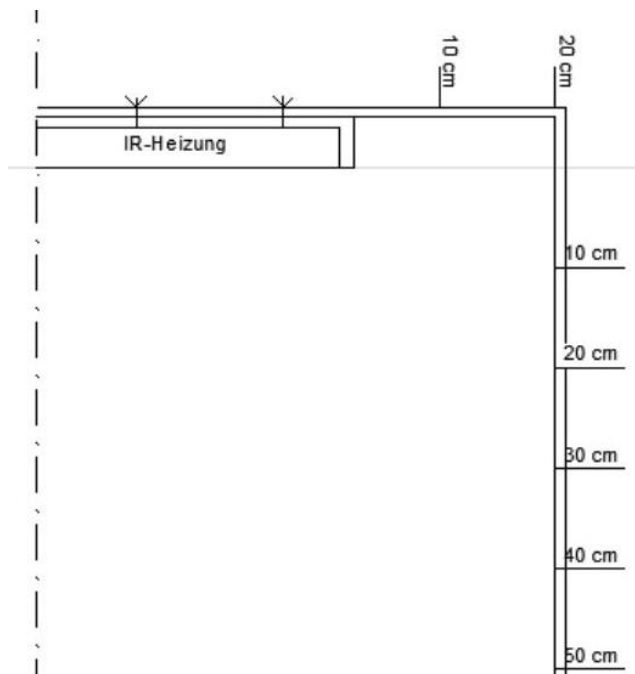


Abb. 94 Aufsicht Versuchsaufbau Abstrahlwinkel

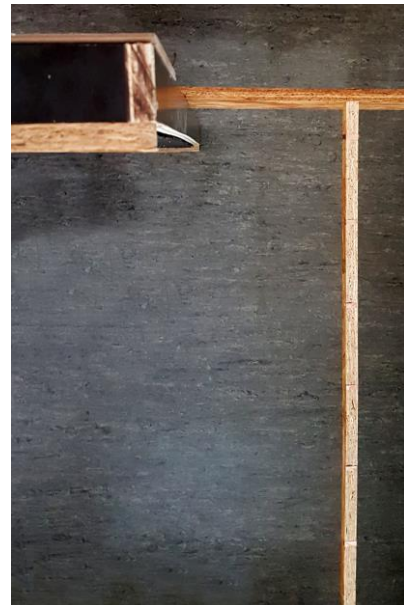


Abb. 93 Versuchsaufbau Abstrahlwinkel

Die IR-Heizung wurde nun für 60 Minuten angeschaltet. In Abb. 96 sieht man die Temperaturverteilung entlang des langen Holzschenkels. M1 und M2 in Abb. 95 markieren die Temperaturmaxima.

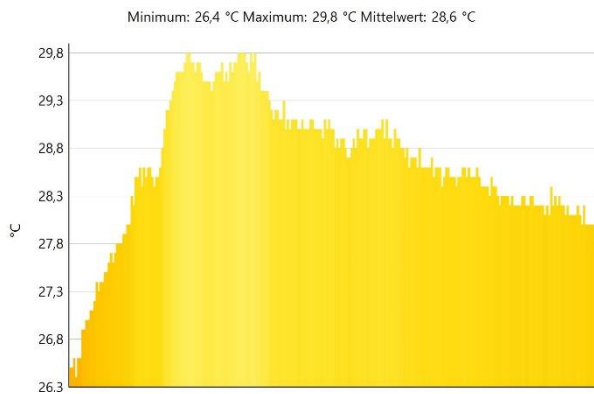


Abb. 96 Temperaturverteilung auf dem Holzschenkel

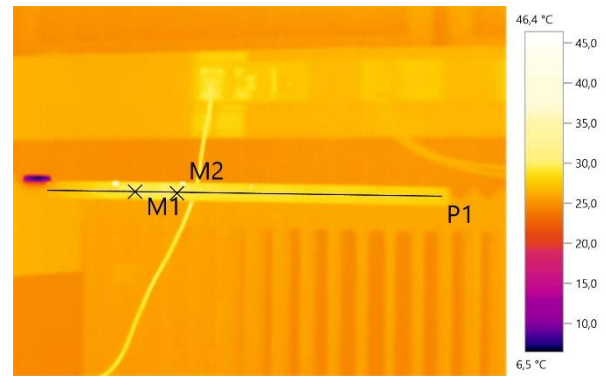


Abb. 95 Bild des Holzschenkes mit der IR-Kamera aufgenommen

Legt man nun die Temperaturverteilung entlang des langen Holzschenkels maßstäblich mit der Aufsicht auf den Versuchsaufbau zusammen (s. Abb. 97), kann man deutlich erkennen, dass sich der Holzschenkel im Bereich zwischen 13 cm und 20 cm am stärksten erwärmt hat. In diesem Bereich wurde also durch die IR-Heizung die meiste Energie übertragen, die Strahlungsintensität war am höchsten. Durch die gewählte geometrische Anordnung von IR-Heizung und Holzschenkel lässt sich so ein Abstrahlwinkel von ca. 120° ($180^\circ - 2 \cdot 31^\circ$) ableiten.

Oberhalb von ca. 20 cm nimmt die Temperatur aufgrund der zunehmenden Entfernung zur Strahlungsquelle ab. Unterhalb von 13 cm wird aufgrund des geringen Sichtwinkels zwischen IR-Heizung und Holzschenkel zunehmend weniger Energie übertragen.

Diese Messergebnisse decken sich mit den theoretischen Simulationsergebnissen der FH Burgenland (s. Abb. 98).

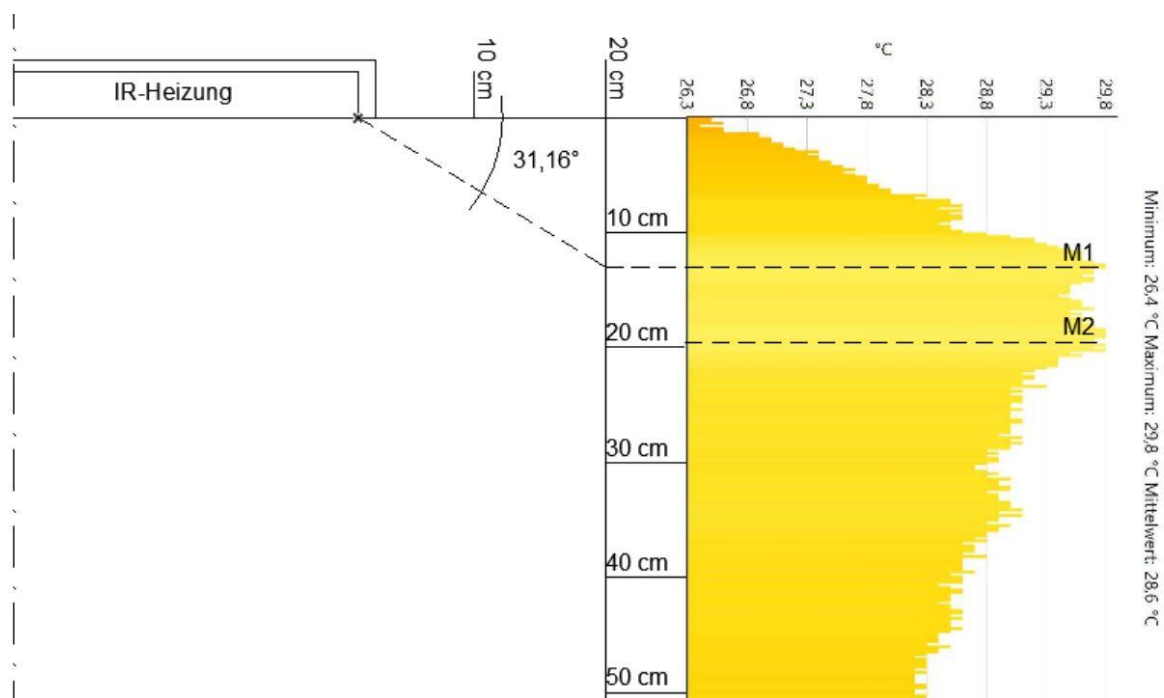


Abb. 97 Abstrahlwinkel IR-Heizung

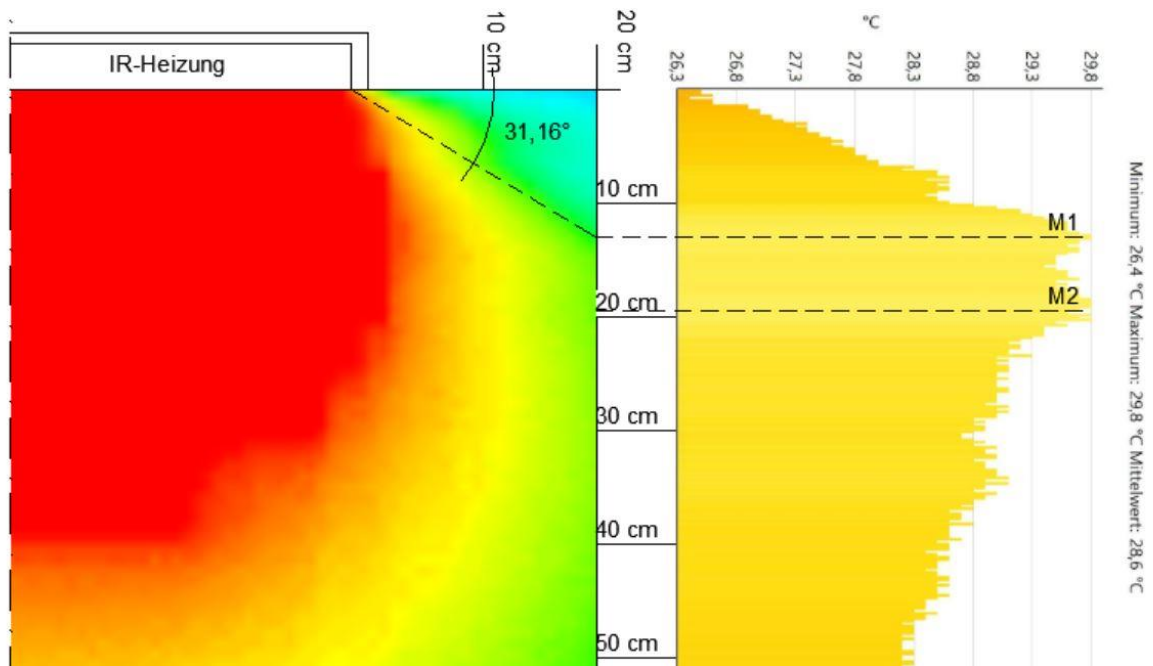


Abb. 98 Gemessener Abstrahlwinkel IR-Heizung im Vergleich zur Simulation der FH Burgenland (rot)³²

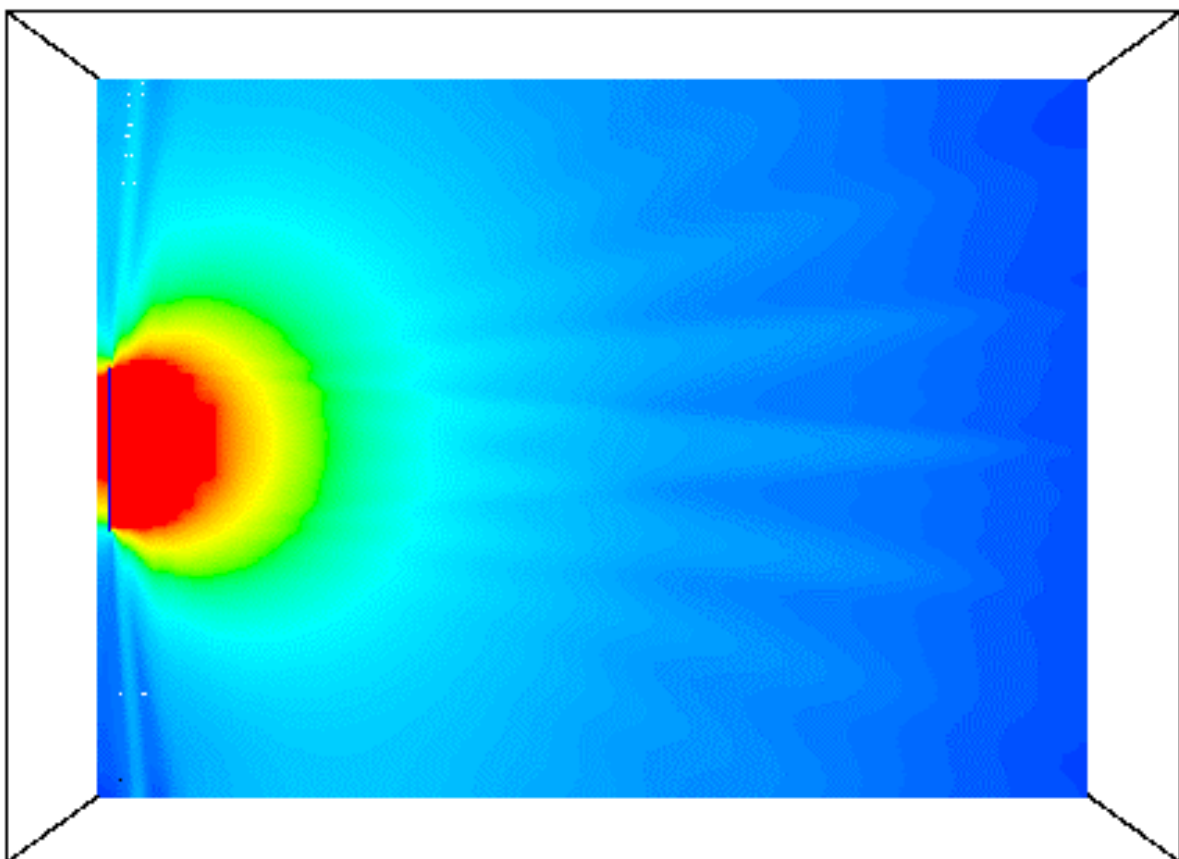


Abb. 99 Simulation der Verteilung der Strahlungstemperatur einer IR-Heizung, Seitenansicht³³

³² [Heschl, 2016]

³³ [Heschl, 2016]

4.4.7 Strahlungswirkungsgrad verschiedener IR-Heizungen

Wie hoch ist der Anteil an abgegebener Strahlungsleistung im Verhältnis zur gesamtbezogenen elektrischen Leistung bei einer Infrartheizung?

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene, am Markt erhältliche Infrartheizungen hinsichtlich ihres Strahlungswirkungsgrads untersucht. Alle Messungen wurden im gleichen Laborraum durchgeführt. Der Raum hat eine Fläche von ca. 25 m² und eine Raumhöhe von 3 m. 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 ca. 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. 100 Vertikale Aufhängung



Abb. 101 Horizontale Aufhängung an der Decke

Die Temperaturen der Vorderseite der IR-Heizungen wurden mit zwei kalibrierten Pt 100 Sensoren gemessen. 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.

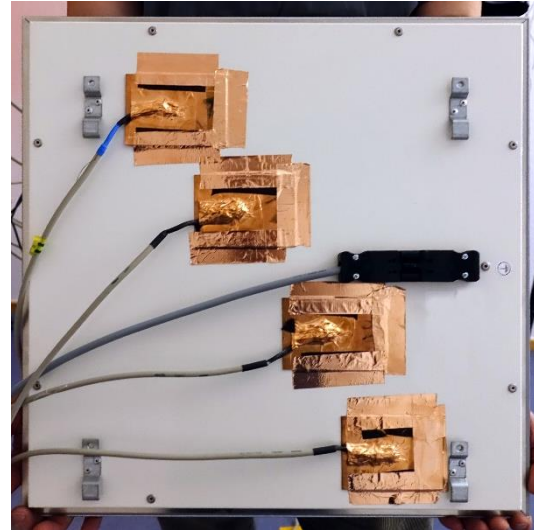
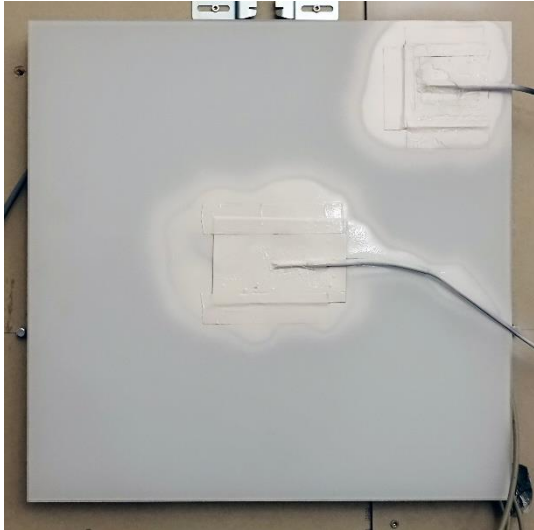


Abb. 102 Temperatursensoren Vorderseite **Abb. 103 Temperatursensoren Rückseite**

Um die durchschnittliche Oberflächentemperatur der gesamten Vorderseite zu ermitteln, wurden parallel zu den Kontaktmessungen, Serienbildaufnahmen mit einer Infrarotkamera (Testo 885-2) gemacht. 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 mit Hilfe 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 Hilfe der Formel zum Strahlungsaustausch (s. Kapitel 2.1) 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 im Rahmen dieses Forschungsprojekts zeigen, dass es je nach Anbieter und Modell deutliche Unterschiede im Strahlungswirkungsgrad der IR-Heizungen gibt (s. Abb. 104).

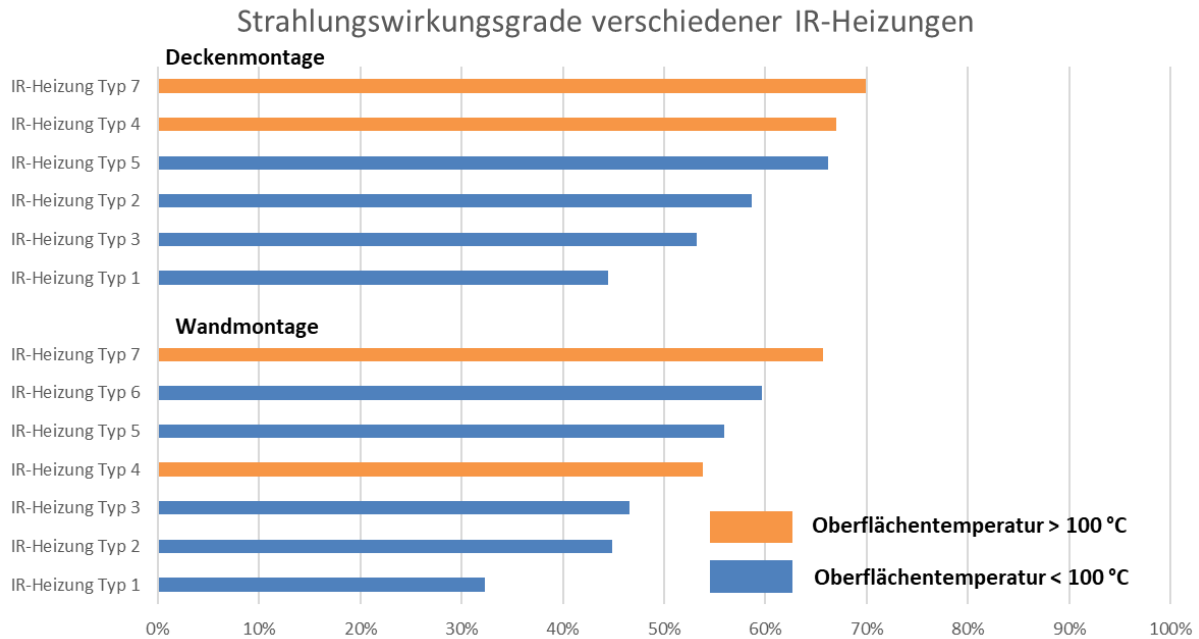


Abb. 104 Strahlungswirkungsgrade untersuchter IR-Heizungen

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 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. 104 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. 105 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 ca. 33 % und 44 %.
- Beim 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.

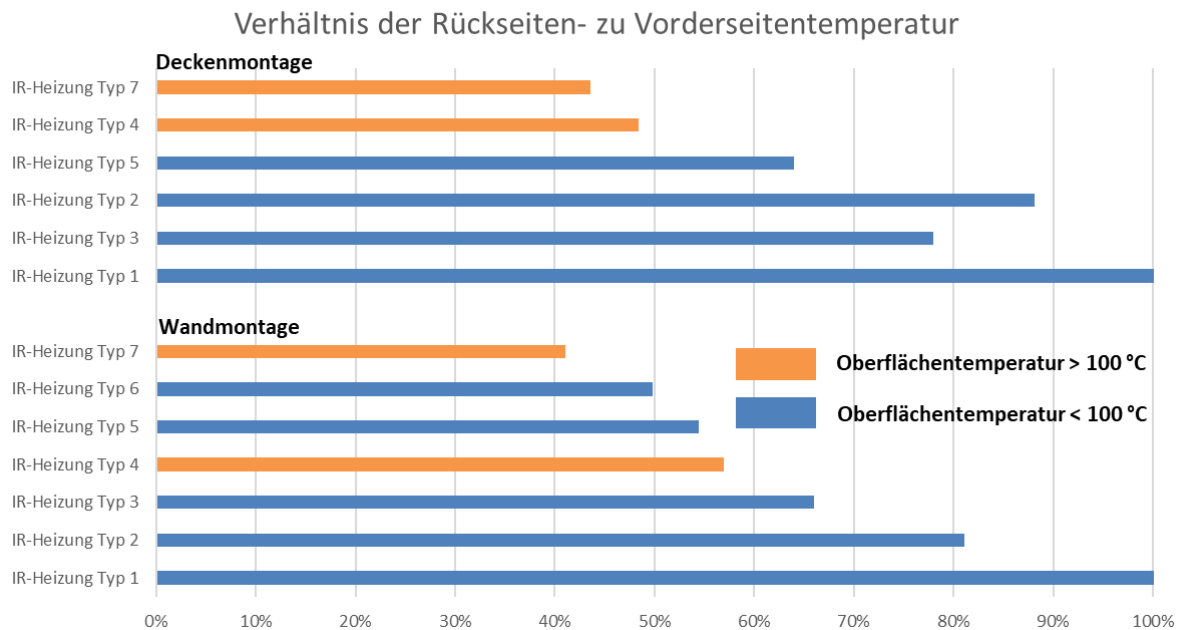


Abb. 105 Verhältnisse von Vorder- zu Rückseitentemperatur bei untersuchten IR-Heizungen

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

- Die Oberfläche der Vorderseitenabdeckung muss einen möglichst hohen Emissionsgrad haben.
- Die Vorderseitenabdeckung sollte möglichst sehr gut wärmeleitend (hoher Lamda-Wert / geringe Materialstärke) sein (evtl. aber nicht stromleitend).
- Der elektrische Widerstand sollte bestmöglich wärmeleitend mit der Wärme abgebenden Vorderseitenabdeckung verbunden sein.
- Die elektrischen Widerstände sollten möglichst homogen die gesamte Vorderseitenabdeckung erwärmen.
- Der rückseitige und seitliche Aufbau des elektrischen Widerstands sollte eine möglichst geringe Wärmeleitung aufweisen. Zu empfehlen ist daher die Einbindung einer Wärmedämmschicht.
- Die Oberfläche der Rückseitenabdeckung sollte einen möglichst niedrigen Emissionsgrad aufweisen.
- Die Befestigung des IR-Elements sollte thermisch entkoppelt werden, um eine Wärmeleitung in die Wand oder Decke zu verhindern.
- 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.

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 sollten keine schädlichen Materialien eingebaut sein.

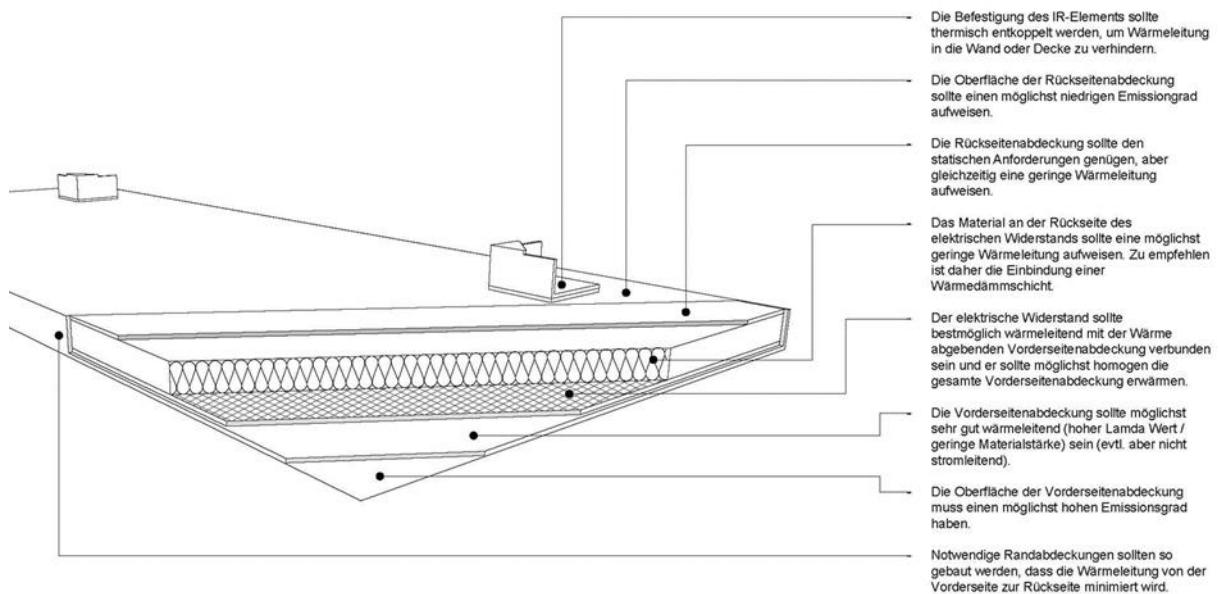


Abb. 106 Optimierter Aufbau einer IR-Heizung

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. 107 zeigt die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten verschiedener untersuchter IR-Heizungen.

Ohne separate Regelung bestimmt die spezifische, in der IR-Heizung installierte Leistungsdichte / m² die maximal erreichbare Betriebstemperatur. Messungen an den im Projekt untersuchten IR-Heizungen zeigen, dass bei einer Leistungsdichte von ca. 1000 W/m² maximale Betriebstemperaturen von ca. 100 -120 °C erreicht werden (s. Abb. 107). Bei einer Leistungsdichte von ca. 2400 W/m² erhöht sich die maximale Betriebstemperatur auf ca. 180 – 190 °C (s. Abb. 107, Typ 4 und Typ 7). Bei einer Dichte von ca. 400 W/m² wird eine maximale Oberflächentemperatur von ca. 60 °C erreicht (s. Abb. 107, Typ 6).

Um eine schnelle Aufheizzeit zu erreichen, ist eine hohe Leistungsdichte hilfreich, jedoch nicht alleine ausschlaggebend. Dies zeigt Heizungstyp 6. 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.

Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit von IR-Heizungen

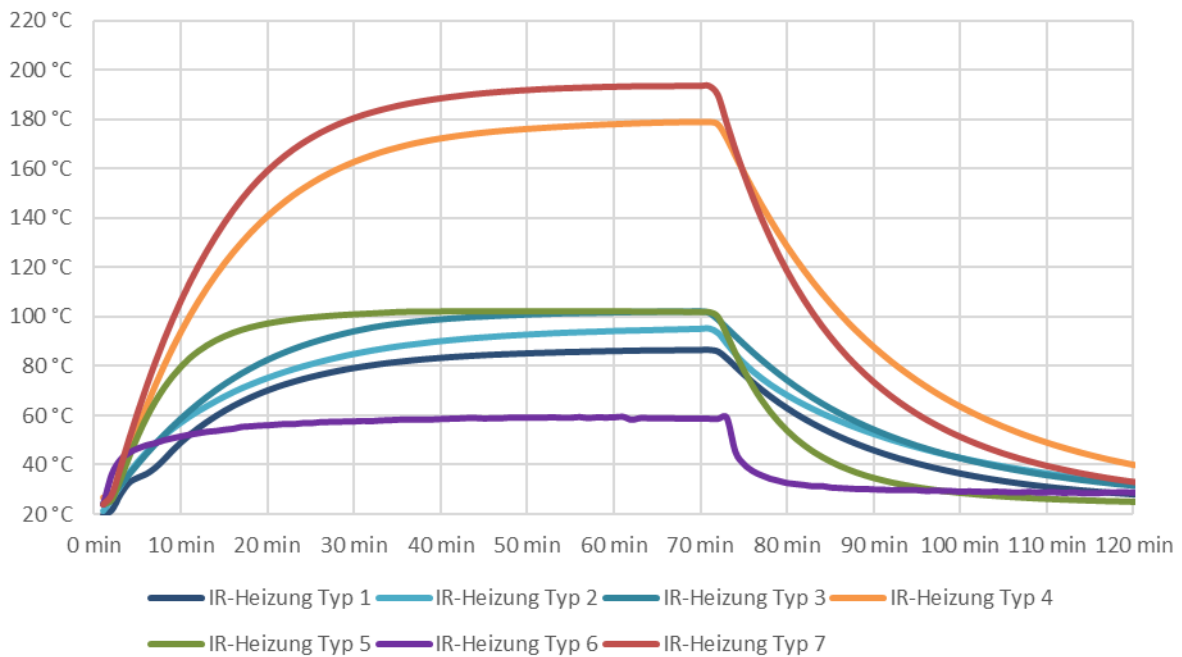


Abb. 107 Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit verschiedener IR-Heizungen bei Deckenaufhängung

Durch eine integrierte Temperaturmessung könnte eine IR-Heizung mit hoher Leistungsdichte und geringer Masse eine schnelle Aufheizzeit erreichen, wenn die Leistungszufuhr ab einer bestimmten Grenztemperatur gedrosselt wird und so eine für die Behaglichkeit im Raum zu hohe Temperatur verhindert wird.

4.4.8 Einfluss von Strahlungswirkungsgrad und Aufheizzeit auf die Effizienz

Welchen Einfluss haben Strahlungswirkungsgrad und Aufheizzeit einer IR-Heizung auf die Effizienz des IR-Heizungssystems?

Der Strahlungswirkungsgrad sagt aus, wie viel 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 Heizungselement. Eine höhere Deckenoberflächentemperatur führt zu größeren Wärmeleitungsverlusten an den angrenzenden Raum.
- 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 nicht zum Erreichen von thermischer Behaglichkeit im Raum genutzt werden.
- 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.

4.4.9 Fußbodenheizung: Strahlungs- oder Konvektionsheizung

Ist eine Fußbodenheizung eine Strahlungs- oder Konvektionsheizung?

Bei Infrartheizungen wird angenommen, dass diese einen überwiegenden Teil ihrer Wärme in Form von Wärmestrahlung an den Raum abgeben. Da in diesem Forschungsprojekt vor allem Fußbodenheizungen mit Infrartheizungen verglichen werden, soll geklärt werden, wie Fußbodenheizungen ihre Wärme an den Raum abgeben. Anhand der Laborraummessungen in Messphase 3 in Heizperiode 2018 / 2019 lässt sich diese Frage gut beantworten.

In der gesamten Messperiode wurden Raum T1 (WP/FBH) 91,4 kWh Wärme zugeführt. Aus der Untersuchung der Transmissionswärmeverluste (s. Tabelle 13, S. 113) ist bekannt, dass 20,3 kWh durch Transmission in den unterhalb liegenden Raum verloren gehen. Es bleiben 71,1 kWh übrig, die zur Beheizung des Raums genutzt werden können.

Die Strahlungsleistung des Fußbodens kann anhand der Fläche und der durchschnittlichen Oberflächentemperatur des Bodens sowie anhand der Oberflächentemperaturen der restlichen Raumflächen ermittelt und mit der Strahlungsaustauschformel berechnet werden. Die Fußbodenheizungsoberfläche hat im Mittel eine Temperatur von 21,7 °C, eine Fläche von 32,7 m² und einen Emissionsgrad von ca. 0,8 (Laminat). Die bestrahlte Fläche hat eine durchschnittliche Temperatur von 19,14 °C und einen Emissionsgrad von ca. 0,95. Die genannten Temperaturen bilden den Durchschnitt über die Laufzeit der Fußbodenheizung von etwa 109,4 Stunden.

Es ergibt sich eine mittlere Strahlungsleistung von 365,7 Watt. Über die 109,4 Stunden Laufzeit wurden so 40,0 kWh Wärme in Form von Strahlung in den Raum abgegeben. Bezogen auf die gesamt gelieferte Wärme liegt so der mittlere Strahlungsanteil bei der Wärmeübergabe der Fußbodenheizung an den Raum bei 43,7 %. Nimmt man als Bezugsgröße nur die Wärmemenge, die tatsächlich den Raum erwärmt hat, ergibt sich ein mittlerer Strahlungsanteil von (40,0 kWh / 71,1 kWh) 56,3 %.

Der große Unterschied zwischen einer Fußbodenheizung und einer IR-Heizung liegt in der größeren Trägheit der Fußbodenheizung und der besseren thermischen Entkopplung der IR-Heizung von der Baukonstruktion.

4.5 Fazit Labormessungen

1. Welche effektiven Rauminnenoberflächentemperaturen stellen sich im Betrieb bei IR-Heizsystemen ein?

Die These, dass die Rauminnenoberflächentemperaturen in einem mit IR-Heizung beheizten Raum höher sind als in einem mit Fußbodenheizung beheizten Raum, konnte nicht bestätigt werden. Zwar ist die mittlere Oberflächentemperatur, zusammen mit den Heizflächen der IR-Heizungen höher als im Fußbodenheizungsraum, ohne die Heizflächen der IR-Heizung sind die Oberflächentemperaturen jedoch 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.

Oberflächen wie Holz oder glatter Beton können eventuell 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 Wandoberflächentemperaturen wären dabei kälter, was zu einer weiteren Reduzierung der Transmissionswärmeverluste führen würde. Daher wäre zu prüfen, ob der Einsatz von stärker IR-reflektierenden Oberflächen die Effizienz eines IR-Heizungssystems verbessern könnte. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

2. Welche Reduktion der Lufttemperatur lässt sich durch erhöhte Oberflächentemperaturen bei Infrarot-Heizelementen realisieren, um dieselben operativen Temperaturen sicherzustellen?

Die These, 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.

3. Welche Einsparungen im Energiebedarf lassen sich durch die optimal an das Nutzerverhalten anpassbare Regelung bei IR-Heizungen erzielen?

Bei Laborraummessungen mit eingestelltem intermittierendem Betrieb zeigte sich eine Zunahme der Verbrauchsdifferenzen zwischen Fußbodenheizungsraum und Infrarotheizungsraum von 15 %. Als Regler wurde hier jedoch eine „intelligente“ Raumregelung verwendet, die selbstständig die nötige Aufheizzeit zum Erreichen einer Solltemperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt hat. Für die elektrische Fußbodenheizung und die IR-Heizung funktionierte diese Regelung sehr gut. Da die Wärmepumpe aufgrund ihres von der Heizkurve abhängigen modulierenden Betriebs keine konstante Leistung geliefert hat, konnte auch die Regelung keine genaue Aufheizzeit ermitteln. Dies führte dazu, dass der Fußbodenheizung auch außerhalb der vorgesehenen Heizzeiten Wärme zugeführt wurde.

4. Welche Bedeutung hat der Strahlungswirkungsgrad einer IR-Heizung für die Effizienz des IR-Heizsystems und wie hoch ist der Strahlungswirkungsgrad bei am Markt verfügbaren IR-Modulen?

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 gezeigt. Hier kann der Strahlungswirkungsgrad je nach Hersteller zwischen 40 % und 70 % variieren. Es fehlt bislang eine Normierung, die allgemein festschreibt, wie der Strahlungswirkungsgrad und damit die Güte einer IR-Heizung bestimmt wird.

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 jedoch noch weiterer Forschungsbedarf.

5. Wie groß ist die effektive Differenz des Strombedarfs im Betrieb für die Wärmeversorgung von Räumen im Realbetrieb inklusive Hilfsenergie zwischen A: Infrarotheizsystem, B: Integriertem Direktstrom-Heizelement (Niedertemperatur) und C: Luftwärmepumpe und Fußbodenheizung?

Bei den Vergleichsmessungen in den Laborräumen über mehrere Monate in der Heizperiode 2018/2019 und einer Regelung nach operativer Raumtemperatur hat die deckenaufgehängte Infrarotheizung ca. 2,9 mal mehr Strom und die elektrische Fußbodenheizung (Trockenbau) ca. 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). Durch Optimierung des IR-Systems im Hinblick auf konstruktive Aspekte und einer optimierten Regelung ist eine weitere Verringerung der Verbrauchsdifferenzen möglich.

5 Berechnungen / Simulationen

Im Forschungsstrang „Berechnungen / Simulationen“ wurden folgende Fragestellungen untersucht:

Forschungsfrage	Pilotprojekt K76	Laborräume Ehoch4	Simula- tionen
1. Rauminnenoberflächentemperaturen bei IR-Heizungen	x	x	
2. Verhalten der Lufttemperatur bei IR-Heizungen	x	x	
3. Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen		x	x
4. Übergabeverluste bei IR-Heizungen			x
5. Strahlungswirkungsgrad von IR-Heizungen		x	
6. Stromverbrauchsdifferenzen IR/WP im realen Betrieb		x	x
7. Verbrauchswerte IR-Heizung im realen Wohngebäude	x		
8. Bewertung der Behaglichkeit im realen Wohngebäude	x		
9. Gesamtökologische Bewertung über 50 Jahre (LCC)	x	x	x
10. Gesamtökonomische Bewertung über 50 Jahre (LCA)	x	x	x
11. Vorteilhafte Randbedingungen für IR-Heizsysteme	x		x
12. Optimierung des IR-Heizsystems durch PV und Speicher	x		x
13. Können IR-Systeme eine Alternative zu WP-Systemen sein?	x		x

Tabelle 22 Fragestellungen Forschungsstrang Berechnungen / Simulationen

5.1 Simulation der Laborräume

Die Laborräume, in denen die Untersuchungen zum Effizienzvergleich WP- / IR-Heizung und weitere Messungen durchgeführt wurden, haben wie bereits beschrieben einige Besonderheiten, die eine direkte Übertragung der gemessenen Effizienzunterschiede auf übliche Gebäude erschweren.

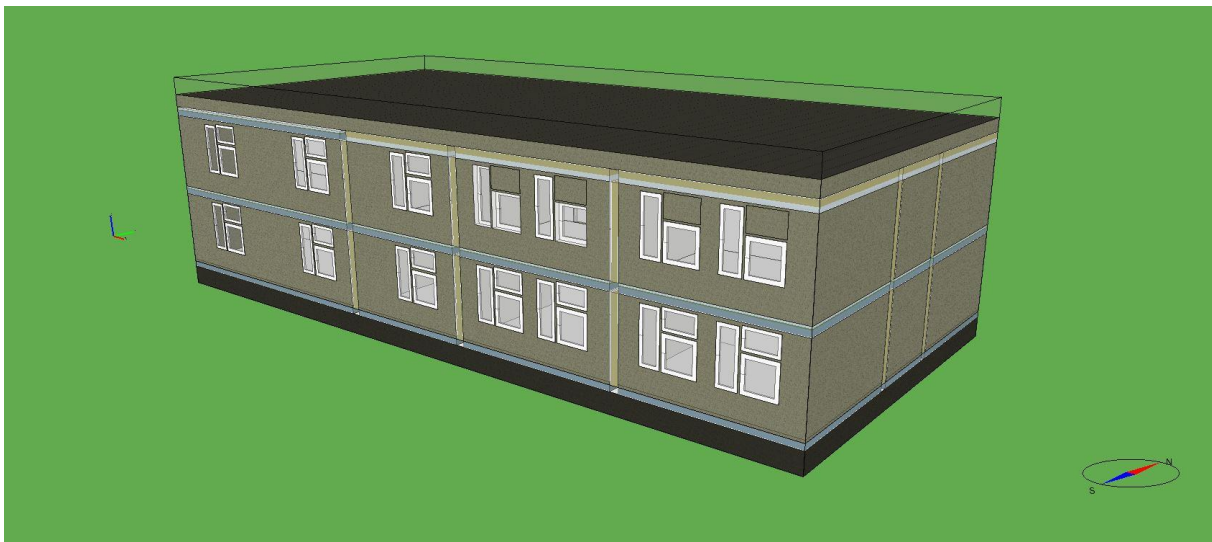


Abb. 108 3D Darstellung der Laborräume in Ehoch4 aus IDA ICE

Um die gemessenen Werte auf Standardgebäude zu übertragen, wurde im dynamischen Gebäudesimulationsprogramm IDA ICE ein digitales Simulationsmodell der Laborräume erstellt. In diesem Modell sind alle technischen und bauphysikalischen Rahmenbedingungen der Laborräume berücksichtigt:

- Die thermische Qualität aller, die Laborräume umgebenden Bauteile.
- Die 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.

5.2 Vergleich Messungen / Simulationen, Validierung der Simulationen

Um zu überprüfen, ob das Simulationsmodell 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. Abb. 109 – Abb. 114 zeigen die gemessenen Außenlufttemperaturen und die gemessenen operativen Temperaturen in Laborraum T3 in den drei Validierungsphasen.

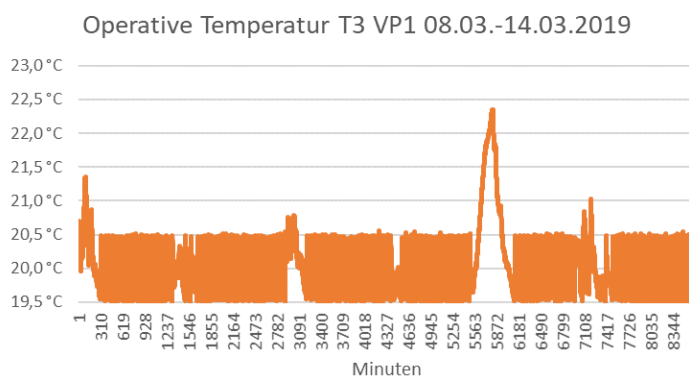
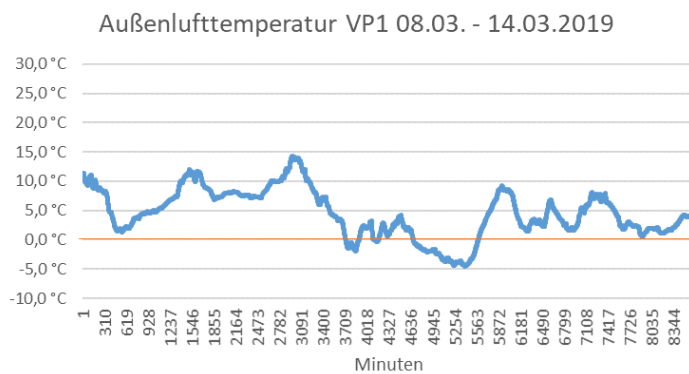


Abb. 109 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 1 (6 Tage/im Mittel 4,5°C)

Abb. 110 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 1

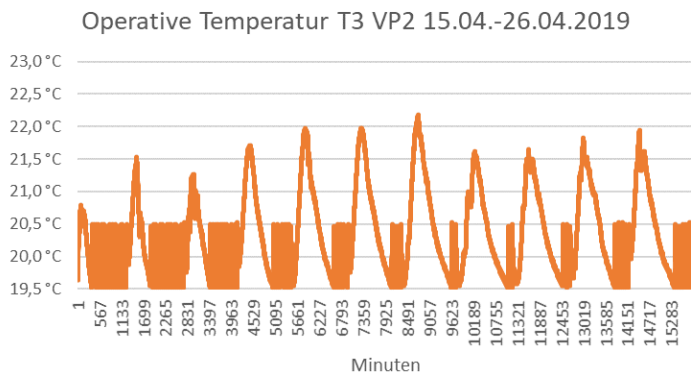
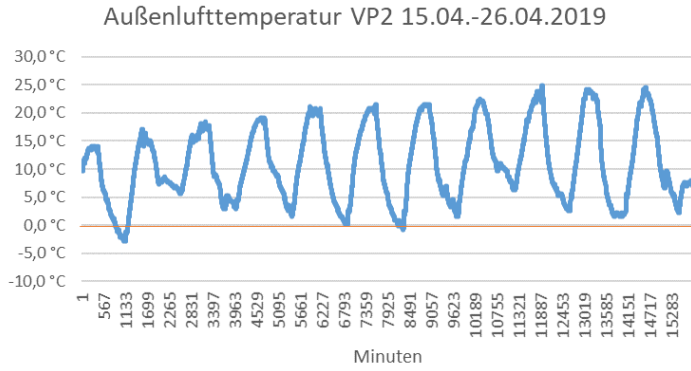


Abb. 111 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 2 (11 Tage/im Mittel 11,0°C)
Abb. 112 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 2

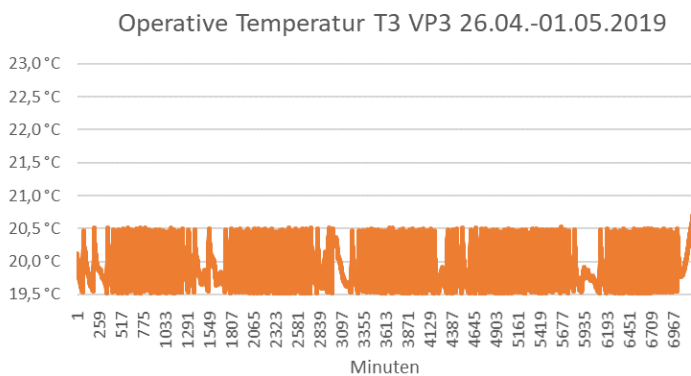
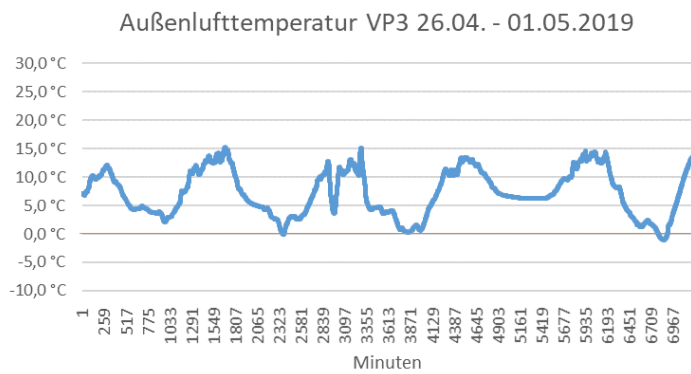


Abb. 113 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 3 (5 Tage / im Mittel 7,2 °C)
Abb. 114 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 3

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse mit den gemessenen Daten der drei Validierungsphasen verglichen.

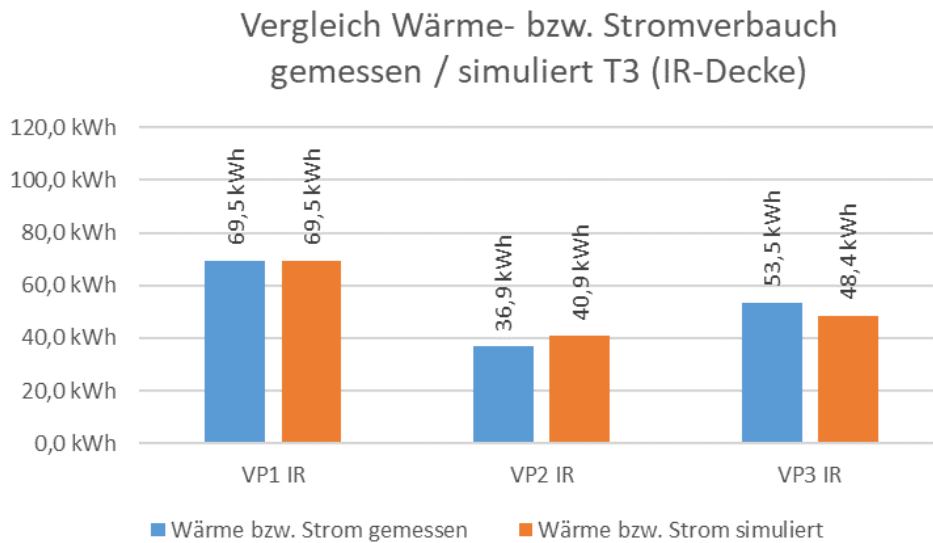


Abb. 115 Gemessene absolute Wärme- bzw. Stromverbräuche Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den simulierten Werten

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

Wie sich in Abb. 115 zeigt, weisen die simulierten Werten zu den gemessenen Werten Abweichungen von maximal +/-10 % auf.

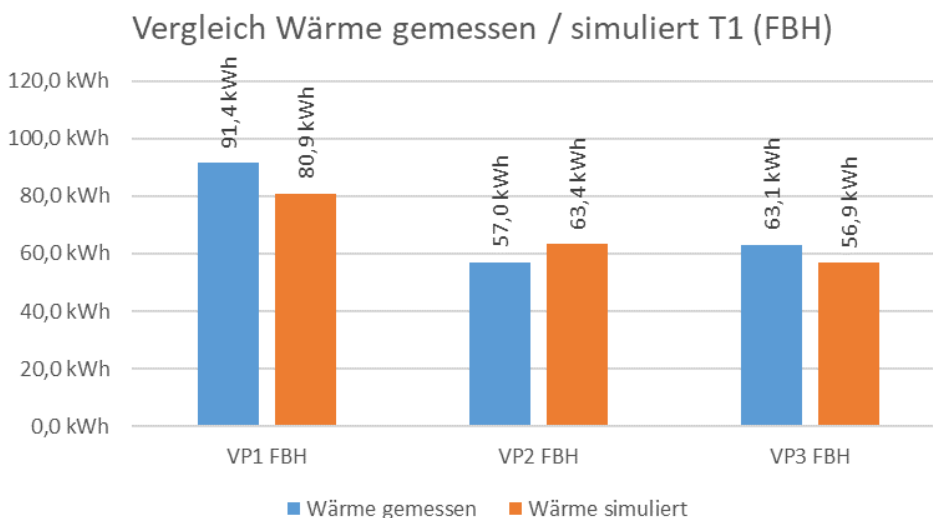


Abb. 116 Gemessene absolute Wärmeverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten

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

Die Abweichungen zwischen gemessenen Wärmeverbrauchswerten und simulierten Werten liegen auch bei Laborraum T1 (WP/FBH) bei ca. +/- 10 %. In den Phasen 2 und 3 verhalten sich die Abweichungen dabei genau gleich wie bei Laborraum T3 (IR-Heizung Decke / s. Abb. 115). Nur Phase 1 weicht um ca. 13 % ab.

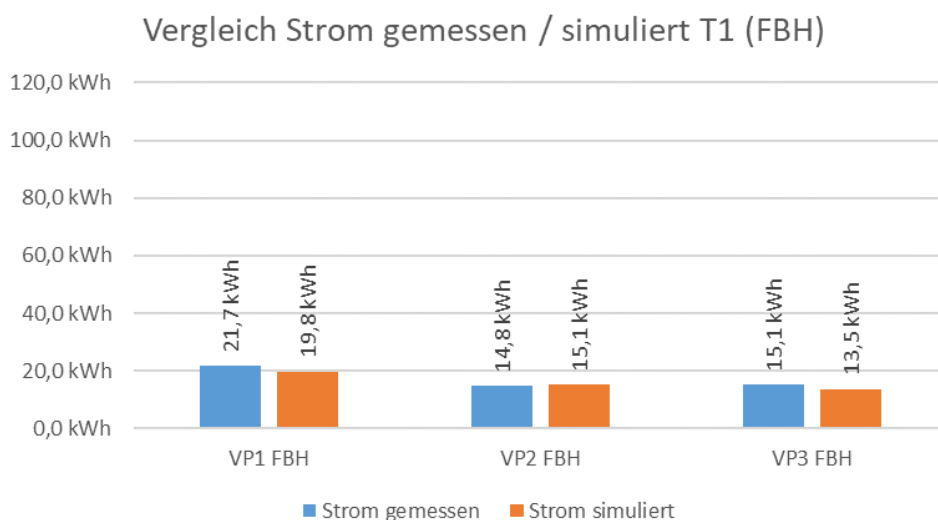


Abb. 117 Gemessene absolute Stromverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den simulierten Werten

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

Auch die Abweichungen der gemessenen zu den berechneten Stromverbräuchen zeigen eine Abweichung von maximal -11 %. Es zeigt sich eine leichte Tendenz in Richtung geringeren simulierten Stromverbrauchswerten bei Laborraum T1 (WP/FBH).

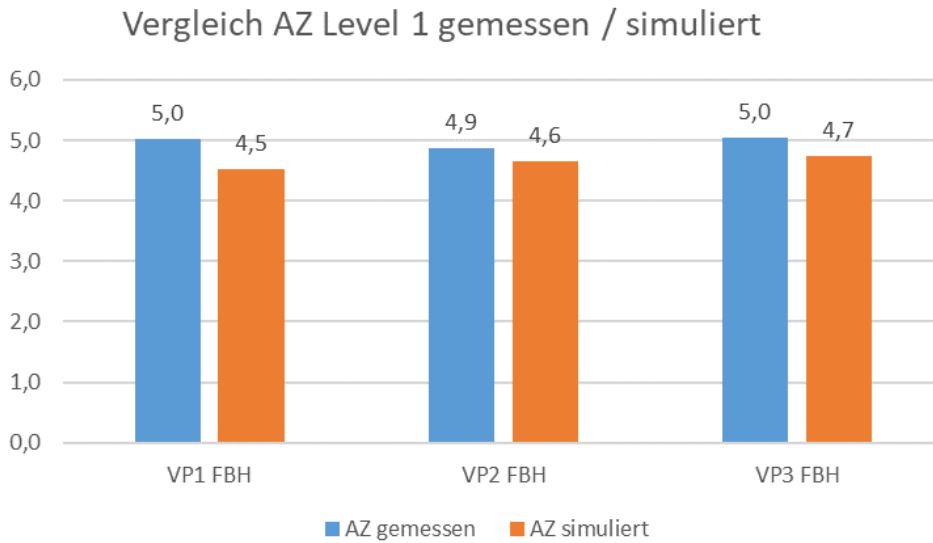


Abb. 118 Gemessene und simulierte Level 1 Arbeitszahlen der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich

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

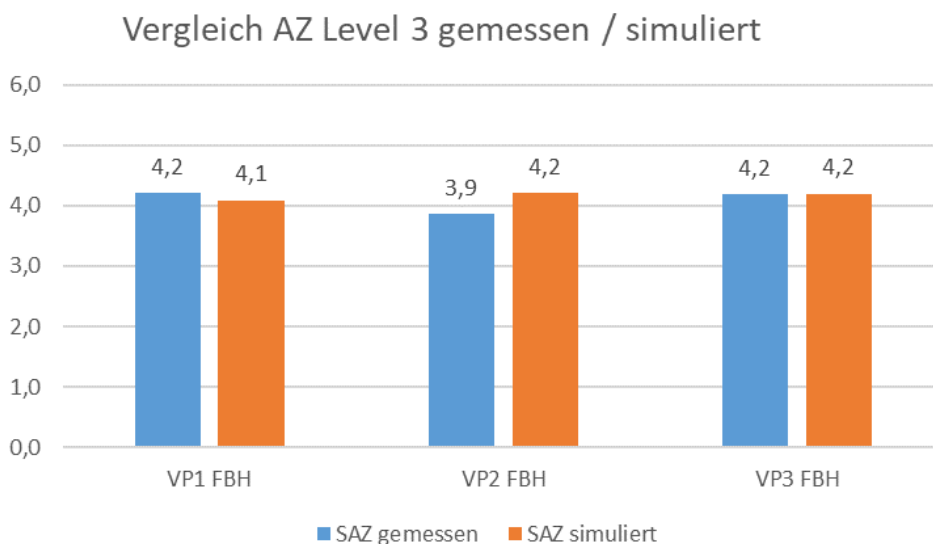


Abb. 119 Gemessene und simulierte Level 3 Arbeitszahlen der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich

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

Die gemessenen Level 1 Arbeitszahlen (Abb. 118) sind im Schnitt etwas besser als die simulierten. Die Abweichungen der gemessenen Level 3 Arbeitszahlen (Abb. 119) 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.

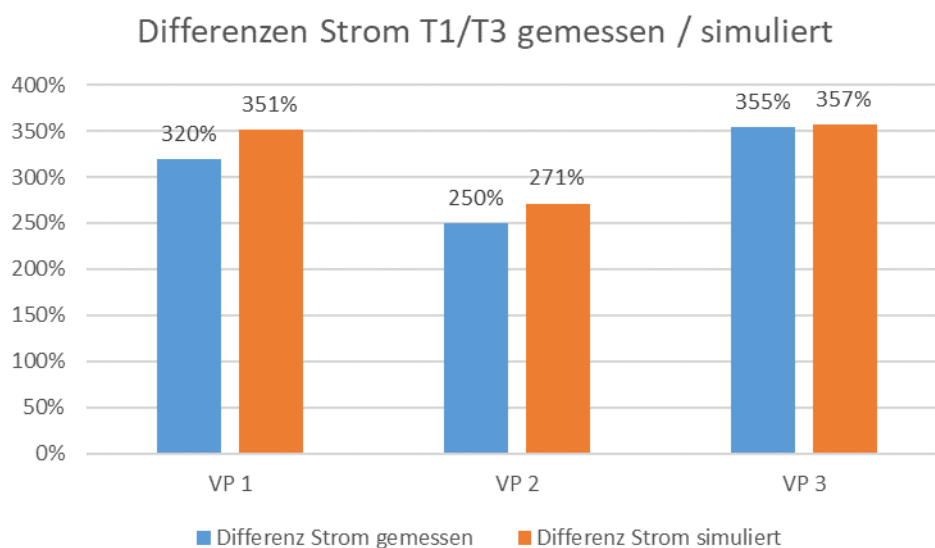


Abb. 120 Differenzen im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke) gemessen und simuliert im Vergleich.

	VP 1	VP 2	VP 3
Differenz Strom gemessen	320%	250%	355%
Differenz Strom simuliert	351%	271%	357%
Abweichung	91%	92%	99%

Tabelle 28 Abweichungen der Differenzen im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke) gemessen und simuliert im Vergleich.

Bei den Differenzen in Abb. 120 zeigt sich wie in Abb. 116 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:

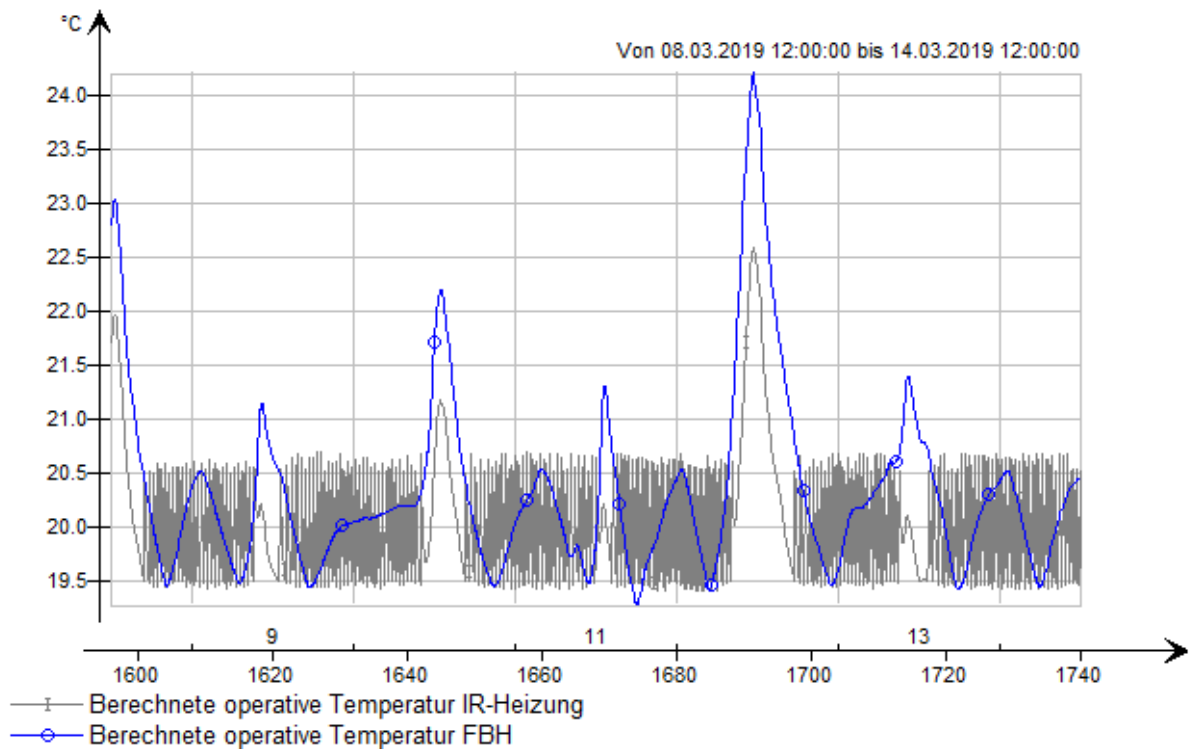


Abb. 121 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen Laborraum T1 (WP/FBH) / Laborraum T3 (IR-Decke) Validierungsphase 1 im Vergleich.

Abb. 121 zeigt den Verlauf der simulierten operativen Temperaturen von Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke). Vergleicht man Abb. 121 mit Abb. 76, S. 108 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 in den Messungen, höher. Dies ist ein wichtiger Faktor zur Erklärung der Verbrauchsunterschiede.

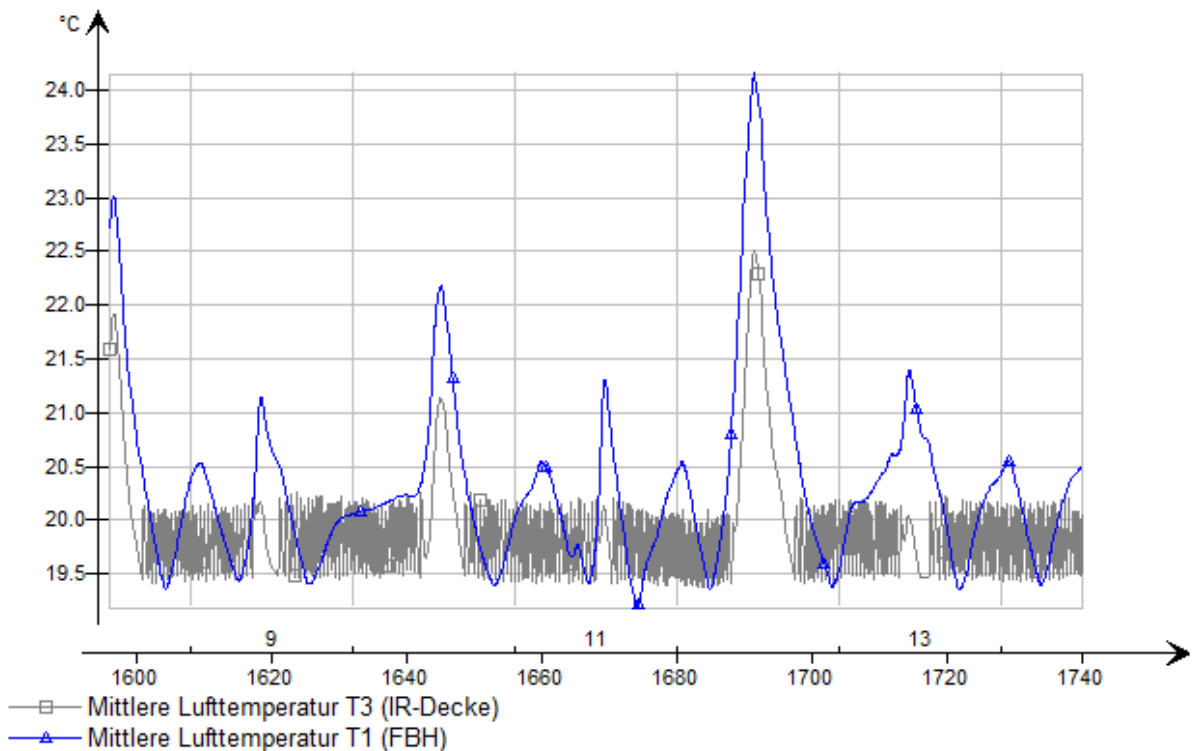


Abb. 122 Verlauf der simulierten Lufttemperaturen Laborraum T1 (WP/FBH) / Laborraum T3 (IR-Decke) Validierungsphase 1 im Vergleich.

Vergleicht man die simulierten Lufttemperaturen aus Abb. 122 mit den Lufttemperaturen aus Abb. 85 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. 123 / Abb. 124.

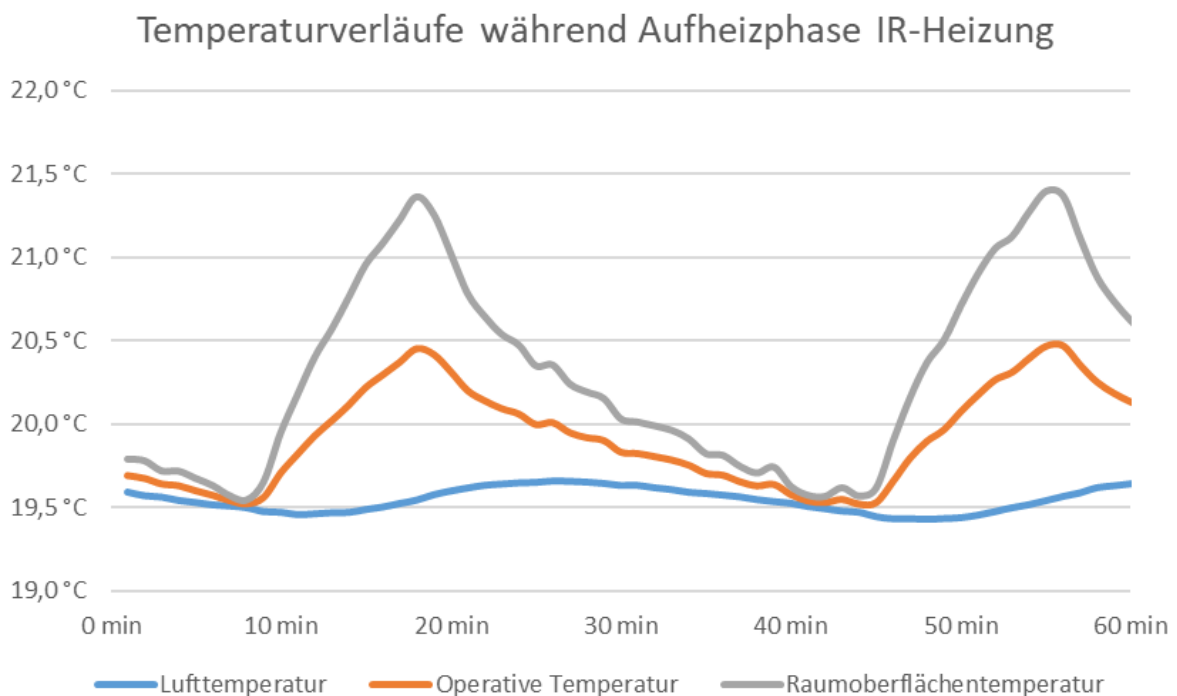


Abb. 123 Verlauf der gemessenen Temperaturen Aufheizphase IR-Heizung

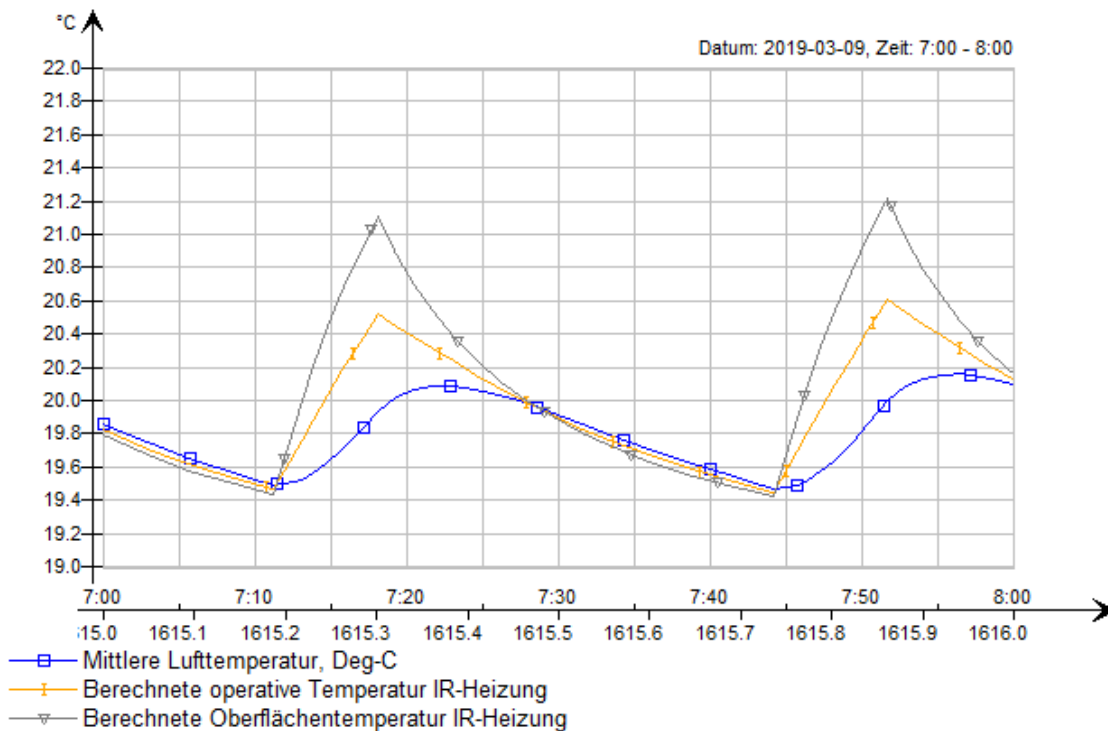


Abb. 124 Verlauf der simulierten Temperaturen Aufheizphase IR-Heizung

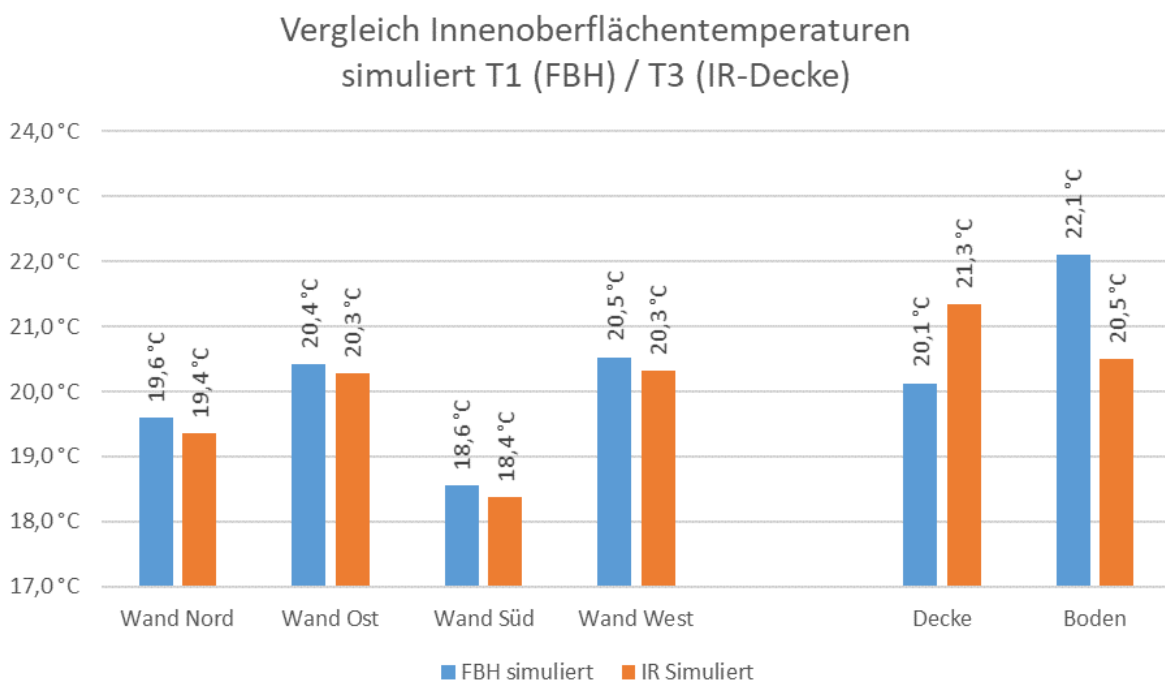


Abb. 125 Vergleich der simulierten Innenoberflächentemperaturen T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke)

Der Vergleich der simulierten durchschnittlichen Oberflächentemperaturen (Abb. 125) mit den tatsächlichen gemessenen Oberflächentemperaturen in Abb. 75, S. 108 zeigt, dass das Grundverhalten in Simulation und Messung gleich ist. In beiden Fällen sind die Oberflächentemperaturen der Wände im Mittel im Fußbodenheizungsraum höher als im IR-beheizten Raum. Jedoch sind die Abweichungen in den Messungen höher als in den Simulationen.

Somit zeigt sich in der detaillierten Betrachtung der Simulationsdaten, 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 sich in der Simulation die Differenzen in den Wärmeverbräuchen etwas geringer darstellen als in der Realität.

Im Gesamten zeigt sich, 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 ca. +/- 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.

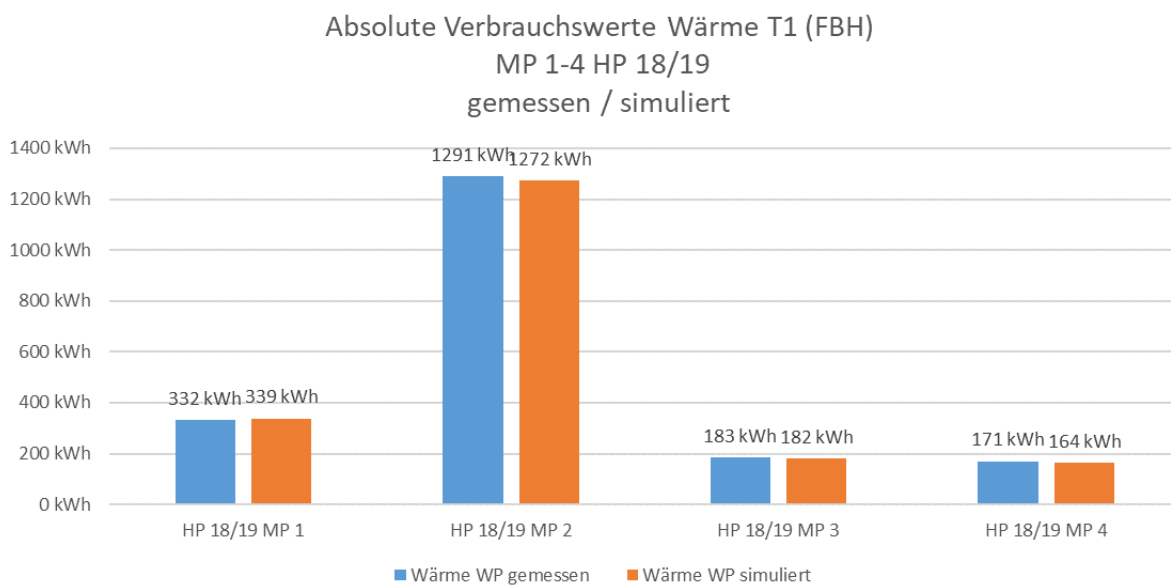


Abb. 126 Absoluter Wärmeverbrauch Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert

	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	102%	99%	99%	96%

Tabelle 29 Abweichung der simulierten von den gemessenen Wärmeverbrauchswerten Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19

Abb. 126 zeigt die absoluten gemessenen und simulierten Werte des Wärmeverbrauchs der Messphasen 1 - 4 aus der Heizperiode 2018 / 2019. Es zeigt sich, dass die simulierten Werte gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Gerade in der langen Messphase 2 (2 ½ Monate) liegt der Unterschied zwischen gemessenem Wert und simuliertem Wert bei nur 1 %.

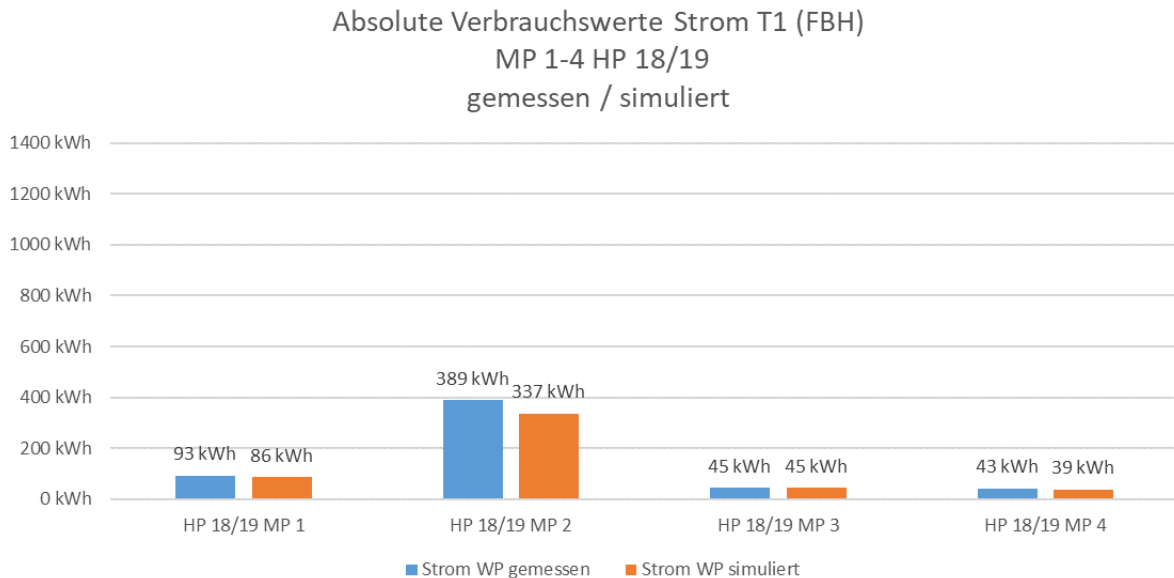


Abb. 127 Absoluter Stromverbrauch Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert

	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	92%	87%	100%	92%

Tabelle 30 Abweichung der simulierten von den gemessenen Stromverbrauchswerten Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19

Abb. 127 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.

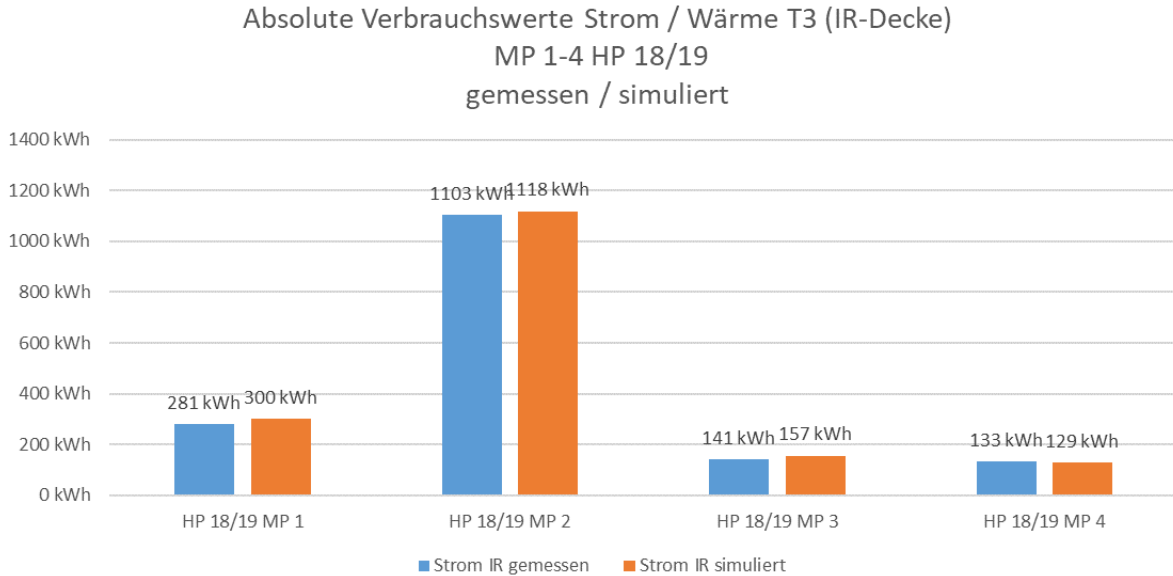


Abb. 128 Absoluter Strom / Wärmeverbrauch Laborraum T3 (IR-Decke), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert

	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	107%	101%	111%	97%

Tabelle 31 Abweichung der simulierten von den gemessenen Stromverbrauchswerten Laborraum T3 (IR-Decke), MP 1-4 HP 18/19

Abb. 128 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 berechneter operativer Temperatur positiv auf die Effizienz des IR-Heizungsraums ausgewirkt hat. Da das Simulationsmodell die operative Raumtemperatur auf die gleiche Weise berechnet wie bei den Messungen in den Laborräumen in den letzten zwei Messphasen, 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.

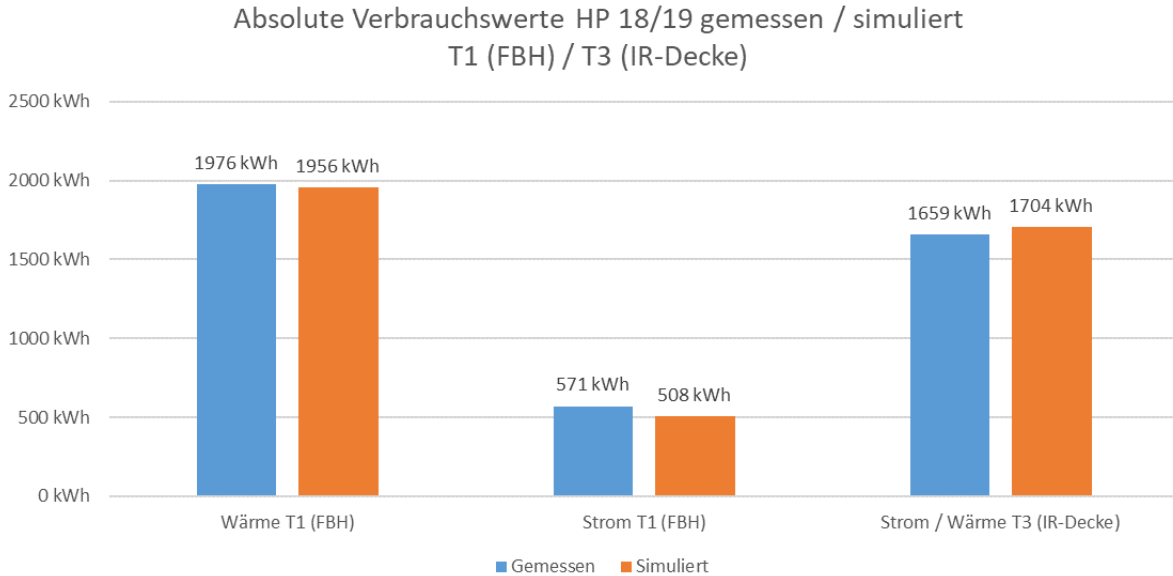


Abb. 129 Absolute Verbrauchswerte Strom / Wärme Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke) HP 18/19 gemessen / simuliert

	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	99%	89%	103%

Tabelle 32 Abweichung der simulierten von den gemessenen Gesamt-Wärme- und Stromverbrauchswerten Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke), HP 18/19

Abb. 129 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. 130 wieder.

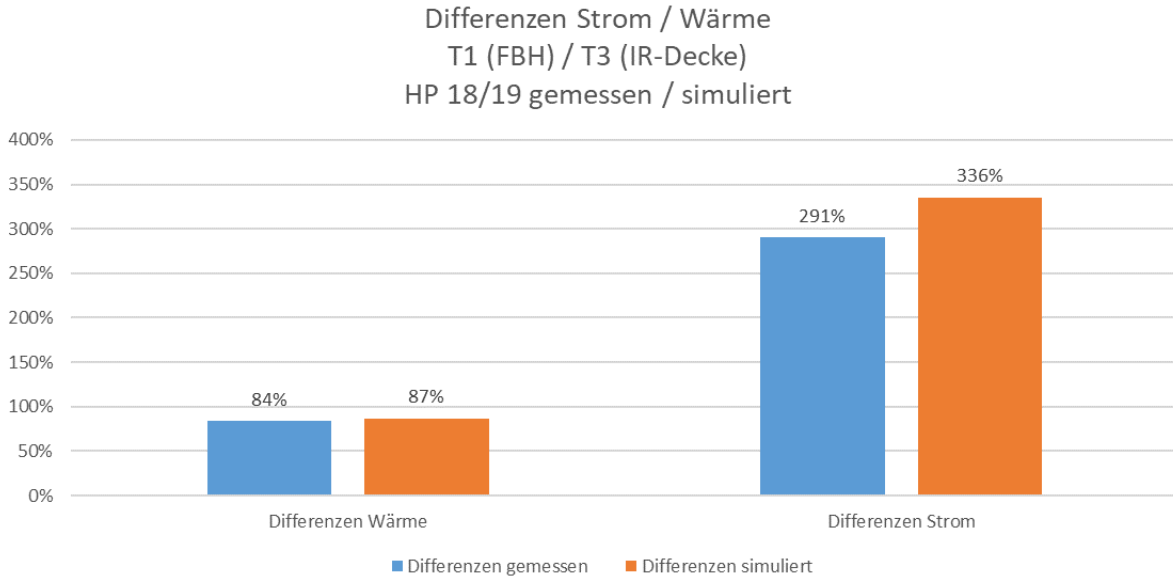


Abb. 130 Differenzen Strom / Wärme Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke), HP 18/19 gemessen / simuliert

Eine mit dem Modell durchgeführte Simulation der gesamten Heizperiode vom 01.10.2018 bis 30.04.2019 kommt zu den nachfolgenden Ergebnissen in Abb. 131 und Abb. 132. 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.

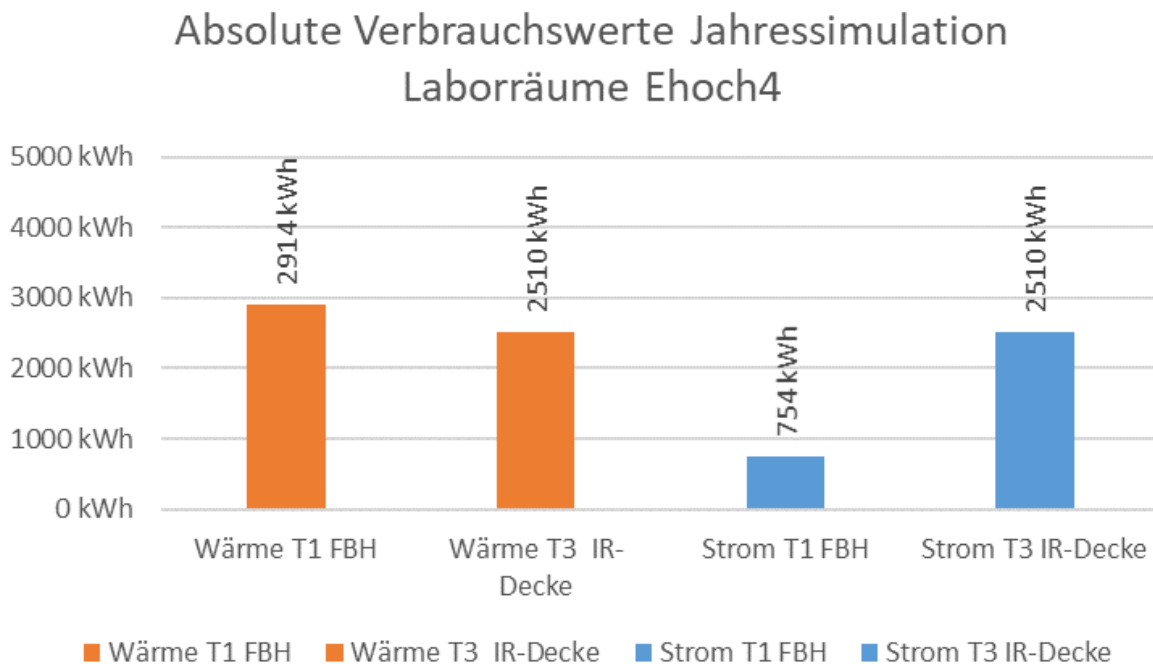


Abb. 131 Absolute Verbrauchswerte Jahressimulation Laborräume Ehoch4 HP 18/19

Verhältnisse der Jahresverbräuche T1 (FBH) / T3 (IR-Decke)

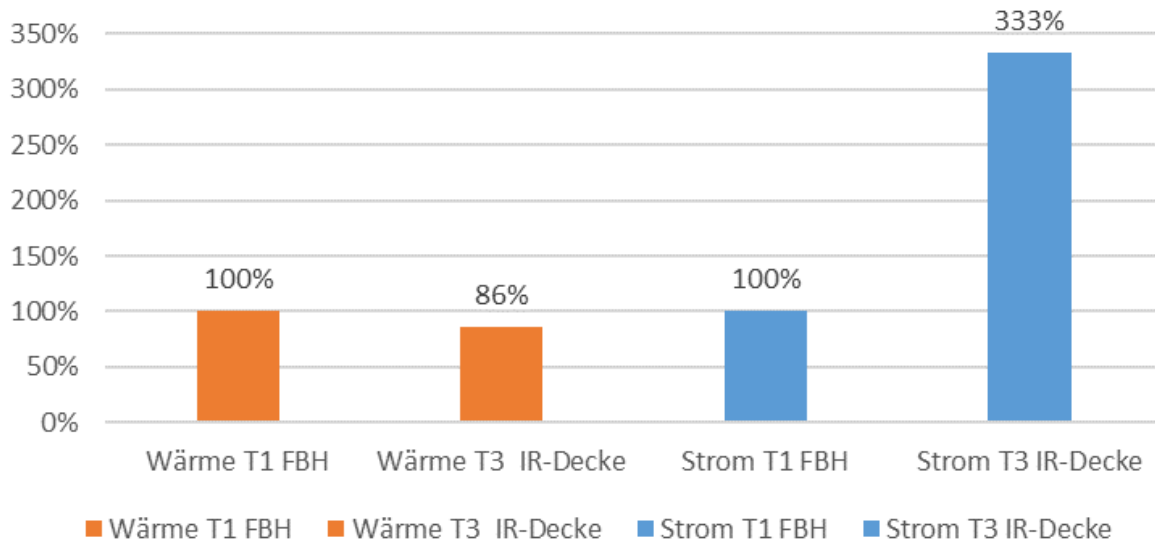


Abb. 132 Verhältnisse der simulierten Jahresverbrauchswerte Laborräume Ehoch4 HP 18/19

5.3 Untersuchte Fragestellungen

5.3.1 Übergabeverluste einer IR-Heizung

Welche effektiven Übergabeverluste können bei IR-Heizungen zur Berechnung angesetzt werden?

Bezüglich der Verluste durch Wärmeübergabe an den Raum wurden drei Fragestellungen geprüft:

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 im Vergleich zu einem Fußbodenheizungssystem?

Die These 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 ca. 0,6 K niedrigere Lufttemperatur ein (s. Abb. 85). 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 These der höheren Wandtemperaturen hat sich nicht bestätigt. Zwar ist die durchschnittliche Temperatur der Umschließungsflächen in einem IR-Heizungsraum zusammen mit den Oberflächen der IR-Heizungen wärmer als die Oberflächen im Fußbodenheizungsraum. Ohne die warmen Oberflächen der IR-Heizungen sind die durchschnittlichen Oberflächentemperaturen jedoch kälter als die Oberflächen 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 These 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 Geschossdecke Richtung Erdgeschoss schlecht gedämmt ist. Da diese zwei Faktoren für die IR-Heizung im Vergleich mit der Fußbodenheizung Vorteile bieten, werden im Folgenden mit Hilfe des validierten Simulationsmodells, die Übergabeverluste bei Standardrandbedingungen simuliert.

In einer ersten Variante wurden zwei Laborräume mit Nord-/ Südausrichtung untersucht. 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.

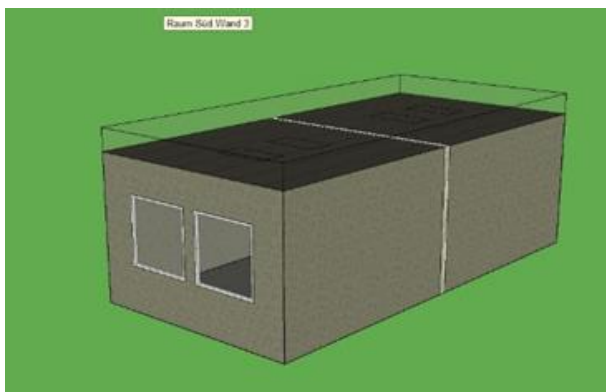


Abb. 133 3D Darstellung der simulierten Laborräume aus IDA ICE

	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%

Tabelle 33 Simulierte Verbrauchsunterschiede zweier Laborräume

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

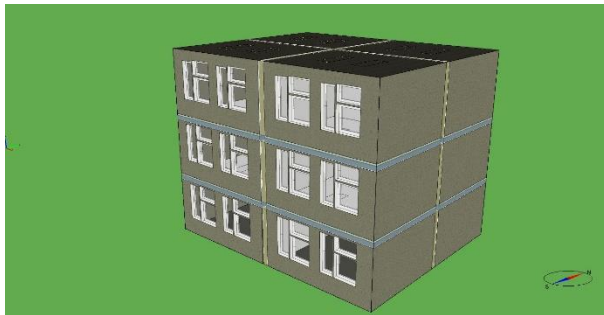


Abb. 134 3D Darstellung der vervielfältigten Laborräume aus IDA ICE

	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%

Tabelle 34 Simulierte Verbrauchsunterschiede vervielfältigter Laborräume

In beiden Varianten zeigt sich, 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.

Vergleich der simulierten Übergabeverluste mit der Berechnung nach DIN 18599.

Tabelle 35 und Tabelle 36 zeigen, wie die Übergabeverluste der Fußbodenheizung und der Elektrodirektheizung aktuell in der der DIN V 18599 abgebildet werden. Dabei zeigt Tabelle 35 die Berechnung nach aktueller DIN 18599-5 2016, Tabelle 36 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 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); $\Delta\vartheta_{roomaut}$

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

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	$\Delta\vartheta_{ce}$	2,85	1,6	0,7	0,0
Bilanz-Innentemperatur für den Heizwärmebedarf	$\vartheta_{i,h}$	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 35 Berechnung der Übergabeverluste nach DIN 18599-5 - 2016

Für die Varianten wurden folgende Werte gesetzt:

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

Als „Nutzwärmebedarf“ wurde der gemessene Wert über die MP 1 - 4 aus Raum T3 (IR-Decke) verwendet, da sich nach den Simulationsergebnissen aus Tabelle 33 und Tabelle 34 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.

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. 130). 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“ sieht 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.

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 35 im Folgenden noch einmal nach der alten, aber für die EnEV-Berechnung aktuell gültigen DIN 18599-5 aus dem Jahr 2011 berechnet.

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
Gesamtnutzungsgrad 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 36 Berechnung der Übergabeverluste nach DIN 18599-5 - 2011

Für die Varianten wurden folgende Werte gesetzt:

- Variante „FBH Laborraum Ehoch4“: η_C = 0,93; η_B = 0,94; f_{hydr} = 1,06
- Variante „FBH Laborraum verbessert“: η_C = 0,93; η_B = 0,96; f_{hydr} = 1,00
- Variante „E-Heizung nach 18599“: η_{h,ce} = 0,94
- Variante „E-Heizung ohne Verluste“: η_{h,ce} = 1,00

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.

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.

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) als Nichtwohngebäude ohne Trinkwarmwasser durchgeführt. Es wurde eine Variante Luft-WP + FBH und eine Variante Elektrodirektheizung / IR-Heizung jeweils im Bestandszustand und in einer verbesserten Variante (bessere Dämmung / optimierte Technik) erstellt.

Tabelle 37 zeigt die Ergebnisse der Berechnung im Gebäudebestand. Hier wurden folgende Einstellungen gemacht:

- Als Grundfläche wurden dabei 137 m² (Laborraum + Auslastungsraum Wärmepumpe) angenommen.
- Die Bauteilaufbauten entsprechen den Bestandsaufbauten ($H_t' = 0,57$)
- 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.

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 37 Ergebnisse der EnEV-Berechnung der Laborräume in Ehoch4 Gebäudebestand

Die Ergebnisse der EnEV-Berechnung zeigen, dass die Abweichungen beim Wärme- und Stromverbrauch in etwa ähnlich groß sind wie in den gemessenen Zeiträumen MP 1 - 4, Heizperiode 2018/2019 (s. Abb. 130).

Tabelle 38 zeigt die Ergebnisse der EnEV Berechnung in einer Variante mit verbesserter Dämmung und optimierter Technik. Hier wurden folgende Einstellungen gemacht:

- Als Grundfläche wurden 137 m² (Laborraum + Auslastungsraum Wärmepumpe) angenommen.
- Die Bauteilaufbauten sind nun besser gedämmt ($H_t' = 0,25$)
- 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.

Die Ergebnisse der EnEV-Berechnung mit verbesserter Dämmung und optimierter Technik zeigen, dass das Verhältnis im Erzeugernutzwärmebedarf 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 größer.

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 38 Ergebnisse der EnEV-Berechnung der Laborräume in Ehoch4 Verbesserte Dämmung / optimierte Technik

5.3.2 Mögliche Einsparungen durch flexible Regelung bei IR-Heizungen

Welche Einsparungen im Energiebedarf lassen sich durch die optimal an das Nutzerverhalten anpassbare Regelung erzielen?

In Kapitel 4.5.5 wurde beschrieben, wie sich ein intermittierender Betrieb auf die Energieverbräuche und die Verbrauchsunterschiede zwischen Fußbodenheizung und Infrarotheizungssystem in den Laborräumen auswirkt. 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.

Es wurde dabei das gleiche Nutzungsprofil angenommen wie in den Laborraummessungen. 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.

Wie bereits bei den Laborraummessungen beobachtet, 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. 135). 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. 136).

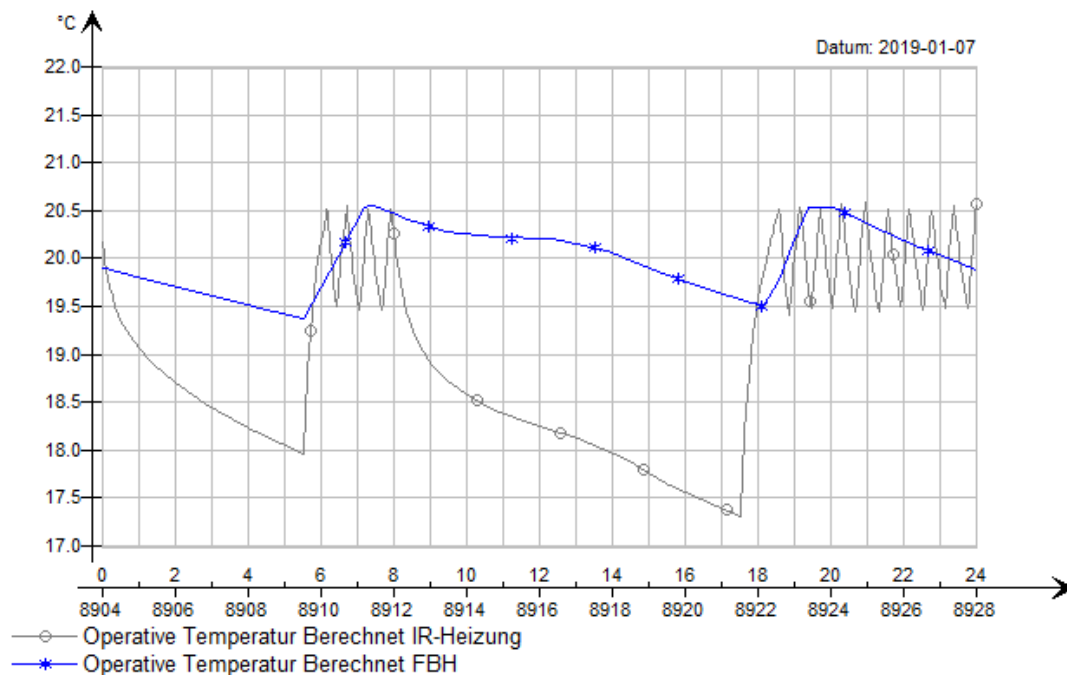


Abb. 135 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen während intermittierendem Betrieb bei gleichem Start der Vorheizzeit

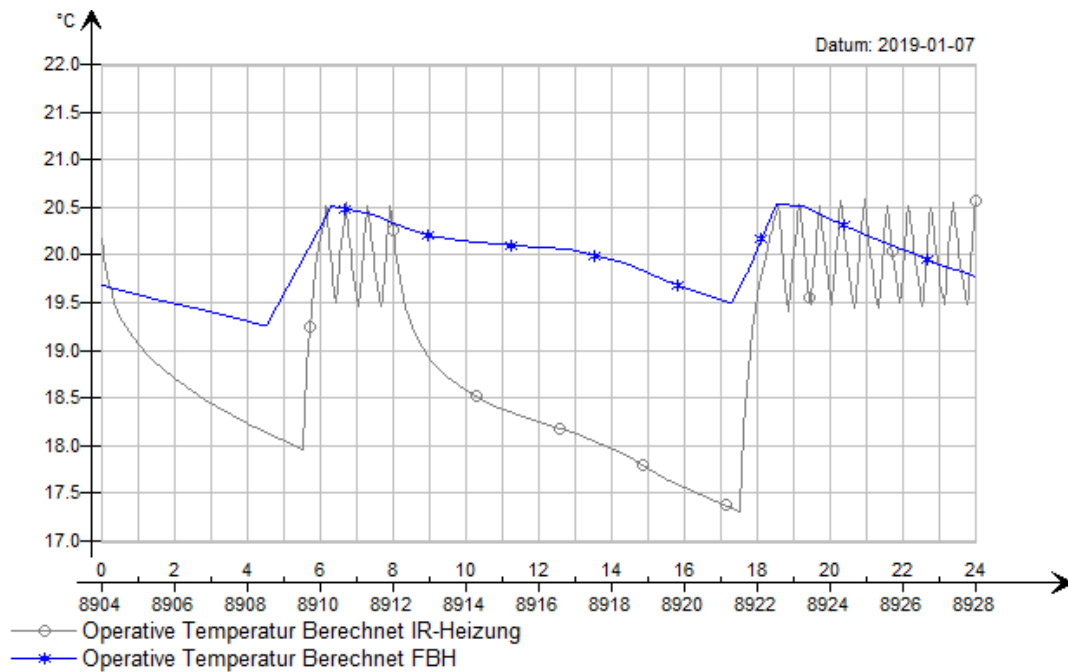


Abb. 136 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen während intermittierendem Betrieb bei früherem Start der Vorheizzeit für die Fußbodenheizung

Ein Vergleich der Energieverbräuche bei nun gleichen raumklimatischen Bedingungen im bereits in Kapitel 5.3.1 verwendeten Simulationsmodell zeigt, dass sich der Verbrauchsunterschied zwischen Fußbodenheizung und IR-Heizung um 2 % gegenüber der Variante ohne intermittierenden Betrieb (s. Tabelle 33) vergrößert hat.

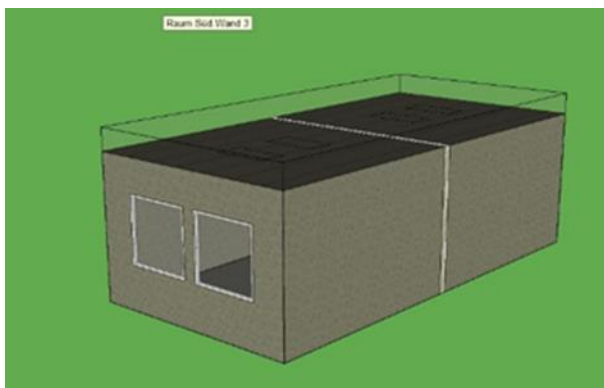


Abb. 137 3D Darstellung der simulierten Laborräume aus IDA ICE

	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 39 Simulierte Verbrauchsunterschiede bei intermittierendem Betrieb

5.3.3 Bilanzierung Life Cycle Assessment (LCA) und Life Cycle Costing (LCC)

Auf Grundlage der in den vorherigen Kapiteln ermittelten Effizienzunterschiede können nun die zwei Energiekonzepte – ein Infrartheizungskonzept und ein Wärmepumpenkonzept - anhand der Umweltwirkung des Treibhauspotentials (GWP) ökobilanziell und mit einer Lebenszykluskostenbetrachtung wirtschaftlich verglichen und bewertet werden.

Die Berechnung erfolgt anhand des Pilotprojektes K 76. Wie bereits dargelegt, ist es im Fall der Infrartheizung sinnvoll, einen Teil der gegenüber einem WP-System eingesparten Herstellungskosten in eine Photovoltaikanlage zu investieren. Für die Variante Infrartheizung würde daher die realisierte PV-Anlage in die Bilanz eingerechnet. Bei der WP-Variante wäre diese nicht finanzierbar gewesen und wird daher in dieser Variante nicht berücksichtigt. Um die Bedeutung der Photovoltaikanlage für die ökonomische und ökologische Bewertung des IR-Heizungssystems zu verdeutlichen, werden die Berechnungen einmal ohne PV-Anlage und einmal mit PV-Anlage durchgeführt.

Zentraler Unterschied der zu vergleichenden Modelle sind die technischen Anlagenkomponenten für den Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf. Dabei werden für das Infrartheizungskonzept die realisierten Infrartheizgeräte sowie Durchlauferhitzer, Warmwasserboiler und PV-Anlage betrachtet. Für das Modell Wärmepumpe werden die benötigten Anlagenkomponenten von vergleichbaren Projekten übertragen und entsprechend dimensioniert. Hier werden neben der Wärmepumpe die dazugehörigen Anlagenkomponenten wie Speicher, Pumpen, Fußbodenheizung und Rohrleitungen und Rohrdämmung für Heizung und Trinkwarmwasser berücksichtigt.

5.3.4 Vergleich der gesamtökologischen Bewertung (LCA) über 50 Jahre

Wie stellt sich der Vergleich der gesamtökologischen Bewertung dar in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung?

Grundlage für die Berechnungen bilden die Datensätze der ökobau.dat 2016. Für beide Modelle wurden die realisierte Baukonstruktion und Materialien des Pilotprojektes K76 bilanziert. Der Endenergiebedarf und Stromertrag der Photovoltaikanlage wird anhand eines Bilanzierungsprogramms (BKI Energieplaner) ermittelt. Die Ökobilanz wurde für den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren berechnet, der altersbedingte Austausch von Bauteilschichten fließt in die Betrachtung mit ein. Die Lebensdauern der Bauteilschichten sind dem Leitfaden für Nachhaltiges Bauen des BMUB entnommen.

Für die Bewertung werden folgende Lebenszyklusmodule betrachtet: Herstellung (A1-A3), Instandhaltung (A1-A3) und Betrieb (B6).

Das Ergebnis zeigt, dass Herstellung und Instandhaltung der KG400 des Modells Wärmepumpe ein doppelt so hohes Treibhauspotential aufweisen, als die des Modells Infrarotheizung. Die fehlenden Anlagenkomponenten wie beispielsweise Leitungen und Pufferspeicher, sowie die instandhaltungsarme technische Ausstattung führt bei dem Infrarotheizungskonzept zu einem deutlich niedrigeren Treibhauspotential.

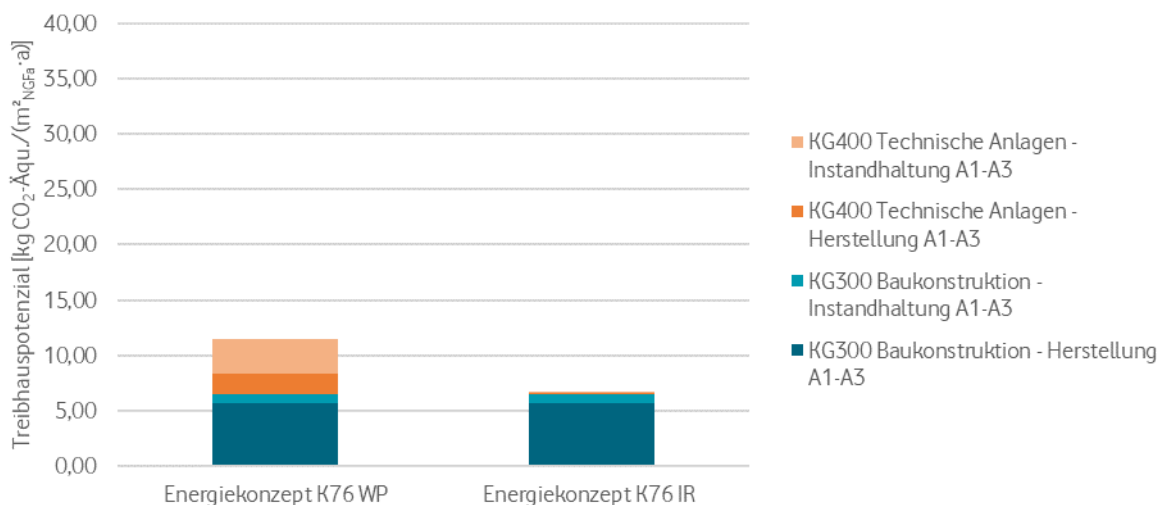


Abb. 138 Vergleich Ökobilanz K76 WP / IR KG 300 und KG 400, IR-Variante ohne PV

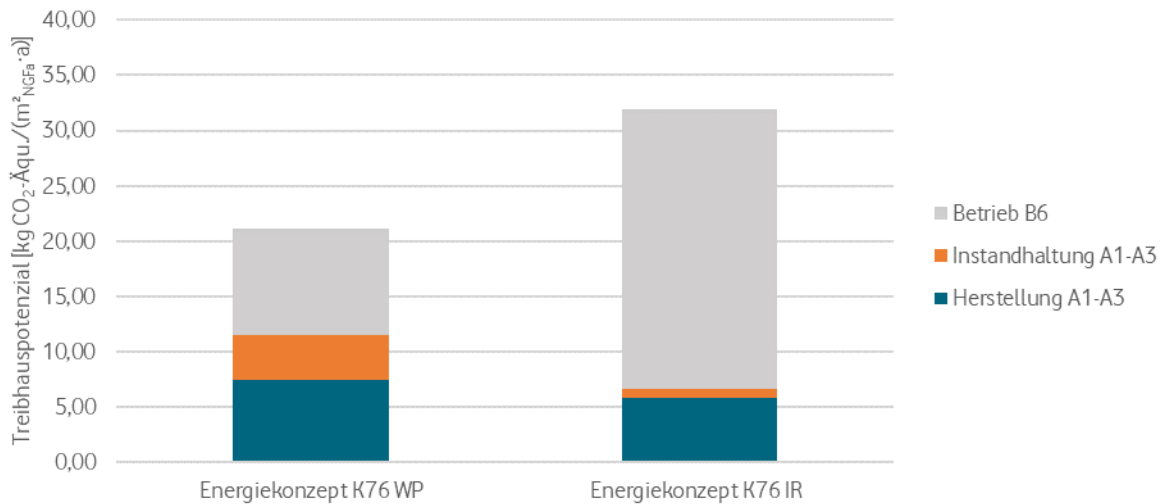


Abb. 139 Vergleich Gesamt-Ökobilanz K76 WP / IR , IR-Variante ohne PV

Abb. 139 zeigt, dass ein Energiekonzept mit Infrarotheizung ohne PV-Anlage im Betrieb ein deutlich höheres Treibhauspotential gegenüber der Wärmepumpenvariante aufweist.

In Kombination mit einer PV-Anlage weist der Betrieb für beide Modelle allerdings ein gleich hohes Treibhauspotential auf, denn der zunächst höhere Strombedarf und das höhere Treibhauspotential der Variante Infrarotheizung wird durch den regenerativ erzeugten Stromertrag der Photovoltaik wieder kompensiert.

Betrachtet man alle bilanzierten Lebenszyklusmodule, weist die Variante Infrarotheizung mit PV-Anlage über eine Dauer von 50 Jahren ökologisch bessere Kennwerte als die Variante Wärmepumpe auf (s. Abb. 141).

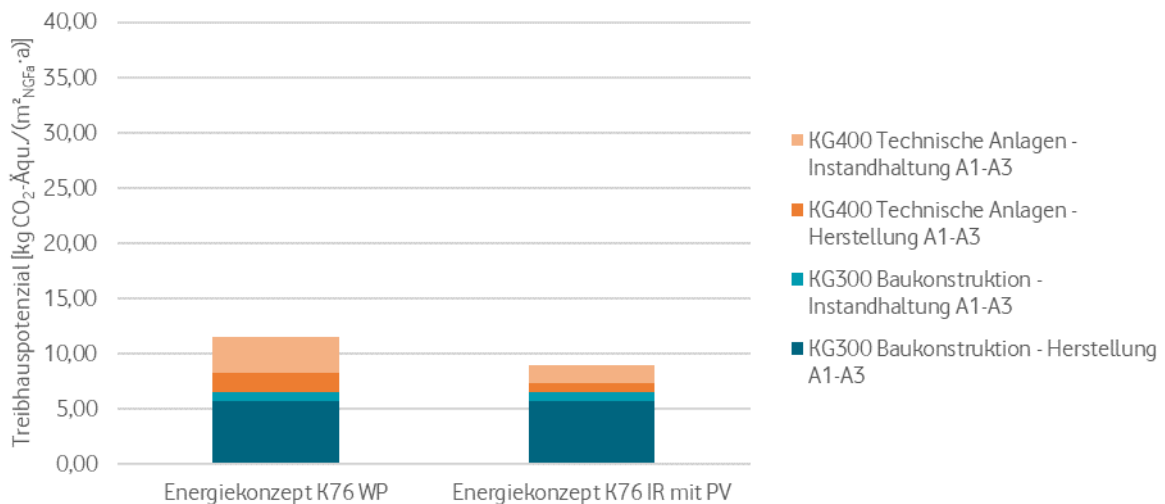


Abb. 140 Vergleich Ökobilanz K76 WP / IR KG 300 und KG 400, IR-Variante mit PV

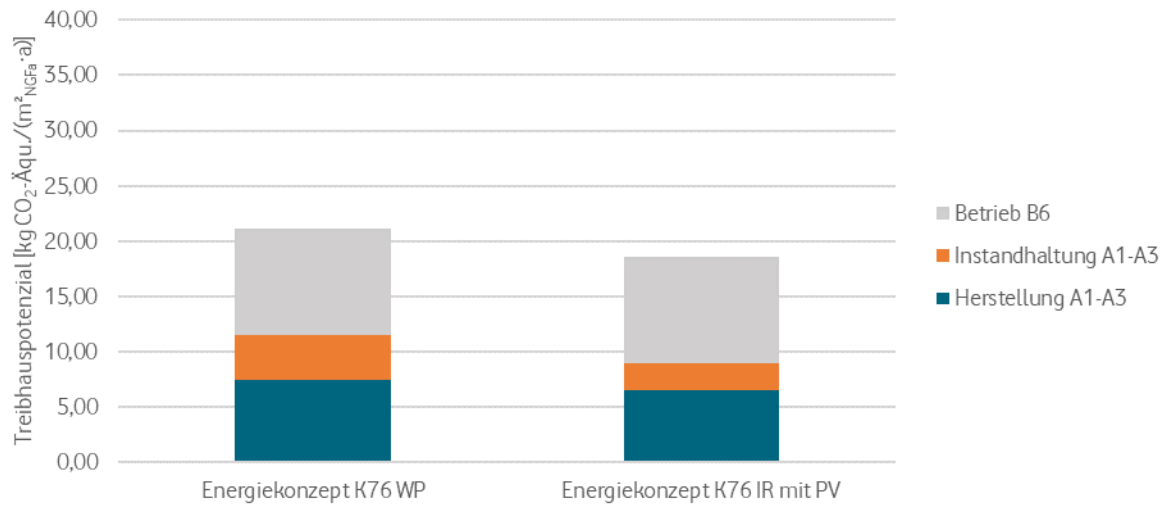


Abb. 141 Vergleich Gesamt-Ökobilanz K76 WP / IR , IR-Variante mit PV

5.3.5 Vergleich der gesamtwirtschaftlichen Bewertung (LCC) über 50 Jahre

Wie stellt sich der Vergleich der gesamtwirtschaftlichen Bewertung dar in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung?

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit der beiden Modelle werden die technischen Anlagen für Heizen und Warmwasser betrachtet und nach VDI 2067 berechnet. Die anzusetzenden Investitionskosten für die Wärmepumpe 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 ca. 1200 Euro inklusive dezentraler Raumregelung und Montage der Heizungen und Regelung. Die Nutzungsdauern, Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Bedienung werden analog VDI 2067 angesetzt.

Die Einspeisevergütung für den Photovoltaikstrom wird konstant für den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren 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 rausfallen. Beiden Modellen liegen der gleiche Zinsfaktor, Preissteigerungen sowie der Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zu Grunde. Dabei fließen folgende Parameter in die Berechnung ein: Zinsfaktor 4%, Instandsetzungszahlungen 4%, betriebsgebundene Zahlungen 4%, verbrauchsgebundene Zahlungen 3%.

Abb. 142 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 günstiger als die Wärmepumpenvariante. Die Betriebskosten sind jedoch bei der IR-Heizung ohne PV-Anlage deutlich höher. Insgesamt zeigt sich, dass eine IR-Heizung unter den hier angenommenen Rahmenbedingungen ohne Kombination mit einer PV-Anlage im gesamten Lebenszyklus deutlich teurer ist als ein vergleichbares Wärmepumpenkonzept.

Abb. 143 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, die Betriebskosten reduzieren sich jedoch deutlich. Insgesamt weist unter diesen Randbedingungen die Variante Infrarotheizung mit Photovoltaik bei deutlich niedrigeren Investitionskosten über 50 Jahre einen besseren Wert auf als das Wärmepumpenkonzept.

Wirtschaftlichkeit Energieerzeugung
 Barwert Gesamtkosten, 50kW, 1360m²
 Energiepreissteigerung = 3%/a

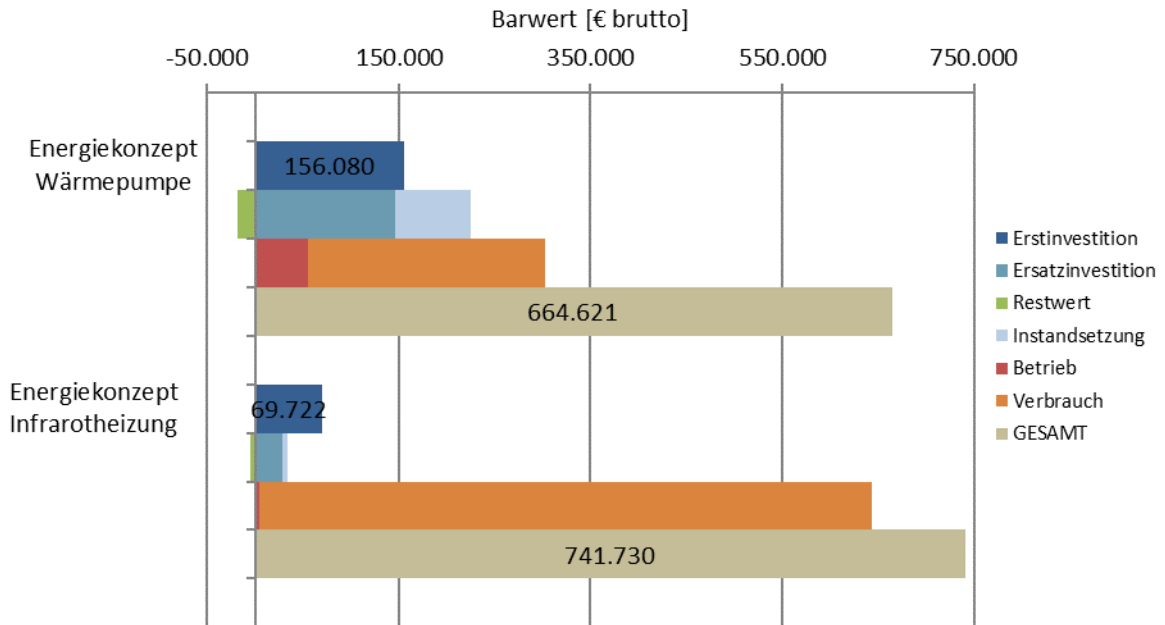


Abb. 142 Vergleich Wirtschaftlichkeit K76 WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante ohne PV

Wirtschaftlichkeit Energieerzeugung
 Barwert Gesamtkosten, 50kW, 1360m²
 Energiepreissteigerung = 3%/a

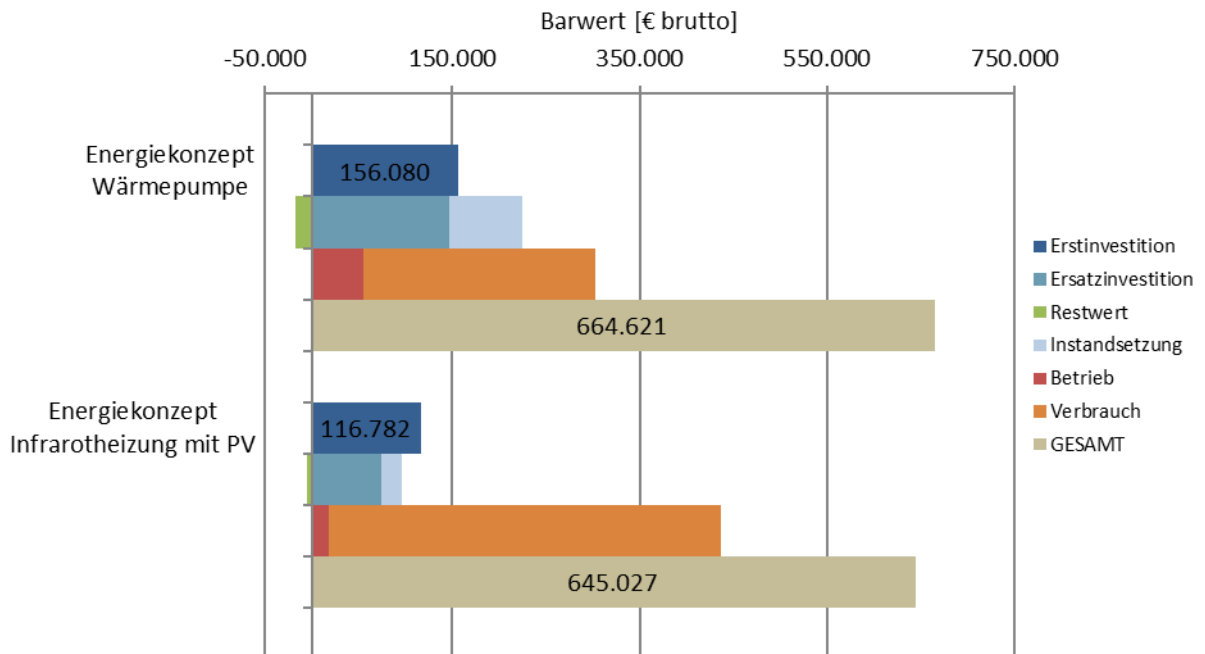


Abb. 143 Vergleich Wirtschaftlichkeit K76 WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre , IR-Variante mit PV

Im einer zweiten Berechnung wurde die Wirtschaftlichkeit für ein Gebäude mit geringerer Leistung und Fläche untersucht. Dabei liegen den Modellen die gleichen Randbedingungen zu Grunde, lediglich die Investitionskosten sind auf die entsprechende Bezugsgröße angepasst.

Das Ergebnis zeigt, dass trotz der hohen Verbrauchskosten sich das Konzept Infrarotheizung in Kombination mit Photovoltaik deutlich wirtschaftlicher darstellt. Während bei der Untersuchung für 50 kW die Variante Infrarotheizung ca. 3 % günstiger ist, beläuft sich die Unterschreitung der Untersuchung für 20 kW auf ca. 15 %. Dieser Vergleich lässt darauf schließen, dass sich das Infrarotkonzept umso wirtschaftlicher darstellt, je kleiner und besser gedämmt das Gebäude bzw. je geringer der Wärmeumsatz ist.

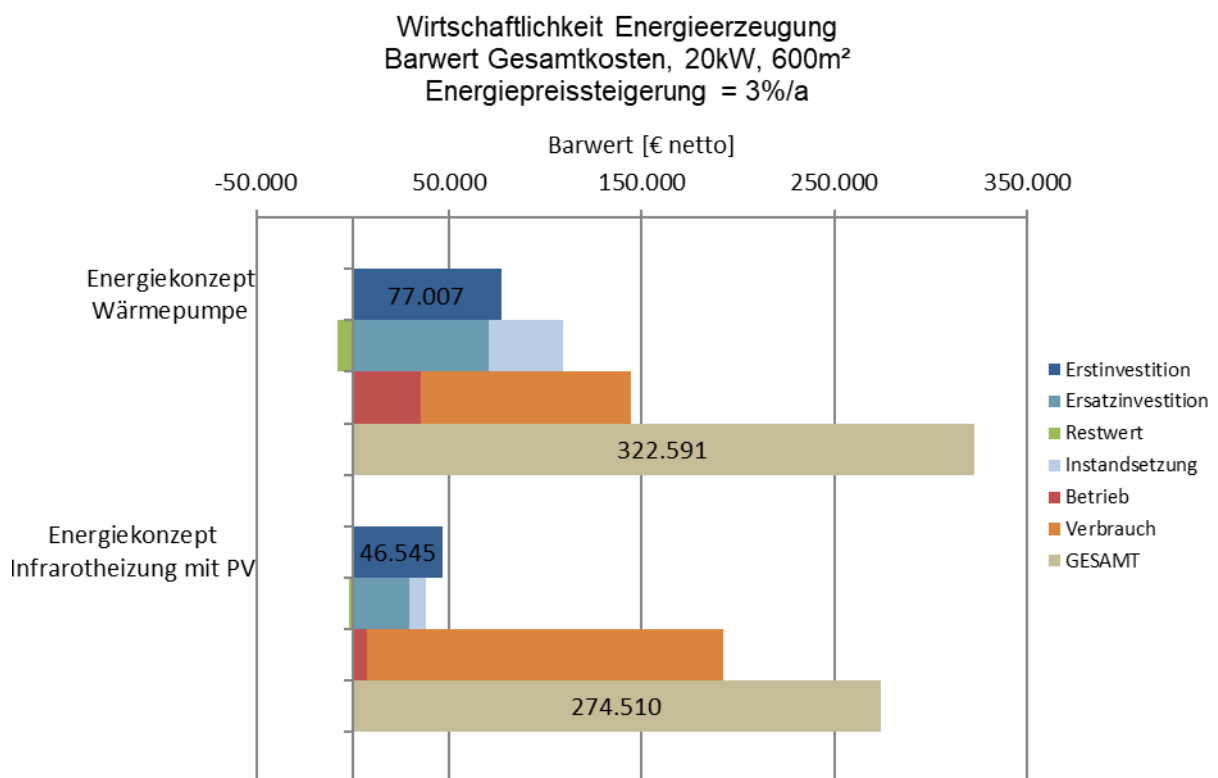


Abb. 144 Vergleich Wirtschaftlichkeit 600 m² WHG WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante mit PV

5.3.6 Einflussgrößen für IR-Heizsysteme

Bei welchen Randbedingungen bezüglich spezifischem Heizwärmebedarf, Gesamtwärmeumsatz und Stromkosten können IR-Heizsysteme Vorteile aufweisen?

Die Ergebnisse der in Kapitel 5.3.4 und 5.3.5 durchgeführten LCC und LCA Berechnungen gelten für das Pilotprojekt K 76 mit seinen spezifischen Randbedingungen 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	Nutzungshäufigkeit des Gebäudes
Investitionskosten IR-Heizung	Nutzungszeiten des Gebäudes
Investitionskosten PV- Anlage / Speicher	Erwartete Nutzungsdauer des Gebäudes
Effizienz der PV Anlage	Größe der PV- Anlage
Energiekosten Strombezug	Effizienz der Wärmepumpe
Einspeisevergütung PV- Strom	Effizienz der IR-Heizung
Eigenverbrauchsanteil PV- Strom	CO ₂ -Kennwert Haustechnik Herstellung /
Gebäudestandort	Instandhaltung
Größe der beheizten Fläche	CO ₂ -Kennwert Betrieb
Thermische Qualität der Gebäudehülle	CO ₂ Gutschrift PV- Strom
Heizlast des Gebäudes	Betrachtungszeitraum
Nutzung des Gebäudes (Lastprofil)	Zinssätze / Preissteigerungsraten

Im Folgenden wird mit Hilfe von Parameterstudien untersucht, wie sich die Änderung einzelner ausgewählter Parameter auf die Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz auswirkt. Ausgangsbasis bildet hierbei das untersuchte Gebäude K76 mit den dort angenommenen Parametern.

Änderung des Endenergiebedarfs

In Abb. 145 und Abb. 146 wird gezeigt, wie sich eine Änderung von $\pm 25\%$ 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.

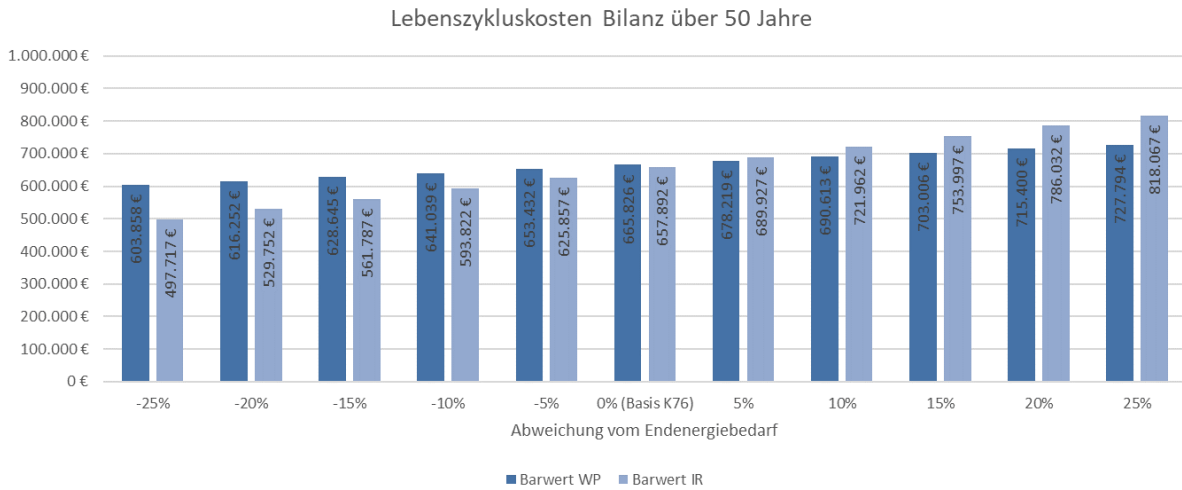


Abb. 145 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Abweichung vom Endenergiebedarf

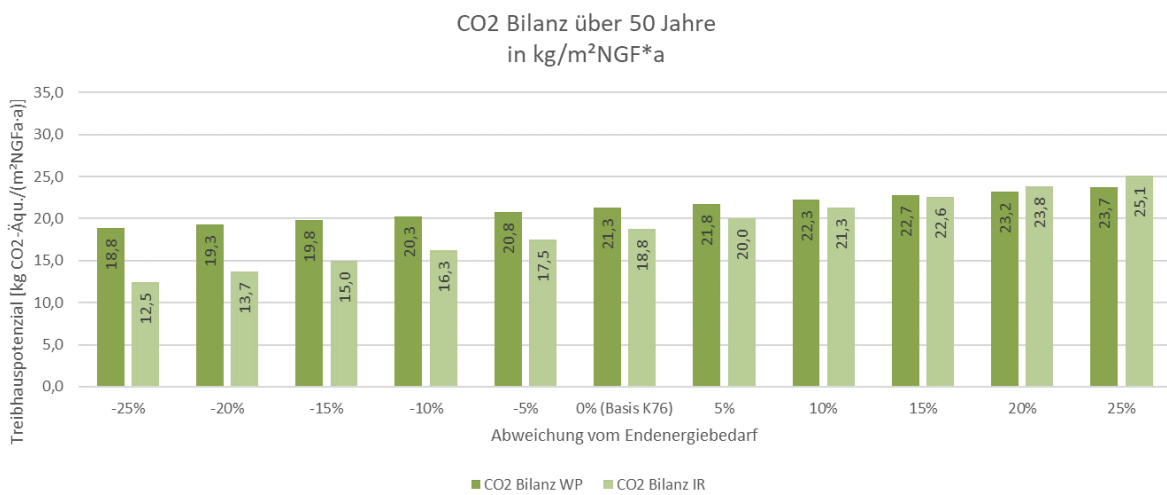


Abb. 146 Änderungen der CO2 Bilanz bei Abweichung vom Endenergiebedarf

Änderung der Effizienz der Wärmepumpe

Abb. 147 und Abb. 148 zeigen, wie sich eine Änderung der Effizienz einer möglichen Luft-/ Wasser- Wärmepumpe gegenüber der bisher angenommen Effizienz auf die ökonomische und ökologische Bilanz auswirken würde.

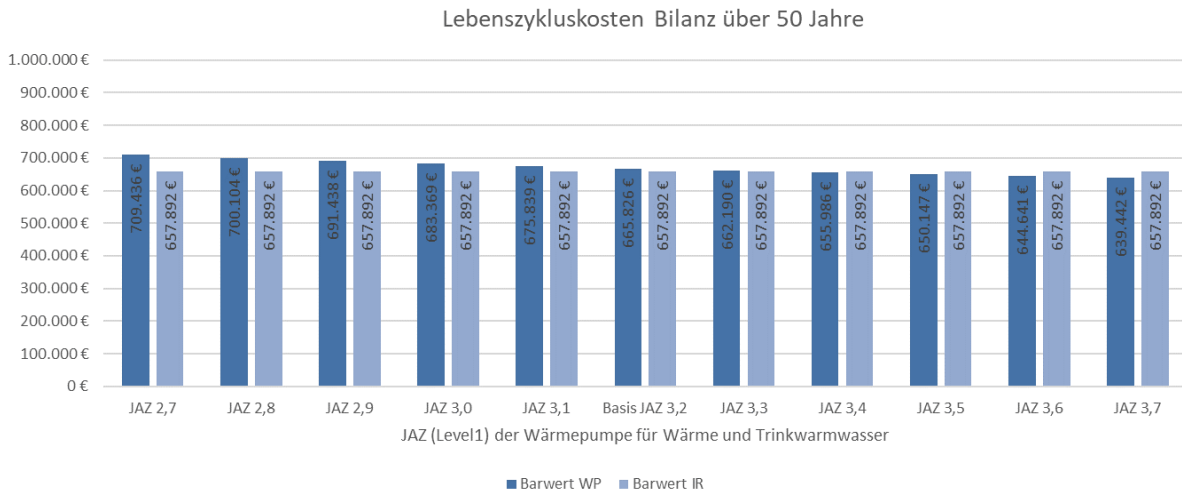


Abb. 147 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Änderung der Effizienz der WP

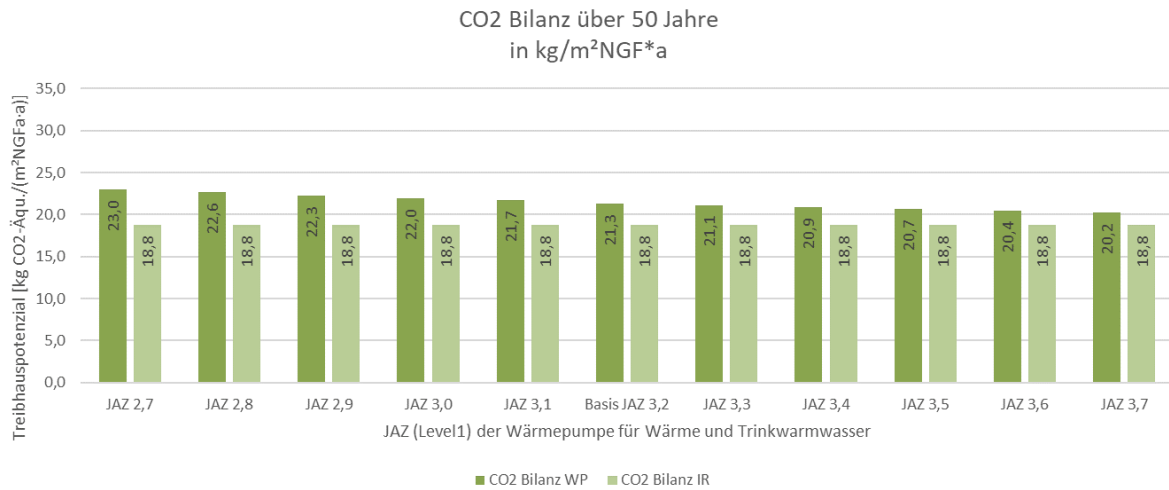


Abb. 148 Änderungen der CO2 Bilanz bei Änderung der Effizienz der WP

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.

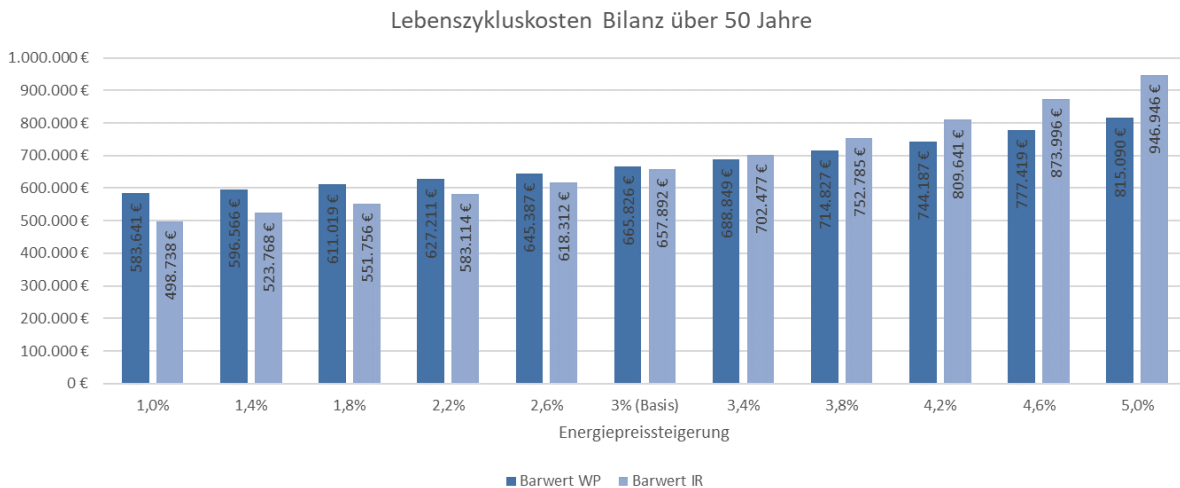


Abb. 149 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommenen Energiepreissteigerungsraten

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.

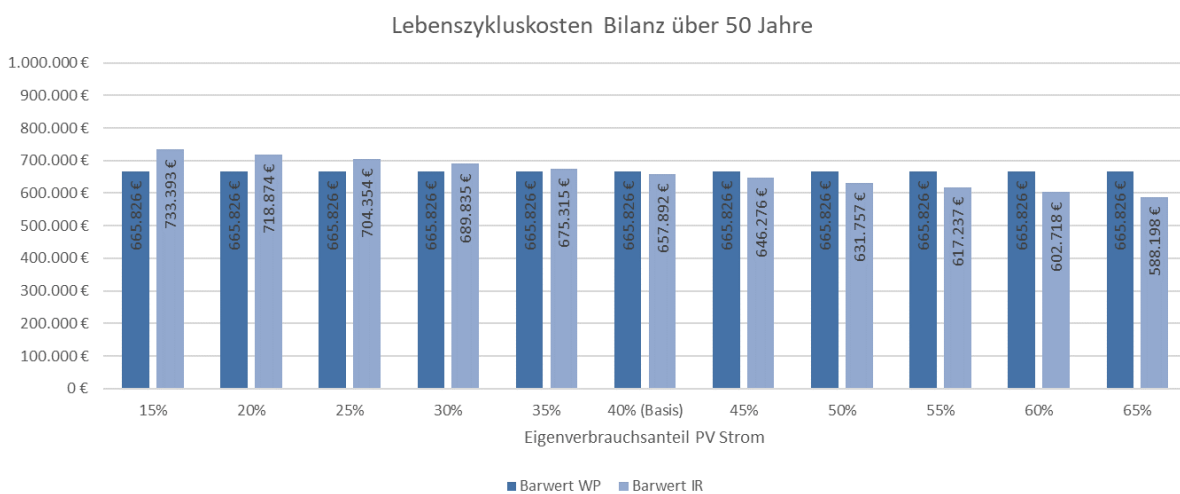


Abb. 150 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommenen Eigenverbrauchsraten des erzeugten PV- Stroms

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.

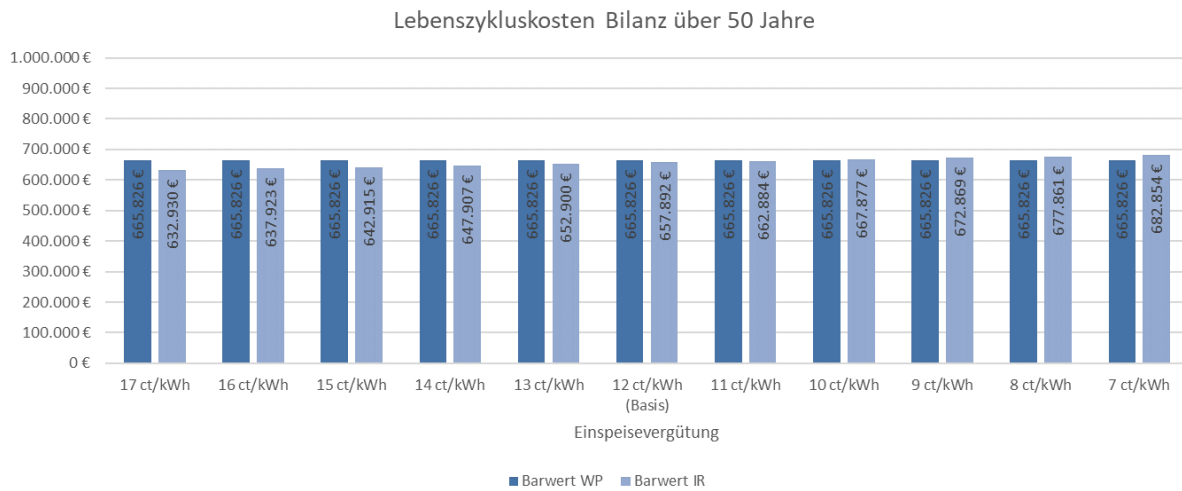


Abb. 151 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei unterschiedlich angenommener Einspeisevergütung

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-Heizungs-System und Wärmepumpen-System auf die ökonomische und ökologische Bilanz. Im realisierten Fall (Basis) wurden 56% der eingesparten Kosten in eine PV-Anlage investiert.

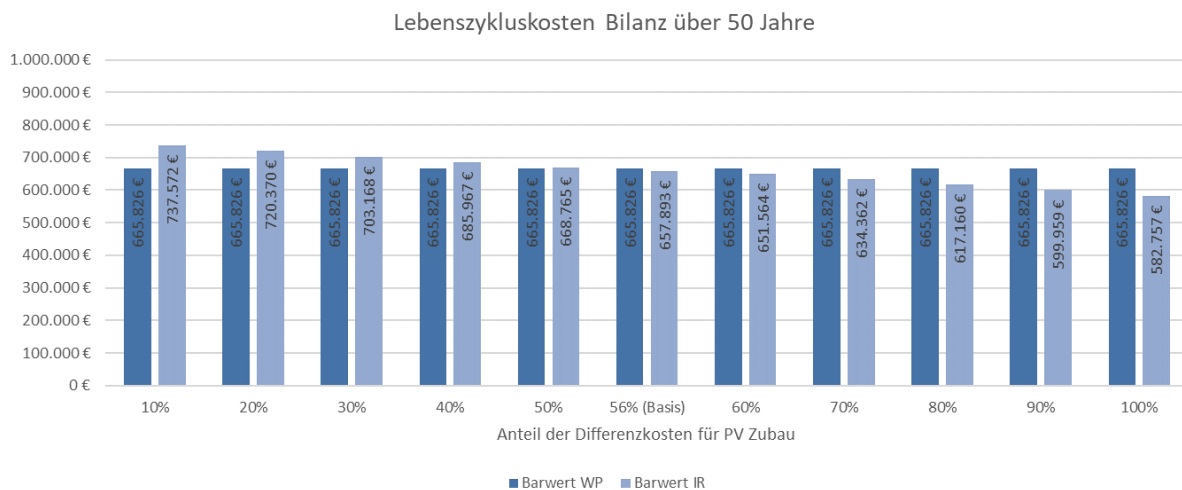


Abb. 152 Änderungen der Wirtschaftlichkeit durch unterschiedlich hohen Zubau von Photovoltaik in Abhängigkeit des Anteils an den Differenzkosten

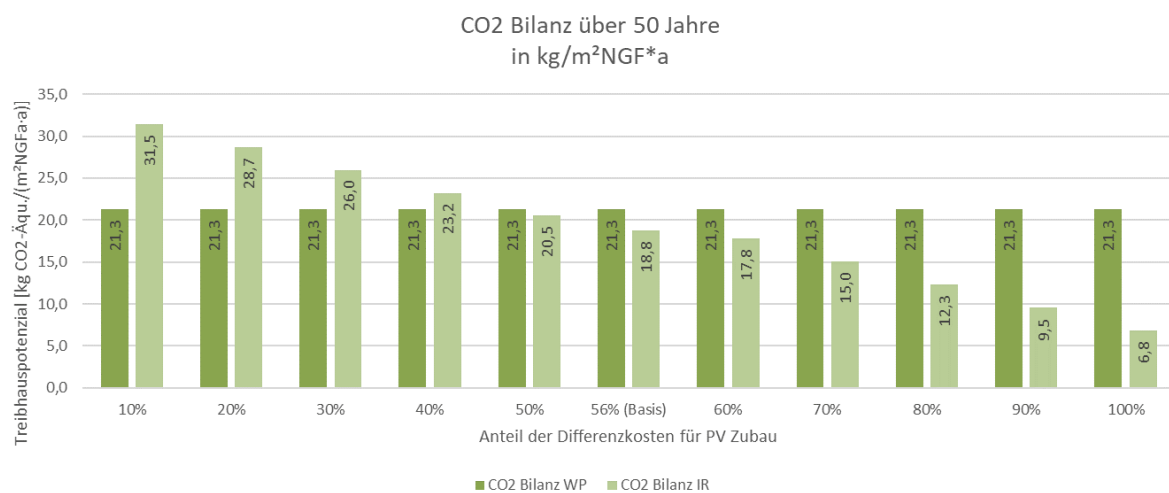


Abb. 153 Änderungen der CO2 Bilanz durch unterschiedlich hohen Zubau von Photovoltaik in Abhängigkeit des Anteils an den Differenzkosten

Bewertung der Parameter nach wirtschaftlichen Auswirkungen:

In Tabelle 40 werden die maximalen Änderungen 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 €
Normendenergiebedarf	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 40 Wirtschaftliche Auswirkungen der Parameteränderungen

Wie Tabelle 40 zeigt, 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 geringeren 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 - 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.

Bewertung der Parameter nach ökologischen Auswirkungen:

In Tabelle 41 werden die maximalen Änderungen 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
Normendenergiebedarf	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 41 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.

Änderungen der Gebäudegröße bei voller Investition der Differenzkosten zwischen Wärmepumpe und IR-Heizung in eine Photovoltaikanlage

In der folgenden Parameteruntersuchung wird die Gebäudegröße geändert. 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 pro 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.

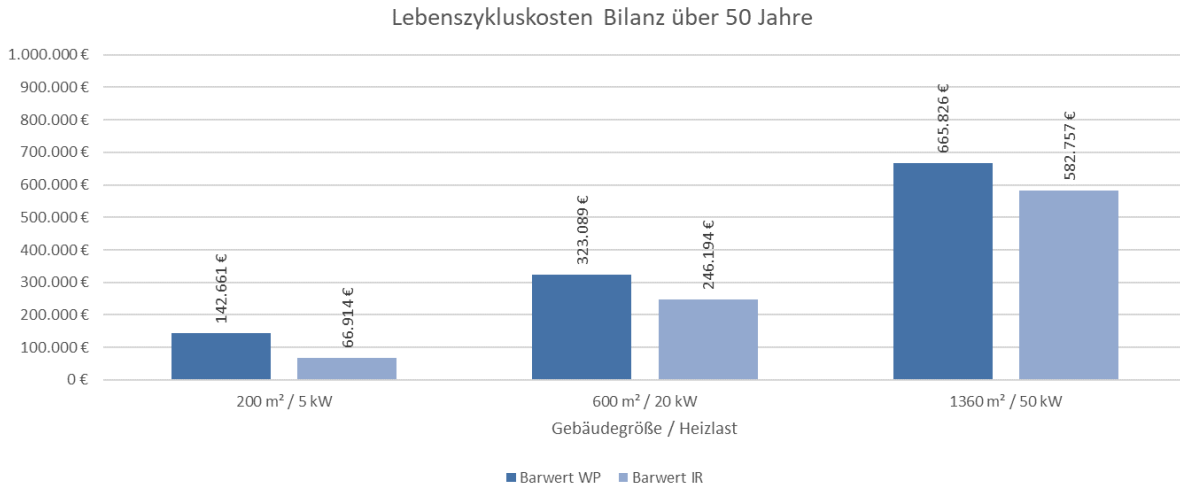


Abb. 154 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Verringerung der Gebäudegröße

	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%

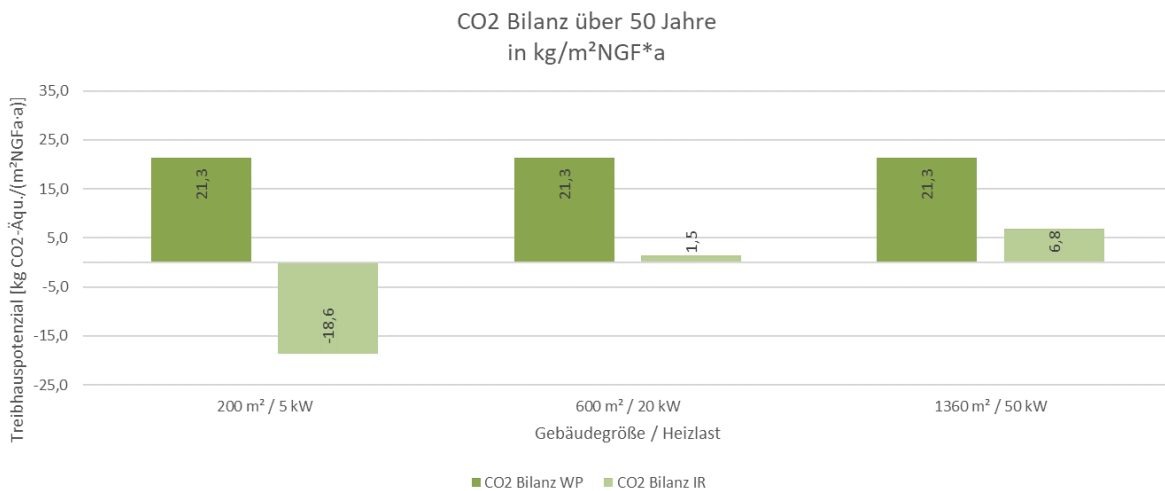


Abb. 155 Änderungen der CO2 Bilanz bei Verringerung der Gebäudegröße

	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
Abweichung IR+PV	-4088%	-1413%	-313%

Die Untersuchung zeigt, dass die wirtschaftlichen Vorteile einer IR-Heizung zunehmen, je kleiner das Gebäude und damit in diesem Fall der gesamte Energieumsatz ist. Die ökologischen Vorteile für die IR-Heizung nehmen bei kleinen Gebäuden auch zu. Im Vergleich zur Wärmepumpenvariante vergrößert sich die Differenz erheblich, da bei kleinen Gebäuden im Verhältnis eine größere PV-Anlage durch die Differenzkosten zugebaut werden kann.

Zubau von Photovoltaik bei der Wärmepumpenvariante

In der folgenden Parameteruntersuchung wird gezeigt, 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.

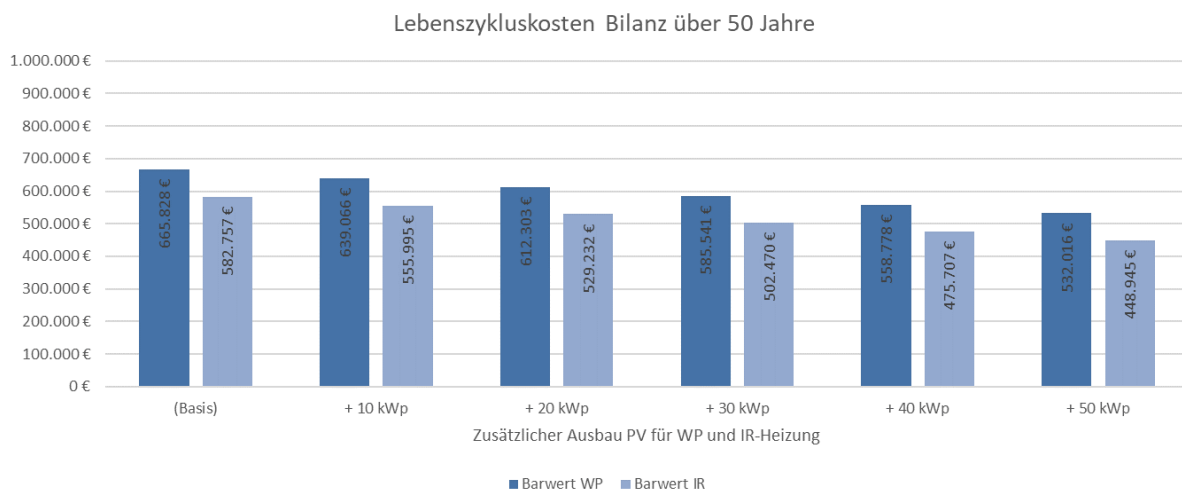


Abb. 156 Änderung der Wirtschaftlichkeit bei gleichmäßigem Zubau von Photovoltaik

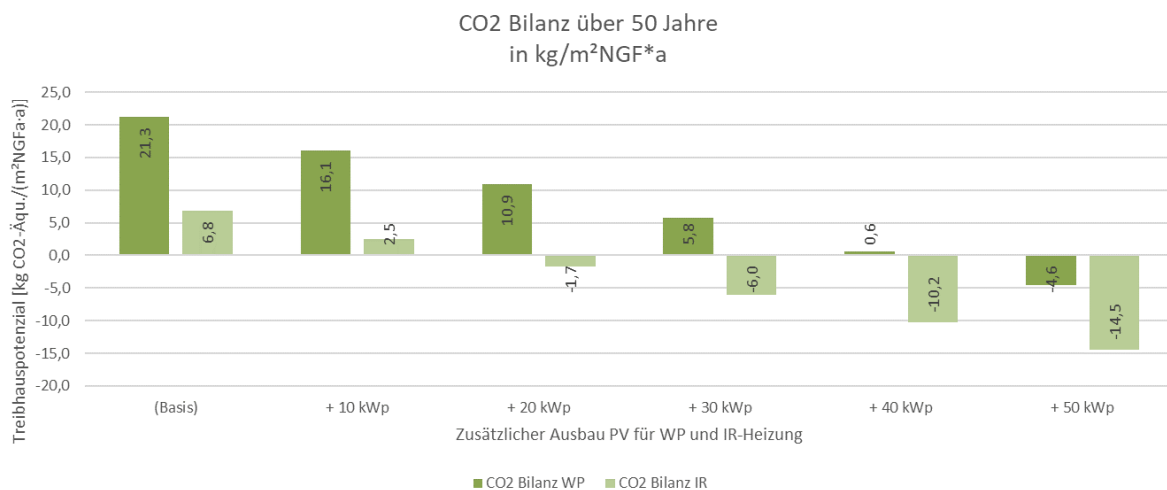


Abb. 157 Änderung der ökologischen Bilanz bei gleichmäßigem Zubau von Photovoltaik

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.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die ökologischen und ökonomischen Vorteile eines IR- Systems zunehmen, je kleiner und besser gedämmt, je geringer also der Energieumsatz ist. Die Einsatzgrenze für Wohngebäude liegt im Bereich 1500 – 2000 m², abhängig von der thermischen Qualität der Gebäudehülle und der möglichen zubaubaren PV- Anlagengröße. Zu beachten ist jedoch, 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.

5.3.7 Optimierung eines IR-Heizsystems durch PV und Speicher

Wie lässt sich das Infrarot-Heizsystem durch Einbindung von Photovoltaiksystemen und dezentraler Stromspeicher (Akkus) in ökologischer und ökonomischer Hinsicht optimieren?

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 Photovoltaik-Anlage, 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 Photovoltaik zu investieren.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass Photovoltaikanlagen für IR-Heizungssysteme ein elementarer Bestandteil sein müssen. Ähnlich 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).

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.

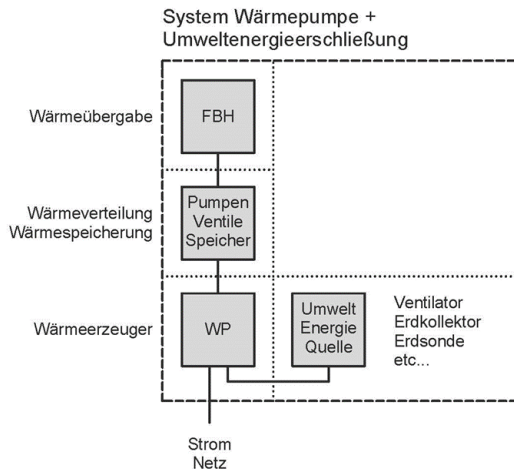


Abb. 158 System Wärmepumpe

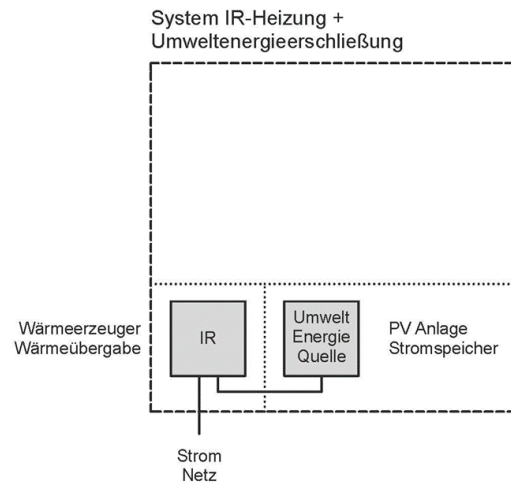


Abb. 159 System IR-PV Heizung

Es stellt sich nun die Frage, wie das ergänzende PV-System im 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 4000 kWh im Jahr benötigter Wärme ca. 2700 kWh aus der Umwelt bezieht, produziert die IR-Heizung in Kombination mit einer 10 kWp PV-Anlage zu gleichen oder sogar geringeren Investitionskosten ca. 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 es, 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 es, 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 im Sommer 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 Möglichkeit zwei und drei 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.

Erste Simulationen in „Polysun“ zeigen, dass dies mit einer wirtschaftlich möglichen PV- Anlagengröße und einer auf Eigenverbrauch optimierten Regelung der IR-Heizung möglich sein kann. Hier besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf, um die Regelung in der Praxis zu testen und zu optimieren.

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:

- Der Restenergiebezug der Heizung
- Der Restenergiebezug von Heizung und Warmwasserbereitung
- Der Restenergiebezug von Heizung, Warmwasserbereitung und Haushaltsstrom
- Oder zusätzlich noch der Netzstrombezug, der aus der 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.

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.

Welche Auswirkungen eine teilweise Umstellung der Gebäudebeheizung auf IR-Heizungen und auf die Netzinfrastruktur in Deutschland hat, muss noch untersucht werden. Hierbei ist auch die Frage der Warmwasserbereitung bei IR-Systemen zu klären. Bisher wurde bei der IR-Heizung immer 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.

Eine Umstellung der Gebäudebeheizung auf IR-Heizungen würde auch die Anforderungen an den Flächenbedarf für Photovoltaik-Anlagen erhöhen. Ob der notwendige zusätzliche Zubau von PV-Anlagen bei Einsatz von IR-Heizungen sozialverträglich machbar ist, muss noch geklärt werden. Aktuelle Untersuchungen (KIT 2017³⁴; ISE 2019³⁵; LUBW 2019³⁶) zeigen, dass in Deutschland vermutlich ausreichende Flächenpotenziale verfügbar sind.

³⁴ [Fath, 2017]

³⁵ [Wirth, 2019]

³⁶ [LUBW, 2019]

5.3.8 Können IR-Systeme eine Alternative zu WP-Systemen sein?

Infrarot-Heizsysteme fügen sich als strombasiertes Heizsystem gut in die generelle Entwicklung der Energiewende ein. Sie weisen erhebliche Vorteile in den Bereichen Installationsaufwand, Wartungsaufwand, Bedienbarkeit, Flexibilität und Rückbaubarkeit auf. Wie im Vorfeld erläutert, bietet die Infrarotheizung aufgrund ihrer sehr geringen Investitionskosten ein großes Potenzial, Kapital in die lokale Erzeugung von regenerativem Strom über Photovoltaikanlagen zu investieren. Die Ausstattung von sehr gut gedämmten, neugebauten Ein- und Mehrfamilienhäusern oder die thermische Sanierung und Umrüstung von Ein- und Mehrfamilienhäusern auf IR-PV- Systeme kann daher dazu beitragen, den Ausbau der regenerativ erzeugten Energie in Deutschland massiv voranzutreiben. Kleine Gebäude könnten mit ihren Energieüberschüssen andere Gebäude mitversorgen. Dabei würden die Hauseigentümer bei den Investitionskosten nicht stärker oder sogar geringer finanziell belastet, als bei der Umstellung auf Wärmepumpensysteme.

Wie sich eine teilweise Umstellung der Gebäudebeheizung auf IR-Heizungen auf die Netzinfrastruktur in Deutschland auswirken würde und ob der Ausbau der zusätzlich benötigten Photovoltaikflächen sozialverträglich machbar ist, muss noch untersucht werden. Nach aktuellen Studienergebnissen (KIT 2017³⁷; ISE 2019³⁸; LUBW 2019³⁹) sind die Flächenpotenziale dafür in Deutschland vermutlich ausreichend vorhanden.

³⁷ [Fath, 2017]

³⁸ [Wirth, 2019]

³⁹ [LUBW, 2019]

5.4 Fazit Berechnungen / Simulationen

3. Welche Einsparungen im Energiebedarf lassen sich durch die extrem an das Nutzerverhalten anpassbare Regelung bei IR-Heizungen erzielen?

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

4. Welche Übergabeverluste können durch Reduzierung der Wärmeverluste und geringerer Übertemperatur zur Berechnung angesetzt werden?

Die Laborraummessungen in Verbindung mit den Simulationsmodellen haben ergeben, dass Infrarotheizungssysteme gegenüber wassergeführten, im Heizestrich verlegten Fußbodenheizungen mindestens 50 % geringere Übergabeverluste haben. 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 heute 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 + Fußbodenheizungssystem. Diese Art der Regelung konnte jedoch noch nicht im Simulationsmodell abgebildet werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

6. Wie groß ist die effektive Differenz des Strombedarfs im Betrieb für die Wärmeversorgung von Räumen im Realbetrieb inklusive Hilfsenergie zwischen A: Infrarotheizsystem, B: Integriertem Direktstrom-Heizelement (Niedertemperatur) und C: Luftwärmepumpe und Fußbodenheizung?

Simulationen und Berechnungen auf Grundlage der Laborraummessungen ergeben einen Stromverbrauchsunterschied von ca. 3,1 bis 3,3 zwischen Wärmepumpen- und Infrarotheizungssystem. 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.

9. Wie stellt sich der Vergleich der gesamtökologischen Bewertung dar, in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung?

Aus ökologischer Sicht kann ein Infrarot-PV-System (in Abhängigkeit der Gebäudegröße und der Dämmqualität) gegenüber einem Luft-Wärmepumpensystem über einen Zeitraum von 50 Jahren deutliche Vorteile aufweisen. Die Kombination mit einer Photovoltaik-Anlage macht die IR-Heizung in der Jahresbilanz deutlich besser als die Wärmepumpenvariante.

Erste Untersuchungen in Richtung einer auf Eigenverbrauch optimierten Regelung der IR-Heizungen zeigen, dass es möglich ist, mit dem IR-PV- System in der Heizperiode den gleichen oder sogar geringeren Netzstrombezug zu erreichen, 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.

10. Wie stellt sich der Vergleich der gesamtökonomischen Bewertung dar, in einer Lebenszyklusbetrachtung über 50 Jahre, inklusive Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung?

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 IR-Heizung profitiert von ihren geringen Anschaffungskosten, der von der Photovoltaikanlage produzierte Strom hilft, die Betriebskosten der IR-Heizung zu senken. 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 eigen produzierten Strom gedeckt werden.

11. Bei welchen Randbedingungen bezüglich spezifischem Heizwärmebedarf, Gesamtwärmeumsatz und Stromkosten können IR-Heizsysteme Vorteile aufweisen?

Als Einsatzgrenze hat sich gezeigt, dass in sehr gut gedämmten ($< 30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ Jahresheizwärmebedarf) Wohngebäuden bis ca. 1500 m^2 - 2000 m^2 beheizter Wohnfläche eine IR-Heizung Vorteile in ökologischer und ökonomischer Sicht aufweisen kann. Dies ist jedoch immer von den genauen projektspezifischen Rahmenbedingungen abhängig. Je kleiner und besser gedämmt ein Haus ist, desto größer sind die wirtschaftlichen Vorteile eines IR-Heizsystems gegenüber einem Wärmepumpensystem.

12. Wie lässt sich das Infrarot-Heizsystem durch Einbindung von Photovoltaiksystemen und dezentraler Stromspeicher in ökologischer und ökonomischer Hinsicht optimieren?

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 als bei einem vergleichbaren Wärmepumpensystem zu erreichen.

Hier stellt sich also die Grundsatzfrage: Bringt es größere ökonomische und ökologische Vorteile, mit dem vorhandenen Kapital den Energieverbrauch durch effiziente Wärmezeugung (Wärmepumpe) zu reduzieren, oder mit dem Kapital die lokale regenerative Energieproduktion (Photovoltaik) zu erhöhen.

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.

13. Können IR-Heizungen zur Gebäudebeheizung unter bestimmten Rahmenbedingungen eine sinnvolle Alternative zu Wärmepumpensystemen sein?

Die Ausstattung von sehr gut gedämmten neu gebauten Ein- und Mehrfamilienhäusern oder die thermische Sanierung und Umrüstung von Ein- und Mehrfamilienhäusern auf IR-PV-Systeme kann dazu beitragen, den Ausbau der regenerativ erzeugten Energie in Deutschland massiv voranzutreiben. Kleine Gebäude könnten mit ihren Energieüberschüssen große Gebäude mit Wärmepumpen-Systemen mit Strom mitversorgen. Dabei würden die Hauseigentümer bei den Investitionskosten nicht stärker oder sogar geringer finanziell belastet, als bei der Umstellung auf Wärmepumpensysteme.

Wie sich eine teilweise Umstellung der Gebäudebeheizung auf IR-Heizungen auf die Netzinfrastruktur in Deutschland auswirken würde, und ob der Ausbau der zusätzlich benötigten Photovoltaikflächen sozialverträglich machbar ist, muss noch untersucht werden. Nach aktuellen Studienergebnissen sind die Flächenpotenziale dafür in Deutschland vermutlich ausreichend vorhanden.

6 Fazit / Ausblick:

Grundlegende Fragestellungen zum Infrarotheizungssystem konnten im Projekt IR-Bau erfolgreich beantwortet werden. Es hat sich gezeigt, dass das Infrarotheizungssystem aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften Vorteile gegenüber Fußbodenheizungssystemen bietet, die eine Reduzierung der Übergabeverluste bewirken. Bei optimierter Regelung nach operativer Temperatur reduziert sich so der Erzeugernutzwärmebedarf bei IR-Heizungen um ca. 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 Infrarotheizung eine Photovoltaikanlage zuzubauen erhält man ein System, das zwar ineffizienter Wärme erzeugt, jedoch dafür eine große Menge regenerativ erzeugten Strom produzieren kann. Diese lokal erzeugte Umweltenergie kann teilweise direkt von der IR-Heizung genutzt werden. Infrarotheizungssysteme sollten daher immer, ähnlich wie bei einer Wärmepumpe, als eine Einheit aus Wärmeerzeuger (Infrarotheizung) 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.

In Kombination mit einer Photovoltaikanlage können Infrarotheizungssysteme so 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 zeigte sich bei der begleitenden Nutzerbefragung im K76, dass die Bewohner das IR-Heizungssystem als behaglich und gut bedienbar empfinden.

Die Einsatzgrenze von Infrarotheizungen liegt bei sehr gut gedämmten Wohngebäuden (< 30 kWh/m²a Jahresheizwärmebedarf) bei ca. 1500 m² - 2000 m² beheizter Wohnfläche. Dies ist jedoch immer von den genauen projektspezifischen Rahmenbedingungen 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 neu gebauten Ein- und Mehrfamilienhäusern oder die thermische Sanierung und Umrüstung von Ein- und Mehrfamilienhäusern auf IR-PV-Systeme dazu beitragen, den Ausbau der regenerativ erzeugten Energie in Deutschland massiv voranzutreiben. Kleine Gebäude könnten mit ihren Energieüberschüssen im Sommer auch große Gebäude mit Wärmepumpen-Systemen 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, und ob der Ausbau der zusätzlich benötigten Photovoltaikflächen sozialverträglich machbar ist, muss noch untersucht werden. Nach aktuellen Studienergebnissen sind die Flächenpotenziale dafür in Deutschland ausreichend vorhanden.

Im Laufe des Projekts sind nachfolgende Fragestellungen entstanden, deren Beantwortung die Systemeffizienz, die Behaglichkeit, die Netzdienlichkeit und den Planungsprozess eines IR-Heizsystems optimieren können:

Wie wirken sich verschiedene Gebäudetypologien auf die ökologische und ökonomische Effizienz eines IR-Heizungssystems aus?

Im Projekt IR-Bau wurde das Gebäude K76 messtechnisch begleitet. Die Auswertung hat gezeigt, dass das IR-Heizungssystem im K76 sowohl ökologische als auch in 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 Angestellten und damit das Wärmebedarfsprofil deckt sich im Tagesverlauf mit den Zeiten möglicher solarer Wärmegegewinne 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 / -Bereiche kann mit IR-Heizungen eine lokale Behaglichkeit hergestellt werden ohne den gesamten Raum zu erwärmen.
- IR-Heizungen bieten größtmögliche Flexibilität bei späterem Umbau / Rückbau. In temporären Bauten reduzieren sich die Kosten für Auf- und Rückbau. Nach dem Rückbau lassen sich IR-Heizungen einfach weiter nutzen.

Wie erfolgt bei einer IR-Heizung sinnvollerweise die Warmwasserbereitung?

Bei zentralen Wärmeerzeugern erfolgt Wärme- und Warmwasserbereitung in der Regel in einem System. Bei IR-Heizungen ist dies nicht möglich. Im Projekt K76 werden zur Warmwasserbereitung 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.

Wie lässt sich die Netzdienlichkeit eines IR-Systems optimieren?

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.

Wie wirken sich die materialspezifischen und konstruktiven Eigenschaften der IR-Heizelemente auf den Strahlungswirkungsgrad und die Effizienz im Betrieb aus?

Untersuchungen im Projekt IR-Bau haben gezeigt, dass die am Markt verfügbaren IR-Heizungen, auch durch das Fehlen einer Norm, große Unterschiede in den Strahlungseigenschaften aufweisen. Wie würde sich der Einsatz von optimierten Infrarotheizungsmodulen auf die Effizienz im Betrieb auswirken?

Welche Kriterien sind für die Entwicklung eines Qualitätsstandards entscheidend, um die am Markt angebotenen IR-Heizungssysteme miteinander vergleichbar zu machen?

Kriterien wären hier zum Beispiel: Strahlungswirkungsgrad, Aufheizzeit, Recyclingfähigkeit, Regelbarkeit, Montageoptionen, Betriebstemperatur, Maximaltemperatur, Gewicht etc...

Welches Fachwissen ist für den Entscheidungsprozess, die Planung und die Realisierung eines IR-Heizkonzepts für Planer und Bauherren entscheidend?

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 Sicherung, Kabelführung, Leitungen zur Regelung und Verbrauchserfassung, zentrale oder dezentrale Heizungssteuerung, Position und Art der Sensoren zur Raumregelung ect.

Wie lässt sich die thermische Behaglichkeit im Raum beim Einsatz von IR-Heizungen optimieren?

Das Projekt IR-Bau hat gezeigt, dass für einen 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 Umständen zu Unbehaglichkeit. Es ist zum Beispiel zu klären, ob sich durch Verminderung der Oberflächentemperatur und gleichzeitig größerer Heizfläche die Behaglichkeit bei deckenaufgehängten IR-Modulen verbessert und ob sich die Effizienz bei wandaufgehängten IR-Heizungen durch konstruktive Änderungen am Element verbessern lässt.

Welche Auswirkungen hätte ein vermehrter Einsatz von IR-Heizungen auf das Gesamtenergiesystem in Deutschland?

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 ggf. 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.

Literaturverzeichnis:

[DIN EN ISO 7730]

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]

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]

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]

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 V 18599-2]

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 EN ISO 7726]

DIN EN ISO 7726: „Umgebungs-klima Instrumente zur Messung physikalischer Größen“
Deutsches Institut für Normung e. V.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001

[Erhorn, 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]

Faith, Karoline: "Technical and economic potential for photovoltaic systems on buildings"; S. 250 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

[Hausladen, Meyer, 1999]

Hausladen, Gerhard; Meyer, Christoph: „Optimierung der Anordnung von Heizflächen und Lüftungselementen mittels Strömungssimulation“
Forschungsbericht der Universität Kassel, Kassel 1999

[Heschl, 2016]

Heschl, Christian; Langerwisch, St.; Brenner, M.: Untersuchungsergebnisse zur Wärmeabgabe von Redwell Heizungen.
FH-Burgenland GmbH, Pinkafeld 2016

[Kosack, 2009]

Kosack, Peter: "Beispielhafte Vergleichsmessung zwischen Infrarotstrahlungsheizung und Gasheizung im Altbaubereich",
Forschungsbericht der TU Kaiserslautern, Kaiserslautern 2015

[Klauz, 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 B., Schreiber S., Stark T.: "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

[Pistohl, 2007]

Pisthol, Wolfram: „Handbuch der Gebäudetechnik“
Werner Verlag – Wolters Kluwer Deutschland GmbH, Köln, 2007

[Recknagel, Sprenger, Albers, 2019]

Recknagel, Hermann., Sprenger, E., 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

[VDI 4650, Blatt1]

VDI 4650: „Berechnung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen“
VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG)
Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019

[von Euw, 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

[Wirth, 2019]

Wirth, Harry: „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“; S.39
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2019

[www.ig-infrared.com, 09/2019]

www.ig-infrared.com/de/faq.html
IG Infrarot Deutschland e.V.
Stand: 09/2019

[Zimmermann, Zimmermann 2012]

Zimmermann, Thomas; Zimmermann, Martina;: „Lehrbuch der Infrarotthermographie“
Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2012

Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1 Vergleich Material- und Installationsaufwand WP/IR	18
Abb. 2 Flächenbedarf für 1 kW Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Oberflächen- temperatur des IR-Systems (Temperatur der gegenüberliegenden Fläche 20 °C)	26
Abb. 3 Ausbreitung der IR-Strahlung im Halbraum unter einer IR-Heizungsplatte	28
Abb. 4 Strahlungsleistung im Raum	29
Abb. 5 Abnahme der Strahlungsleistung / m ² über die Entfernung	29
Abb. 6 PPD in Abhängigkeit von PMV [DIN 7730, S.9].....	31
Abb. 7 Behagliche Raumtemperatur in Abhängigkeit von Aktivität (in „met“) und	32
Abb. 8 Zone der Behaglichkeit in Abhängigkeit zur Lufttemperatur und der Temperatur der abstrahlenden Flächen.....	33
Abb. 9 Schematischer Aufbau des Globethermometers	34
Abb. 10 Bilanzgrenze am Beispiel einer Sole-Wasser-Wärmepumpenheizungsanlage	36
Abb. 11 Süd / West Ansicht K76	40
Abb. 12 Grundriss K76 Thermische Hülle [werk.um architekten, darmstadt].....	41
Abb. 13 Infrarotheizungen K76 links und rechts sowie Lüftungsleitung	42
Abb. 14 Randbedingungen zur EnEV-Berechnung.....	44
Abb. 15 Ergebnisse der EnEV-Berechnung nach Fertigstellung.....	44
Abb. 16 Wohnungsweiser Strombedarf für Warmwasser HP 2017/2018	47
Abb. 17 Wohnungsweiser Strombedarf für Lüftung HP 2017/2018	47
Abb. 18 Wohnungsweiser Strombedarf für IR-Heizung HP 2017/2018	48
Abb. 19 Detaillierte, wohnungsweise Übersicht der Verbrauchsdaten.....	50
Abb. 20 Positionierung Funksensoren	51
Abb. 21 Vergleich des Strombedarfs für Warmwasser pro Jahr	52
Abb. 22 Vergleich des Strombedarfs für Lüftung pro Jahr	52
Abb. 23 Vergleich des Strombedarfs für Heizung pro Jahr	52
Abb. 24 Vergleich der spezifischen Verbräuche HP 2017/2018 / HP 2018/2019	53
Abb. 25 Lufttemperaturen im Verhältnis zum Heizungsstromverbrauch	55
Abb. 26 Lastgang K76 Winter / 21. Dezember 2018, 0-24 Uhr [discovery.com].....	57
Abb. 27 Lastgang K76 Frühling / 21. März 2018, 0-24 Uhr [discovery.com].....	57
Abb. 28 Lastgang K76 Sommer / 21. Juni 2018, 0-24 Uhr [discovery.com].....	57
Abb. 29 Gemessener PV-Stromertrag / IR-Stromverbrauch K76 HP 2018/2019.....	58
Abb. 30 Theoretisch mögliche Steigerung des Eigenverbrauchs durch einen 66 kWh Stromspeicher	59
Abb. 31 Konzeption Nutzerbefragung - Anonymisierung	64
Abb. 32 Konzeption Nutzerbefragung - Teilnehmer	66
Abb. 33 Konzeption Nutzerbefragung - Onlinefragebogen	68
Abb. 34 Auswertung Nutzerbefragung - Behaglich	69
Abb. 35 Auswertung Nutzerbefragung - Bedienbarkeit	70
Abb. 36 Gemessene Lufttemperaturen K76 Heizperiode 2018 / 2019.....	74
Abb. 37 Südansicht Gebäude 6	80
Abb. 38 Grundriss Gebäude 6 mit Lage der 4 Laborräume	81
Abb. 39 Querschnitt Gebäude 6 mit Lage der Laborräume	81
Abb. 40 Laborraum T1 mit wassergeführter Fußbodenheizung	82
Abb. 41 Hydraulikschema Wärmepumpen-System Laborräume Ehoch4	83
Abb. 42 Technikraum für Wärmepumpe mit Pufferspeicher	83
Abb. 43 Luft/Wasser-Wärmepumpe	83
Abb. 44 Laborraum T2 mit elektrischer Fußbodenheizung	84
Abb. 45 Laborraum T3 mit IR-Heizung an der Decke	85

Abb. 46 Laborraum T4 mit IR-Heizung an der Wand	85
Abb. 47 Südfassade Gebäude 6 mit Einzellüftern.....	86
Abb. 48 Messtechnikschema Laborräume Ehoch 4.....	89
Abb. 49 Anordnung der IR-Sensoren zur Messung der durchschnittlichen Oberflächentemperatur und zur Berechnung der operativen Raumtemperatur	89
Abb. 50 Anordnung der 16 IR-Sensoren in Laborraum T3.....	90
Abb. 51 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2017/2018	93
Abb. 52 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2017/2018.....	93
Abb. 53 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2017/2018.....	94
Abb. 54 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2017/2018.....	94
Abb. 55 Wärmeverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2017/2018.....	95
Abb. 56 Stromverbrauch Raum T2, Raum T3 und Raum T4 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2017/2018.....	95
Abb. 57 Lufttemperaturschichtung Raum T1-T4, Messphase 1 HP 2017/18.....	97
Abb. 58 Mittlere Dauer der Heizphasen Raum T1-T4 HP 2017/2018	98
Abb. 59 Unterschiede in der Einschalthäufigkeit bei E-FBH und IR-Heizung bei unterschiedlicher Hysterese	98
Abb. 60 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2018/2019	99
Abb. 61 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1, Heizperiode 2018/2019	99
Abb. 62 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2018/2019	100
Abb. 63 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 2, Heizperiode 2018/2019	100
Abb. 64 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2018/2019	101
Abb. 65 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 3, Heizperiode 2018/2019	101
Abb. 66 Wärmeverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 4, Heizperiode 2018/2019	102
Abb. 67 Stromverbrauch Raum T2 und Raum T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 4, Heizperiode 2018/2019	102
Abb. 68 Wärmeverbrauch Raum T1-T3, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019	103
Abb. 69 Wärmeverbrauch Raum T2 und T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019	103
Abb. 70 Stromverbrauch Raum T1-T3, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019	104
Abb. 71 Stromverbrauch Raum T2 und T3 im Verhältnis zu Raum T1, Messphase 1-4, Heizperiode 2018/2019	104
Abb. 72 Gemessene und berechnete operative Temperatur bei Betrieb einer IR-Heizung in Laborraum T3 im Vergleich	105
Abb. 73 Übersicht der Messphasen in Heizperiode 2018 / 2019	106
Abb. 74 Vergleich der nächtlichen Luft – und Oberflächentemperaturen zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) in Messphase 3 HP 2018/2019.....	107
Abb. 75 Innenoberflächentemperaturen Raum T1 (WP/FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, Messphase 3, HP 2018/2019	108

Abb. 76 Verlauf der berechneten operativen Temperaturen Raum T1 (WP/FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, Messphase 3, HP 2018/2019	108
Abb. 77 Operative Temperaturen nachts, Messphase 3 HP 18/19	109
Abb. 78 Operative Temperaturen tagsüber, Messphase 3 HP 18/19	109
Abb. 79 Vergleich der nächtlichen Luft – und Oberflächentemperaturen zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke) über die gesamte HP 2018/2019	109
Abb. 80 Innenoberflächentemperaturen Raum T1 (FBH), Raum T3 (IR-Decke) im Vergleich, gesamte HP 2018/2019.....	110
Abb. 81 Vergleich der operativen Temperaturen nachts und tagsüber, gesamte HP 2018 / 2019	110
Abb. 82 Temperaturverlauf der Oberflächentemperaturen auf der Vorderseite der IR-Heizung und der darüber liegenden Deckenflächen.	116
Abb. 83 Aufteilung der Differenzen der Transmissionswärmeverluste von Raum T1 (WP/FBH) im Verhältnis zu Raum T3 IR-Decke in Messphase 3 HP 18/19	118
Abb. 84 Dämmsituation der IR-Heizung und der FBH in den Laborräumen in Ehoch4 im Vergleich.	118
Abb. 85 Verlauf der Lufttemperaturen in Raum T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke) bei Regelung nach operativer Temperatur, MP 08.03.19 – 14.03.2019.....	121
Abb. 86 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T1 (WP/FBH) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.2018.....	122
Abb. 87 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T2 (E-FBH) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.2018.....	123
Abb. 88 Verlauf der Luft- / Globetemperatur und der Heizleistung in Raum T3 (IR-Decke) während der Aufheizphase 03.12.18 – 04.12.18.....	123
Abb. 89 Verlauf der Globetemperaturen in Raum T1 - T3 während intermittierendem Betrieb 14.-19.12.2018	124
Abb. 90 Durchschnittliche Globetemperaturen während intermittierendem Betrieb vom 14.-19.12.2018	125
Abb. 91 Absolute Wärmeverbräuche während intermittierendem Betrieb 14-19.12.2018 ...	125
Abb. 92 Verhältnis der Wärmeverbräuche während intermittierendem Betrieb 14.-19.12.2018	126
Abb. 93 Versuchsaufbau Abstrahlwinkel.....	127
Abb. 94 Aufsicht Versuchsaufbau Abstrahlwinkel	127
Abb. 95 Bild des Holzschekes mit der IR-Kamera aufgenommen	128
Abb. 96 Temperaturverteilung auf dem Holzschekel	128
Abb. 97 Abstrahlwinkel IR-Heizung.....	128
Abb. 98 Gemessener Abstrahlwinkel IR-Heizung im Vergleich zur Simulation der FH Burgenland (rot)	129
Abb. 99 Simulation der Verteilung der Strahlungstemperatur einer IR-Heizung, Seitenansicht	129
Abb. 100 Vertikale Aufhängung.....	130
Abb. 101 Horizontale Aufhängung an der Decke	131
Abb. 102 Temperatursensoren Vorderseite Abb. 103 Temperatursensoren Rückseite	132
Abb. 104 Strahlungswirkungsgrade untersuchter IR-Heizungen	133
Abb. 105 Verhältnisse von Vorder- zu Rückseitentemperatur bei untersuchten IR-Heizungen	134
Abb. 106 Optimierter Aufbau einer IR-Heizung.....	135
Abb. 107 Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit verschiedener IR-Heizungen bei Deckenaufhängung	136
Abb. 108 3D Darstellung der Laborräume in Ehoch4 aus IDA ICE	144
Abb. 109 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 1 (6 Tage/im Mittel 4,5°C)	145
Abb. 110 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 1	145

Abb. 111 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 2 (11 Tage/im Mittel 11,0°C)	146
Abb. 112 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 2	146
Abb. 113 Gemessene Außenlufttemperatur Validierungsphase 3 (5 Tage / im Mittel 7,2 °C)	146
Abb. 114 Gemessene Operative Temperatur T3 (IR-Decke), Validierungsphase 3	146
Abb. 115 Gemessene absolute Wärme- bzw. Stromverbräuche Laborraum T3 (IR-Heizung Decke) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den simulierten Werten	147
Abb. 116 Gemessene absolute Wärmeverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über	147
Abb. 117 Gemessene absolute Stromverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den simulierten Werten	148
Abb. 118 Gemessene und simulierte Level 1 Arbeitszahlen der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich	149
Abb. 119 Gemessene und simulierte Level 3 Arbeitszahlen der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich	149
Abb. 120 Differenzen im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke) gemessen und simuliert im Vergleich	150
Abb. 121 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen Laborraum T1 (WP/FBH) / Laborraum T3 (IR-Decke) Validierungsphase 1 im Vergleich	151
Abb. 122 Verlauf der simulierten Lufttemperaturen Laborraum T1 (WP/FBH) / Laborraum T3 (IR-Decke) Validierungsphase 1 im Vergleich	152
Abb. 123 Verlauf der gemessenen Temperaturen Aufheizphase IR-Heizung	152
Abb. 124 Verlauf der simulierten Temperaturen Aufheizphase IR-Heizung	153
Abb. 125 Vergleich der simulierten Innenoberflächentemperaturen T1 (WP/FBH) / T3 (IR- Decke)	153
Abb. 126 Absoluter Wärmeverbrauch Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert	154
Abb. 127 Absoluter Stromverbrauch Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19, gemessen / simuliert	155
Abb. 128 Absoluter Strom / Wärmeverbrauch Laborraum T3 (IR-Decke), MP 1-4 HP 18/19,	156
Abb. 129 Absolute Verbrauchswerte Strom / Wärme Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR- Decke) HP 18/19 gemessen / simuliert	157
Abb. 130 Differenzen Strom / Wärme Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke), HP 18/19 gemessen / simuliert	158
Abb. 131 Absolute Verbrauchswerte Jahressimulation Laborräume Ehoch4 HP 18/19	158
Abb. 132 Verhältnisse der simulierten Jahresverbrauchswerte Laborräume Ehoch4 HP 18/19	159
Abb. 133 3D Darstellung der simulierten Laborräume aus IDA ICE	161
Abb. 134 3D Darstellung der vielfältigen Laborräume aus IDA ICE	162
Abb. 135 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen während intermittierendem Betrieb bei gleichem Start der Vorheizzeit	168
Abb. 136 Verlauf der simulierten operativen Temperaturen während intermittierendem Betrieb bei früherem Start der Vorheizzeit für die Fußbodenheizung	169
Abb. 137 3D Darstellung der simulierten	169
Abb. 138 Vergleich Ökobilanz K76 WP / IR KG 300 und KG 400, IR-Variante ohne PV	171
Abb. 139 Vergleich Gesamt-Ökobilanz K76 WP / IR , IR-Variante ohne PV	172
Abb. 140 Vergleich Ökobilanz K76 WP / IR KG 300 und KG 400, IR-Variante mit PV	172
Abb. 141 Vergleich Gesamt-Ökobilanz K76 WP / IR , IR-Variante mit PV	173
Abb. 142 Vergleich Wirtschaftlichkeit K76 WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante ohne PV	175

Abb. 143 Vergleich Wirtschaftlichkeit K76 WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre , IR-Variante mit PV	175
Abb. 144 Vergleich Wirtschaftlichkeit 600 m ² WHG WP / IR nach VDI 2067 über 50 Jahre, IR-Variante mit PV.....	176
Abb. 145 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Abweichung vom Endenergiebedarf	178
Abb. 146 Änderungen der CO2 Bilanz bei Abweichung vom Endenergiebedarf	178
Abb. 147 Änderungen der Wirtschaftlichkeit bei Änderung der Effizienz der WP	179
Abb. 148 Änderungen der CO2 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 Eigenverbrauchsrate des 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 CO2 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 CO2 Bilanz bei Verringerung der Gebäudegröße	185
Abb. 156 Änderung der Wirtschaftlichkeit bei gleichmäßigen Zubau von Photovoltaik	186
Abb. 157 Änderung der ökologischen Bilanz bei gleichmäßigen Zubau von Photovoltaik...	186
Abb. 158 System Wärmepumpe Abb. 159 System IR-PV Heizung.....	189

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1 Mit welcher Methodik wird welche Forschungsfrage beantwortet	21
Tabelle 2 Fragestellungen Forschungsstrang Wissenschaftliche Begleitforschung K76	39
Tabelle 3 Endenergiebedarf K76 nach EnEV-Berechnung	45
Tabelle 4 Vergleich Endenergieverbrauch K76 nach EnEV / HP 2017/2018	48
Tabelle 5 Vergleich Endenergieverbrauch K76 nach EnEV / HP 2018/2019	53
Tabelle 6 Vergleich Endenergieverbrauch K76 berechnet / gemessen witterungsbereinigt ..	54
Tabelle 7 gemessene Innenoberflächentemperaturen K76	73
Tabelle 8 Fragestellungen Forschungsstrang Laborräume Ehoch4	79
Tabelle 9 Nächtliche Lüftungswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	112
Tabelle 10 Nächtliche Lüftungswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	112
Tabelle 11 Nächtliche Infiltrationswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	112
Tabelle 12 Nächtliche Infiltrationswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	112
Tabelle 13 Nächtliche Transmissionswärmeverluste Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	113
Tabelle 14 Nächtliche Transmissionswärmeverluste Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	113
Tabelle 15 Transmissionswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	114
Tabelle 16 Transmissionswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	114
Tabelle 17 Lüftungswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	114
Tabelle 18 Lüftungswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	114
Tabelle 19 Infiltrationswärmeverluste am Tag Raum T1 (WP/FBH), Messphase 3, HP 18/19	115
Tabelle 20 Infiltrationswärmeverluste am Tag Raum T3 (IR-Decke), Messphase 3, HP 18/19	115
Tabelle 21 Berechnete Differenzen im Wärmeverbrauch zwischen Raum T1 (WP/FBH) und Raum T3 (IR-Decke)	115
Tabelle 22 Fragestellungen Forschungsstrang Berechnungen / Simulationen	143
Tabelle 23 Abweichung der simulierten Wärme- und Stromverbräuche in Laborraum T3 (IR- Heizung Decke) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	147
Tabelle 24 Abweichung der simulierten Wärmeverbräuche Laborraum T3 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	148
Tabelle 25 Abweichung der simulierten Stromverbräuche Laborraum T1 (WP/FBH) über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	148
Tabelle 26 Abweichung der simulierten Level 1 Arbeitszahl der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	149
Tabelle 27 Abweichung der simulierten Level 3 Arbeitszahl der Wärmepumpe über die Validierungsphasen 1-3 im Vergleich zu den gemessenen Werten	150
Tabelle 28 Abweichungen der Differenzen im Stromverbrauch zwischen Laborraum T1 (WP/FBH) und Laborraum T3 (IR-Decke) gemessen und simuliert im Vergleich.	150
Tabelle 29 Abweichung der simulierten von den gemessenen Wärmeverbrauchswerten Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19	154

Tabelle 30 Abweichung der simulierten von den gemessenen Stromverbrauchswerten Laborraum T1 (WP/FBH), MP 1-4 HP 18/19	155
Tabelle 31 Abweichung der simulierten von den gemessenen Stromverbrauchswerten Laborraum T3 (IR-Decke), MP 1-4 HP 18/19	156
Tabelle 32 Abweichung der simulierten von den gemessenen Gesamt-Wärme- und Stromverbrauchswerten Laborräume T1 (WP/FBH) / T3 (IR-Decke), HP 18/19.....	157
Tabelle 33 Simulierte Verbrauchsunterschiede.....	161
Tabelle 34 Simulierte Verbrauchsunterschiede.....	162
Tabelle 35 Berechnung der Übergabeverluste nach DIN 18599-5 - 2016	163
Tabelle 36 Berechnung der Übergabeverluste nach DIN 18599-5 - 2011	165
Tabelle 37 Ergebnisse der EnEV-Berechnung der Laborräume in Ehoch4 Gebäudebestand	166
Tabelle 38 Ergebnisse der EnEV-Berechnung der Laborräume in Ehoch4 Verbesserte Dämmung / optimierte Technik	167
Tabelle 39 Simulierte Verbrauchsunterschiede.....	169
Tabelle 40 Wirtschaftliche Auswirkungen der Parameteränderungen	183
Tabelle 41 Ökologische Auswirkungen der Parameteränderungen	184

Anhang:

Kostenberechnung Wärmepumpen Systeme

Ökobilanz Infrarotheizung

Fragebogen Nutzerbefragung K76 lang

Fragebogen Nutzerbefragung K76 kurz

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 Skt	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 Skt	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 €

Projektbericht

Ökobilanzstudie einer Infrarotheizung

Datum 25/09/2019

Auftraggeber: Hochschule Konstanz
Alfred-Wachtel-Straße 8
D-78462 Konstanz

Erstellt von: Cristina Paz
GreenDelta GmbH, Berlin
paz@greendelta.com

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Produktbeschreibung	3
3	Modellierung.....	3
3.1	A1-A3.....	3
3.2	C4 und D	4
3.3	Glasplatte.....	6
4	Ergebnisse	6
5	Interpretation	6
6	Empfehlungen	7
7	Annex I	9

1 Einleitung

GreenDelta GmbH hat eine Ökobilanzstudie von einem Infrartheizungskörper für die Hochschule Konstanz durchgeführt. In diesem Bericht wird die Modellierung des Heizkörpers erläutert und die Ergebnisse der Studie präsentiert.

Die Open Source Software openLCA, unter Verwendung von den Datenbanken GaBi und ÖkobaDat, wurde verwendet. Daten aus veröffentlichten EPDs wurden auch berücksichtigt.

Für die Erstellung der Ökobilanz wurden die Indikatoren und Angaben gemäß ÖkobaDat (Tabellen 5 und 6) genutzt, entlang folgender Module:

- A1: Rohstoffbereitstellung
- A2: Transport
- A3: Herstellung
- C4: Beseitigung
- D: Wiederverwertungs- Rückgewinnungs- und Recyclingpotential

2 Produktbeschreibung

Die deklarierte Einheit ist eine Infrartheizung für Innenräume mit 1kW Leistung. Diese besteht hauptsächlich aus einer Metallplatte (Variante 1.a) oder Glasplatte (Variante 1.b), einem metallischen Rückblech und Elektronik. Die Ökobilanz wurde für die Varianten 1.a und 1.b durchgeführt.

3 Modellierung

3.1 A1-A3

Das Modul A1 enthält die verwendeten Werkstoffe für die Herstellung der Infrartheizung. Eine Materialliste mit den Bestandteilen der Infrartheizung wurde GreenDelta zur Verfügung gestellt. Aus der Liste kann man die Werkstoffe und die Mengen der einzelnen Komponenten ableiten. Aufgrund der Ungenauigkeit von manchen Angaben und des Mangels an Datensätzen, mussten an manchen Stellen entsprechende Annahmen getroffen werden. Diese werden im Annex I erläutert.

Die Bestandteile werden von den Lieferanten zum Hersteller der Infrartheizung transportiert. Die Entfernungen hat der Auftraggeber bekannt gegeben. Die Modellierung des Transports

erfolgt im Modul A2. Der Datensatz *LKW (Euro 0-6 mix)* mit einer Nutzlast von 17,3 Tonnen (Mittel Nutzlast in GaBi) wurde verwendet.

Im Modul A3 wird die Herstellung modelliert. Nach Angaben vom Auftraggeber werden 8,4 kW Strom aus erneuerbaren Energiequellen verwendet. Windkraft wurde für die Modellierung ausgewählt, weil sie die erste erneuerbare Energiequelle in Deutschland ist¹. Zudem wird die Verpackung in diesem Modul berücksichtigt. Laut Auftraggeber gibt es in diesem Modul keine weiteren Angaben zu betrachten. Im Annex I werden die Werkstoffe und gewählten Datensätze für die Modellierung der Verpackung im Detail gezeigt.

Die Modellierung von den Modulen A1 bis A3 wird beispielhaft für die Vordertasse und das Trägermaterial in der Abbildung 1 dargestellt. Die Output Flüsse aus A1 und A2, zusammen mit der Verpackung und der Strom, werden in A3 zugefügt.

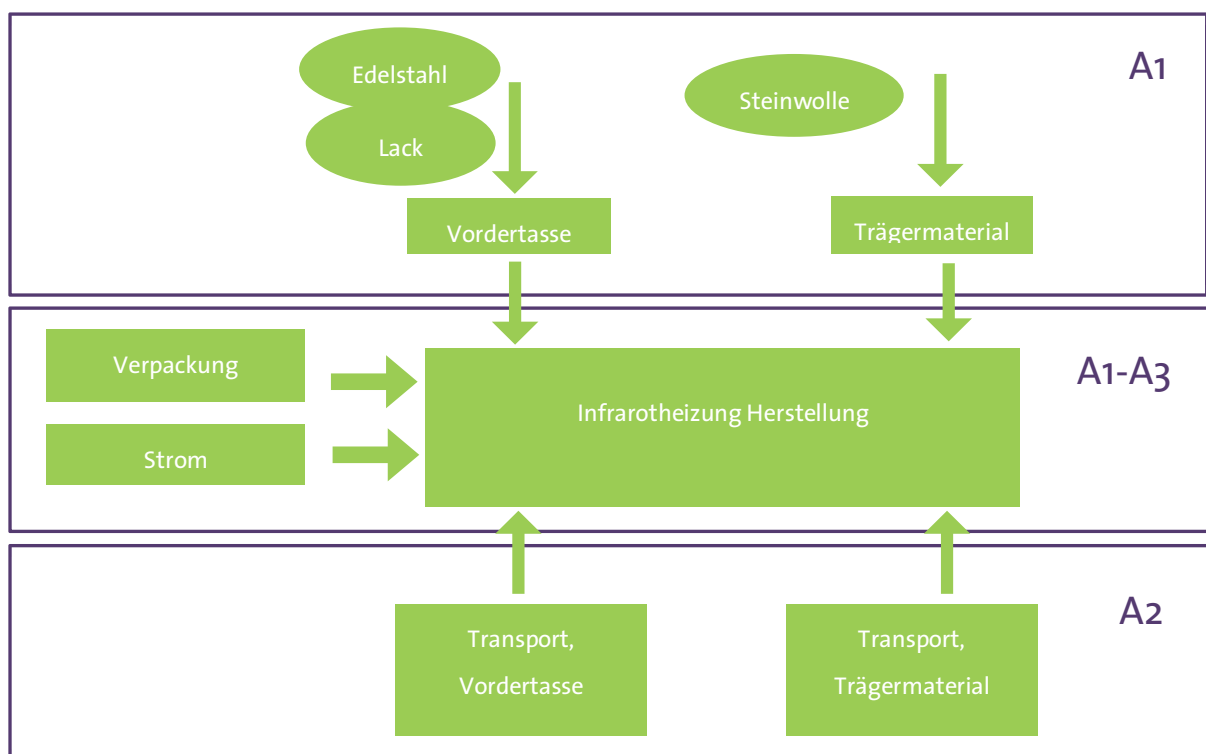


Abbildung 1. Darstellung des Modellierungsansatzes der Module A1-A3

3.2 C4 und D

Die Infrarotheizung hat eine Lebensdauer von ca. 50 Jahren. Danach soll der Heizungskörper als elektronischer Abfall entsorgt werden. Es gibt drei mögliche Behandlungswege für die

¹ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>

Bestandteile, die in A1-A3 deklariert wurden: Deponierung, Recycling und Verbrennung. Diese werden im Annex I gezeigt.

Die Umweltauswirkungen, die durch die Abfallbeseitigung entstehen, einschließlich der physikalischen Vorbehandlung und des Deponiebetriebs, werden im Modul C4 deklariert; zum Beispiel die Emissionen aus der Deponierung, Verbrennung oder Recycling von Abfällen.

Durch Recycling können Ressourcen eingespart werden und durch Verbrennung kann Energie zurückgewonnen werden. Diese Gutschriften aus der Abfallbeseitigung (in C4 modelliert) werden im Modul D deklariert.

Für die Modellierung von C4 werden die verschiedenen Werkstoffe der Infrarothheizung zusammengetragen (z.B. Edelstahl, Zink, Kunststoff) und in die ausgewählten Behandlungswegen zugeführt. Die Abfallflüsse, die recycelt oder verbrannt werden, werden im Modul D zugeführt. Das Beispiel der Modellierung der Module A1-A3 ist in der Abbildung 2 für C4 und D fortgesetzt. Es wurde angenommen, dass Edelstahl zu 95% recycelt wird – C4 und D können deklariert werden -, und Steinwolle deponiert wird – nur C4 wird deklariert, weil es keine Kredite aus der Deponierung entstehen.

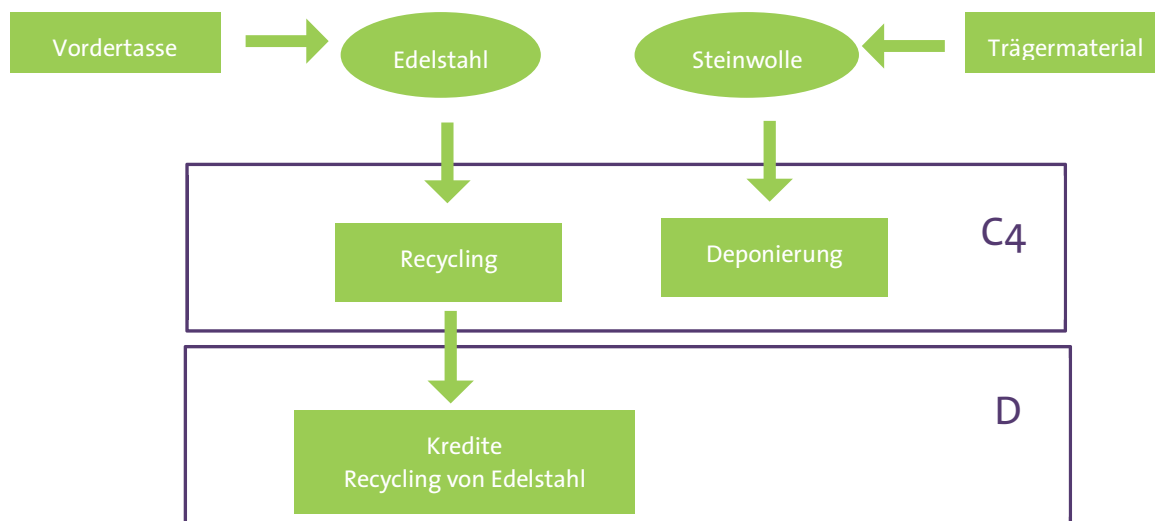


Abbildung 2. Darstellung des Modellierungsansatzes der Module C4 und D

Die Behandlung vom Verpackungsabfall soll im Modul A5 deklariert werden. Da dieses Modul nicht betrachtet wird, wird die Abfallbehandlung der Verpackung auch nicht berücksichtigt.

3.3 Glasplatte

Der Datensatz für die Modellierung der Glasplatte wurde aus der EPD „Flachglas, Einscheibensicherheitsglas und Verbundsicherheitsglas“ (EPD-Nr. M-EPD-FEV-002014) genommen, da kein Datensatz in GaBi oder in der Ökobaudat verfügbar ist.

4 Ergebnisse

Die Berechnung der Umweltindikatoren gemäß Ökobaudat wurden in openLCA durchgeführt. Wie erwartet, sind die Indikatoren der Module A1-A3 und C4 positiv (Lasten) und die Indikatoren des Moduls D negativ (Gutschriften). Die Ergebnisse für die Metallplatte sind in der Tabelle 1 und für die Glasplatte in der Tabelle 2 zusammengefasst.

5 Interpretation

Wenn die Module A1-A3 betrachtet werden, schneiden fast alle Umweltindikatoren der Sachbilanz für die Metallplatte höher ab. Nur POCP und EP zeigen niedrigeren Werte. Das globale Erwärmungspotenzial, das Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe und Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen sind größer für die Metalplatte. Der Grund dafür ist, dass diese Umweltindikatoren stark von der Herstellung von Edelstahl beeinflusst sind. Im Gegensatz sind die Umweltindikatoren Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon, Versauerungspotential und Eutrophierungspotential für die Glasplatte höher. Die Ergebnisse des Abbaupotenzials der stratosphärischen Ozonschicht sind sehr ähnlich. Im Modul C4 gibt es sehr geringe Unterschiede. Obwohl in der Variante 1.b mehr Material deponiert wird (70% der Glasplatte), wird auch weniger Edelstahl zum Recycling (6,5 statt 12 kg Edelstahl) eingesetzt. Daher gleichen sich die Ergebnisse aus. Aufgrund des Recyclings der Metallplatte, bekommt die Variante 1.a höher Gutschriften im Modul D².

Die Entscheidung, welche Variante ein besseres ökologisches Profil vorweist, ist von den Umweltindikatoren und Lebenszyklusphasen abhängig. Die Unterschiede zwischen der

² Für die Modellierung der Glasplatte wurde es angenommen, dass 70% des ESG Abfalls deponiert wird, und 30% wiederverwendet wird (Szenario 1). Aufgrund der langen Lebensdauer der Infrarotheizung wurde auch ein Szenario betrachtet, in dem die komplette Glasplatte deponiert wird. Die Ergebnisse sind sehr ähnlich und deswegen im Bericht nicht enthalten.

Metallplatte und der Glasplatte werden durch die Herstellung und Beseitigung der Vordertasse verursacht.

6 Empfehlungen

Um einen genaueren Vergleich zwischen Variante 1.a und 1.b zu schaffen, wäre die Verwendung von primär Daten für die Herstellung der Vordertasse sinnvoll. Darüber hinaus würden genauere Angaben über die Beseitigung der Vordertasse eine bessere Vergleichbarkeit ermöglichen.

Table 1. Metallplatte - Ergebnisse der Umweltindikatoren gemäß Ökobaudat

Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen	Wert			Einheit
	A1-A3	C4	D	
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	239,63	2,0729	-76,956	MJ
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	0	0	0	MJ
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	239,63	2,0729	-76,956	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	768,35	29,388	-435,07	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	0	0	0	MJ
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	737,33	29,387	-416,19	MJ
Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	0	0	0	kg
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	0	0	0	MJ
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	0	0	0	MJ
Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	1,2121	-0,0471	-0,5531	m ³
Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	0,0267	0,0133	0	kg
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	441,10	178,61	-186,64	kg
Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	0,0459	0,0002	-0,0016	kg
Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	0	0	0	kg
Stoffe zum Recycling (MFR)	0	0	0,6159	kg
Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	0	0	0	kg
Exportierte elektrische Energie (EEE)	0	0	0	MJ
Exportierte thermische Energie (EET)	0	0	0	MJ
Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen				
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	61,642	23,486	-35,743	kg CO ₂ Äquiv.
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	6,27E-12	9,36E-16	-5,06E-8	kg R11 Äquiv.
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	0,0186	0,0052	-0,0064	kg Ethen Äquiv.
Versauerungspotenzial (AP)	0,4327	0,0157	-0,1479	kg SO ₂ Äquiv.
Eutrophierungspotenzial (EP)	0,0265	0,0120	-0,0153	kg Phosphat Äquiv.
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	0,0043	0,0000	-0,0012	kg Sb Äquiv.
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	737,29	29,386	-408,18	MJ

Table 2. Glasplatte - Ergebnisse der Umweltindikatoren gemäß Ökobaudat

Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes und sonstige Umweltinformationen	Wert			Einheit
	A1-A3	C4	D	
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PERE)	174,68	2,0647	-41,0661	MJ
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM)	0	0	0	MJ
Total erneuerbare Primärenergie (PERT)	174,68	2,2425	-42,5253	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (PENRE)	655,32	29,326	-225,96	MJ
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PENRM)	0	0	0	MJ
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)	636,93	30,745	-237,93	MJ
Einsatz von Sekundärstoffen (SM)	0,3840	0	0	kg
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe (RSF)	0	0	0	MJ
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe (NRSF)	0	0	0	MJ
Einsatz von Süßwasserressourcen (FW)	0,8105	-0,0469	-0,2974	m ³
Gefährlicher Abfall zur Deponie (HWD)	0,0267	0,0133	0	kg
Entsorgter nicht gefährlicher Abfall (NHWD)	265,73	185,02	-104,43	kg
Entsorgter radioaktiver Abfall (RWD)	0,0295	0,0002	-0,0016	kg
Komponenten für die Wiederverwendung (CRU)	0	0	0	kg
Stoffe zum Recycling (MFR)	0,2419	0	0	kg
Stoffe für die Energierückgewinnung (MER)	0	0	0	kg
Exportierte elektrische Energie (EEE)	0	0	0	MJ
Exportierte thermische Energie (EET)	0	0	0	MJ
Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen				
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	44,998	23,5876	-20,0190	kg CO ₂ Äquiv.
Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	2,56E-11	2,52E-14	-9,05E-13	kg R11 Äquiv.
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	0,0196	0,0053	-0,0022	kg Ethen Äquiv.
Versauerungspotenzial (AP)	0,4372	0,0163	-0,0831	kg SO ₂ Äquiv.
Eutrophierungspotenzial (EP)	0,0274	0,0121	-0,0085	kg Phosphat Äquiv.
Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE)	0,0034	0	-0,0007	kg Sb Äquiv.
Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)	606,32	30,7069	-236,39	MJ

7 Annex I

Materialliste für die Modellierung der Module A1-A3

Pos.	Bestandteil	Werkstoff	Annahme
1.a	Vordertasse	Edelstahl 1.4016/430	
		Lack	Die Inputs- und Outputs Flüsse von diesem Prozess wurden aus der Datenbank UVEK genommen, weil kein Datensatz in GaBi.
1.b	Vordertasse	Kalknatron Einscheibensicherheitsglas (ESG)	Kein Datensatz zur Verfügung. Daten aus der EPD-Nr. M-EPD-FEV-002014 wurden verwendet.
2	Rückblech	Edelstahl 1.4016/430	
3	Dämmung	Mineralfaserdämmung: Steinwolle	
4	Klebstoff	Epoxy 2K	Genauere Formulierung unbekannt. Datensatz für Epoxy 2K
5	Temperaturbegrenzer	Silber, Stahl und Zink	Anteil Materialgewicht aus dem Datenblatt eingeschätzt. Material der Federschappscheibe unbekannt
6	Glasfaser Heizdraht (6130x0.8)	Nickel, Chromium, Silikon und Glasfaser	Heizleiter: Ni (80%), Cr (20%) Ummantelung: Silikon (30%), Glasfaser (70%). Kein Datensatz für Chromium. Wurde nicht modelliert, aber der Anteil ist sehr gering (ca. 0.003%).
7	Glasfaser Heizdraht (6090x0.8)		
8	Silikonkabel 210 mm	Kabel, 1 Draht mit Silikonummantelung	Kupfergewicht: 7,2 kg/km Kabelgewicht: 13 kg/km
9	Silikonkabel 85 mm		
10	Silikonkabel 315 mm		
11	Silikonkabel 155 mm		
12	Splicer	CuZn30	Kein Datensatz für CuZn30: Kombination aus Rotguss und Zink
13	Isolierschlauch	Silikon	
14	Flachsteckhülsen	CuZn30	Wie Pos. 12
15	Flachsteckersatz	CuZn30	
16	Flachstecker	CuZn30	
17	Laminatplättchen	HPL	
18	Macromelt	Polyamide 641	Kein Datensatz für Polyamide 641, Polyamide 6.10 genommen
19	Texpol	Glasfaser und Silikon	Glasfaser 90%, Silikon 10%
20	Anschlusskabel	Kabel, 3 Draht mit Silikonummantelung	Kupfergewicht: 28,8 kg/km Kabelgewicht: 81 kg/km
21	Multiniete mit Fl.Kopf	Stahl, verzinkt und Aluminium	Stahl 70% Aluminium 30%
22	Selbstbohrschrb.	Stahl, verzinkt	
23	Halterung	ZDG: Zink-Druckguss	Kein Datensatz für ZDG, Komponenten nach Zusammensetzung ausgewählt
24	Typenschild		Die Zusammensetzung ist unklar, aber sieht nach Cr aus. Einschätzung aus Herstellerangaben (shioik). Kein Datensatz für Chromium. Wurde nicht modelliert, aber der Anteil ist sehr gering (ca. 0.003%).

Materialliste für die Modellierung des Moduls A2

Pos.	Bestandteil	Gewicht für Transport, kg	Entfernung, km
1.a	Vordertasse	12,5	1
2	Rückblech		
3	Dämmung	1,2	260
4	Klebstoff	0,000105	130
5	Temperaturbegrenzer	0,0063	849
6	Glasfaser Heizdraht (6130x0.8)	0,087226324	560
7	Glasfaser Heizdraht (6090x0.8)		
8	Silikonkabel 210 mm	0,016055	1000
9	Silikonkabel 85 mm		
10	Silikonkabel 315 mm		
11	Silikonkabel 155 mm		
12	Splicer	0,004	924
13	Isolierschlauch	0,013452175	1000
14	Flachsteckhülsen		
15	Flachsteckersatz		
16	Flachstecker		
17	Laminatplättchen	0,0026325	3
18	Macromelt	0,01	130
19	Texpol	0,2	130
20	Anschlusskabel	0,162	750
21	Multiniete mit FI.Kopf	0,010706	275
22	Selbstbohrschrb.		
23	Halterung	0,684	70
24	Typenschild	0,001	135

Pos.	Bestandteil	Gewicht für Transport, kg	Entfernung, km
1.b	Vordertasse	9,5	1004
2	Rückblech	6,5	1

Materialliste für die Modellierung der Module C4 und D

Pos.	Bestandteil	Entsorgungsweg	Annahme
1.a	Vordertasse	Edelstahl Recycling	95% recycelt
1.b	Vordertasse	30% recycelt, 70% deponiert	Daten aus EPD-Nr.: M-EPD-FEV-002014 30% wiederverwendet 70 % deponiert
2	Rückblech	Edelstahl Recycling	95% recycelt
3	Dämmung	Deponie	
4	Klebstoff		Nicht berücksichtigt, kein Datensatz und sehr geringe Menge
5	Temperaturbegrenzer	Recycling: Silber, Stahl, und Zink	Silber und Zink: 90% recycelt Stahl: 95% recycelt
6	Glasfaser Heizdraht	Recycling (Metall)+Verbrennung (Kunststoff)	Metall: 90% recycelt Kunststoff: energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen (MVA)
7	Glasfaser Heizdraht		
8	Silikonkabel		
9	Silikonkabel		
10	Silikonkabel		
11	Silikonkabel		
12	Splicer	Recycling	Kein Datensatz für CuZn30, als Kupfer modelliert, 90% recycelt
13	Isolierschlauch	Verbrennung	Kunststoff: energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen (MVA)
14	Flachsteckhülsen	Recycling	Kein Datensatz für CuZn30, als Kupfer modelliert, 90% recycelt
15	Flachsteckersatz	Recycling	
16	Flachstecker	Recycling	
17	Laminatplättchen	Verbrennung	Energetische Verwertung in Müllverbrennungsanlage (MVA)
18	Macromelt	Verbrennung	Kunststoff: energetische Verwertung
19	Texpol	Verbrennung	In Müllverbrennungsanlage (MVA)
20	Anschlusskabel	Recycling (Metall)+Verbrennung(Kunststoff)	Metall: 90% recycelt Kunststoff: energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen (MVA)
21	Multiniete mit Fl.Kopf	Recycling: Al (1) und Stahl verzinkt (2)	Al: 90% recycelt Stahl: 95% recycelt
22	Selbstbohrschrb.	Recycling	Stahl: 95% recycelt
23	Halterung	Recycling	Datensatz aus Ökobaudat für Zink verwendet
24	Typenschild		Nicht berücksichtigt, Zusammensetzung unklar und geringe Menge

Fragebogen

1 Erste Seite

Willkommen liebe Teilnehmer der Behaglichkeits-Studie zur ersten Befragungsrunde!

Ab voraussichtlich Mitte des Jahres wird vom Fachgebiet Energieeffizientes Bauen an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung HTWG Konstanz ein Forschungsprojekts zum Potenzial von Infrarot-Heizsystemen für hocheffiziente Wohngebäude durchgeführt werden. In diesem Rahmen soll auch der Einfluss des Heizsystems auf Komfort und Behaglichkeit erfasst werden.

Natürlich stehen die technischen Aspekte bezüglich Energieverbräuchen und Rentabilität im Vordergrund. Jedoch ist es im Hinblick auf eine weitreichende Einführung dieser bisher wenig bekannten Technologie wichtig, zusätzlich Erkenntnisse über Komfort und Behaglichkeit bei deren Nutzung zu gewinnen. Zu diesem Zweck soll eine Begleitstudie mit mehreren Befragungen im Verlauf der kommenden 2 Jahre durchgeführt werden.

Um aussagekräftige Daten zu bekommen und die Ergebnisse zur Behaglichkeit später mit der bisherigen Situation vergleichen zu können, soll bereits in Ihrer jetzigen Wohnung eine kleine Vorstudie durchgeführt werden. Daraus ergibt sich, dass wir Sie hiermit bitten, bereits vor Ihrem Umzug einen Fragebogen auszufüllen.

Dieser Fragebogen teilt sich in mehrere Blöcke:

- Teil 1: aktuelle Situation
 - A: Behaglichkeit
 - B: Bedienbarkeit
 - C: Wetterlage und Raumklima
 - D: Person

- Teil 2: konstante Daten
 - A: Person
 - B: Nutzer allgemein
 - C: Raumklima

- Teil 3: Effizienz
 - A: Raumausstattung
 - B: Gebäude
 - C: Heizung und Energie

Die Beantwortung wird etwa 20 Minuten Ihrer Zeit in Anspruch nehmen.

Bei späteren Befragungen im Rahmen des Forschungsprojekts (nach Ihrem Umzug) werden wir Sie noch ein mal bitten einen ähnlichen Fragebogen auszufüllen. Danach wird dann einheitlich ein deutlich kürzerer Fragebogen verwendet (nur Teil 1), der in ca. 5 Minuten ausfüllbar ist.

2 Zweite Seite

Fragen und Antworten

Komische Fragen...

Um Komfort und Behaglichkeit zu erfassen, müssen wir auch Daten erheben, die auf den ersten Blick möglicherweise irrelevant erscheinen, tatsächlich sind Aspekte wie Alter, Geschlecht und sogar Herkunft aber sehr wichtig. Beispielsweise empfindet eine zierliche Frau einen Raum häufig erst bei einer höheren Temperatur als behaglich als ein kräftiger Mann, besonders wenn dieser in einer kalten Klimazone aufgewachsen ist.

Wohnzimmer? Hab ich nicht.

Fragen bezüglich des "Wohnzimmers" beziehen sich auf den Raum, der von den Nutzern der Wohnung üblicherweise gemeinsam genutzt wird und in dem man sich häufig aufhält, meist also das klassische "Wohnzimmer". Bitte nutzen Sie für die Beantwortung der Fragen gleichbleibend den Raum Ihrer Wohnung, der dieser Nutzung am ähnlichsten ist. Bitte halten Sie sich während der Beantwortung aller Fragen aus Teil 1 in Ihrem "Wohnzimmer" auf. Auch für die Beantwortung der Fragen aus Teil 2 und 3 ist es sinnvoll, im "Wohnzimmer" zu bleiben.

Wann ausfüllen?

Am besten wäre es, wenn Sie den Fragebogen am Abend nach Sonnenuntergang ausfüllen, da dann die Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung keine Relevanz mehr haben. Der Zeitpunkt bleibt aber dennoch ganz Ihnen überlassen.

Das möchten Sie nicht beantworten?

Die Beantwortung der Fragen ist für uns von hohem Wert, aber absolut freiwillig. Wenn Sie einzelne Fragen nicht beantworten können oder möchten, können Sie sie überspringen oder den "keine Angabe" Button nutzen. Und natürlich können Sie die Beantwortung des Fragebogens zu jedem Zeitpunkt ohne Angabe von Gründen abbrechen. Ihre Daten werden ohne Zuordnung zu Ihrer Person und damit anonymisiert ausgewertet und nicht an Dritte weitergegeben.

Wie lange dauert's noch?

An der Fortschrittsanzeige oben rechts erkennen Sie den Anteil der bisher beantworteten Fragen. In dieser ersten Befragung möchten wir Sie bitten, den Fragebogen ohne längere Unterbrechungen auszufüllen, das bedeutet, ohne dass Sie die Internetseite verlassen. Damit ist es möglich, dass weitere Personen (z.B. aus Ihrer Familie) auf dem selben Gerät den Fragebogen ausfüllen können.

Ihre Unterstützung ist sehr hilfreich für den Erfolg des Projekts.

Herzlichen Dank für Ihre Teilnahme!

3 Codeeingabe

Da die Umfrage anonymisiert ist, ist es nötig, dass Sie hier einen Code eingeben. Damit wird es möglich, die Antworten, die Sie in den zukünftigen Fragebogen geben werden, diesem ersten Bogen zuzuordnen.

Geben Sie hier bitte einen Code nach folgendem Format ein:
Initialen aus dem ersten Vornamen und dem Geburtsnamen Ihrer Mutter und Geburtsjahr Ihrer Mutter.
Beispiel: Elke Müller, geborene Schmidt, geboren im Jahr 1950 ergibt den Code: ES 1950

Initialen und Geburtsjahr Ihrer Mutter XX jxxx

4 1. Fragen zur Person, aktuell bzgl. Behaglichkeit

Teil 1 - aktuelle Situation

1A - Behaglichkeit

Im Folgenden stellen wir Ihnen Fragen zu Ihrer momentanen Behaglichkeit.

Bitte beantworten Sie diese Fragen, so wie alle folgenden, in Ihrem "Wohnzimmer".

Wie warm ist es Ihnen in diesem Moment?

- viel zu kalt zu kühl etwas kühl genau richtig etwas warm zu warm viel zu warm

Wie beurteilen Sie die Temperatur der Umschließungsflächen im Durchschnitt (Wände, Decke, Boden)?

Wie wirken sich die Umschließungsflächen auf Ihre Behaglichkeit aus? Bitte beurteilen Sie die Temperatur auf Distanz. Sind die Umschließungsflächen...

- sehr kalt
 kalt
 eher kalt
 neutral
 eher warm
 warm
 sehr warm

Wie empfinden Sie die aktuelle Luftfeuchte im Raum?

Die Luft ist..

- sehr feucht
 feucht
 eher feucht
 durchschnittlich
 eher trocken
 trocken
 sehr trocken
 kann ich nicht beurteilen / keine Angabe

Wie empfinden Sie die aktuelle Luftqualität?

- sehr gut
 eher gut
 durchschnittlich
 eher schlecht
 sehr schlecht

Zieht es in diesem Moment?

- nein
 ja etwas
 ja sehr

Wie groß ist der Bereich mit angenehmer Temperatur im Wohnzimmer?

- der ganze Raum
 etwa drei Viertel des Raums
 etwa die Hälfte des Raums
 etwa ein Viertel des Raums

es gibt keinen Bereich mit angenehmer Temperatur

Gibt es im Wohnzimmer etwas besonders Angenehmes und / oder Unangenehmes (bezüglich der Temperatur)?

Bitte geben Sie hier an, was Ihnen **aktuell** angenehm oder unangenehm auffällt, wie zum Beispiel Wohlfühlbereiche, zu kalte oder zu warme Bereiche, Strahlungseinflüsse oder Ähnliches.

Bitte bewerten Sie die Gesamt-Behaglichkeit im Wohnzimmer.

Überdenken Sie hierfür noch einmal die Aspekte Wärme, Feuchte, Luftqualität, Zuglufterscheinungen, Angenehmes und Unangenehmes.

- sehr unbehaglich unbehaglich eher unbehaglich neutral eher behaglich behaglich sehr behaglich

5 2. Fragen person. aktuell Bedienbarkeit

Teil 1B - Bedienbarkeit

Nun möchten wir Ihnen gerne ein paar Fragen zur Bedienbarkeit Ihrer Heizung stellen.

Auf welche Art und Weise wird die Temperatur im Wohnzimmer kontrolliert?

- manuell nach Gefühl
- manuell nach Raumthermometer
- Automatische Regelung
- Automatische Regelung mit Monitoring / Verbrauchsanzeige
- Die Temperatur im Raum kann nicht kontrolliert werden

Wie häufig wird die Temperatur im Wohnzimmer von den Nutzern justiert?

- mehrmals täglich
- etwa täglich
- etwa wöchentlich
- etwa monatlich
- nie

Aus welchem Grund wird justiert?

Sie können mehrere Gründe nennen.

- es wird nicht justiert
- Veränderte Nutzung / Tätigkeit
- Verlassen des Raums
- Sonneneinstrahlung / Wärmegewinne
- Mängel (Pfeifen der Heizung o.ä.)
- Kostenersparnis
- Nachtabsenkung

andere

Gibt es Probleme oder Besonderheiten bei der Bedienung der Heizung?

Wie bewerten Sie die Bedienbarkeit Ihrer Heizung?

- sehr gut bedienbar
- gut bedienbar
- bedienbar
- eingeschränkt bedienbar
- nicht bedienbar

6 4. Raum, aktuelle Situation

Teil 1C - Wetterlage und Raumklima

Bitte beantworten Sie nun einige Fragen bezüglich der aktuellen Bedingungen draußen und im Wohnzimmer.

Bitte geben Sie hier das aktuelle Datum ein.

tt.mm.jjjj

Bitte geben Sie hier die aktuelle Uhrzeit ein.

Uhrzeit: hh:mm

Welches Wetter ist im Moment?

Mehrfachantworten sind möglich.

- Schneefall
- Regen
- Nieselregen
- Nebel
- stürmisch
- bedeckt
- leicht bewölkt
- klar
- kalt
- kühl
- eher warm
- sonnig

Bitte geben Sie hier die gemessene Außentemperatur ein.

°C

Bitte geben Sie hier die relative Luftfeuchte außen ein.

%

Bitte geben Sie hier die aktuelle Raumtemperatur an:

°C

Bitte geben Sie hier die aktuelle relative Luftfeuchte im Wohnzimmer an.

%

Falls Messgerät vorhanden:

Bitte geben Sie hier die aktuelle CO2 Konzentration im Raum an.

ppm

Welche Temperatur hat die Außenwand?

Bitte messen Sie die Temperatur mit dem IR-Messgerät.

Bei Vorhandensein von Wand und Glasflächen, messen Sie bitte auf der größeren, dominanten Fläche. Sollte die größere Fläche beispielsweise von geschlossenen Vorhängen überdeckt sein, messen Sie bitte auf der Textiloberfläche.

Außenwand °C

Welche Temperatur hat die Innenwand?

Bitte messen Sie die Temperatur mit dem IR-Messgerät.

Innenwand °C

Welche Temperatur hat der Boden?

Bitte messen Sie die Temperatur mit dem IR-Messgerät.

Boden °C

Welche Temperatur hat die Decke?

Bitte messen Sie die Temperatur mit dem IR-Messgerät.

Decke °C

Wird die Temperatur und / oder Abstrahlung der Umgebungsflächen durch Einrichtung oder Ausbau beeinflusst? Wenn ja, durch welche Elemente?

Beispiel: geschlossene Vorhänge, Gardinen, Wandteppich, Innendämmung...

Sind Fenster im Wohnzimmer im Moment...

- geschlossen
- gekippt
- offen

Ist das Wohnzimmer im Moment beheizt?

- ja
- nein

Gibt es weitere Wärmequellen im Wohnzimmer, wie beispielsweise...

Bitte nennen Sie nur solche, die gerade Wärme abgeben.
Mehrfachnennungen sind möglich.

- nein
- ein Ofen
- Kerzen
- Glühbirnen
- Computer
- Aquarium
- weitere Personen. Wenn ja, wie viele?

andere

7 3. Fragen zur Person, aktuelle Situation

Teil 1D - Fragen zur Person

Im Folgenden stellen wir Ihnen Fragen zu Ihrer aktuellen Situation.

Um die Behaglichkeit genau zu erfassen, müssen wir Ihnen Fragen zu Ihrer Person stellen. Diese werden anonym erfasst und nicht weitergegeben.

Bitte geben Sie hier Ihre Tätigkeit direkt vor der Befragung an.

Wählen Sie bitte die Variante, die der tatsächlichen Tätigkeit bezüglich Anstrengung am ähnlichsten ist.

- Liegend, entspannt
- Sitzend, entspannt
- Sitzende Tätigkeit
- Stehend
- Stehend, leichte Tätigkeit
- Stehend, mittelschwere Tätigkeit
- langsames Gehen
- schnelles Gehen
- anstrengende Tätigkeit

- sehr anstrengende Tätigkeit
- keine Angabe

Bitte geben Sie hier den Grad Ihrer aktuellen Bekleidung an.

Bitte wählen Sie die Angabe, die Ihrer aktuellen Bekleidung am ähnlichsten ist.

- keine Kleidung
- nur Unterwäsche
- Shorts und T-Shirt
- lange Hose und T-Shirt
- lange Hose, Oberhemd
- lange Hose, Pullover
- Winterjacke oder Mantel
- keine Angabe

Haben Sie im Moment einen erhöhten Wärmebedarf? (z.B. aus gesundheitlichen Gründen o.ä.)

- ja
- nein
- keine Angabe

8 Konstante Daten

Die Fragen, die Sie bis hier beantwortet haben, werden auch in den späteren Befragungen wieder gestellt werden.

Ab hier beginnen nun die Fragen zu den konstanten Daten, die wir Ihnen nur ein Mal vor und ein Mal nach Ihrem Umzug stellen werden.

Hat bereits eine Person aus Ihrer Wohnung den Fragebogen vollständig ausgefüllt?

Falls ja, stellen wir Ihnen nur noch die Fragen bezüglich Ihrer Person, die eher konstant sind.

- nein
- ja
- keine Angabe

9 6a. Personenbezogene Daten Person

Teil 2 - konstante Daten

2A - Person

Im Folgenden stellen wir Ihnen Fragen zu Ihrer Person, die eher konstant sind.

Sind Sie...

- weiblich
- männlich
- andere / keine Angabe

Bitte geben Sie Ihr Alter an.

- 10 - 19 Jahre
- 20 - 29 Jahre
- 30 - 39 Jahre
- 40 - 49 Jahre
- 50 - 59 Jahre
- 60 - 69 Jahre
- 70 - 79 Jahre
- 80 - 89 Jahre
- 90 Jahre und älter
- keine Angabe

Bitte geben Sie an, aus welcher Klimazone Sie stammen.

- Tropen
- Subtropen
- gemäßigte Zonen (Mitteleuropa)
- Subpolargebiete

- Polarregion
 keine Angabe

Frieren Sie leicht bzw. haben Sie generell einen erhöhten Wärmebedarf? (z.B. aus gesundheitlichen Gründen o.ä.)

- ja
 nein
 keine Angabe

Wie wichtig ist für Sie persönlich das Thema "Energiesparen"?

- sehr wichtig
 wichtig
 eher wichtig
 neutral
 eher unwichtig
 unwichtig
 sehr unwichtig
 keine Angabe

10.1 Code Eingabe

Da bereits eine Person aus Ihrer Wohnung vor Ihnen den Fragebogen ausgefüllt hat, ist es natürlich nicht mehr nötig, dass Sie die konstanten Daten eingeben.

Um Ihre Antworten diesen bereits erfassten Daten zuzuordnen, geben Sie hier bitte **den Code an, den die Person, die die konstanten Daten bereits eingegeben hat, genutzt hat.**

Bitte konstante Daten übernehmen von XX jxxx

10.2 Filter Konstante Daten schon eingegeben

Da die konstanten Daten bereits eingegeben wurden, haben Sie nun alle Fragen beantwortet.

**Herzlichen Dank, dass Sie an dieser Befragung teilgenommen haben!
Sie haben unsere Forschung damit sehr unterstützt!**

Sollten Sie noch Fragen oder Anregungen haben, wenden Sie sich bitte an:
Nicole Conrad - nconrad@htwg-konstanz.de

Sie können das Fenster nun schließen.

11 Dritte Seite

Fragen und Antworten

Knifflige Fragen

Dieser Fragebogen enthält auch Fragen zu Raum und Gebäude, die man nicht unbedingt direkt aus dem Kopf beantworten kann. Wir hoffen, dass Sie sich an Hand unserer Mail bereits über diese Punkte informieren konnten. Falls nicht, vielleicht möchten Sie sich, bevor Sie mit der Beantwortung fortfahren, über folgende Punkte informieren?

Für die Messung der Behaglichkeit wären folgende Informationen sehr hilfreich:

die ungefähre Größe des Wohnzimmers,
die ungefähre Fläche der Außenwand des Wohnzimmers (inklusive Fenster),
die ungefähre Fläche der Innenwände des Wohnzimmers (inklusive Türen),
das ungefähre Alter und die Fläche der Fenster im Wohnzimmer.

Für die Messung der Effizienz wären zusätzlich folgende Informationen hilfreich (**falls bekannt**):

die Größe der Wohnung in Quadratmeter Wohnfläche,
das ungefähre Baujahr des Gebäudes,
der Gebäudeeffizienzstandard (z.B. KfW70 o.ä.),
Art und ungefähres Baujahr der Heizung,
der ungefähre Jahresstromverbrauch,
die ungefähren Heizkosten pro Jahr,
die benötigte Heizwärmeenergie pro qm und Jahr.

Natürlich können Sie einzelne Fragen, die Sie nicht beantworten möchten oder können, einfach überspringen.

12 6. Personenbezogene Daten, allgemein (alle Nutzer des Raums)

Teil 2B - Nutzer

Bitte beantworten Sie im Folgenden Fragen zu den Nutzern des Wohnzimmers.

Bitte geben Sie an, von wievielen Personen das Wohnzimmer regelmäßig genutzt wird.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- mehr als 7
- keine Angabe

Bitte geben Sie an, welches Geschlecht die Nutzer haben.

Mehrfachnennungen sind möglich.

- weiblich
- männlich
- andere / keine Angabe

Bitte geben Sie an, welches Alter die Nutzer haben.

Mehrfachnennungen sind möglich.

- 0 - 9 Jahre
- 10 - 19 Jahre
- 20 - 29 Jahre
- 30 - 39 Jahre
- 40 - 49 Jahre
- 50 - 59 Jahre
- 60 - 69 Jahre
- 70 - 79 Jahre
- 80 - 89 Jahre
- 90 Jahre und älter
- keine Angabe

Bitte geben Sie an, aus welchen Klimazonen die Nutzer stammen.

Mehrfachnennungen sind möglich.

- Tropen
- Subtropen
- gemäßigte Zonen (Mitteleuropa)
- Subpolargebiete
- Polarregion
- keine Angabe

Befindet sich unter den Nutzern des Wohnzimmers eine Person, die generell einen erhöhten Wärmebedarf hat? (z.B. aus gesundheitlichen Gründen, Kleinkinder o.ä.)

- ja
- nein
- keine Angabe

Bitte geben Sie hier die Tätigkeit an, die üblicherweise im Wohnzimmer stattfindet.

Wählen Sie bitte die Variante, die der üblichen Tätigkeit bezüglich Anstrengung am ähnlichsten ist. Mehrfachnennungen sind möglich.

- Liegend, entspannt
- Sitzend, entspannt
- Sitzende Tätigkeit
- Stehend
- Stehend, leichte Tätigkeit
- Stehend, mittelschwere Tätigkeit
- langsames Gehen
- schnelles Gehen
- anstrengende Tätigkeit
- sehr anstrengende Tätigkeit

keine Angabe

Bitte geben Sie hier den Grad der typischen Bekleidung der Nutzer im Wohnzimmer während der Heizperiode an.

Bitte wählen Sie die Angabe, die dieser Bekleidung am ähnlichsten ist.

- keine Kleidung
- nur Unterwäsche
- Shorts und T-Shirt
- lange Hose und T-Shirt
- lange Hose, Oberhemd
- lange Hose, Pullover
- Winterjacke oder Mantel
- keine Angabe

Wie lüften Sie?

- ganz bewusst
- eher unbewusst / spontan
- die Lüftung ist automatisch geregelt
- keine Angabe

Wie wichtig ist in Ihrem Haushalt das Thema "Energiesparen"?

- sehr wichtig
- wichtig
- eher wichtig
- neutral
- eher unwichtig
- unwichtig
- sehr unwichtig
- keine Angabe

13 9a. Basics Raumklima

Teil 2C - Raumklima

Bitte beantworten Sie nun einige Fragen bezüglich der typischen Bedingungen im Wohnzimmer.

Bitte denken Sie dabei an den Dezember '16 und Januar '17.

Wie warm war es Ihnen in dieser Zeit im Wohnzimmer?

- viel zu kalt
- zu kühl
- etwas kühl
- genau richtig
- etwas warm
- zu warm
- viel zu warm

Welche Temperatur hat das Wohnzimmer typischerweise im Winter, wenn es genutzt wird?

ca. °C

Wie beurteilen Sie die typische Temperatur der Umschließungsflächen im Winter im Durchschnitt (Wände, Decke, Boden)?

- sehr kalt
- kalt
- eher kalt
- neutral
- eher warm
- warm
- sehr warm

Wie beurteilen Sie die typische Luftfeuchte im Wohnzimmer während der Heizperiode?

Die Luft ist..

- sehr feucht
- feucht
- eher feucht
- durchschnittlich
- eher trocken
- trocken
- sehr trocken
- kann ich nicht beurteilen / keine Angabe

Welche typische relative Luftfeuchte hat das Wohnzimmer im Winter, wenn es genutzt wird?

Falls bekannt

ca. % rel. Feuchte

Gibt es im Wohnzimmer zusätzliche Quellen für Luftfeuchtigkeit?

Mehrfachnennungen sind möglich.

- Wohnküche
- Wäscheständer
- Luftbefeuchter
- Pflanzen
- Zimmerbrunnen
- Aquarium
- andere
- keine

Wie beurteilen Sie die typische Luftqualität im Wohnzimmer im Winter?

- sehr gut
- eher gut
- durchschnittlich
- eher schlecht
- sehr schlecht

Zieht es im Wohnzimmer im Allgemeinen?

- ja
- manchmal
- nein

Wie groß ist der typische Bereich mit angenehmer Temperatur im Wohnzimmer im Winter?

- der ganze Raum
- etwa drei Viertel des Raums
- etwa die Hälfte des Raums
- etwa ein Viertel des Raums
- es gibt keinen Bereich mit angenehmer Temperatur

Welche Möglichkeiten haben Sie, auf die Behaglichkeit im Wohnzimmer Einfluss zu nehmen?

Mehrfachnennungen sind möglich.

- zus. Wärmequellen
- schnelle Regelung der Heizung
- Sonnenschutzrollos
- Klimaanlage
- Vorhänge

andere

- keine

Gibt es im Wohnzimmer etwas besonders Angenehmes und / oder Unangenehmes bezüglich der Temperatur?

Bitte geben Sie hier an, was **generell** angenehm oder unangenehm auffällt, wie zum Beispiel Wohlfühlbereiche, zu kalte oder zu warme Bereiche, Strahlungseinflüsse oder Ähnliches.

Bitte bewerten Sie die Gesamt-Behaglichkeit im Wohnzimmer, rückblickend für den vergangenen Winter.

Überdenken Sie hierfür noch einmal die Aspekte Wärme, Feuchte, Luftqualität, Zuglufterscheinungen, Angenehmes und Unangenehmes.

- sehr unbehaglich unbehaglich eher unbehaglich neutral eher behaglich behaglich sehr behaglich

14 9. Basics Raum

Teil 3 - Effizienz

Bitte beantworten Sie nun Fragen zum Gebäude. Diese Fragen werden nur ein mal vor und ein mal nach Ihrem Umzug gestellt. Ihre Antworten sind wertvoll für die Berechnung der Effizienz der Heizungsanlage.

3A - Raumausstattung

Folgende Fragen beziehen sich auf konstante räumliche Aspekte des Wohnzimmers.

Wie groß ist Ihr Wohnzimmer?

Bitte geben Sie die Größe des Raums an, in dem Sie die Messungen vornehmen. Bei einem offenen Grundriss messen Sie bitte die Fläche bis zu der Stelle, an der eine deutlich andere Nutzung beginnt. Beispiel: Eine Wohn-Ess-Küche wird komplett gemessen bis zu einem angrenzenden Flurbereich.

qm

Wie groß ist die Fläche der Außenwand / Außenwände des Wohnzimmers in etwa?

Bitte geben Sie die Fläche inklusive Fensterflächen an.

qm

Wie groß ist die Fläche der Innenwände des Wohnzimmers in etwa?

Bitte geben Sie die Fläche inklusive Türflächen an.

qm

Wie ist das Wohnzimmer ausgestattet?

- Teppich
- Vorhänge
- Gardinen
- Sofa
- Kissen
- Felle

anderes

Aus welchem Material ist die Oberfläche des Wohnzimmerbodens?

- Holz (Parkett, Dielen,...)
- Kunststoff (Laminat, PVC,...)
- Mineralisch (Fliesen, Estrich, Beton,...)
- Textil (Teppichboden, ...)

andere

Welche Farbe haben die Umschließungsflächen (Wände, Boden, Decke)?

- weiß
- helle, warme Töne
- dunkle, warme Töne
- helle, kühle Töne
- dunkle, kühle Töne
- keine Angabe

Wie groß ist die Gesamt-Fensterfläche im Wohnzimmer in etwa?

qm

In welchem Jahr wurden diese Fenster eingebaut?

Das Einbaujahr findest sich bei Doppelverglasung häufig auf dem Streifen zwischen den beiden Scheiben.

- vor 1918
- 1918 - 1948
- 1949 - 1957
- 1958 - 1968
- 1969 - 1977
- 1978 - 2002

- nach 2002
- keine Angabe

In welche Himmelsrichtung(en) sind diese Fenster ausgerichtet?

Mehrfachnennungen sind möglich.

- Norden
- Nordosten
- Osten
- Südosten
- Süden
- Südwesten
- Westen
- Nordwesten
- keine Angabe

Wie viele Stunden pro Tag wird das Wohnzimmer im Durchschnitt unter der Woche genutzt?

Bitte geben Sie eine ganze Zahl ein.

ca. Stunden pro Wochentag

Wie viele Stunden pro Tag wird das Wohnzimmer im Durchschnitt am Wochenende genutzt?

Bitte geben Sie eine ganze Zahl ein.

ca. Stunden pro Tag am Wochenende

15 8. Basics Gebäude

Teil 3B - Gebäude

In welcher Art von Gebäude wohnen Sie?

Bitte kreuzen Sie den Gebäudetyp an, der am ähnlichsten ist.

- freistehendes Einfamilienhaus
- Doppelhaus / Reihenhaus
- Mehrfamilienhaus
- Hochhaus
- anderes

In welchem Jahr wurde das Gebäude, in dem Sie wohnen in etwa erbaut?

Die Einteilung kommt mir noch etwas seltsam vor...

- vor 1918
- 1918 - 1948
- 1949 - 1957
- 1958 - 1968
- 1969 - 1977
- 1978 - 2002
- nach 2002

Welchen Gebäudeeffizienzstandard hat das Gebäude, in dem Sie wohnen?

- nicht bekannt
- KFW 100
- KFW 70
- KFW 55
- KFW 40
- KFW 40+
- Sonnenhaus
- 3 Liter Haus
- Niedrigenergiehaus
- andere

Wie viele Quadratmeter Wohnraum hat Ihre Wohnung?

Bitte geben Sie eine ganze Zahl ein.

qm

In welche Himmelsrichtung(en) ist Ihre Wohnung hauptsächlich ausgerichtet?

In welche Richtung orientieren sich Ihre Hauptwohnräume?
Mehrfachantworten möglich.

- Norden
- Nordosten
- Osten
- Südosten
- Süden
- Südwesten
- Westen
- Nordwesten
- keine Angabe

16 10. Basics Heizung

Teil 3C - Heizung und Energie

In welchem Jahr wurde die Heizung im Gebäude eingebaut?

Falls nicht bekannt, kann diese Frage übersprungen werden.

im Jahr jxxx

Welche Art von Heizung liefert die Wärme für Ihre Wohnung?

Mehrfachnennung ist möglich.

- Ölkessel
- Ölbrennwert
- Gastherme
- Gasbrennwert
- Holzpelletkessel
- Wärmepumpe
- Elektroheizung
- Festbrennstoffe (Holz)
- Solarthermie
- Photovoltaik

andere

- unbekannt

Wie wird Ihre Heizung geregelt?

- manuell, nach Gefühl
- manuell, nach Raumthermometer
- automatische Regelung
- automatische Regelung mit Monitoring / Verbrauchsanzeige
- unbekannt

Wo befindet sich die Steuerungseinheit der Heizung?

- Gebäudezentral unzugänglich
- Gebäudezentral zugänglich
- Wohnungszentral
- Raumzentral
- unbekannt

Wie wird die Wärme übertragen?

Mehrfachnennung ist möglich.

- Heizkörper
- Fußbodenheizung
- Wandheizung
- Heizung über Luft
- IR Strahlungsheizung

andere

Wo befindet sich die Wärmeübergabe?

Mehrfachnennung ist möglich.

- im Fußboden

- an einer Innenwand
- an einer Außenwand
- an der Decke

Haben Sie eine Lüftungsanlage?

- nein
- Abluft (nicht Dunstabzugshaube / Trockner)
- Zu- und Abluft ohne Wärmerückgewinnung
- Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung

Wie wird Ihr warmes Wasser erzeugt?

- wie Heizung
- Elektroboiler
- Gasboiler
- Direktdurchlauferhitzer
- Solarthermie
- andere
- unbekannt

Ist eine Zirkulationsleitung vorhanden?

- ja
- nein
- unbekannt

Wenn Sie das Warmwasser aufdrehen, wie lange dauert es, bis es Ihnen zur Verfügung steht?

etwa Sekunden

Wie viel Strom verbrauchen Sie in etwa pro Jahr?

Falls nicht bekannt, kann diese Frage übersprungen werden.

ca. kWh / Jahr

Wie viele Kilowattstunden Heizwärmeenergie verbrauchen Sie ca. in Ihrer Wohnung pro Quadratmeter und Jahr?

Falls nicht bekannt, kann diese Frage übersprungen werden.

in etwa kWh/qma

Wie hoch sind in etwa Ihre Heizkosten pro Jahr?

Falls nicht bekannt, kann diese Frage übersprungen werden.

ca. € / Jahr

17 Endseite

Sie haben nun alle Fragen beantwortet.

**Herzlichen Dank, dass Sie an dieser Befragung teilgenommen haben!
Sie haben unsere Forschung damit sehr unterstützt!**

Sollten Sie noch Fragen oder Anregungen haben, wenden Sie sich bitte an:
Nicole Conrad - nconrad@htwg-konstanz.de

Sie können das Fenster nun schließen.

Fragebogen

1 Erste Seite

Willkommen zurück zur zweiten Befragungsrunde!

Auch in dieser Runde geht es wieder um den Einfluss des Heizsystems auf Komfort und Behaglichkeit. Dieser Fragebogen besteht nur noch aus dem 1. Teil des letzten Fragebogens und wird etwa 5 Minuten Ihrer Zeit in Anspruch nehmen.

Was brauche ich?

Sie benötigen nur das IR Messgerät und die Anzeigen der Innen- und Außenraum Mess-Stationen. Falls nicht Sie selbst die konstanten Daten im ersten Fragebogen eingegeben haben, sondern eine andere Person aus Ihrem Haushalt, benötigen Sie auch den Code dieser Person.

Wohnzimmer?

Bitte beantworten Sie auch dieses mal die Fragen bezüglich des "Wohnzimmers" wieder in dem Raum, der von den Nutzern der Wohnung üblicherweise gemeinsam genutzt wird und in dem man sich häufig aufhält, meist also das klassische "Wohnzimmer".

Wann ausfüllen?

Am besten wäre es, wenn Sie den Fragebogen so bald wie möglich ausfüllen (gerne Abends), da es ja nun hoffentlich bald wieder wärmer wird!

Das möchten Sie nicht beantworten?

Die Beantwortung der Fragen ist für uns von hohem Wert, aber weiterhin absolut freiwillig. Sie können Fragen überspringen oder den "keine Angabe" Button nutzen. Und natürlich können Sie die Beantwortung des Fragebogens zu jedem Zeitpunkt ohne Angabe von Gründen abbrechen. Ihre Daten werden ohne Zuordnung zu Ihrer Person und damit anonymisiert ausgewertet und nicht an Dritte weitergegeben.

Wie lange dauert's noch?

An der Fortschrittsanzeige oben rechts erkennen Sie wieder den Anteil der bisher beantworteten Fragen.

Ihre Unterstützung ist sehr hilfreich für den Erfolg des Projekts.

Herzlichen Dank für Ihre Teilnahme!

2 Codeeingabe

Bitte geben Sie hier wieder Ihren Code nach folgendem Format ein:

Initialen aus dem ersten Vornamen und dem Geburtsnamen Ihrer Mutter und Geburtsjahr Ihrer Mutter.

Beispiel: Elke Müller, geborene Schmidt, geboren im Jahr 1950 ergibt den Code: ES 1950

Initialen und Geburtsjahr Ihrer Mutter XX jxxx

Sollte eine andere Person aus Ihrer Wohnung die Fragen zu den konstanten Daten im ersten Fragebogen ausgefüllt haben, geben Sie hier bitte den Code dieser Person an. Falls nicht können Sie die Frage einfach überspringen.

Bitte konstante Daten übernehmen von XX jxxx

3 1. Fragen zur Person, aktuell bzgl. Behaglichkeit

Teil 1A - momentane Behaglichkeit

Bitte beantworten Sie die Fragen in Ihrem "Wohnzimmer".

Wie warm ist es Ihnen in diesem Moment?

- viel zu kalt zu kühl etwas kühl genau richtig etwas warm zu warm viel zu warm

Wie beurteilen Sie die Temperatur der Umschließungsflächen im Durchschnitt (Wände, Decke, Boden)?

Wie wirken sich die Umschließungsflächen auf Ihre Behaglichkeit aus? Bitte beurteilen Sie die Temperatur auf Distanz. Sind die Umschließungsflächen...

- sehr kalt
 kalt
 eher kalt
 neutral
 eher warm
 warm
 sehr warm

Wie empfinden Sie die aktuelle Luftfeuchte im Raum?

Die Luft ist..

- sehr feucht

- feucht
- eher feucht
- durchschnittlich
- eher trocken
- trocken
- sehr trocken
- kann ich nicht beurteilen / keine Angabe

Wie empfinden Sie die aktuelle Luftqualität?

- sehr gut
- eher gut
- durchschnittlich
- eher schlecht
- sehr schlecht

Zieht es in diesem Moment?

- nein
- ja etwas
- ja sehr

Wie groß ist der Bereich mit angenehmer Temperatur im Wohnzimmer?

- der ganze Raum
- etwa drei Viertel des Raums
- etwa die Hälfte des Raums
- etwa ein Viertel des Raums
- es gibt keinen Bereich mit angenehmer Temperatur

Gibt es im Wohnzimmer etwas besonders Angenehmes und / oder Unangenehmes (bezüglich der Temperatur)?

Bitte geben Sie hier an, was Ihnen **aktuell** angenehm oder unangenehm auffällt, wie zum Beispiel Wohlfühlbereiche, zu kalte oder zu warme Bereiche, Strahlungseinflüsse oder Ähnliches.

Bitte bewerten Sie die Gesamt-Behaglichkeit im Wohnzimmer.

Überdenken Sie hierfür noch einmal die Aspekte Wärme, Feuchte, Luftqualität, Zuglufterscheinungen, Angenehmes und Unangenehmes.

- sehr unbehaglich
- unbehaglich
- eher unbehaglich
- neutral
- eher behaglich
- behaglich
- sehr behaglich

4 2. Fragen person. aktuell Bedienbarkeit

Teil 1B - Bedienbarkeit

Auf welche Art und Weise wird die Temperatur im Wohnzimmer kontrolliert?

- manuell nach Gefühl
- manuell nach Raumthermometer
- Automatische Regelung
- Automatische Regelung mit Monitoring / Verbrauchsanzeige
- Die Temperatur im Raum kann nicht kontrolliert werden

Wie häufig wird die Temperatur im Wohnzimmer von den Nutzern justiert?

- mehrmals täglich
- etwa täglich

- etwa wöchentlich
- etwa monatlich
- nie

Aus welchem Grund wird justiert?

Sie können mehrere Gründe nennen.

- es wird nicht justiert
- Veränderte Nutzung / Tätigkeit
- Verlassen des Raums
- Sonneneinstrahlung / Wärmegewinne
- Mängel (Pfeifen der Heizung o.ä.)
- Kostenersparnis
- Nachtabsenkung

andere

Gibt es Probleme oder Besonderheiten bei der Bedienung der Heizung?

Wie bewerten Sie die Bedienbarkeit Ihrer Heizung?

- sehr gut bedienbar
- gut bedienbar
- bedienbar
- eingeschränkt bedienbar
- nicht bedienbar

5 4. Raum, aktuelle Situation

Teil 1C - Wetterlage und Raumklima

Bitte geben Sie hier das aktuelle Datum ein.

tt.mm.jjjj

Bitte geben Sie hier die aktuelle Uhrzeit ein.

Uhrzeit: hh:mm

Welches Wetter ist im Moment?

Mehrfachantworten sind möglich.

- Schneefall
- Regen
- Nieselregen
- Nebel
- stürmisch
- bedeckt
- leicht bewölkt
- klar
- kalt
- kühl
- eher warm
- sonnig

Bitte geben Sie hier die gemessene Außentemperatur ein.

°C

Bitte geben Sie hier die relative Luftfeuchte außen ein.

%

Bitte geben Sie hier die aktuelle Raumtemperatur an:

°C

Bitte geben Sie hier die aktuelle relative Luftfeuchte im Wohnzimmer an.

%

Falls Messgerät vorhanden:

Bitte geben Sie hier die aktuelle CO2 Konzentration im Raum an.

ppm

Welche Temperatur hat die Außenwand?

Bitte messen Sie die Temperatur mit dem IR-Messgerät.

Bei Vorhandensein von Wand und Glasflächen, messen Sie bitte auf der größeren, dominanten Fläche. Sollte die größere Fläche beispielsweise von geschlossenen Vorhängen überdeckt sein, messen Sie bitte auf der Textiloberfläche.

Außenwand °C

Welche Temperatur hat die Innenwand?

Bitte messen Sie die Temperatur mit dem IR-Messgerät.

Innenwand °C

Welche Temperatur hat der Boden?

Bitte messen Sie die Temperatur mit dem IR-Messgerät.

Boden °C

Welche Temperatur hat die Decke?

Bitte messen Sie die Temperatur mit dem IR-Messgerät.

Decke °C

Wird die Temperatur und / oder Abstrahlung der Umgebungsflächen durch Einrichtung oder Ausbau beeinflusst? Wenn ja, durch welche Elemente?

Beispiel: geschlossene Vorhänge, Gardinen, Wandteppich, Innendämmung...

Sind Fenster im Wohnzimmer im Moment...

- geschlossen
 gekippt
 offen

Ist das Wohnzimmer im Moment beheizt?

- ja
 nein

Gibt es weitere Wärmequellen im Wohnzimmer, wie beispielsweise...

Bitte nennen Sie nur solche, die gerade Wärme abgeben.
Mehrfachnennungen sind möglich.

- nein
 ein Ofen
 Kerzen
 Glühbirnen
 Computer
 Aquarium
 weitere Personen. Wenn ja, wie viele?

andere

6 3. Fragen zur Person, aktuelle Situation

Teil 1D - Fragen zur Person, aktuelle Situation

Bitte geben Sie hier Ihre Tätigkeit direkt vor der Befragung an.

Wählen Sie bitte die Variante, die der tatsächlichen Tätigkeit bezüglich Anstrengung am ähnlichsten ist.

- Liegend, entspannt
- Sitzend, entspannt
- Sitzende Tätigkeit
- Stehend
- Stehend, leichte Tätigkeit
- Stehend, mittelschwere Tätigkeit
- langsames Gehen
- schnelles Gehen
- anstrengende Tätigkeit
- sehr anstrengende Tätigkeit
- keine Angabe

Bitte geben Sie hier den Grad Ihrer aktuellen Bekleidung an.

Bitte wählen Sie die Angabe, die Ihrer aktuellen Bekleidung am ähnlichsten ist.

- keine Kleidung
- nur Unterwäsche
- Shorts und T-Shirt
- lange Hose und T-Shirt
- lange Hose, Oberhemd
- lange Hose, Pullover
- Winterjacke oder Mantel
- keine Angabe

Haben Sie im Moment einen erhöhten Wärmebedarf? (z.B. aus gesundheitlichen Gründen o.ä.)

- ja
- nein
- keine Angabe

7 6a. Personenbezogene Daten Person

Teil 2A - konstante Daten Person

Sind Sie...

- weiblich
- männlich
- andere / keine Angabe

Bitte geben Sie Ihr Alter an.

- 10 - 19 Jahre
- 20 - 29 Jahre
- 30 - 39 Jahre
- 40 - 49 Jahre
- 50 - 59 Jahre
- 60 - 69 Jahre
- 70 - 79 Jahre
- 80 - 89 Jahre
- 90 Jahre und älter
- keine Angabe

Bitte geben Sie an, aus welcher Klimazone Sie stammen.

- Tropen
- Subtropen
- gemäßigte Zonen (Mitteleuropa)
- Subpolargebiete
- Polarregion
- keine Angabe

Frieren Sie leicht bzw. haben Sie generell einen erhöhten Wärmebedarf? (z.B. aus gesundheitlichen Gründen o.ä.)

- ja
- nein
- keine Angabe

Wie wichtig ist für Sie persönlich das Thema "Energiesparen"?

- sehr wichtig
 - wichtig
 - eher wichtig
 - neutral
 - eher unwichtig
 - unwichtig
 - sehr unwichtig
 - keine Angabe
-

8 Endseite

Sie haben nun alle Fragen beantwortet.

**Herzlichen Dank, dass Sie an dieser Befragung teilgenommen haben!
Sie haben unsere Forschung damit sehr unterstützt!**

Sollten Sie noch Fragen oder Anregungen haben, wenden Sie sich bitte an:
Nicole Conrad - nconrad@htwg-konstanz.de

Sie können das Fenster nun schließen.
