

Abschlussbericht InfraMess (Fortsetzung)

Fachabteilung Energie und Wohnbau



Begleituntersuchung
für ein Infrarot-
Heizsystem und ein
fernwärmebasiertes
Radiatorensystem,
Wohnanlage Kaindorf
a. d. Sulm

September 2019





ABSCHLUSSBERICHT INFRAMESS (FORTSETZUNG)

Für den Inhalt verantwortlich: Fachabteilung Energie und Wohnbau
www.wohnbau.steiermark.at

Layout: Marco Umgeher, Ing.

Herausgeber

Amt der Steiermärkischen Landesregierung
ABT 15 Energie, Wohnbau, Technik
Leitung: HR Dr. Gerhard Semmelrock
Landhausgasse 7, 8010 Graz

Telefon: +43/(0)316/877-4166
Fax: +43/(0)316/877-4569
E-Mail: abteilung15@stmk.gv.at

© September 2019



Abschlussbericht 2019

InfraMess

Begleituntersuchung
für ein Infrarot-Heizsystem
und ein fernwärmebasiertes
Radiatorensystem,
Wohnanlage Kaindorf a.d. Sulm

DI Daniel Rüdissler, AEE INTEC

DI Reinhard Pertschy, AEE INTEC

Ing. Waldemar Wagner, AEE INTEC

Dr. Karl Höfler, AEE INTEC

DI Marcus Deopito, ENW Gemeinn. Wohnungsges.m.b.H.

Gleisdorf, September 2019

AEE - Institut für Nachhaltige Technologien (AEE INTEC)

8200 Gleisdorf, Feldgasse 19, Austria

durchgeführt durch

AEE - Institut für Nachhaltige Technologien

A-8200 Gleisdorf, Feldgasse 19

Tel.: +43-3112 5886 –17

Fax: +43-3112 5886 –18

E-Mail: office@aee.at



beauftragt durch das

**Amt der Steiermärkischen Landesregierung
FA Energie und Wohnbau**

Landhausgasse 7

8010 Graz



Das Land
Steiermark

→ Fachabteilung Energie und Wohnbau

Inhalt

1	EINLEITUNG	4
1.1	Ausgangssituation / Motivation	4
1.2	Messbericht Auswertephase 1 und Adaption Infrarot-Heizsystem	4
1.3	Hintergrund und Zielsetzungen.....	6
1.4	Untersuchungsgegenstand und Methodik	9
2	MESSKONZEPT	15
3	ERGEBNISSE	20
3.1	Energieverbrauch	20
3.2	Lokales Klima / Außenbedingungen	33
3.3	Raumfühler	35
3.4	Befragungen zur Behaglichkeit	53
3.5	Behaglichkeitsmessung	58
3.6	Dreidimensionale Behaglichkeitsanalyse – IR-Wohnung	81
3.7	Funktionsweise der Heizungsregelung des Infrarot-Paneels.....	94
3.8	Verteilungsverluste Fernwärme – Wohnung	95
3.9	Wirtschaftlichkeitsvergleich (Herstellkosten-Betriebs- und Wartungskosten) .	102
3.10	Vergleich Primärenergieverbrauch und CO ₂ Äquivalente Emissionen	119
3.11	PV Eigenverbrauch.....	137
4	ZUSAMMENFASSUNG	145
4.1	Herstellungskosten	145
4.2	Betriebskosten	145
4.3	Wirtschaftlichkeit.....	146
4.4	Energieverbrauch Heizung und Warmwasser.....	146
4.5	Primärenergieverbrauch Heizung und Warmwasser.....	146
4.6	Treibhausgas-Emissionen	147
4.7	Behaglichkeit	148
4.8	Photovoltaik-Eigendeckung	148

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation / Motivation

Das Land Steiermark unterstützt die Bemühungen der steirischen Wohnbaugenossenschaften kostengünstiges Wohnen bei gleichzeitig hohem Komfort in der Steiermark zu ermöglichen. In einem Umfeld sich ständig ändernder Rahmenbedingungen gilt es hierfür die optimalen Umsetzungsmöglichkeiten unter Einhaltung der geltenden Standards und unter Berücksichtigung der übergeordneten Ziele zu prüfen.

Auf Seiten der Raumheizung, insbesondere im Bereich des Einfamilienhauses, gelangen in den letzten Jahren vermehrt Systeme mit Infrarotpanelen zur Anwendung. Da sich die Systeme grundlegend von konventionellen Heizsystemen unterscheiden, gilt es hinsichtlich des Einsatzes im Wohnbaubereich eine Reihe von wichtigen Fragestellungen zu beantworten, welche sowohl den Nutzerkomfort, als auch die Wirtschaftlichkeit und die Umweltauswirkungen betreffen. Bisher gibt es weltweit kaum umfassende und unabhängige Studien zu dieser Thematik. Aus diesem Grunde wurde die vorliegende Studie von der Fachabteilung Energie und Wohnbau des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung beauftragt und mit maßgeblicher Unterstützung der Wohn- und Siedlungsgenossenschaft ENNSTAL durchgeführt.

1.2 Messbericht Auswertephase 1 und Adaption Infrarot-Heizsystem

1.2.1 Messbericht Auswertungsphase 1

Die erste Messperiode umfasste den Auswertzeitraum Kalenderjahr 2017 und damit jeweils zwei halbe Heizperioden. Die Ergebnisse wurden in einem Endbericht (Phase I) zusammengestellt und der Öffentlichkeit seitens des Landes Steiermark und der AEE INTEC zur Verfügung gestellt.

Der Bericht behält für sich unabhängige Gültigkeit.

LINK: www.aee-data.at/downloads/inframess.pdf

1.2.2 Adaption des Infrarot-Heizsystems

Aufgrund der kritischen Ergebnisse der Behaglichkeitsbefragung und -analyse in der Messphase I im Kochen/Essen/Wohnen-Bereich, bei welcher insbesondere die ungleichmäßige Wärmeverteilung im Raum bemängelt wurde, hat der Hersteller neue Varianten für die Anordnung der IR-Paneele erarbeitet. Die Varianten wurden mit der Siedlungsgenossenschaft Ennstal und dem Haustechnikplaner diskutiert und im Herbst 2018 die ausgewählte Adaption durchgeführt.

Zusätzlich zum bestehenden Paneel in Raummitte wurde – um den Aufwand für die Bewohner gering zu halten – ein zusätzliches kleineres IR-Heizpaneel angebracht. Das neue Paneel wurde durch eine aufputz verlegte Elektroleitung mit dem bestehenden Paneel verbunden. Beide Paneele werden somit vom selben Thermostaten geregelt. Diese Adaption wurde in fünf der sechs infrarotbeheizten Wohnungen durchgeführt. Durch die Ergänzung um ein weiteres Paneel, ergibt sich eine gleichmäßigere Strahlungsverteilung im Raum. Zudem sinken bei gleicher Heizleistung im Raum die mittleren Oberflächentemperaturen der beiden Paneele.

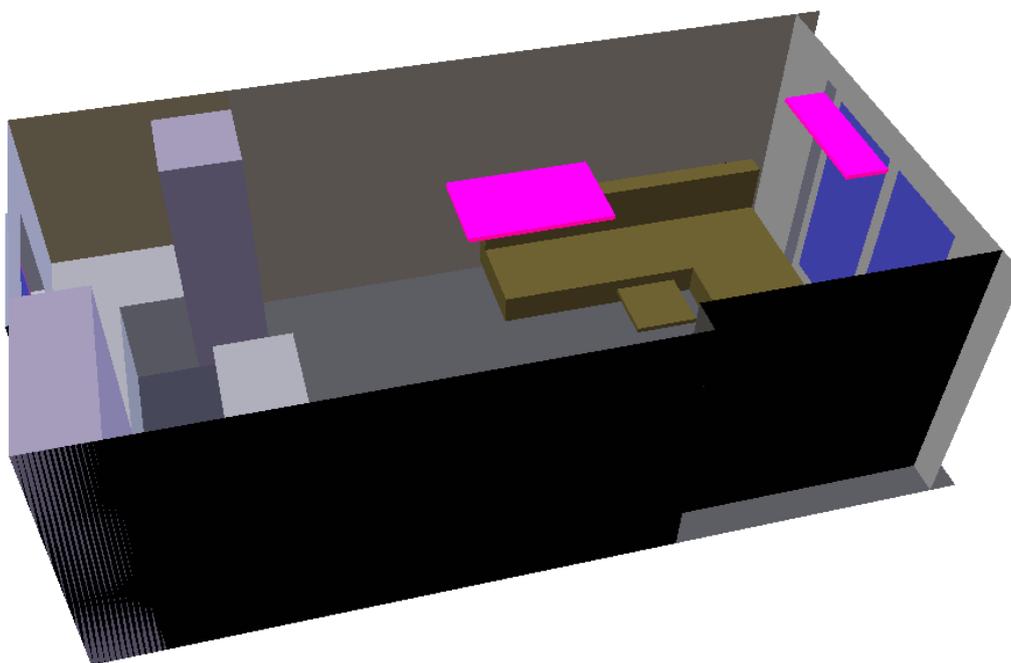


Abb. 1 Anordnung der IR Paneele im Koch-/Ess-/Wohnbereich 3d-Ansicht
(bestehendes Paneel links, Nachrüstpaneel rechts)



Abb. 2 Foto der Umsetzung
(bestehendes Paneel rechts, Nachrüstpaneel links)

1.3 Hintergrund und Zielsetzungen

Der Trend zu Infrarotheizung in Wohngebäuden hat sich in letzter Zeit deutlich verstärkt. Hersteller bewerben viele Eigenschaften der Heizsysteme wie etwa: geringe Anschlussleistung, exakt geregelte Betriebszeiten, Einzelraumregelung, markant reduzierte Investitions- und Betriebskosten, keine Wartungs- oder Nebenkosten und erhöhte Behaglichkeit. Die vorliegende Untersuchung soll dazu dienen, diesen versprochenen Leistungen objektive Bewertungen gegenüberzustellen.

Das physikalische Funktionsprinzip von Infrarot-Heizsystemen ist einfach und theoretisch gut beschreibbar. Jeder Körper der erwärmt wird, strahlt grundsätzlich Energie in der Form von elektromagnetischen Wellen ab. Die Wellenlänge dieser Strahlung und die insgesamt abgestrahlte Leistung sind von der Temperatur abhängig. Bei geringen Temperaturen <200 °C liegen die Wellenlängen der Strahlung vorwiegend im Bereich von einigen Mikrometern (siehe Abb. 3), man spricht in diesem Zusammenhang von „langwelliger Strahlung“, „Wärmestrahlung“ oder „Infrarot-C“. Bei höheren Temperaturen, ab ca. 500 °C, werden die Wellenlängen so kurz, dass sie sich in den Bereich des sichtbaren Lichts verschieben – die Wärmestrahlung wird als „Rotglut“ sichtbar. Erreichen die Temperaturen Werte von einigen Tausenden Grad, so wird vorwiegend Strahlung im sichtbaren Bereich abgegeben (vgl. Sonne oder Weißglut).

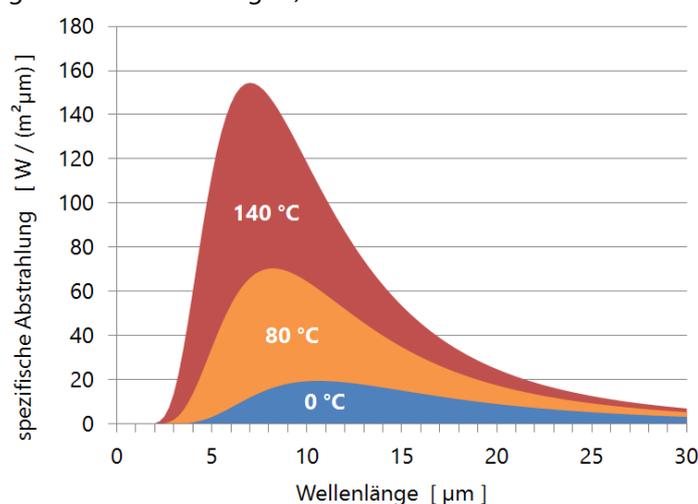


Abb. 3 Wärmestrahlung bei unterschiedlichen Temperaturen

Die gesamte abgestrahlte Leistung kann durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben werden, nach welchem Körper, abhängig von Ihrer Temperatur, beständig Energie in der Form von Wärmestrahlung abgeben.

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

P...Strahlungsleistung [W] *A*...Fläche [m²]
ε...Emissionsgrad *T*...Temperatur [K]
σ...Stefan-Boltzmann-Konstante

Die abgestrahlte Leistung ist vom Emissionsgrad ε der Oberfläche abhängig. Beim theoretischen Fall des sogenannten „schwarzen Strahlers“, ist dieser 1.0 und die Abstrahlung maximal. Bei den meisten üblichen Oberflächen liegt der Wert im Bereich von 0.85 - 0.98, d.h. es werden immer noch 85% bis 98% der Leistung des schwarzen Strahlers abgestrahlt. Entspricht die Abstrahlung in etwas reduzierter Form jener eines schwarzen Körpers, so spricht man von „grauen Strahlern“. Die meisten Oberflächen, wie auch jene der Infrarot-Paneele, fallen unter diese Kategorie. Ausnahmen wären etwa – insbesondere polierte – Metalloberflächen oder nanostrukturierte oder kristalline Oberflächen. Bei diesen kann der Emissionsgrad generell oder in bestimmten Wellenlängenbereichen („selektiv“) deutlich geringer sein. Ein wichtiges Prinzip der Wärmestrahlung ist, dass der Emissionsgrad ε dem Absorptionsgrad α entspricht. Das heißt, dass das Vermögen von Oberflächen Wärmestrahlung

abzugeben, dem Vermögen Wärmestrahlung aufzunehmen entspricht. Oberflächen mit hohem Emissionsgrad erwärmen sich deshalb bei gleicher Wärmestrahlung schneller.

Die abgegebene Leistung ist zudem abhängig von der vierten Potenz der Temperatur, d.h. sie steigt mit zunehmender Temperatur stark überproportional an. Da bei Berechnung der übertragenen Wärmemenge jedoch auch die entsprechende Strahlungsleistung der Umgebung in umgekehrter Richtung berücksichtigt werden muss, ergibt sich im hier relevanten Temperaturbereich ein nahezu linearer Zusammenhang, d.h. bei einer Verdoppelung der Temperaturdifferenz zwischen Strahler und Umgebung, steigt die netto abgestrahlte Leistung nur geringfügig mehr als das Doppelte an (siehe Abb. 4).

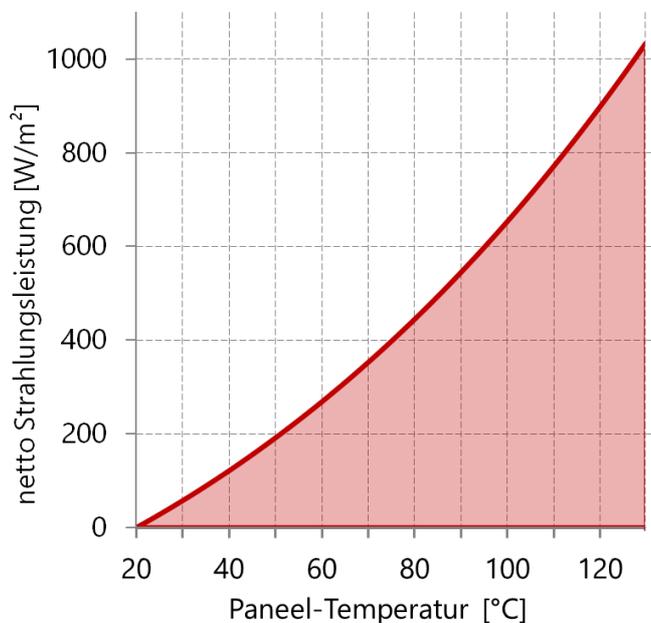


Abb. 4 Beispiel abgegebene Strahlungsleistung abhängig von der Paneel-Temperatur
(bei 20°C Umgebungstemperatur, 0.96 Emissionsgrad)

Zusätzlich zur abgestrahlten Leistung wird auch bei Infrarot-Heizpaneelen ein Teil der Wärme über Konvektion abgegeben, d.h. die vorbeiströmende Luft wird erwärmt. Der genaue Anteil der Konvektion an der Wärmeabgabe ist von einer Reihe von Parametern abhängig, insbesondere auch von der Größe und Einbauposition.

Umgekehrt, wird auch bei konventionellen Radiatoren, oder anderen Heizsystemen, ein signifikanter Teil der Wärme in Form von Wärmestrahlung abgegeben (in der Regel etwa ein Drittel). Das Verhältnis zwischen konvektiv abgegebener und abgestrahlter Wärme ist bei Infrarot-Heizsystemen im Wesentlichen auf Grund der Geometrie der Paneele und der vergleichbar hohen Oberflächentemperaturen deutlich in Richtung Wärmestrahlung verschoben.

Während also die zugrundeliegenden wirksamen physikalischen Prinzipien bekannt und relativ einfach beschreibbar sind, gibt es hinsichtlich der Wechselwirkung des Heizsystems mit dem Gebäude und insbesondere mit den Gebäudenutzern - Stichwort Behaglichkeit - noch erheblichen Forschungsbedarf. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurde im Zuge dieses Projekts ein umfangreiches vergleichendes Monitoring der Infrarot-Heizung unter Realbedingungen in einem bewohnten Objekt untersucht.

Für eine möglichst ganzheitliche Bewertung, wurden Analysen zu den folgenden Themengebieten durchgeführt:

- Wirtschaftlichkeit
 - Investitionskosten
 - Betriebskosten
 - Lebenszykluskosten

- Effizienz und Umweltauswirkungen
 - Energieverbrauch
 - Primärenergieverbrauch
 - Treibhausgasemissionen
 - PV-Eigenverbrauch

- Behaglichkeit

1.4 Untersuchungsgegenstand und Methodik

Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten wurde eine vergleichende Studie von zwei weitgehend identischen Objekten durchgeführt. In einer neu errichteten Wohnanlage der Wohnbaugesellschaft „Gemeinnützige Wohn- und Siedlungsgenossenschaft Ennstal“ bestehend aus insgesamt vier baugleichen Wohngebäuden, zu jeweils sechs Wohneinheiten, wurde für dieses Forschungsprojekt eines dieser Gebäude vollständig mit Infrarot-Paneelen ausgestattet. Alle anderen Objekte werden mit konventioneller, durch Fernwärme gespeister, Radiatorheizung betrieben. Die Wohnanlage befindet sich in der Gemeinde Kaindorf an der Sulm (welche zwischenzeitlich in die Gemeinde Leibnitz integriert wurde).

Sowohl das mit Infrarot-Systemen beheizte Gebäude, als auch das konventionell beheizte Gebäude wurde von AEE INTEC mit umfassender Messtechnik ausgestattet. Zusätzlich wurden in diesen beiden Objekten Nutzerbefragungen durchgeführt und vor-Ort Spotmessungen zur Behaglichkeit durchgeführt. Für die Analyse der Herstellungs- und Betriebskosten wurden von der Wohnbaugesellschaft zur Verfügung gestellte Unterlagen und Abrechnungen ausgewertet.

Auf Basis der so ermittelten Daten konnten gezielt Ergebnisse für die gesetzten Fragestellungen erarbeitet werden. Die Möglichkeit zwei baugleiche Objekte vergleichen zu können erhöht die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse.

Für das Forschungsprojekt wurden die beiden nördlichen Objekte „Haus 4“ (Infrarot) und „Haus 3“ (Fernwärme) untersucht (siehe Abb. 5). Die Objekte liegen nebeneinander und weisen die gleiche Orientierung auf.

Nachfolgend eine Aufstellung über wesentliche Kenngrößen der beiden Objekte.

Tab. 1 Übersicht Kennzahlen der untersuchten Objekte

	Haus 3	Haus 4
Wärmeabgabe	Radiatoren	Infrarot-Paneele
Wärmeversorgung	zentral	dezentral/elektrisch
Warmwasserbereitung	FW / dezentrale Speicher	Elektrisch / dezentrale Speicher
Warmwasserspeicher	110 l	120 l
Energiequelle	Fernwärme (Biomasse Holz)	Elektrizitätsnetz / PV-Anlage (2kWp je WE)
Wohnnutzfläche (WNF)	438 m ²	
Bruttogeschosfläche (BGF)	560 m ²	
Wohnungsgrößen	50-97 m ² , 1-3 Schlafzimmer	
Anzahl Wohneinheiten	6	
Belegung	12 Personen	8 Personen
Heizwärmebedarf (Energieausweis)	28 kWh/m ²	
U-Werte	Außenwand U=0,13 W/m ² K (25 cm HLZ, 20 cm EPSplus) Decke zu Dachraum: U=0,08 / 0,11 W/m ² K Boden erdanliegend: U=0,11 W/m ² K Fenster U _w =0,81 W/m ² K	

Anmerkung: AEE INTEC war zu keiner Zeit bei der Planung, Auslegung oder Realisierung der Heizungssysteme involviert. Diese wurden auf übliche Weise von der Siedlungsgenossenschaft beauftragt und von erfahrenen Unternehmen der jeweiligen Branchen nach dem aktuellen Stand der Technik ausgeführt.

Planauszüge und Fotos der Objekte

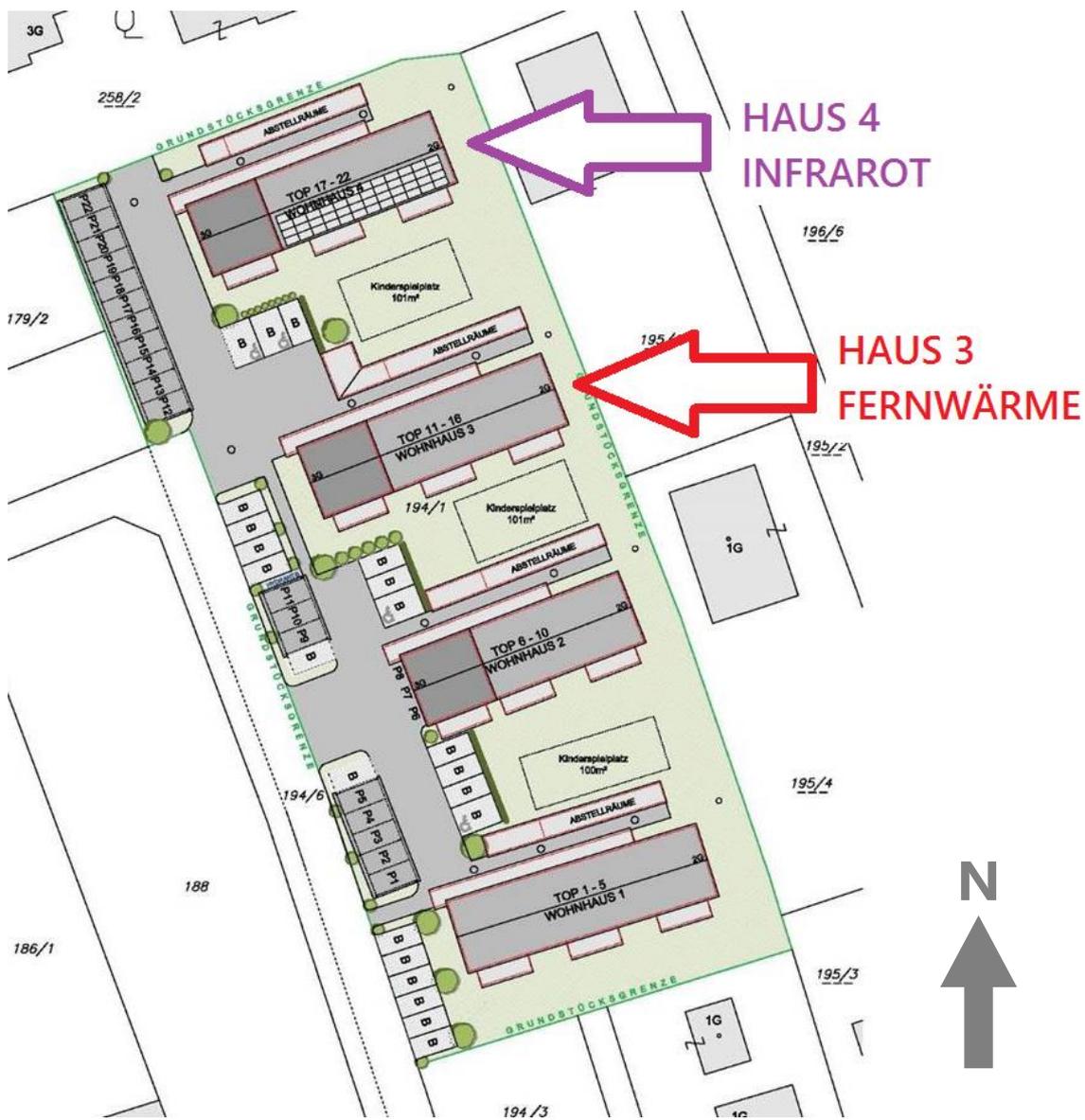


Abb. 5 Lageplan – Siedlung

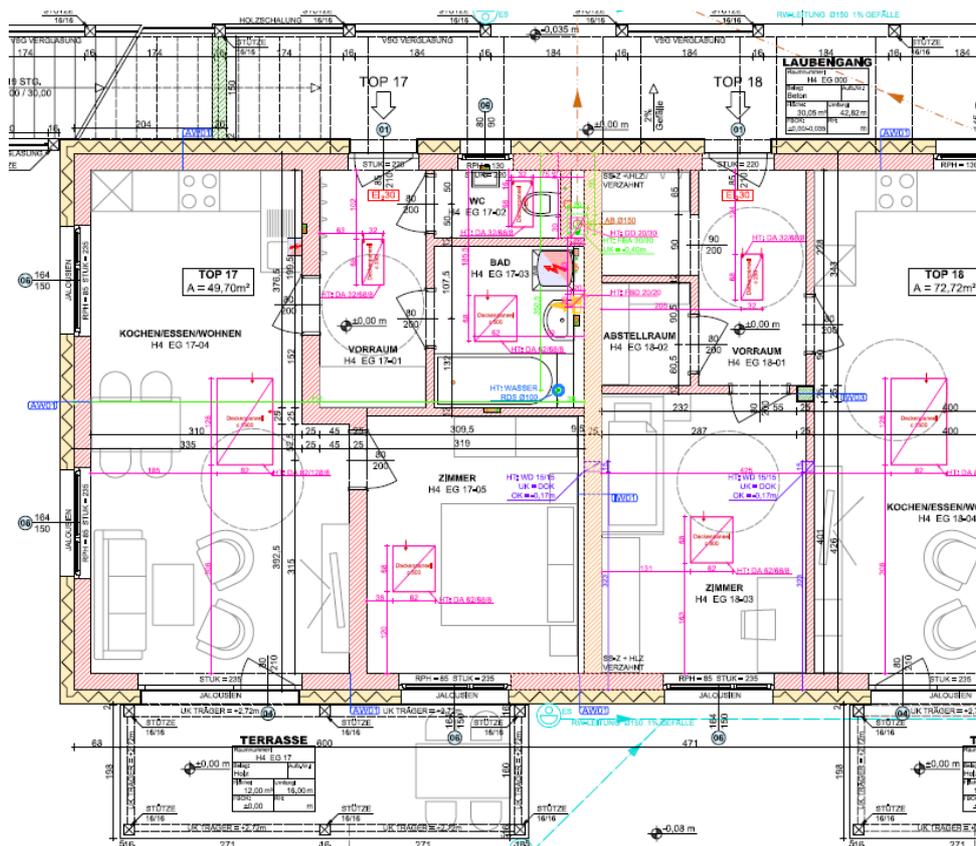


Abb. 6 Grundriss EG – Wohnung in Haus 4

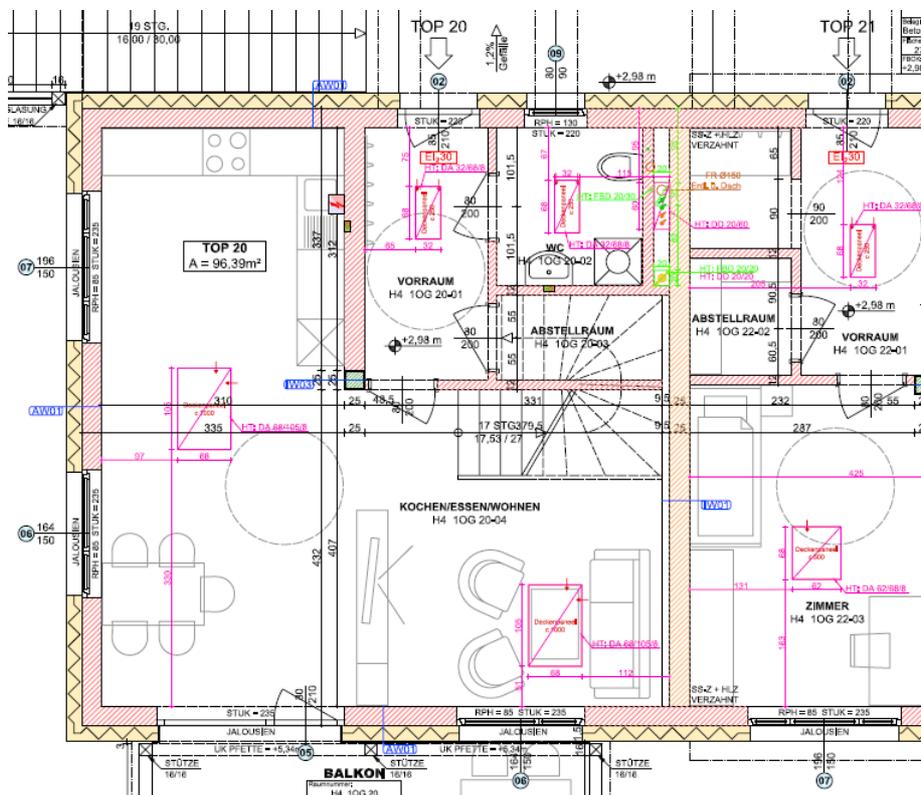


Abb. 7 Grundriss OG – Wohnung in Haus 4

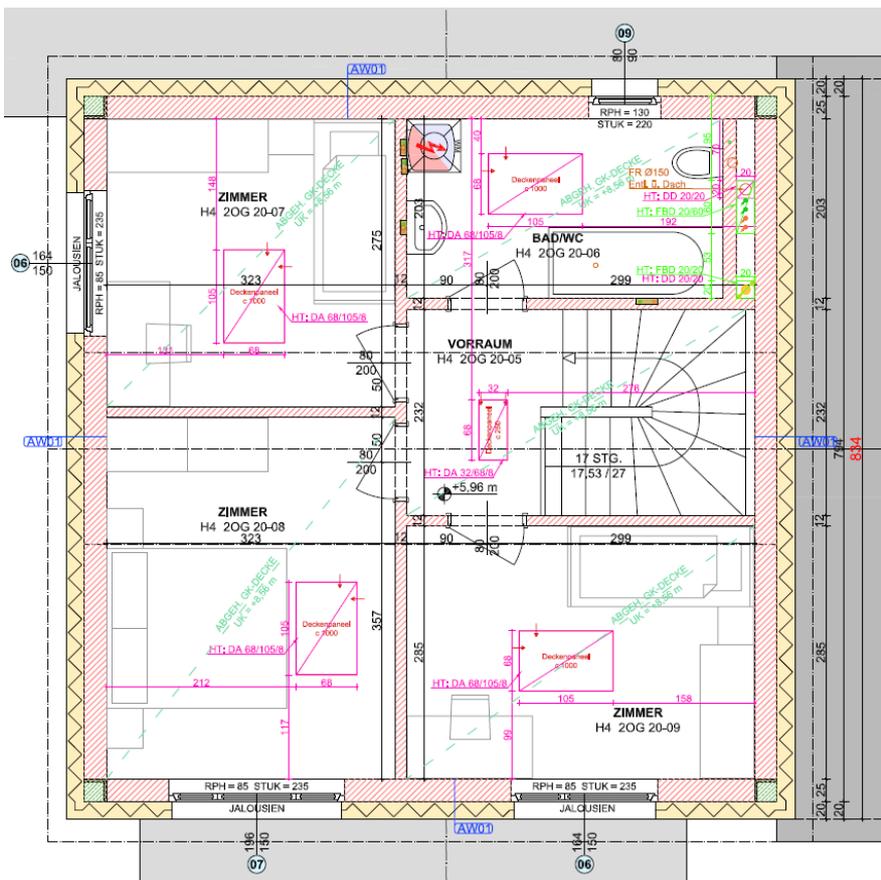


Abb. 8 Grundriss DG – Wohnung in Haus 4

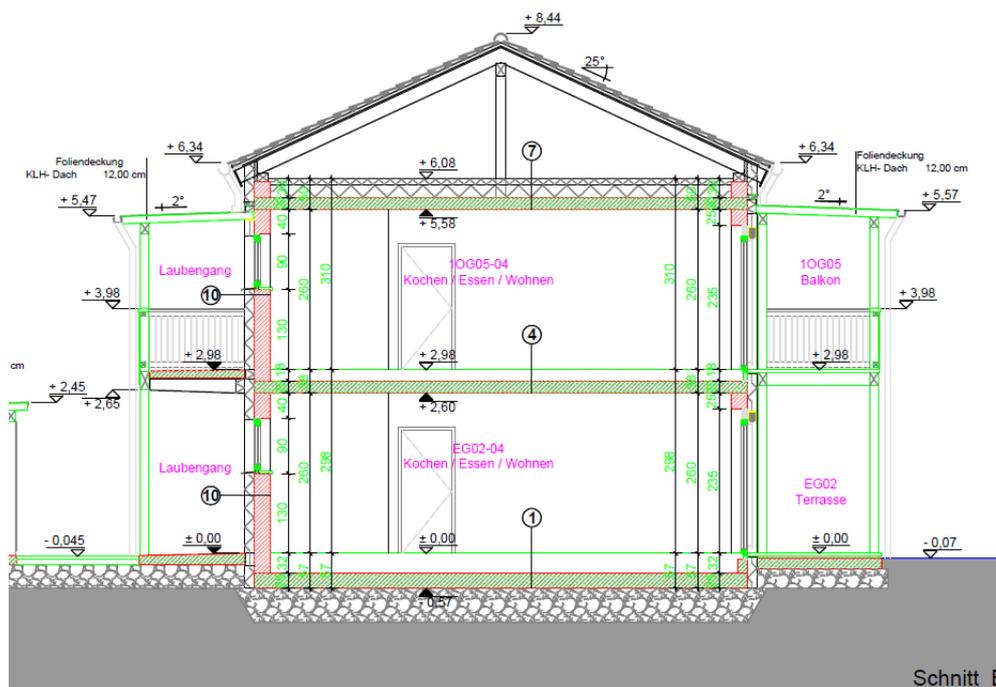


Abb. 9 Vertikalschnitt Haus 4



Abb. 10 Foto Siedlung
(Haus 4 ganz hinten mit PV-Anlage, Haus 3 davor)



Abb. 11 Haus 4 bei Fertigstellung - Südseite



Abb. 12 Haus 4 bei Fertigstellung - Südseite

2 Messkonzept

2.1.1 Allgemeines

Ziel bei der Messtechnik-Konzeptentwicklung war es in den beiden untersuchten Gebäuden möglichst alle relevanten Parameter zu erheben, welche für die Beurteilung der energetischen Performance bzw. des Komforts nötig sind.

Das messtechnische Konzept beinhaltet die folgenden Messparameter:

- Außenklimabedingungen wie Globalstrahlung, Luftfeuchtigkeit und Temperatur
- In den Wohnungen: Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte, CO₂ sowie Fensterkontakte zur Ermittlung der Fensteröffnungszeiten
- Monitoring sämtlicher relevanter Wärmeströme der Fernwärmeversorgung mit Vorlauf-/Rücklauftemperaturen, Volumenströme, Energie, Leistung.
- Erhebung des elektrischen Energieverbrauchs getrennt in die Bereiche:
 - Haushaltsstrom
 - IR-Heizungssystem (nur bei IR Wohnungen)
 - Warmwasserversorgung (nur bei IR Wohnungen)
 - PV-Erzeugung
 - Haushaltsstrom

Aus den Einzelkomponenten der Energieverbrauchsmessung wurden bei der Auswertung im Zuge einer Energiebilanzierung die Gesamtenergieverbräuche (thermisch und elektrisch) für die untersuchten Objekte errechnet.

2.1.2 Messtechnikschema

Energiemessung Fernwärme-Wohnung

Die Bestimmung der Energieverbräuche in den Fernwärmewohnungen erfolgte über die Messung der Wärmemengen in den Wohnungsübergabestationen. Die Energiemenge für die Heizung und die Warmwasserbereitung wurde getrennt voneinander, mit jeweils eigenen Wärmemengenzählern, erfasst.

Für die Fernwärmeabrechnung und Ermittlung der Verteilverluste wurde der Wärmemengenzähler in der Fernwärmeübergabestation herangezogen. Aus der Differenz der Messwerte der Wärmemengenzähler in der Fernwärmeübergabestation und den Wärmemengenzähler in den Wohnungsübergabestationen konnten die Verteilverluste ermittelt werden.

Zusätzlich wurden auch die bezogenen Kalt- und Warmwassermengen erfasst.

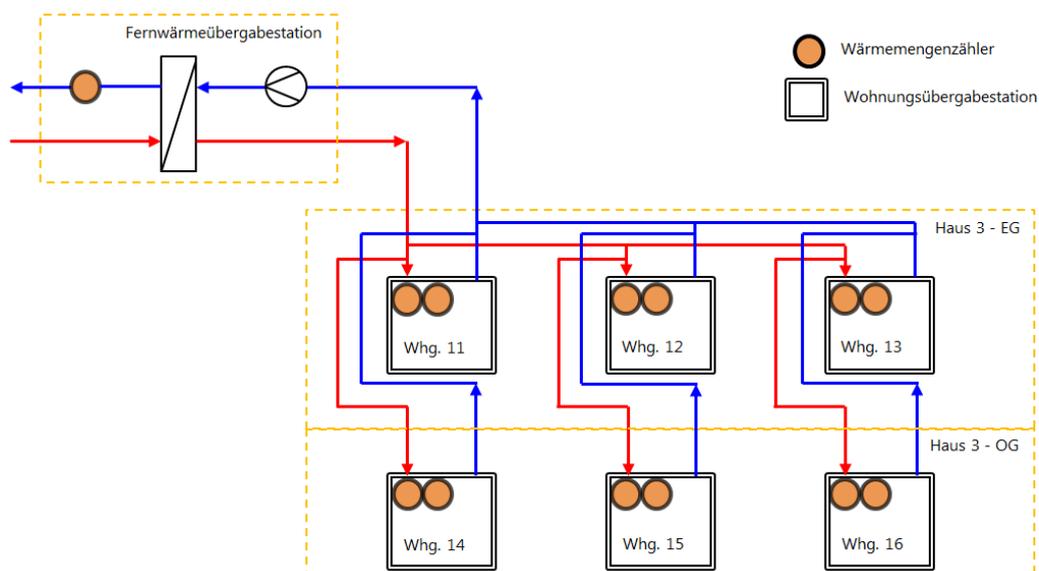


Abb. 13 Übersichts-Schema der Wärmeversorgungsleitungen.

In den Wohnungsübergabestationen wird die Wärmeversorgung aufgeteilt auf die Heizung und auf die Warmwasserbereitung. Diese beiden Kreise werden getrennt voneinander mit Wärmemengenzählern gemessen.

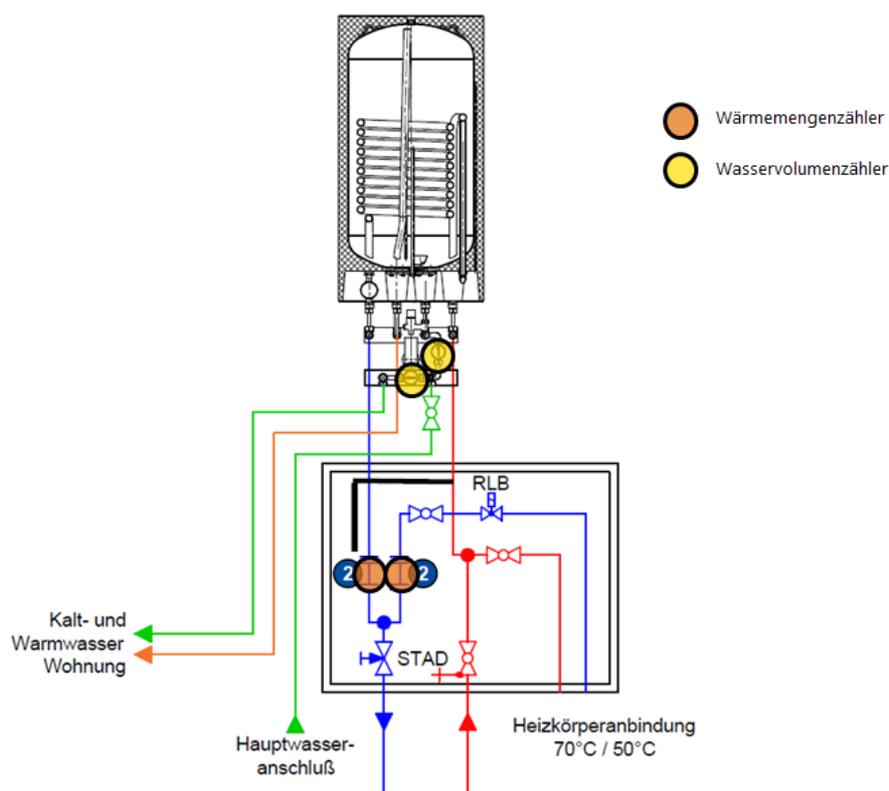


Abb. 14 Wärme- und Wasserversorgung der Wohnungen im Detail,

In der Wohnungsübergabestation teilen sich die Wärmeversorgungsleitungen auf die Heizkörperanbindung und die Warmwasserversorgung auf. Der Frischwasserkreis wird mit einem Wasservolumenzähler für das Kaltwasser und einem für Warmwasser gemessen.

Energiemessung IR-Wohnung

Die Messung der Energieverbräuche in den IR-Wohnungen erfolgte über die Messung mittels Stromzählern. Auf Grund des physikalischen Messprinzips kann hierbei die genutzte elektrische Wirkenergie sehr genau bestimmt werden. Die Messdatenerfassung erfolgte mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten. Die zeitlich hohe Auflösung gestattet insbesondere eine genaue Zuordnung der in der Photovoltaik-Anlage erzeugten Strommengen.

Die folgenden Komponenten wurden messtechnisch erfasst:

- Gesamtverbrauch
- Generierter Photovoltaik-Strom
- Gesamt-Netzeinspeisung (PV)
- Energiebezug Warmwassererzeugung
- Energiebezug Infrarot-Heizung.
- Energiebezug Haushaltsstrom (mittels Bilanzierung, nicht direkt gemessen)
- PV-Eigenverbrauch (mittels Bilanzierung)

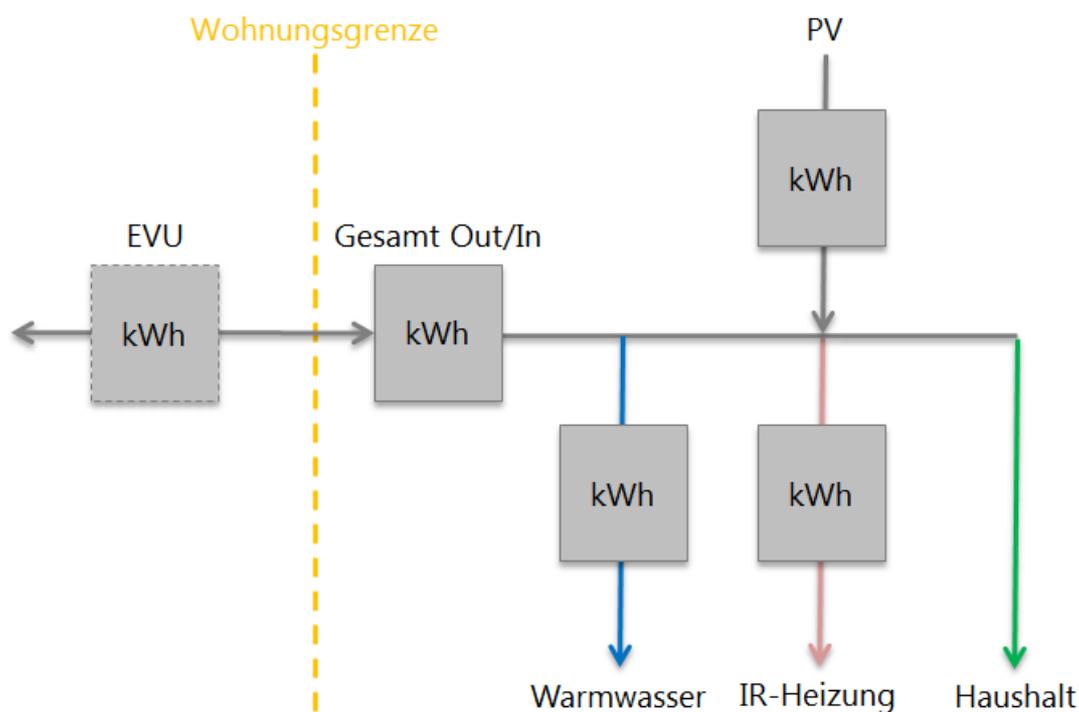


Abb. 15 Messung der elektrischen Leistung und Energie: Netzbezug, Netzeinspeisung, PV-Produktion und der Stromverbraucher: Warmwasser, Heizung und Haushaltstrom (indirekt). Der EVU Zähler wird nicht automatisiert ausgelesen, es erfolgt aber stichprobenhaft ein Vergleich der Zählerstände.

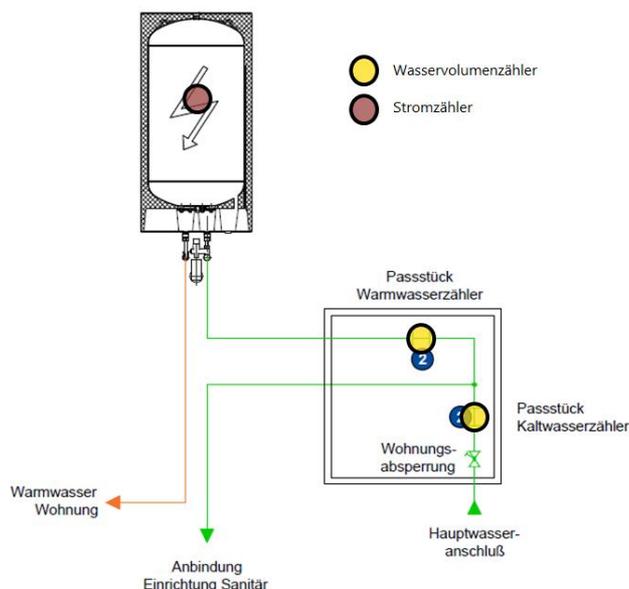


Abb. 16 Messung der Kalt- und Warmwasservolumina in den Infrarot-Wohnungen.

Die Wärmemenge für die Warmwasserbereitung wird über einen elektrischen Wirkenergiezähler gemessen.

Temperatur, Feuchte, Kohlenstoffdioxid, Fensteröffnung

Für die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs dieser Messgrößen wurden in allen zwölf untersuchten Wohnungen entsprechende Sensoren verbaut. Es wurde in allen Räumen die Lufttemperatur gemessen. In allen Wohnräumen wurde zusätzlich die CO₂ Konzentration gemessen. In den Wohnzimmern wurde zusätzlich die relative Feuchte erfasst. Alle Fenster wurden mit Fensteröffnungskontakten ausgestattet. Hierdurch konnte der Öffnungszustand des Fensters ohne Unterscheidung Kippöffnung/Flügelöffnung ermittelt werden.

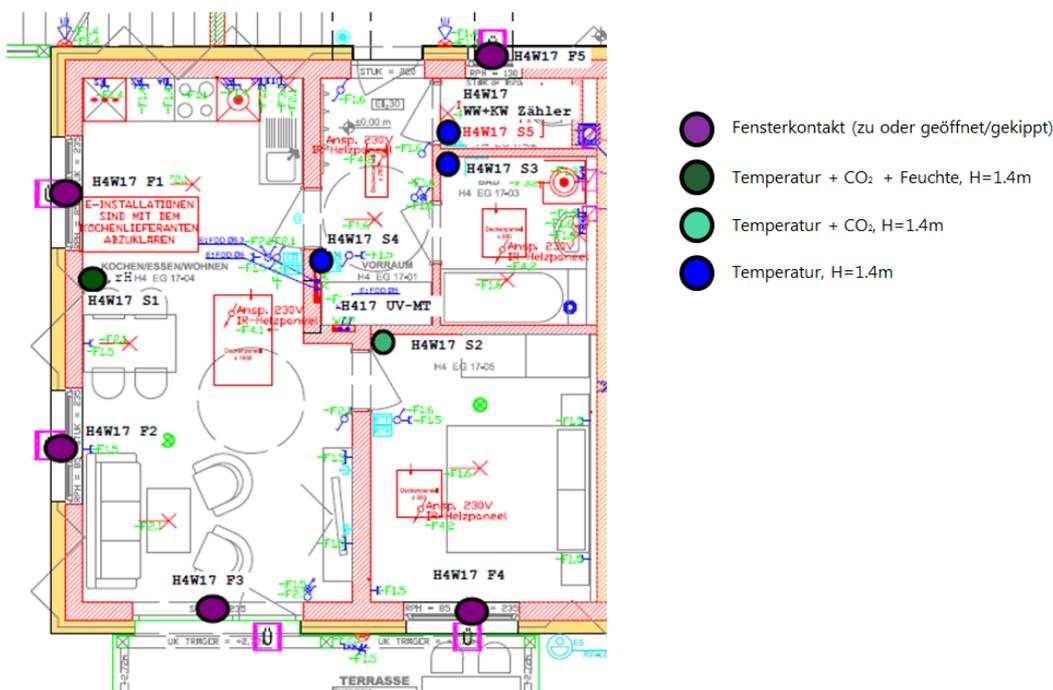


Abb. 17 Anordnung der Sensoren zur Bestimmung des Raumklimas
(am Beispiel von Wohnung 17 im IR-Gebäude)

2.1.3 Auswertezeitraum

Die Messtechnik wurde im Laufe des Jahres 2016 installiert. Da die Wohnungen im Winter 2016/2017 sukzessive bezogen wurden, wurden die beiden darauffolgenden Heizperioden für die Auswertungen herangezogen.

Die Auswerteziträume wurden deshalb wie folgt definiert:

	<i>Beginn</i>	<i>Ende</i>
„JAHR 1“	1.6.2017	31.5.2018
„JAHR 2“	1.6.2018	31.5.2019

Wie bereits im Kapitel 1.2.1 erwähnt, fand bereits eine umfassende Auswertung für das Kalenderjahr 2017 statt. Auch dieser Bericht besitzt unabhängige Gültigkeit und steht zum öffentlichen Download zur Verfügung.

3 Ergebnisse

3.1 Energieverbrauch

3.1.1 Monatsaufstellung der bezogenen Energiemengen

Für den Vergleich des Energieverbrauchs zwischen Fernwärme-Haus und Infrarot-Haus werden in den nachfolgenden Darstellungen die Heizenergiemengen für beide Jahre und beide Heizsysteme einander gegenübergestellt. Im Fernwärme-Haus treten bei der Wärmeverteilung nach der Fernwärmeübergabestation signifikante Verteilungsverluste auf. Diese lassen sich aus Differenzenbildung aus dem Messwert der Übergabestation und der Summer der Wohnungszähler ermitteln.

Tab. 2 Monatswerte des Energieverbrauchs von Haus 3 – Fernwärme – JAHR 1

	Gesamtenergie (Übergabestation) [kWh]	Heizenergie- verbrauch (Wohnungszähler) [kWh]	Warmwasser- energieverbrauch (Wohnungszähler) [kWh]	Verteilleitungs- verluste (Differenz) [kWh]
Jun. 17	1481	0	851	630
Jul. 17	1643	0	930	713
Aug. 17	1601	0	758	843
Sep. 17	2606	356	1206	1044
Okt. 17	2977	520	1339	1118
Nov. 17	4419	1541	1472	1406
Dez. 17	5423	2232	1584	1607
Jan. 18	4909	1812	1691	1406
Feb. 18	5101	2114	1547	1440
Mär. 18	4884	1710	1772	1402
Apr. 18	2629	220	1406	1003
Mai. 18	2116	16	1188	912
Gesamt Jahr 1	39787	10521	15744	13522

Tab. 3 Monatswerte des Energieverbrauchs von Haus 3 – Fernwärme – JAHR 2

	Gesamtenergie (Übergabestation) [kWh]	Heizenergie- verbrauch (Wohnungszähler) [kWh]	Warmwasser- energieverbrauch (Wohnungszähler) [kWh]	Verteilleitungs- verluste (Differenz) [kWh]
Jun. 18	1744	1	897	846
Jul. 18	1675	0	841	834
Aug. 18	1637	1	809	827
Sep. 18	1925	63	984	878
Okt. 18	2732	390	1321	1021
Nov. 18	3428	912	1372	1144
Dez. 18	4854	1863	1595	1396
Jan. 19	5552	2280	1639	1633
Feb. 19	4012	1262	1425	1325
Mär. 19	3411	594	1612	1205
Apr. 19	2609	170	1395	1044
Mai. 19	2617	175	1396	1046
Gesamt Jahr 2	36196	7711	15286	13199

Anhand von Simulationen und weiteren Berechnungen konnte eine gute Abschätzung der Verlustverteilung durchgeführt werden (siehe Kapitel 3.8). Auf Basis derselben konnten die Verluste in nutzbare und nicht-nutzbare Verluste eingeteilt werden. Nutzbar sind jene Verluste welche in der Heizperiode anfallen und in das Wohnungsinere fließen. Nicht nutzbar sind jene Verluste welche außerhalb der Heizperiode anfallen oder an das Erdreich bzw. die Außenluft abgegeben werden.

Die nicht-nutzbaren Verluste wurden zu einem Teil der Warmwasserbereitung und zum anderen Teil der Heizung zugeordnet. Jene Verluste die während der Heizperiode entstehen werden anteilig entsprechend dem aktuellen Verhältnis Heizenergiemenge/Warmwasserbereitungsenergiemenge den Komponenten Heizung und Warmwasserbereitung zugeordnet. Außerhalb der Heizperiode werden naturgemäß die gesamten Verluste der Warmwasserbereitung zugeordnet. Die Verlustzuordnung wurde jeweils für jedes Auswertejahr separat durchgeführt.

Tab. 4 monatliche Zuordnung der Leitungsverluste für Haus 3 – Fernwärme – JAHR 1

	Verteilleitungs verluste [kWh]	nutzbar als Heizwärme [kWh]	nicht nutzbar	
			der Heizung zugeordnet [kWh]	der Warmwasser- bereitung zugeordnet [kWh]
Jun. 17	630	0	0	630
Jul. 17	713	0	0	713
Aug. 17	843	0	0	843
Sep. 17	1044	0	238	806
Okt. 17	1118	352	214	551
Nov. 17	1406	443	493	471
Dez. 17	1607	506	644	457
Jan. 18	1406	443	498	465
Feb. 18	1440	454	570	417
Mär. 18	1402	442	472	489
Apr. 18	1003	316	93	594
Mai. 18	912	0	12	900
Gesamt Jahr 1	13522	2955	3233	7334

Tab. 5 monatliche Zuordnung der Leitungsverluste für Haus 3 – Fernwärme – JAHR 2

	Verteilleitungs verluste [kWh]	nutzbar als Heizwärme [kWh]	nicht nutzbar	
			der Heizung zugeordnet [kWh]	der Warmwasser- bereitung zugeordnet [kWh]
Jun. 18	846	0	1	845
Jul. 18	834	0	0	834
Aug. 18	827	0	1	826
Sep. 18	878	0	53	825
Okt. 18	1021	322	159	540
Nov. 18	1144	360	313	471
Dez. 18	1396	440	515	441
Jan. 19	1633	514	651	468
Feb. 19	1325	417	426	481
Mär. 19	1205	379	222	603
Apr. 19	1044	329	78	638
Mai. 19	1046	0	116	929
Gesamt Jahr 2	13199	2762	2536	7901

Bei der Infrarot-Heizung treten keine nennenswerten Verluste bei der Energieverteilung auf. Theoretisch treten geringe ohmsche Verluste in den Zuleitungen auf. Bei Verwendung sachgemäßer Kabelquerschnitte sind diese jedoch so gering, dass hier nicht gesondert berücksichtigt werden.

Tab. 6 Monatswerte des elektrischen Energieverbrauchs von Haus 4 – Infrarot – JAHR 1

	Heizung [kWh]	Warmwasserbereitung [kWh]
Jun. 17	14	509
Jul. 17	32	536
Aug. 17	30	493
Sep. 17	329	486
Okt. 17	644	520
Nov. 17	1685	543
Dez. 17	2617	784
Jan. 18	2409	689
Feb. 18	2508	582
Mär. 18	2228	657
Apr. 18	627	609
Mai. 18	254	565
Gesamt Jahr 1	13377	6972

Tab. 7 Monatswerte des elektrischen Energieverbrauchs von Haus 4 – Infrarot – JAHR 2

	Heizung [kWh]	Warmwasserbereitung [kWh]
Jun. 18	8	555
Jul. 18	7	533
Aug. 18	2	464
Sep. 18	229	511
Okt. 18	736	612
Nov. 18	1460	591
Dez. 18	2717	765
Jan. 19	2752	777
Feb. 19	2010	704
Mär. 19	1546	742
Apr. 19	993	665
Mai. 19	878	655
Gesamt Jahr 2	13338	7574

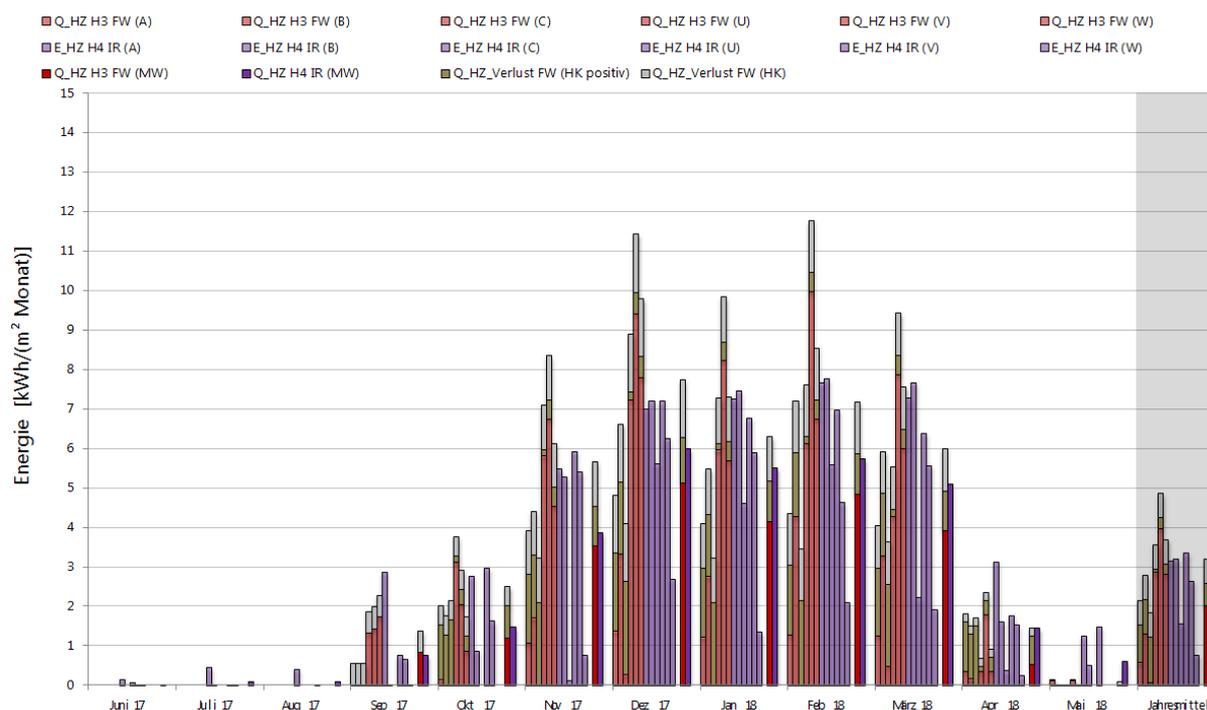


Abb. 18 Monatsdarstellung der Heizwärmern für die untersuchten Objekte – JAHR 1

Haus 3-Fernwärme: rot: Wohnungszähler, braun: nutzbare Verluste, grau: nicht nutzbare Verluste
 Haus 4-Infrarot: lila

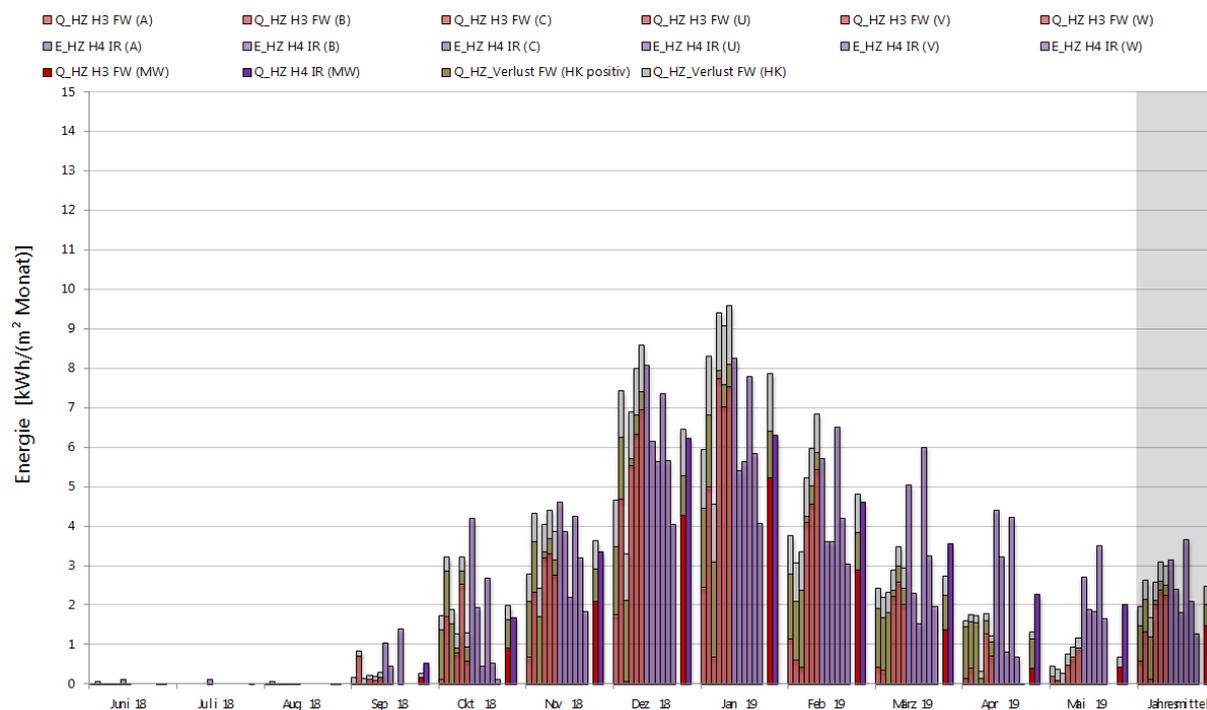


Abb. 19 Monatsdarstellung der Heizwärmern für die untersuchten Objekte – JAHR 2

Haus 3-Fernwärme: rot: Wohnungszähler, braun: nutzbare Verluste, grau: nicht nutzbare Verluste
 Haus 4-Infrarot: lila

In der Abbildung oben sind die monatlichen Energiemengen wohnungsspezifisch und je Quadratmeter Wohnnutzfläche dargestellt. Naturgemäß tritt in der kalten Jahreszeit der höchste Energieverbrauch auf. Eine offensichtliche, signifikante Abweichung zwischen Fernwärme-Heizung und IR-Heizung ist nicht erkennbar.

Auf den Balken der Fernwärme-Energiemengen sind wiederum die Verluste gesondert, in grau, dargestellt. Es ist an den braun dargestellten Bereichen gut erkennbar, dass diese vorwiegend den Erdgeschoß-Wohnungen (A,B,C) zugutekommen, während die Wohnungen im Obergeschoss (U,V,W) nur relative geringe Zuflüsse haben (siehe auch Kapitel 3.8).

3.1.2 Energieverbrauch Heizung - Jahresvergleich

Aus dem Energieausweis für die Gebäude geht ein nomineller Heizwärmebedarf (HWB) von 28 kWh/m²_{BGFA} hervor. Der Heizwärmebedarf wird auf die Bruttogrundfläche bezogen. In dieser Untersuchung wurden alle spezifischen Größen auf die Wohnnutzfläche bezogen. Bezieht man den Heizwärmebedarf auf die Wohnnutzfläche, so ergibt sich ein Wert von 36,3 kWh/m²_{WNFA}.

Der im Jahr 1 bzw. 2 ermittelte - tatsächliche - spezifische Heizendenergieverbrauch (inklusive der nutzbaren Verluste) bezogen auf die Wohnnutzfläche, lag beim Fernwärme-Haus bei 30,76 (J1) bzw. 23,90 kWh/m²_{WNFA} (J2) und beim IR-Haus bei 30,53 (J1) bzw. 30,44 kWh/m²_{WNFA} (J2). Beim Endenergieverbrauch des Fernwärme-Hauses wurden die Verteilverluste gemäß der durchgeführten Verlustzuordnung berücksichtigt (siehe Kapitel 3.8). Entsprechend dieser Bilanzierung sind in den Jahren 1 bzw. 2 7,38 bzw. 5,70 kWh/m²a nicht nutzbar, da sie an die Umgebung (Erdreich, Außenluft) abgegeben werden. Nutzbar hingegen sind 6,74 bzw. 7,06 kWh/m²_{WNFA} der Verteilverluste, welche während der Heizperiode entsprechend der jeweiligen Leitungsführung den spezifischen Wohnungen als Nutzwärme zufließen. Somit ergibt sich im Fernwärme-Haus ein Wert von 38,14 kWh/m²_{WNFA} (J1) bzw. 29,69 kWh/m²_{WNFA} (J2), welche als Endenergie für die Heizung bezogen wurde. Der Realverbrauch liegt damit unter dem vorberechneten Heizwärmebedarfswert des Energieausweises. Die Abweichungen liegen jedoch in einer durchaus üblichen Bandbreite.

Eine Bereinigung bezüglich Abwesenheiten wurde nicht durchgeführt. Es ist jedoch aus den Raumklima-Messdaten und den Befragungen ersichtlich, dass die Belegung im elektrisch beheizten Objekt geringer war.

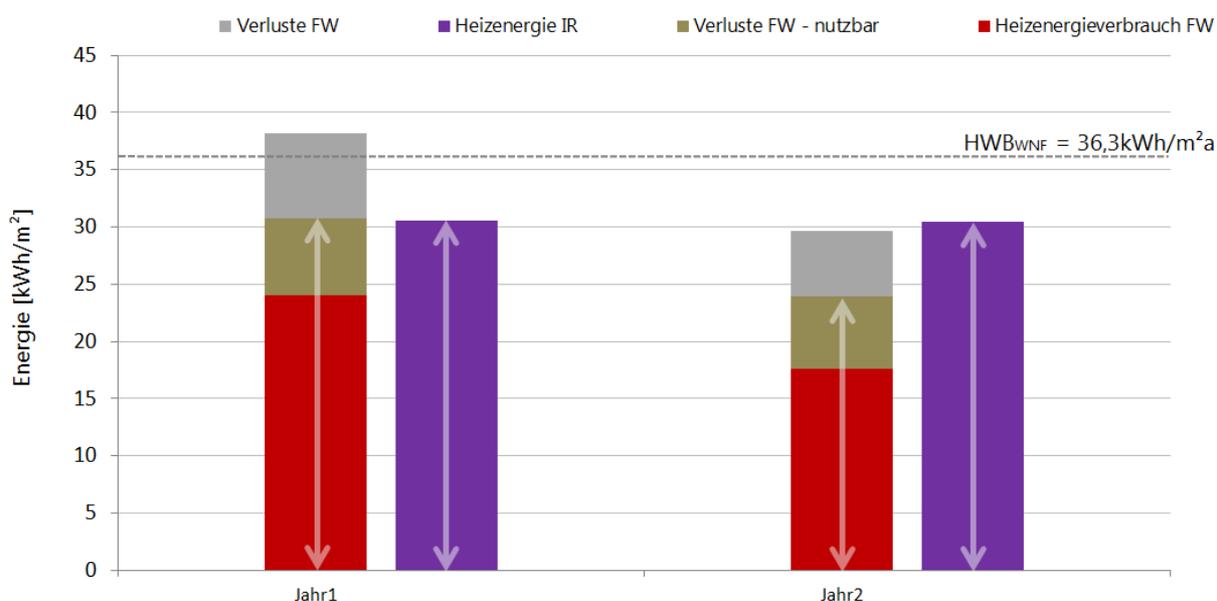


Abb. 20 Jahresvergleich des Heizwärmeverbrauchs, bezogen auf die Wohnnutzfläche – JAHR 1 und JAHR 2
(Pfeile: in die Wohnungen abgegebene Nutzwärme; Gesamthöhe der Balken: Endenergie)

Wie in der Abbildung oben erkennbar ist, lag die nutzbar abgegebene Heizwärme der beiden Objekte im Jahr 1 in einem sehr vergleichbaren Bereich. Die benötigte Endenergie zur Beheizung der Objekte, war auf Grund der Rohrleitungsverluste im Fernwärmeobjekt höher. Im Jahr 2 war die in den Wohnungen abgegebene Nutzwärme im Objekt mit Infrarot-Heizung deutlich größer. Selbst bei Berücksichtigung der nicht-nutzbaren Verluste lag die vom Fernwärme Objekt benötigte Endenergie zur Beheizung unter jener im elektrischen Objekt.

3.1.3 Vergleich der Monatsmittelwerte der Heizleistungen

Für eine genauere Analyse der Wärmeabgabesysteme wurden die in den Objekten abgegebenen spezifischen Heizleistungen als monatliche Mittelwerte ausgewertet. Der Vergleich bezieht sich auf die gesamte elektrische Heizleistung beim Objekt mit Infrarot-Heizung, und die gemessene Nutzenergie zuzüglich der nutzbaren Verluste (siehe Kapitel 3.8). Alle Werte stellen Mittelwerte über alle Wohnungen dar und sind auf den Quadratmeter Wohnnutzfläche bezogen.

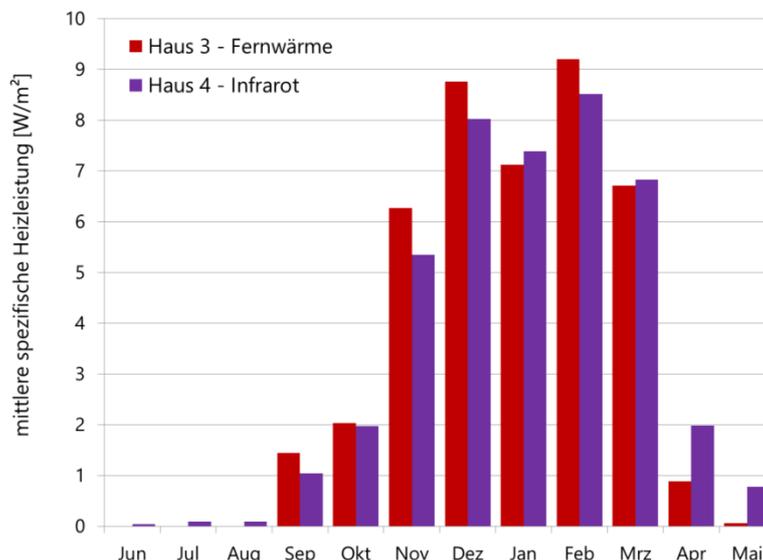


Abb. 21 Monatsmittelwerte der mittleren spezifischen Heizleistungen (inkl. Nutzbarer Verluste) - JAHR 1

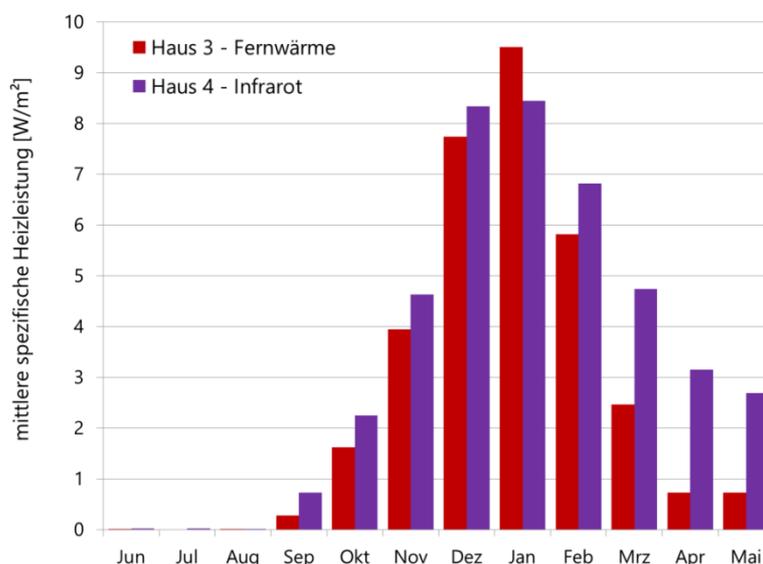


Abb. 22 Monatsmittelwerte der mittleren spezifischen Heizleistungen (inkl. Nutzbarer Verluste) - JAHR 2

Es ist zu erkennen, dass die spezifischen Heizleistungen im Objekt mit Infrarotheizung in den kältesten Monaten jeweils unter jenen des Fernwärmeobjekts liegen. In Frühjahrsmonaten März bis Mai jedoch wird im IR-Objekt mehr Heizleistung abgegeben. Insbesondere im zweiten Auswertejahr, ist dieser Effekt markant. Die deutlich geringere Heizleistung im zweiten Jahr im Fernwärme-Objekt lässt sich maßgeblich auf diese Differenz zurückführen. Während die Heizgradtage in beiden Jahren annähernd identisch waren, unterscheiden sich die Temperaturprofile der Monate Februar bis Mai markant (siehe Kapitel 3.2). Während im Auswertejahr 1 zu Beginn außerordentlich kalte Temperaturen vorherrschten, kennzeichnet das Auswertejahr 2 eine besonders hohe Zahl an Heiztagen bei gemäßigten Temperaturen, bzw. eine lang anhaltende Heizperiode.

3.1.4 Heizleistung und Energieverbrauch Heizung in Abhängigkeit von der mittleren Außentemperatur

Für eine genauere Analyse der Wärmeabgabesysteme wurden die Heizleistungen und abgegebenen Nutzwärmemengen in Abhängigkeit von der jeweiligen Außentemperatur ausgewertet. Der Vergleich bezieht sich auf die gesamte elektrische Heizleistung beim Objekt mit Infrarot-Heizung, und die gemessene Nutzenergie zuzüglich der nutzbaren Verluste (siehe Kapitel 3.8). Alle Werte stellen Mittelwerte über alle Wohnungen dar und sind auf den Quadratmeter Wohnnutzfläche bezogen.

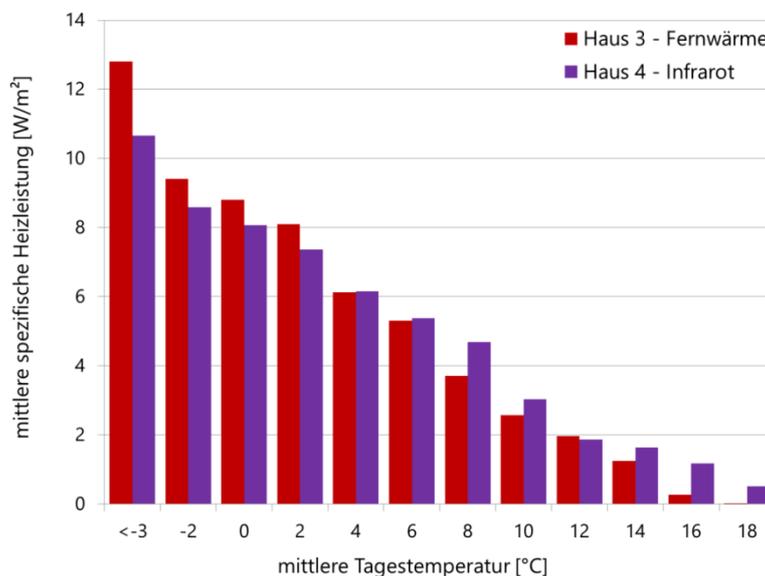


Abb. 23 mittlere spezifische Heizleistung in Abhängigkeit von der mittleren Tagesaußentemperatur JAHR 1

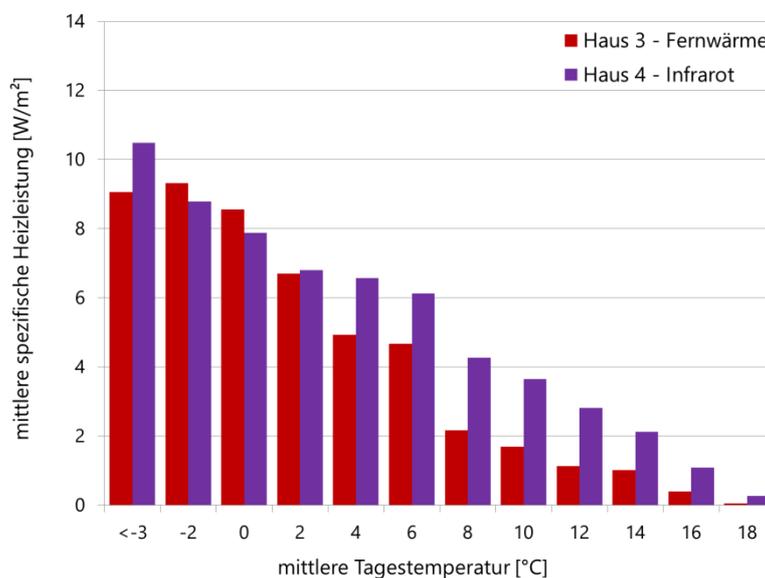


Abb. 24 mittlere spezifische Heizleistung in Abhängigkeit von der mittleren Tagesaußentemperatur JAHR 2

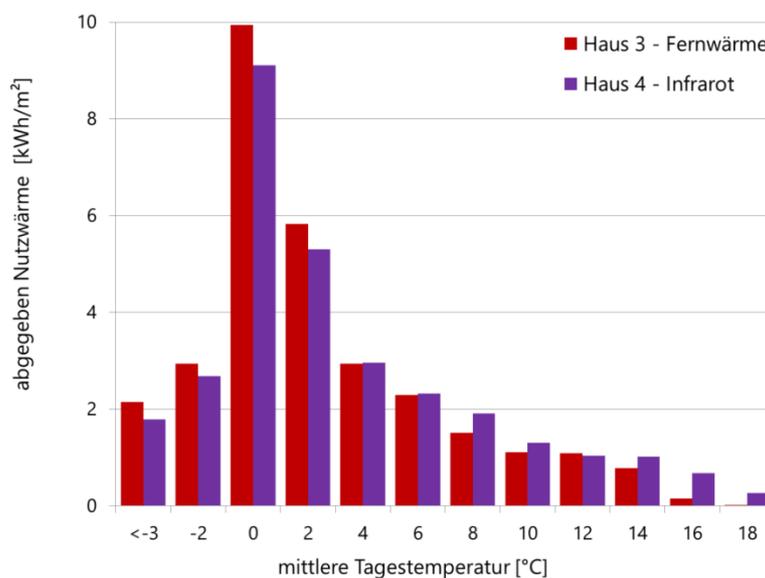


Abb. 25 gesamte abgegebene spezifische Heiznutzenergie in Abhängigkeit von der mittleren Tagesaußentemperatur JAHR 1

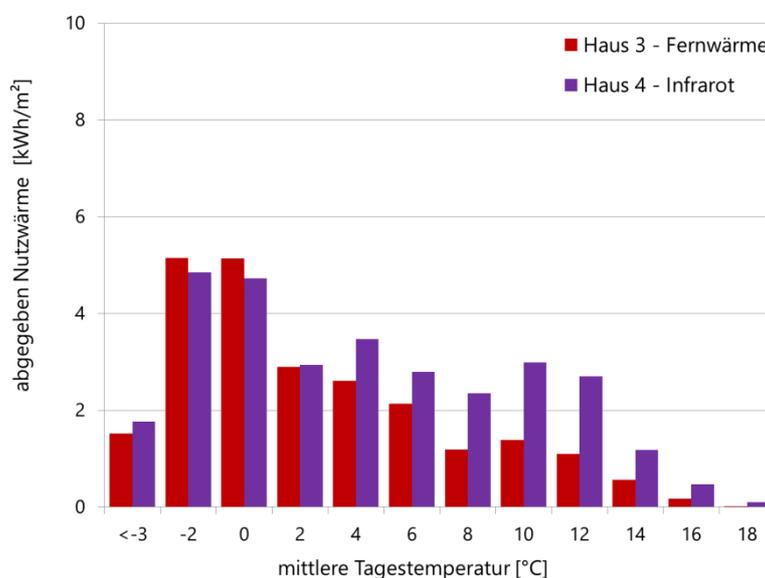


Abb. 26 gesamte abgegebene spezifische Heiznutzenergie in Abhängigkeit von der mittleren Tagesaußentemperatur JAHR 2

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, treten die signifikantesten Unterschiede bei den abgegebenen Heizwärmern bei Heiztagen mit gemäßigten Temperaturen im zweiten Auswertejahr auf. Dies dürfte vermutlich auf ein unterschiedliches Verhalten des Reglers, sowie Nutzerverhalten zurückzuführen sein. Es gilt einerseits zu berücksichtigen, dass bei mit Fernwärme beheizten Objekten eine Vorregelung der Heizleistung durch Anpassung der Vorlauftemperaturen der Fernwärme an die Außentemperaturen erfolgt, d.h. die maximale Heizleistung kann in den Wohnungen auch nur bezogen werden, wenn die Fernwärmeleitung die höchsten Temperaturen zur Verfügung stellt. Auch das Regelverhalten der Thermostate an den Radiatoren weicht auf Grund der unterschiedlichen Positionierung und Funktionsweise signifikant von jenem des Thermostats ab, welches die Leistung der Infrarotpaneele regelt.

So kann etwa ein Luftzug durch ein gekipptes Fenster, oder eine falsch eingestellter Thermostat bei der Infrarotheizung schnell dazu führen, dass auch in der Übergangsjahreszeit die maximale Heizleistung abgerufen wird. Hier wäre eventuell eine zentrale Vorregelung mit Informationen über die Außenbedingungen oder intelligentere Regler von Vorteil.

3.1.5 Mittlerer Tagesgang der Heizleistungen

Für eine genauere Analyse der Wärmeabgabesysteme wurden die abgegebenen spezifischen Heizleistungen als stündliche Mittelwerte ausgewertet. Der Vergleich bezieht sich auf die gesamte elektrische Heizleistung beim Objekt mit Infrarot-Heizung, und die gemessene Nutzenergie zuzüglich der nutzbaren Verluste (siehe Kapitel 3.8) beim Fernwärme-Objekt. Alle Werte stellen Mittelwerte über alle Wohnungen dar und sind auf den Quadratmeter Wohnnutzfläche bezogen.

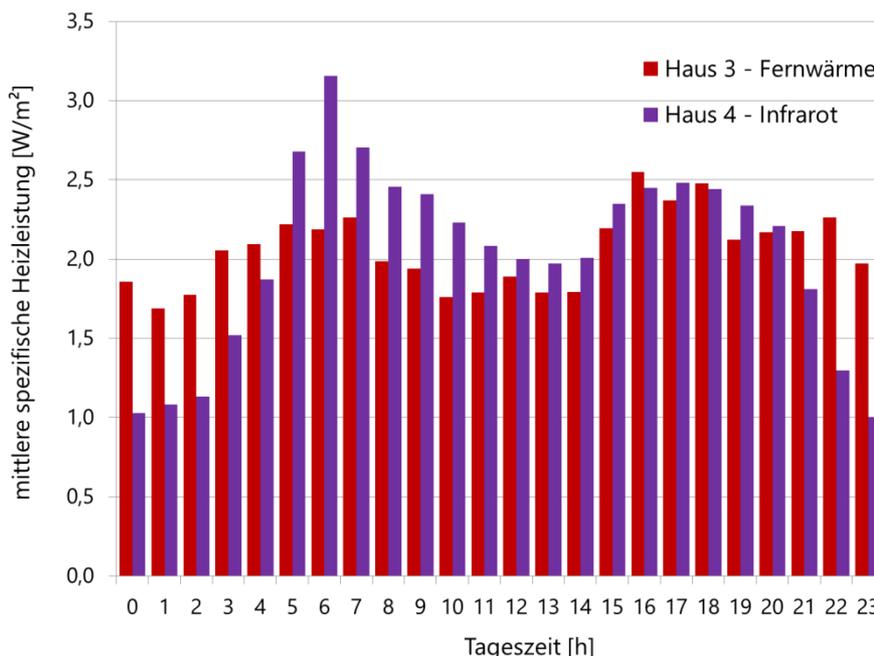


Abb. 27 Stundenmittelwerte der mittleren spezifischen Heizleistungen – September bis Mai, JAHR 1

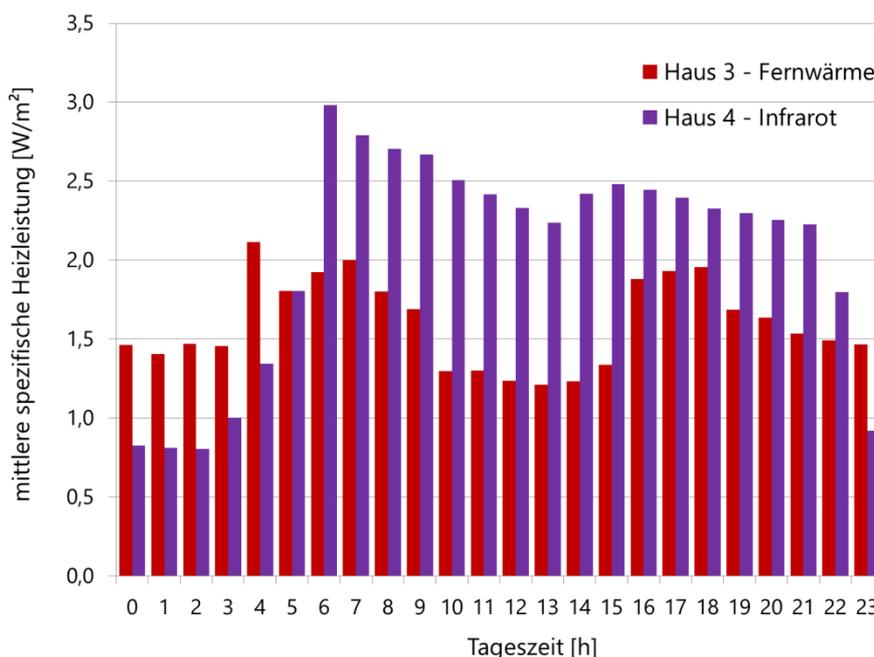


Abb. 28 Stundenmittelwerte der mittleren spezifischen Heizleistungen – September bis Mai, JAHR 2

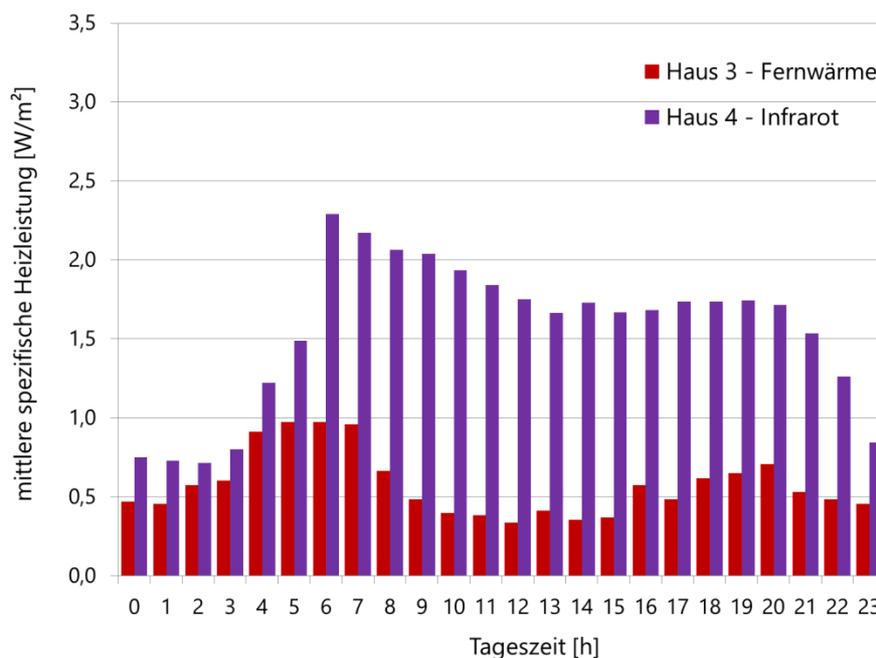


Abb. 29 Stundenmittelwerte der mittleren spezifischen Heizleistungen – MÄRZ 2019 – MAI 2019

Wie oben zu sehen ist unterscheiden sich die mittleren Tagesprofile der abgegebenen spezifischen Heizleistungen markant. Das Tagesprofil des Fernwärmeobjekts weist im 24-Stunden Verlauf ein relativ ausgeglichenes Profil aus, mit relativen Maxima vormittags um 6 bis 7 Uhr und nachmittags um 17 bis 18 Uhr. Beim Objekt mit Infrarotheizung ist deutlich die von den meisten Nutzern eingesetzte Nachtschaltung erkennbar. Nach Beendigung derselben, um ca. 6 Uhr morgens, treten die höchsten Heizleistungen auf und fallen bis ca. 22 Uhr ab. Infolge des Sonnenuntergangs kommt es auch um ca. 16:00-18:00 nochmals zu einer relativen Erhöhung, die Heizleistungen des Maximums am Morgen werden in im Mittel jedoch nicht mehr erreicht.

3.1.6 Energieverbrauch - Warmwasserbereitung

Entsprechend des im Kapitel 3.8 beschriebenen Verfahrens wurden auch bei der Energieverbrauchsermittlung für die Warmwasserbereitung mit Fernwärme die Verteilungsverluste berücksichtigt. Bei der elektrischen Warmwasserbereitung treten, bei sachgemäß ausgeführten Versorgungsleitungen, wiederum nur sehr geringe Zuleitungsverluste auf. Diese können deshalb vernachlässigt werden.

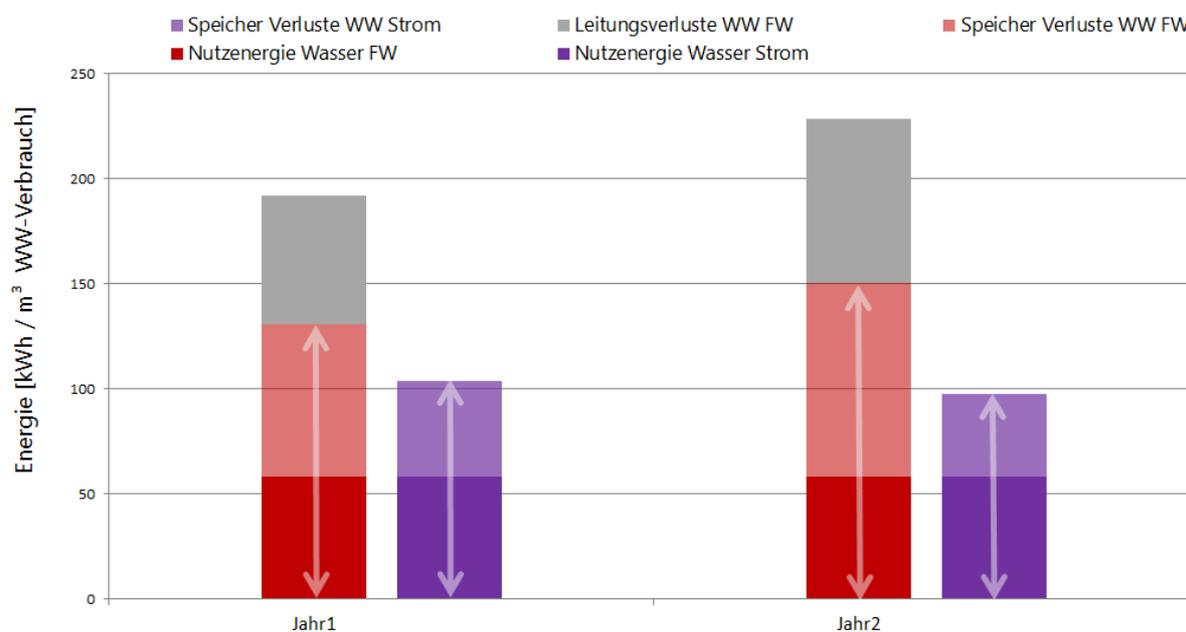


Abb. 30 Jahresvergleich des Energieverbrauchs für die Warmwasserbereitung – JAHR 1 und JAHR 2 bezogen auf einen Kubikmeter Warmwasser

(Pfeile: in den Speicher geführte Nutzwärme; Gesamthöhe der Balken: Endenergieverbrauch)

Wie zu sehen ist, liegt der Endenergieverbrauch der Warmwasserbereitung im mit Fernwärme beheizten Objekt deutlich höher. Je Kubikmeter Warmwasser werden bei der Warmwasserbereitung mit Fernwärme 192 kWh (J1) bzw. 225 kWh (J2) aufgewendet, beim elektrisch betriebenen Warmwasserspeicher im Infrarot-Haus sind es nur 103 kWh (J1) bzw. 98 kWh (J2). Unter der Annahme einer Kaltwassertemperatur von 10 °C und einer Warmwassertemperatur von 60 °C ergibt sich kalorimetrisch ein Energieaufwand von 58 kWh/m³ welcher für die entsprechende Erhöhung der Wassertemperatur mindestens erforderlich ist (unterster Bereich im Diagramm). Die darüber liegenden Bereiche stellen die Speicherverluste dar. Beim Fernwärmeobjekt beinhalten diese Speicherverluste auch die Verluste der Zuleitung zwischen Wohnungsübergabestation und dezentralem Speicher. Der zusätzliche, grau schraffierte Bereich bei der Warmwasserbereitung mit Fernwärme bildet den thermischen Verlust der Verteilleitungen ab, welcher nach dem bereits beschriebenen Verfahren der Warmwasserbereitung zugeordnet wurden, dieser beträgt 61 kWh/m³ (J1) bzw. 75 kWh/m³ (J2). Der höhere Verlustanteil im zweiten Jahr begründete sich damit, dass in diesem Jahr insgesamt weniger Heizenergie abgegeben wurde. Die auftretenden Rohrleitungsverluste müssen deshalb vermehrt der Warmwasserbereitung zugeordnet werden. Für die Warmwasserbereitung erfolgt außerhalb der Heizperiode zweimal täglich eine Wärmeabgabe durch das Fernwärmenetz. Dieser Vorgang durch das Erwärmen und Abkühlen der Zuleitungen verlustbehaftet.

3.2 Lokales Klima / Außenbedingungen

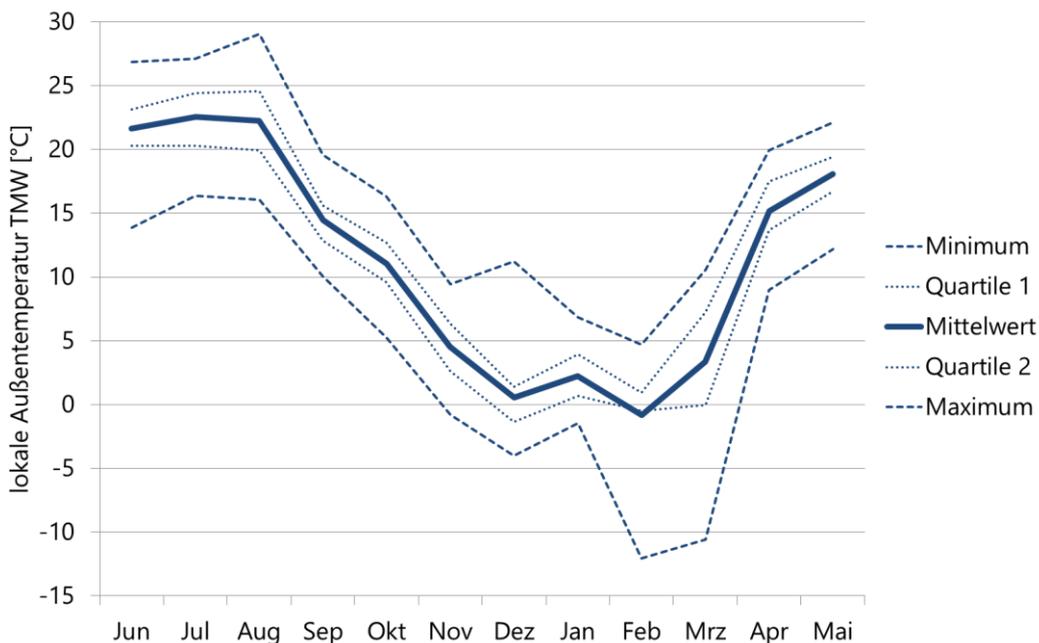


Abb. 31 lokale Tagesmitteltemperaturen - Monatsstatistik - JAHR 1 (17/18)

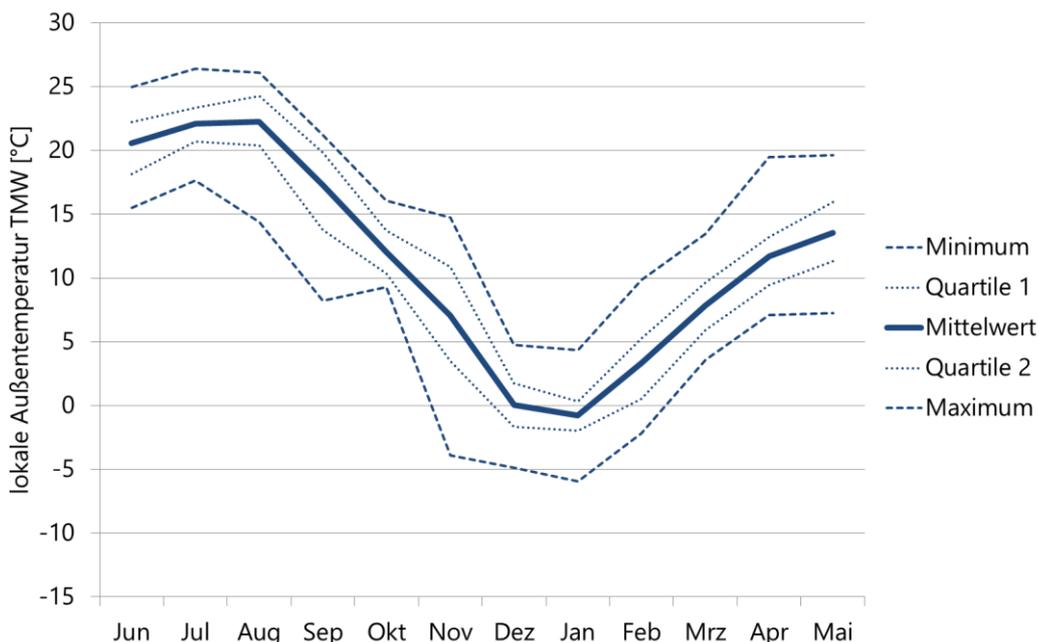


Abb. 32 lokale Tagesmitteltemperaturen - Monatsstatistik - JAHR 2 (18/19)

Die Monatsprofile der durchschnittlichen Tagesmittelwerte unterscheiden sich besonders in dem Monaten Februar bis Mai. Das Jahr 1 war gekennzeichnet durch außerordentlich kalte Tage in den Monaten Februar und März. Auch im Monatsmittelwert lagen die Temperaturen hier um mehr als 4 °C unter jenen des darauffolgenden Jahres. In den Monaten April und Mai lagen jedoch im zweiten Jahr die Temperaturen im Mittel um ca. 4 °C über jenen des Vorjahres.

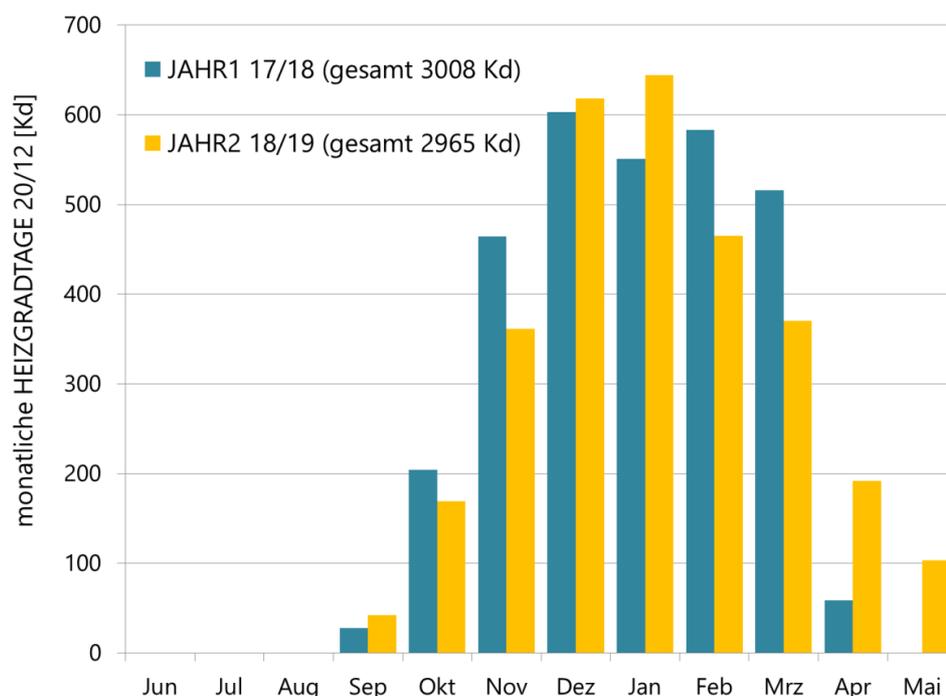


Abb. 33 monatliche Heizgradtage (HGT_{20/12}) – Gegenüberstellung der Auswertejahre 1 und 2

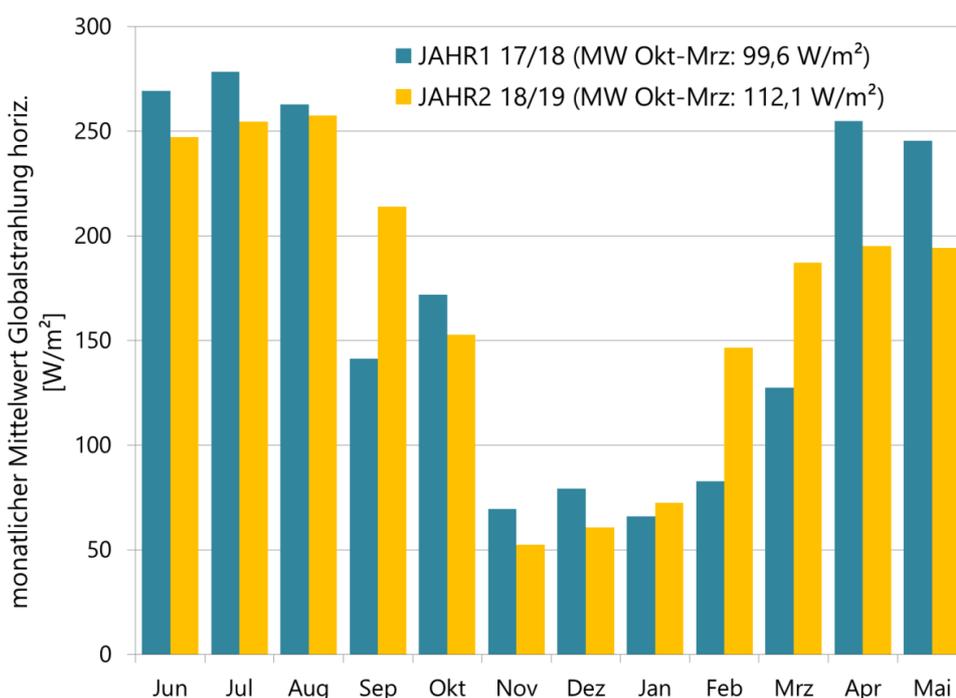


Abb. 34 monatliche mittlere Globalstrahlung – Gegenüberstellung der Auswertejahre 1 und 2

Das Auswertejahr 1 wies am Standort mit 3008 K.d annähernd die gleich Zahl an Heizgradtagen (20/12) auf wie das Auswertejahr 2 mit 2965 K.d (-1,4%). Im Unterschied zum ersten Auswertejahr, traten diese aber im zweiten Jahr aber weniger konzentriert auf, bzw. dauerte die Heizperiode außerordentlich lange mit signifikantem Heizbedarf auch in den Monaten April und Mai. Die solare Einstrahlung in den heizrelevanten Monaten Oktober bis März lag im ersten Jahr im Mittel bei 88,6 W/m² und im zweiten bei 112,1 W/m² (+26%).

3.3 Raumfühler

In allen vermessenen Wohnungen wurden die Messgrößen Raumluft-Temperatur, relative Luftfeuchte, Kohlenstoffdioxid-Konzentration und der Fensteröffnungsanteil messtechnisch erfasst.

3.3.1 Kohlenstoffdioxid

In den Wohn- und Schlaf- und Kinderzimmern wurde die CO₂ Konzentration erfasst. Die CO₂ Konzentration lässt Rückschlüsse auf die mittlere Belegung und Nutzung der Wohnungen zu. Die Auswertung wurde anonymisiert durchgeführt.

In den nachfolgenden Abbildungen wird die CO₂ Konzentration im Wohnzimmer bzw. Schlafzimmer dargestellt. Dargestellt sind die Monatsmittelwerte der spezifischen Räume der einzelnen Wohnungen. Für eine Analyse der Luftqualität wären natürliche zeitlich höher aufgelöste Auswertungen und Ermittlungen der Extremwerte notwendig. Derartige Fragestellungen waren jedoch nicht Teil der Untersuchungen. Die CO₂ Messungen dienten nur zur Analyse der Belegung und des Luftwechsels.

Die Fernwärme-Wohnungen sind jeweils in Rot dargestellt, die Infrarot-Wohnungen in Lila. Die beiden dunklen Balken rechts von den Wohnungsbalken stellen jeweils die Monatsmittelwerte für jedes Heizsystem dar.

Monatsmittelwerte Kohlenstoffdioxid - Wohnzimmer

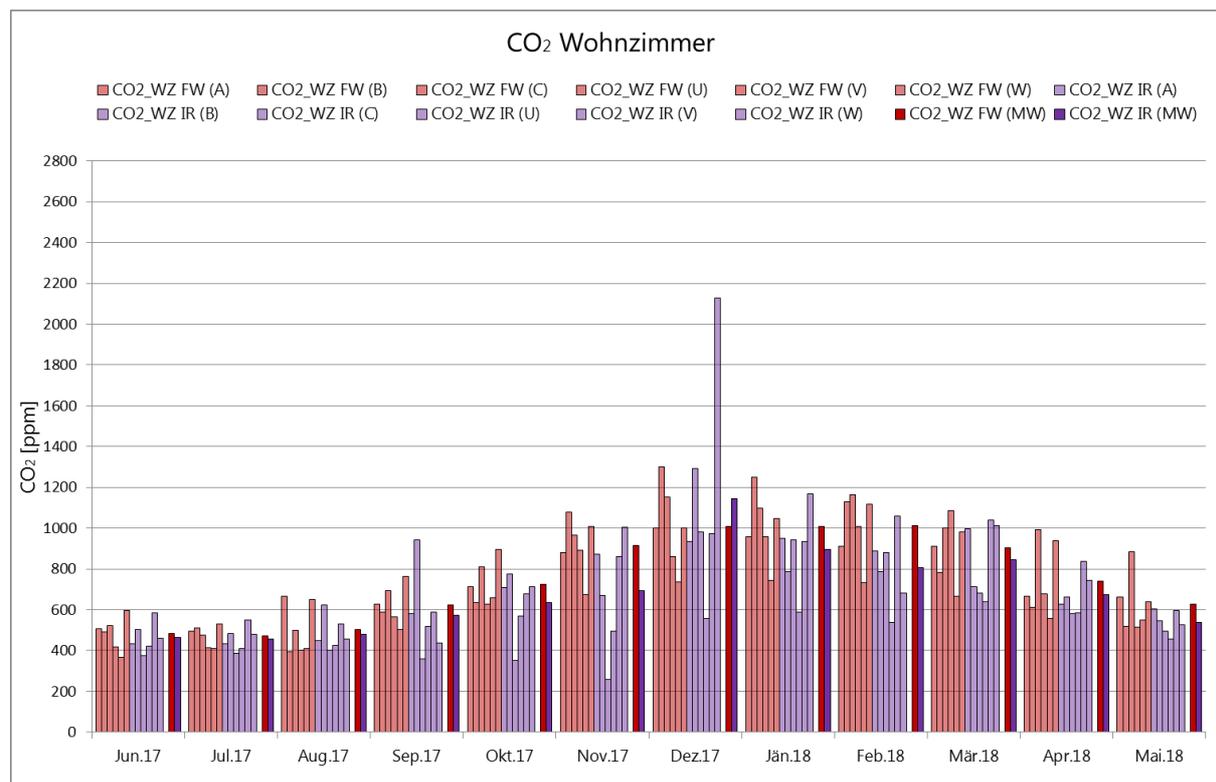


Abb. 35 CO₂ Konzentration im Wohnzimmer – JAHR 1
Monatsmittelwerte aller Wohnungen

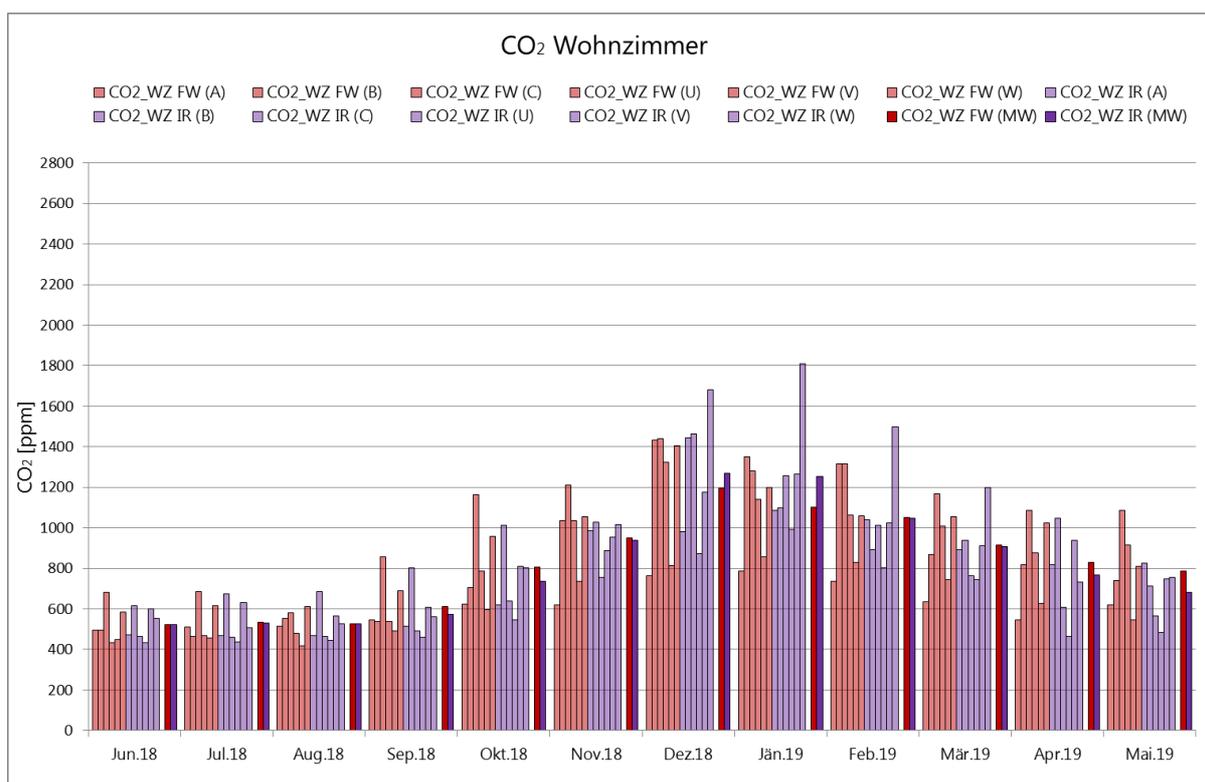


Abb. 36 CO₂ Konzentration im Wohnzimmer – JAHR 2
 Monatsmittelwerte aller Wohnungen

Bei den Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen in den Wohnzimmern sind keine großen Unterschiede erkennbar. Der Ursache für den hohen Wert im Dezember 2017 kann nur eine deutlich intensivere Nutzung, in diesem Zeitbereich, bei gleichzeitig wenig Luftaustausch sein. Auch im zweiten Messjahr sind bei den Mittelwerten der beiden Objekte keine großen Unterschiede der CO₂ Konzentration in der Raumluft erkennbar. Generell sind die Werte im Winter in der Zeit von November bis Februar im 2. Jahr gestiegen, was auf eine erhöhte Belegung oder geringeres Lüften zurückzuführen ist.

Monatsmittelwerte Kohlenstoffdioxid - Schlafzimmer

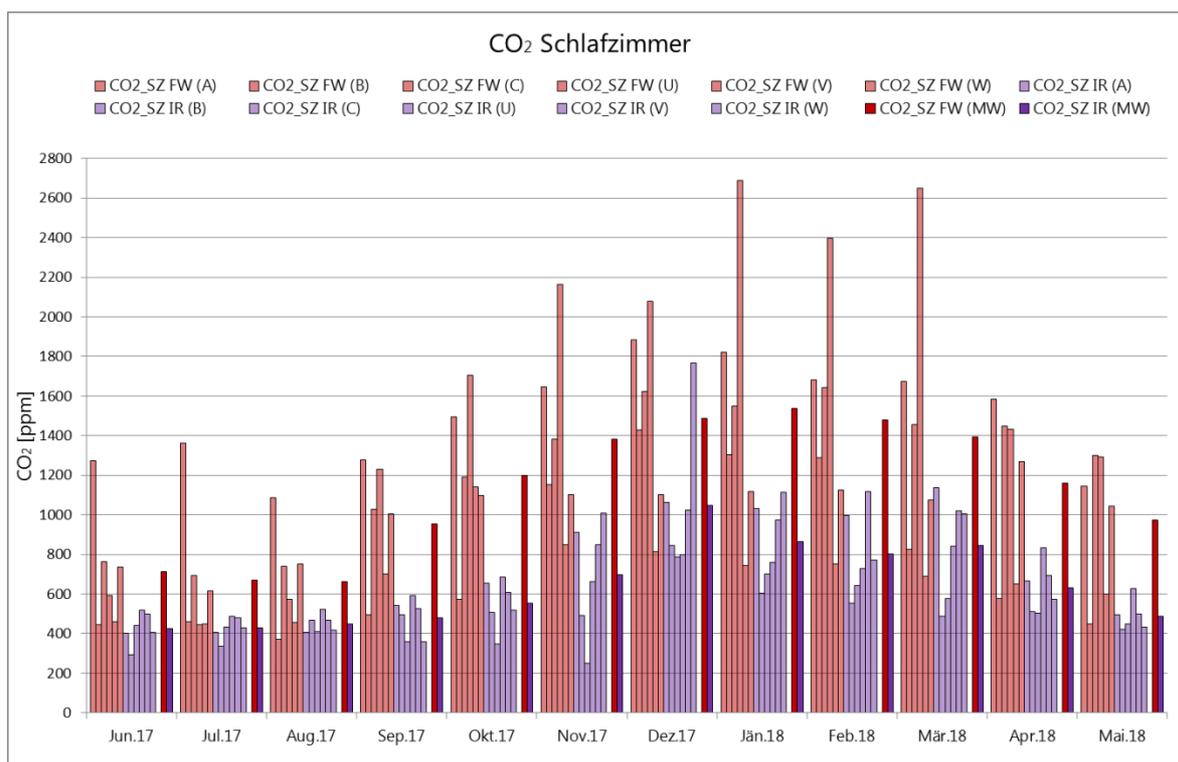


Abb. 37 CO₂ Konzentration im Schlafzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen – JAHR 1

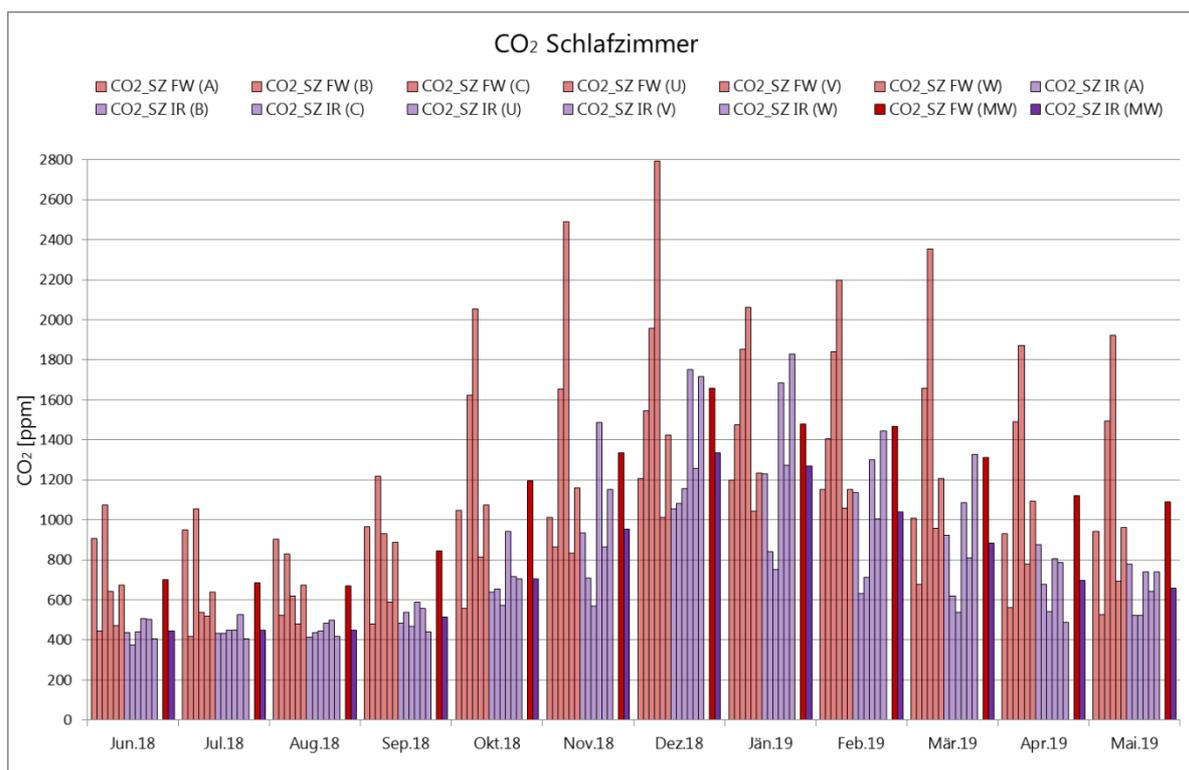


Abb. 38 CO₂ Konzentration im Schlafzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen – JAHR 2

Die CO₂ Konzentration im Schlafzimmer in den mit Radiatoren ausgestatteten Wohnungen ist deutlich höher als die CO₂ Konzentration in den mit Infrarot beheizten Wohnungen. Während in den Wohnzimmern keine signifikanten Unterschiede erkennbar waren, gibt es in den Schlafzimmern augenscheinliche Unterschiede. Der Grund für die deutlich höhere CO₂ Konzentration in den Fernwärme-Wohnungen ist auf die deutlich höhere Belegungsichte zurückzuführen (Anm.: 8

Bewohner im IR-Gebäude, 12 Bewohner im FW-Gebäude). Die höhere Belegung wirkt sich besonders stark im Schlafzimmer aus, da der Raum hier auch als zusätzlicher Aufenthaltsraum genutzt wird. Im zweiten Messjahr steigt im IR Gebäude die CO₂ Konzentration in den Wintermonaten an. Der Unterschied zu den mit Fernwärme beheizten Wohnungen ist noch immer sehr deutlich.

3.3.2 Fensterkontakte

Alle Fenster der Wohnungen wurden mit Fensterkontakten ausgestattet. In der nachfolgenden Darstellung wird der zeitliche Anteil der Fensteröffnungen in den Wohnungen gezeigt.

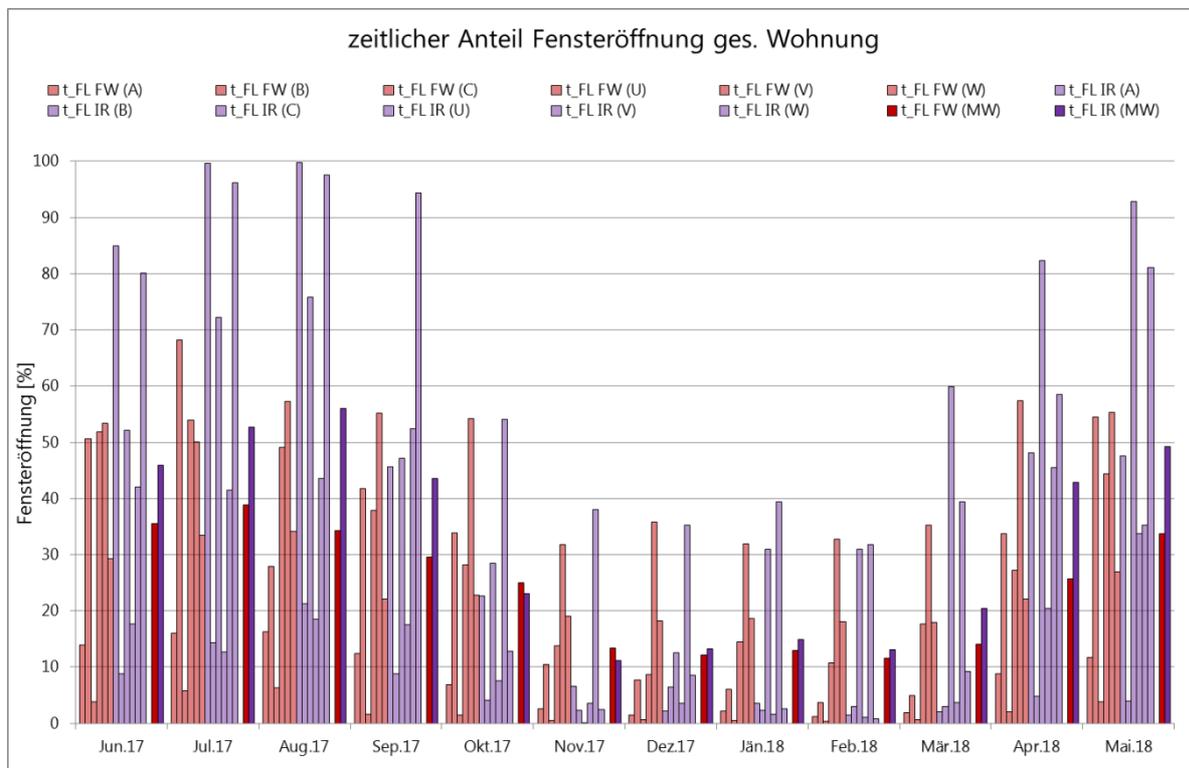


Abb. 39 Fensteröffnungen - Monatsmittelwert für alle Wohnungen – JAHR 1

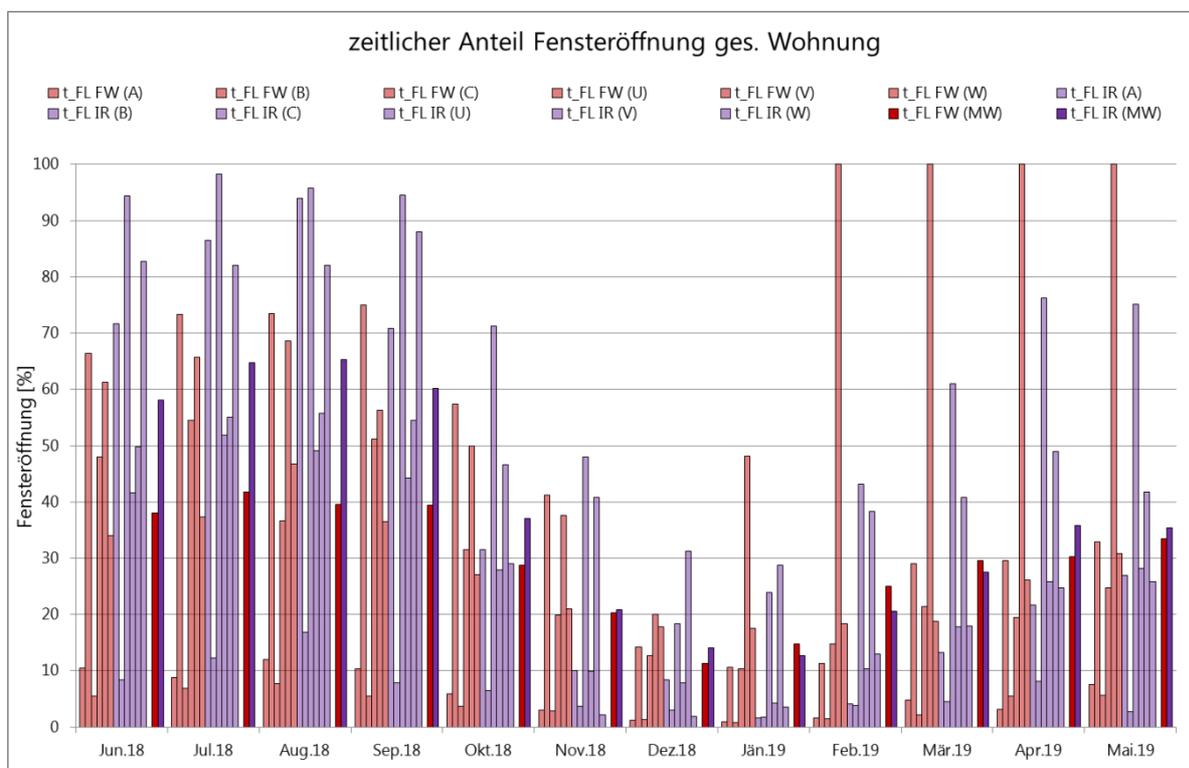


Abb. 40 Fensteröffnungen - Monatsmittelwert für alle Wohnungen – JAHR 2

In den für die Untersuchung relevanten Wintermonaten liegt der Mittelwert des Fensteröffnungsanteils der Infrarot- bzw. Fernwärmewohnungen in vergleichbarer Höhe. Dies für die Aussagekraft der durchgeführten energetischen Analysen von Vorteil, da die messtechnisch schwer erfassbaren auftretenden Energieverluste durch Luftwechsel demnach in vergleichbarer Höhe lagen.

In den Sommermonaten weichen die Fensteröffnungen auf Grund unterschiedlichen Nutzerverhaltens bei einigen Wohnungen erheblich ab. Dies hat jedoch wenig Einfluss auf die in diesem Projekt durchgeführten Energievergleiche.

3.3.3 Raumlufthtemperatur

Alle Zimmer bzw. Wohnräume in allen vermessenen Wohnungen sind mit Lufttemperaturfühlern ausgestattet. Die Sensoren sind in einer Höhe von 1,4 m an der Wand montiert. Bei der Auswahl und Anbringung der Temperatursensoren wurde darauf geachtet, dass diese überwiegend die Lufttemperatur bestimmen und keiner zu starken, direkten Bestrahlung durch die Infrarot-Paneele ausgesetzt sind. In der nachfolgenden Abbildung werden die Monatsmittelwerte der gemessenen Raumlufthtemperaturen für alle Wohnungen gezeigt. Bei der Mittelung wurden die Nettoflächen der jeweiligen Räume als Gewichtungsfaktoren herangezogen.

Monatsmittelwerte Raumlufthtemperaturen - Wohnungsmittel

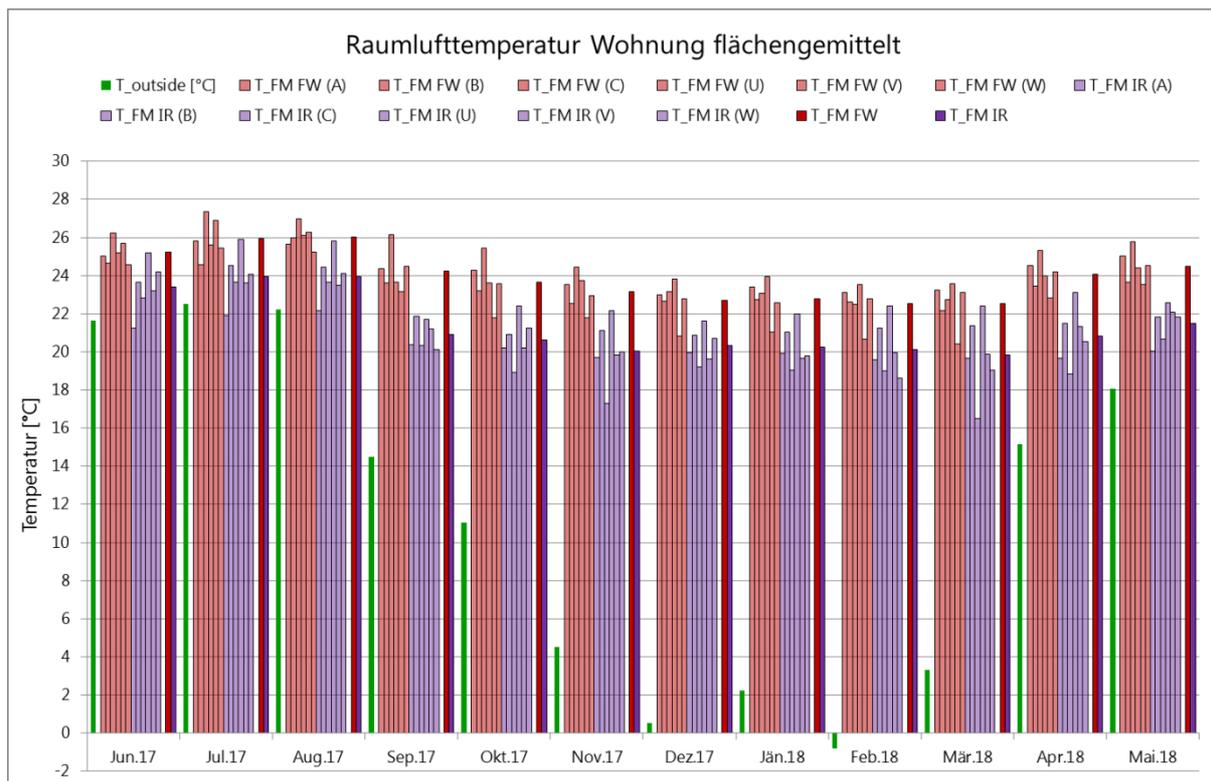
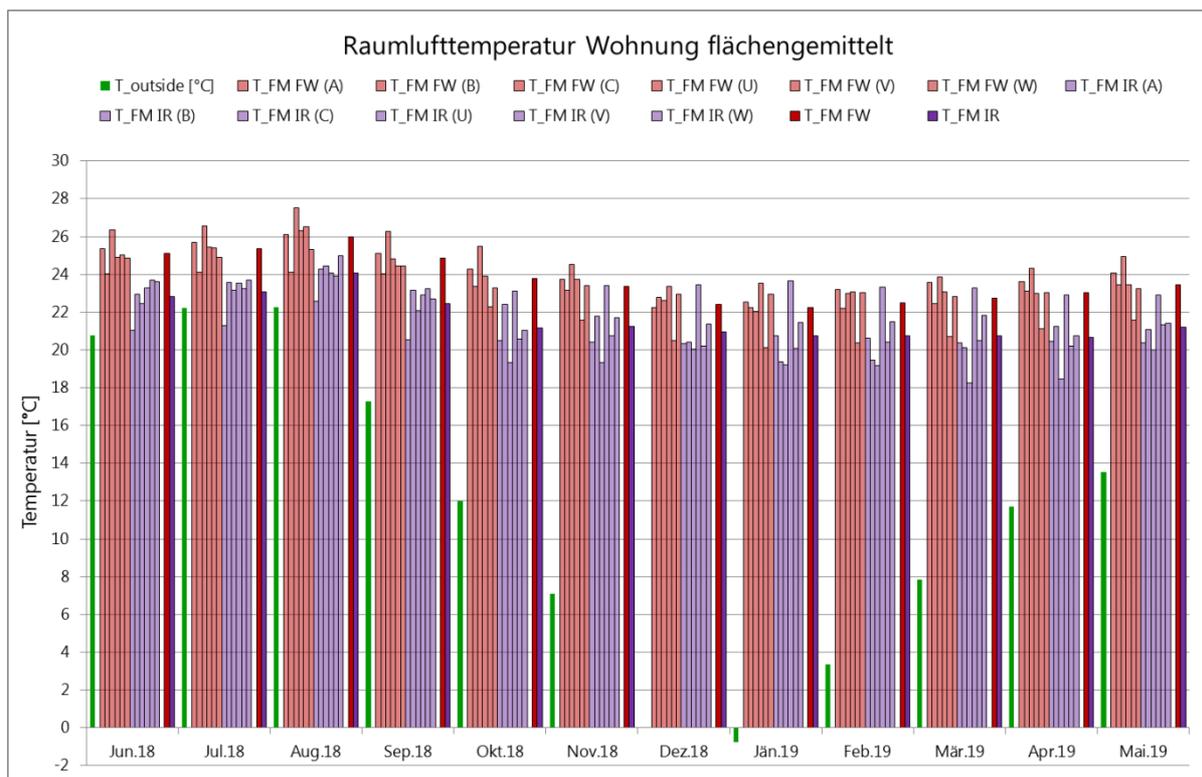


Abb. 41 Raumlufthtemperaturen für alle Wohnungen
Flächengemittelte Monatsmittelwerte - JAHR 1



**Abb. 42 Raumlufthtemperaturen für alle Wohnungen
Flächengemittelte Monatsmittelwerte - JAHR 2**

Die Raumlufthtemperaturen in den mit Infrarot beheizten Wohnungen sind erkennbar geringer als in den mit Radiatoren beheizten Wohnungen. Ein Teil der Differenz begründet sich jedoch aus der unterschiedlichen Belegung und der damit verbundenen unterschiedlichen Nutzung einiger Räume. Werden ausschließlich die Temperaturen im Wohnzimmer verglichen so zeigt sich ein etwas abweichendes Bild (siehe unten).

Die hohen Unterschiede in den Sommermonaten sind eine Folge des stark unterschiedlichen Lüftungsverhaltens. Da diese Abweichungen vorwiegend außerhalb der Heizperiode stattfinden, haben diese keinen Einfluss auf die energetische Betrachtung.

Monatsmittelwerte Raumlufthtemperaturen - Wohnzimmer

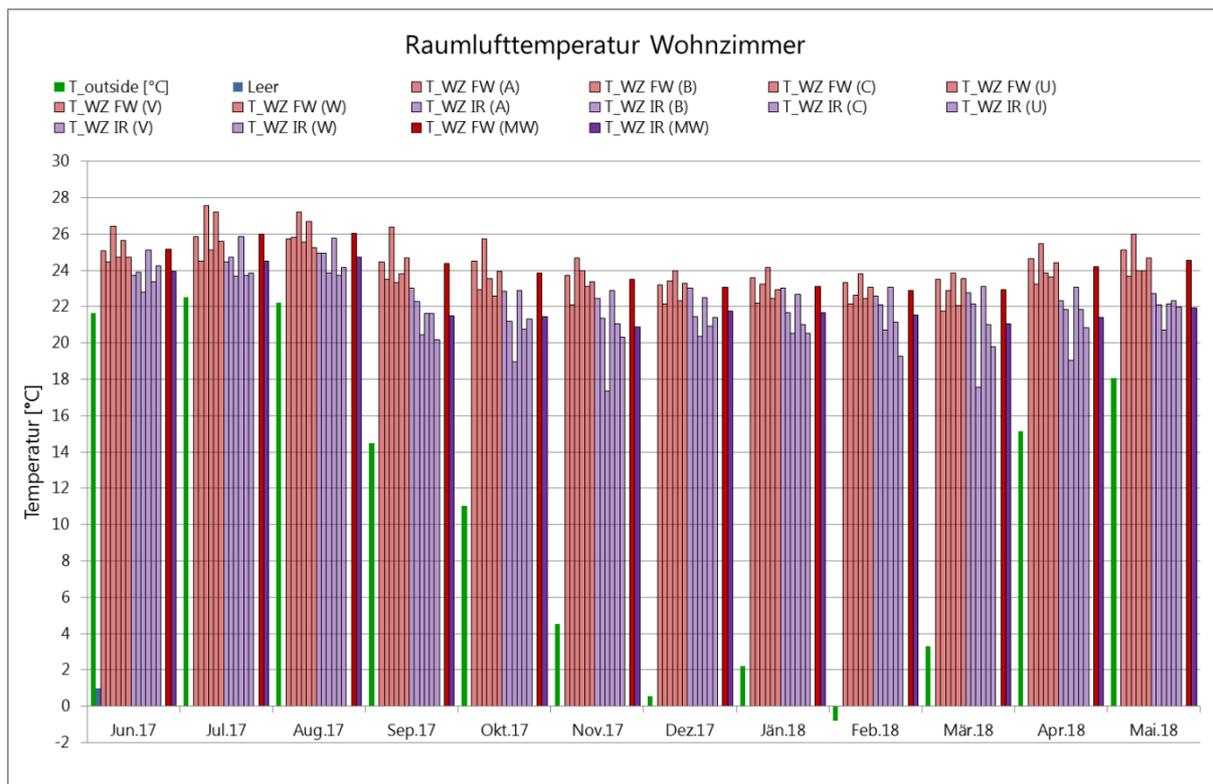


Abb. 43 Raumlufthtemperaturen im Wohnzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen – JAHR 1

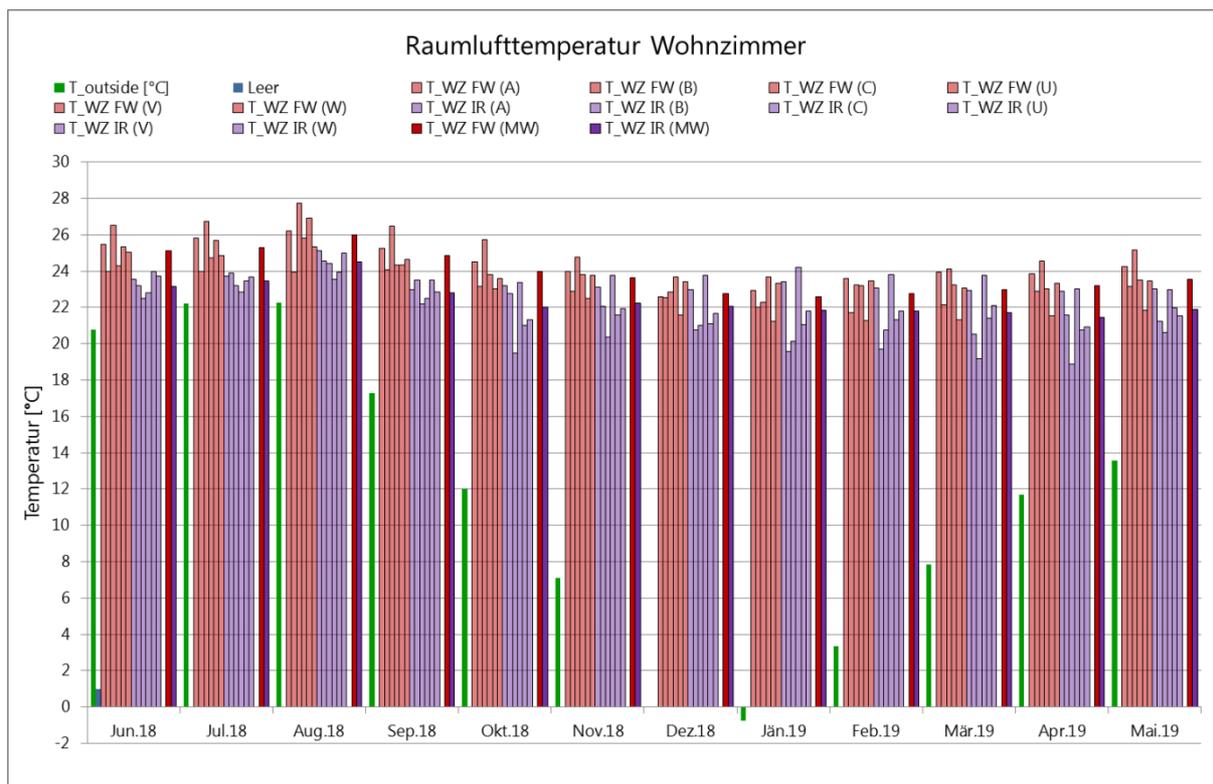


Abb. 44 Raumlufthtemperaturen im Wohnzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen – JAHR 2

Werden explizit nur die Raumlufthtemperaturen der Wohnzimmer untersucht, so ist erkennbar, dass diese in den Infrarot-Wohnungen durchwegs geringer sind als in den Fernwärme-Wohnungen. Die Unterschiede fallen im Wohnzimmer nach der Erweiterung mit dem Nachrüstpaneel jedoch geringer aus als zuvor.

Monatsmittelwerte Raumlufthtemperaturen - Schlafzimmer

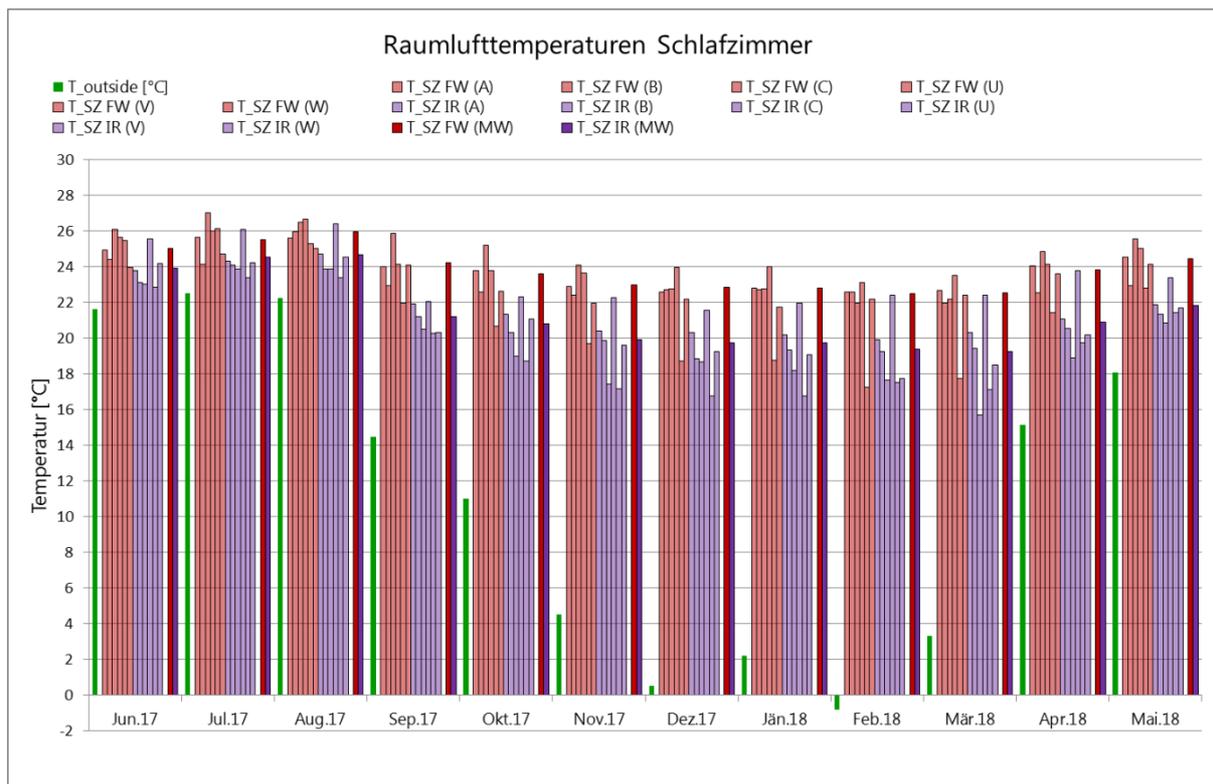


Abb. 45 Raumlufthtemperaturen im Schlafzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen – JAHR 1

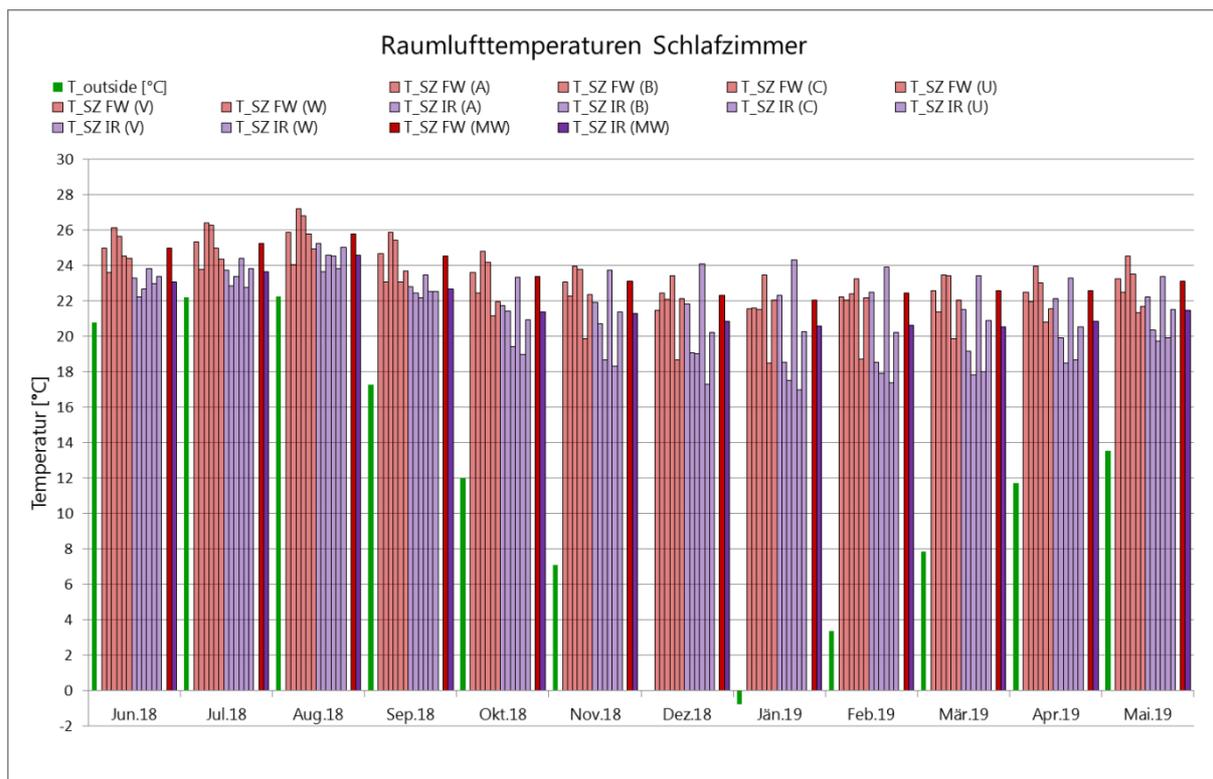
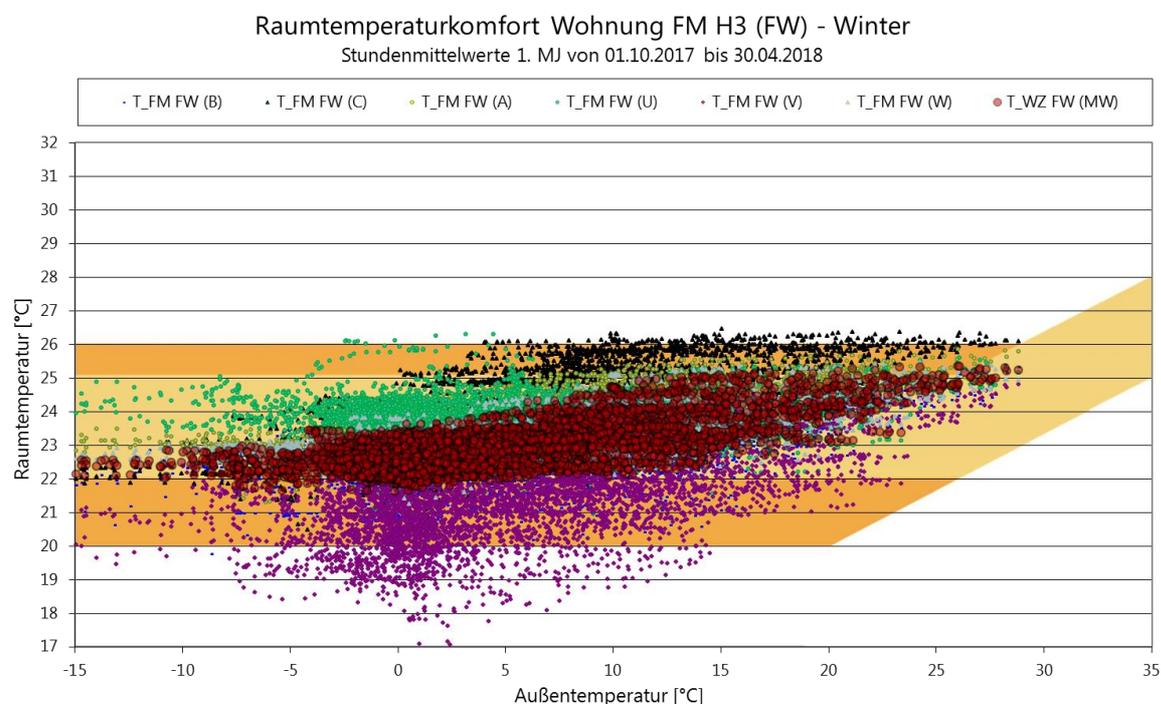


Abb. 46 Raumlufthtemperaturen im Schlafzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen – JAHR 2

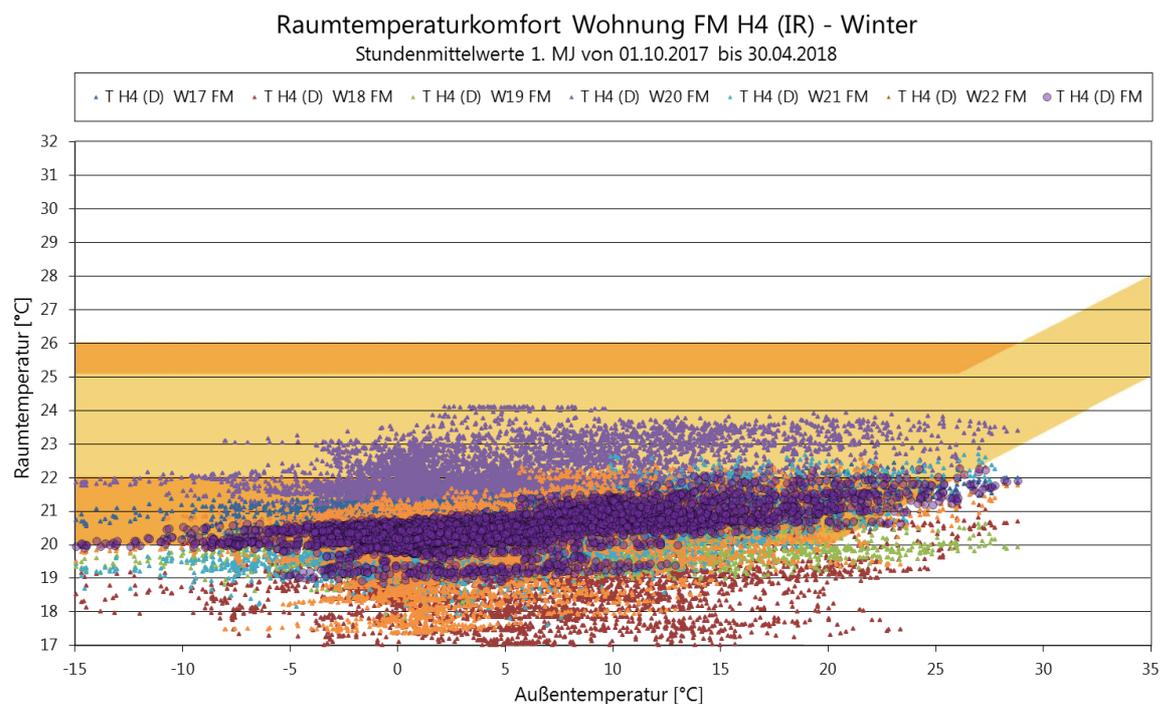
Wie bereits ausgeführt, zeigen sich in den Schlafzimmern größere Unterschiede als in den Wohnzimmern, da diese in den Infrarot-Wohnungen weniger oder anders, z.B. als Büro, genutzt wurden. Diese geänderte Raumnutzung ist auch bei den Messwerten der CO₂-Konzentration deutlich erkennbar.

Monatsmittelwerte Raumlufthtemperaturen - Außentemperaturabhängigkeit

In den nachfolgend dargestellten Punktwolkendiagrammen sind die stündlichen Messwerte der Raumlufthtemperaturen dargestellt. Die y-Koordinate zeigt die gemessene Temperatur an, die x-Koordinate die aktuelle vorherrschende Außentemperatur. Die kleineren Punkte im Hintergrund sind die Werte der einzelnen Wohnungen, die stärkeren, roten (FW) bzw. lila (IR) Punkte im Vordergrund zeigen die jeweiligen Mittelwerte der jeweiligen Häuser an. Die orange eingezeichneten Felder ermöglichen eine vereinfachte Bewertung des adaptiven Komforts gemäß DIN 1946-2.



**Abb. 47 Raumlufthtemperaturen für alle Wohnungen
Flächengemittelte der mit Fernwärmewohnungen versorgten Wohnungen. JAHR 1**



**Abb. 48 Raumlufthtemperaturen für alle Wohnungen JAHR 1
Flächengemittelte der mit Infrarot Paneelen versorgten Wohnungen.**

Während sich, im fernwärmeversorgten Wohnungstyp, die Raumlufthtemperaturen fast ausschließlich im komfortablen Bereich befinden (gemäß einer vereinfachten Bewertung nach DIN 1946-2), ist die Raumlufthtemperatur in den mit Infrarot Paneelen versorgten Wohnungstyp wesentlich tiefer. Im nachfolgenden Kapitel 3.6 „Dreidimensionale Behaglichkeitsanalyse – IR-Wohnung“ wird noch näher auf die Temperaturverteilung im Raum eingegangen.

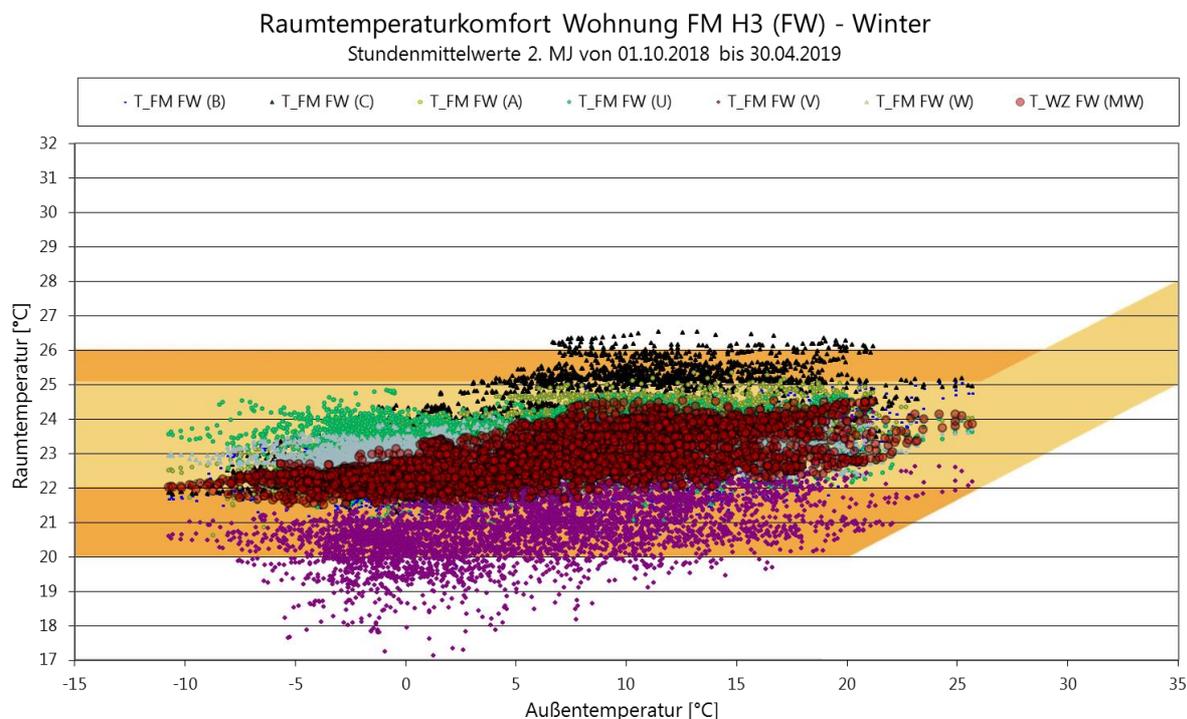


Abb. 49 Raumlufthtemperaturen für alle Wohnungen JAHR 2
Flächengemittelte der mit Fernwärmewohnungen versorgten Wohnungen.

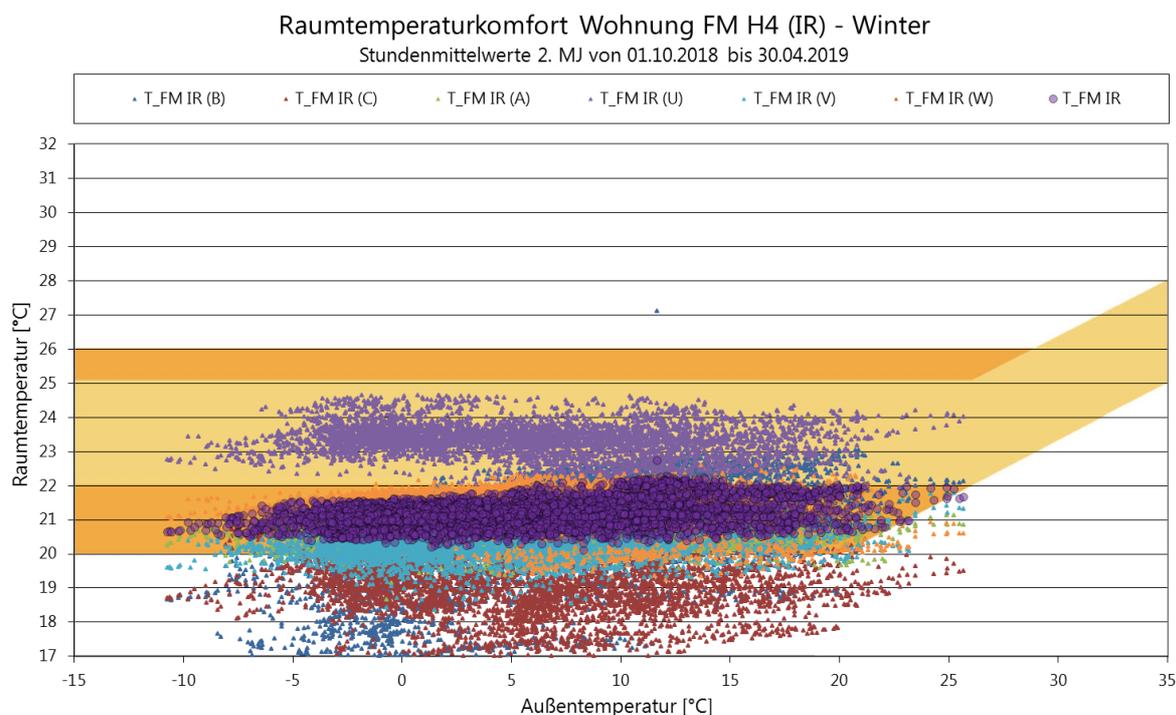
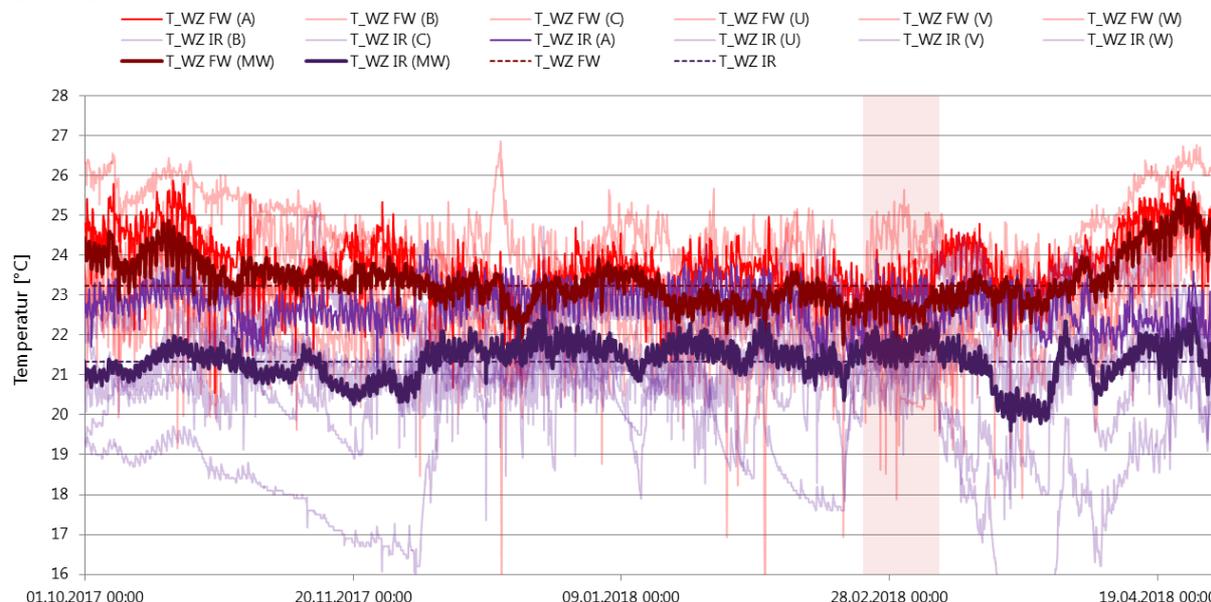


Abb. 50 Raumlufthtemperaturen für alle Wohnungen - JAHR 2
Flächengemittelte der mit Infrarot Paneelen versorgten Wohnungen.

Vergleicht man die Diagramme bezüglich der beiden Auswertejahre so sieht man, dass das Auswertejahr 1 (17/18) sowohl durch extrem kalte Phasen, als auch durch sehr warme Phasen gekennzeichnet war.

Um Unterschiede der Raumlufttemperaturen, welche auf das Heizungssystem zurückzuführen sind, zu analysieren wurden deshalb die Lufttemperaturen im Wohnzimmer im Winter 2017/2018 näher untersucht.



**Abb. 51 Raumlufttemperaturen im Schlafzimmer
Verlauf für alle Wohnungen**

Im Diagramm oben ist der Zeitraum von 1.10.2017 bis 1.5.2018 dargestellt. Die sehr dick dargestellten Linien in rot (Fernwärme) und lila (Infrarot) kennzeichnen die Wohnungsmittelwerte der jeweiligen Heizsysteme. Die leicht hervorgehobenen Linien markieren die bei der Behaglichkeitsmessung untersuchten Wohnungen. Die durchschnittliche Lufttemperatur in den Wohnzimmern der Fernwärme-Wohnungen lag im dargestellten Zeitraum bei 23,2 °C, in den Wohnzimmern der Infrarotwohnung bei 21,3 °C. Das ergibt eine mittlere Differenz von 1,9 °C.

Im Liniendiagramm ist erkennbar, dass die Raumlufttemperaturen in einigen Infrarot-Wohnungen über längere Zeiträume ausgesprochen tief waren. Die Wohnungen waren offensichtlich über längere Zeiträume unbewohnt und die Heizung wurde abgeschaltet, oder stark zurückgeregelt. Die dargestellten Mittelwerte sind daher für Vergleichszwecke der Heizsysteme ungeeignet. Um Unterschiede der mittleren Raumlufttemperaturen resultierend aus den unterschiedlichen Heizsystemen ableiten zu können, wurde deshalb eine Periode ausgewählt in welcher alle Wohnungen beheizt wurden (rot markierter Bereich).

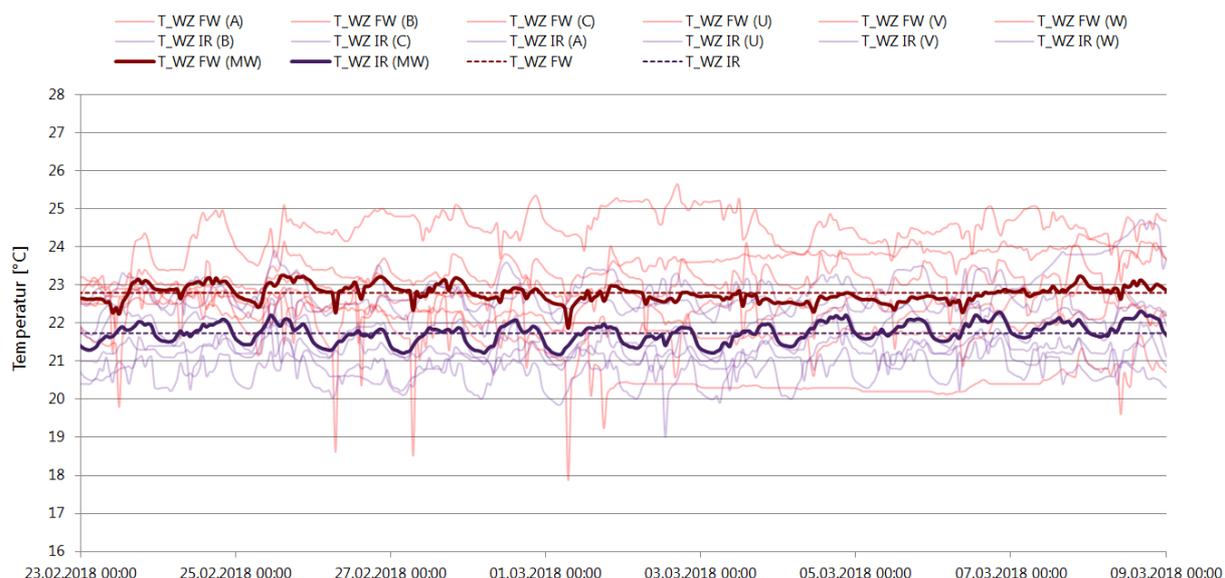


Abb. 52 Raumlufttemperaturen im Schlafzimmer. Verlauf für alle Wohnungen.

Die Wohnungsmittelwerte sind hervorgehoben.

Im Diagramm ist der Zeitbereich, vom 23.2.2018 bis zum 9.3.2018 dargestellt. In diesem Zeitraum waren alle Wohnungen belegt und wurden durchgängig beheizt. Die mittlere Lufttemperatur in den Wohnzimmern der Fernwärme-Wohnungen lag in diesem Zeitbereich bei 22,8 °C, in den Wohnzimmern der Infrarotwohnung bei 21,7 °C. Somit ergibt sich eine systematische Differenz von 1,1 °C. Dies dürfte direkt auf das unterschiedliche Heizprinzip zurückzuführen sein, bei höheren Strahlungstemperaturen ist für denselben thermischen Komfort eine entsprechend geringere Lufttemperatur notwendig (siehe Abb. 64).

Mittlere Tagesverläufe der Raumlufthtemperaturen im Koch/Ess/Wohnbereich

Insbesondere um die Umbauarbeiten nach dem ersten Jahr evaluieren zu können, wurde für die Monate Jänner und April ein mittlerer Tagesverlauf der Lufttemperaturen im Wohnzimmerbereich ermittelt. Es zeigt sich, dass im Vergleich zum Vorjahr die Unterschiede bei den Lufttemperaturen geringer geworden sind. Dies bedingt sich vermutlich jedoch auch in den geänderten Außenbedingungen oder geänderten Regler-Einstellungen da besonders die Temperaturen in den Fernwärme-Wohnungen geringer waren als im ersten Jahr. Insgesamt jedoch lagen die Lufttemperaturen in den Fernwärme-Wohnungen jedoch signifikant über jenen der mit Infrarotpaneelen beheizten Wohnungen.

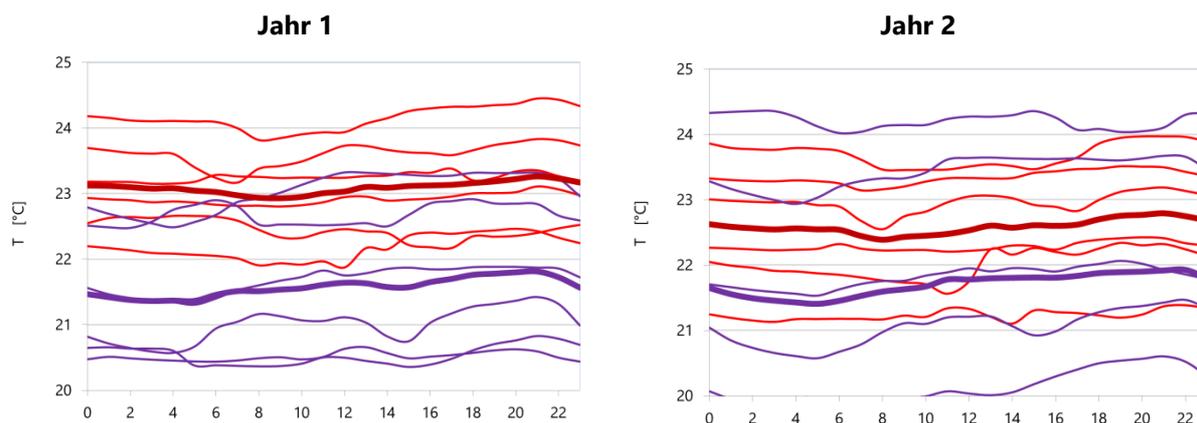


Abb. 53 Mittlerer Tagesverlauf der Raumlufthtemperaturen im Wohnbereich für den Monat Jänner
(rot: Fernwärme, lila: Infrarot; die Wohnungsmittelwerte sind hervorgehoben.)

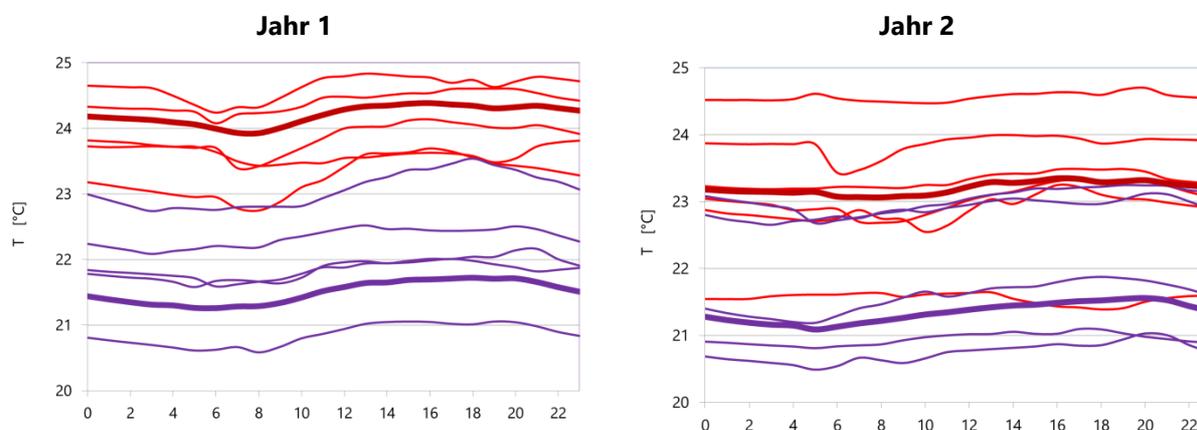


Abb. 54 Mittlerer Tagesverlauf der Raumlufthtemperaturen im Wohnbereich für den Monat April
(rot: Fernwärme, lila: Infrarot; die Wohnungsmittelwerte sind hervorgehoben.)

3.3.4 Relative Luftfeuchte

In den Wintermonaten ist die relative Feuchte in den mit Fernwärme beheizten und mit Infrarot beheizten Wohnungen in etwa gleich. Ab Oktober ist die relative Feuchtigkeit in den Infrarotwohnungen etwas höher. Die höhere relative Feuchte lässt sich durch die niedrigeren Lufttemperaturen in den Infrarotwohnungen erklären, da bei vergleichbaren absoluten Luftfeuchten und niedrigeren Temperaturen diese entsprechend höher sind. In allen Wohnungen befinden sich die relativen Luftfeuchtwerte generell in einem physiologisch günstigen und bauphysikalisch noch akzeptablen Bereich.

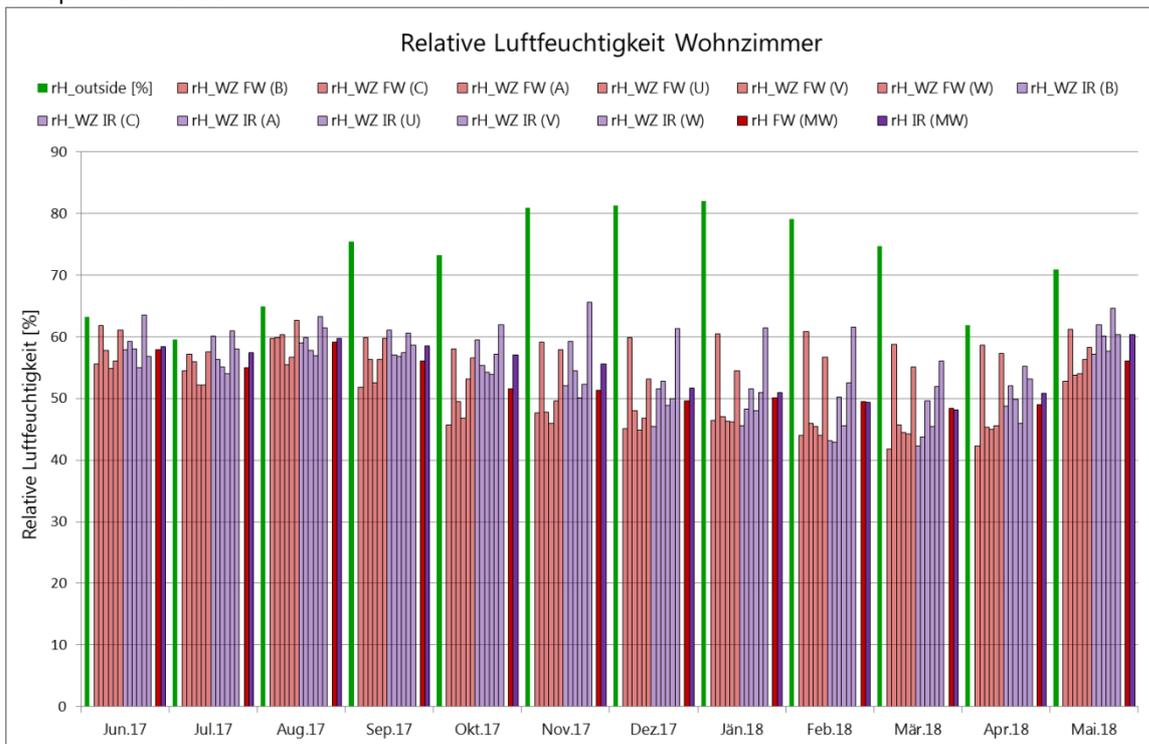


Abb. 55 Relative Luftfeuchte im Wohnzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen - JAHR 1

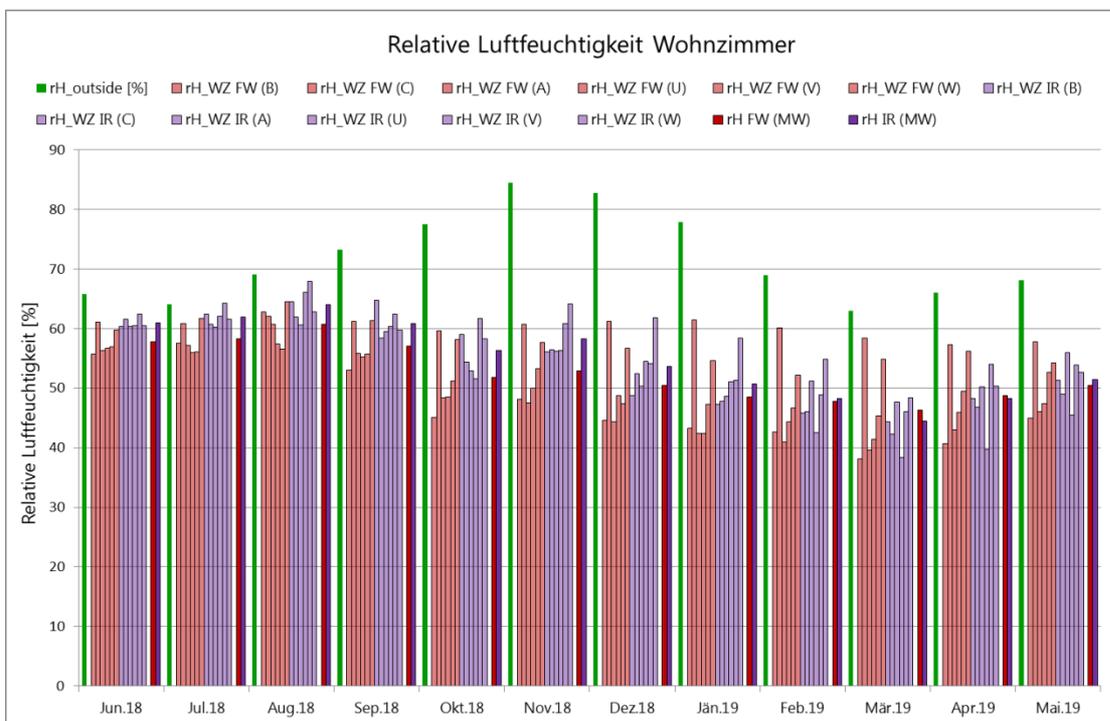
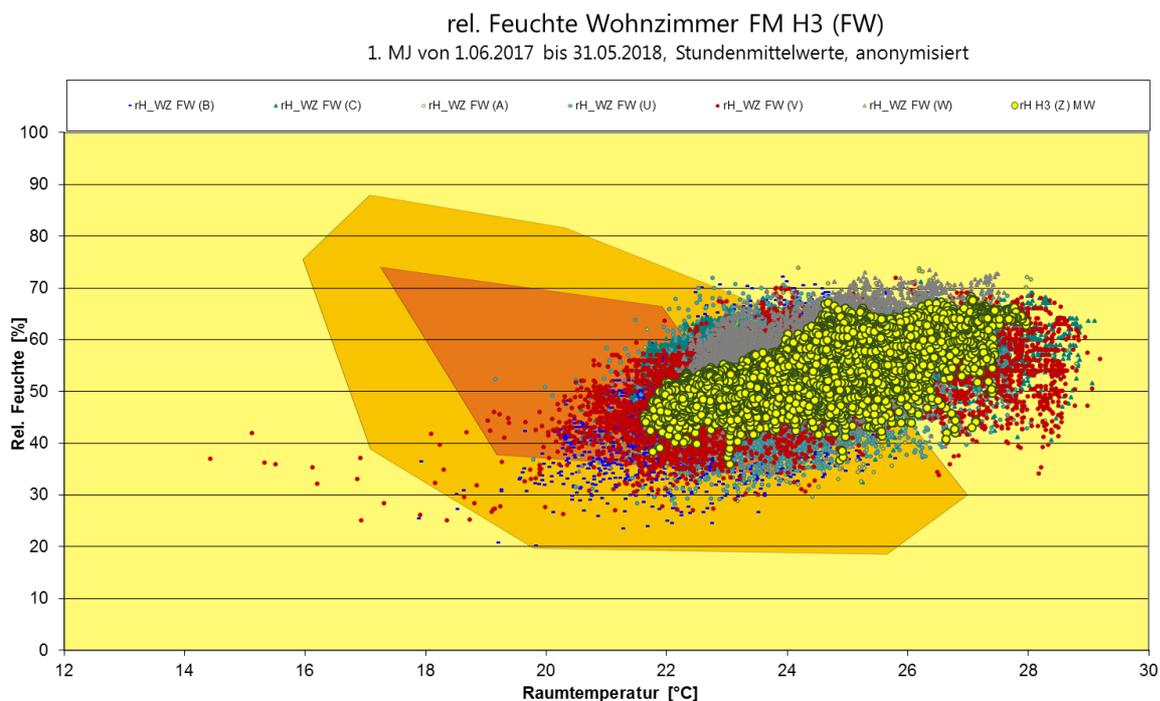
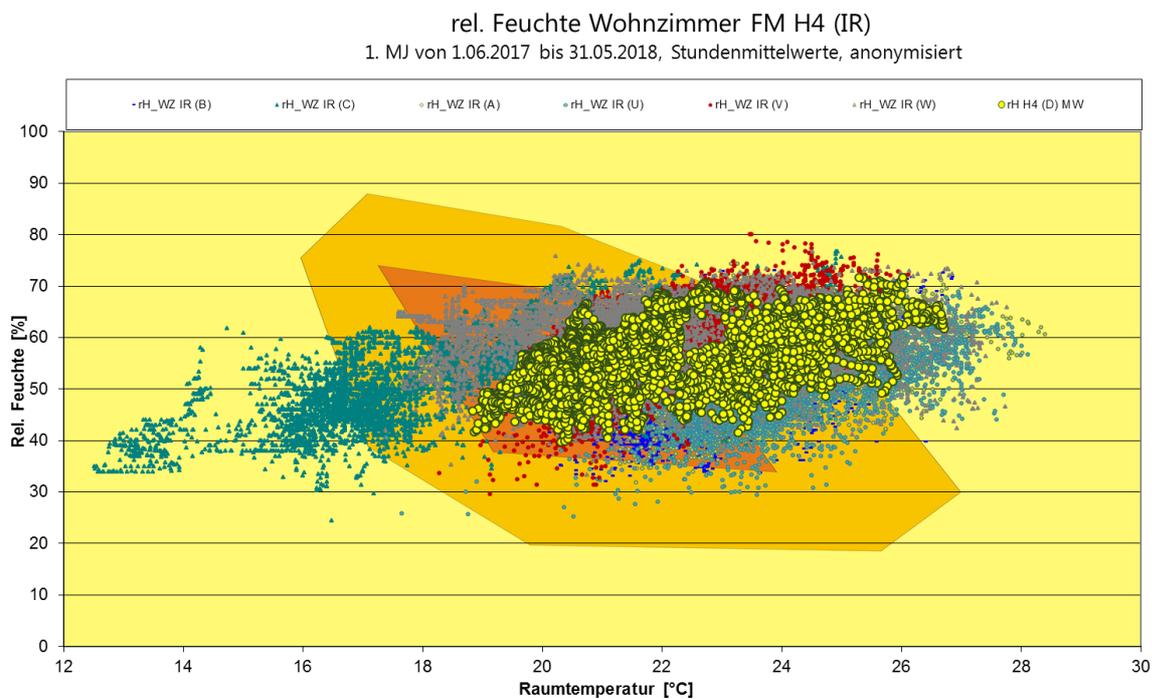


Abb. 56 Relative Luftfeuchte im Wohnzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen - JAHR 2

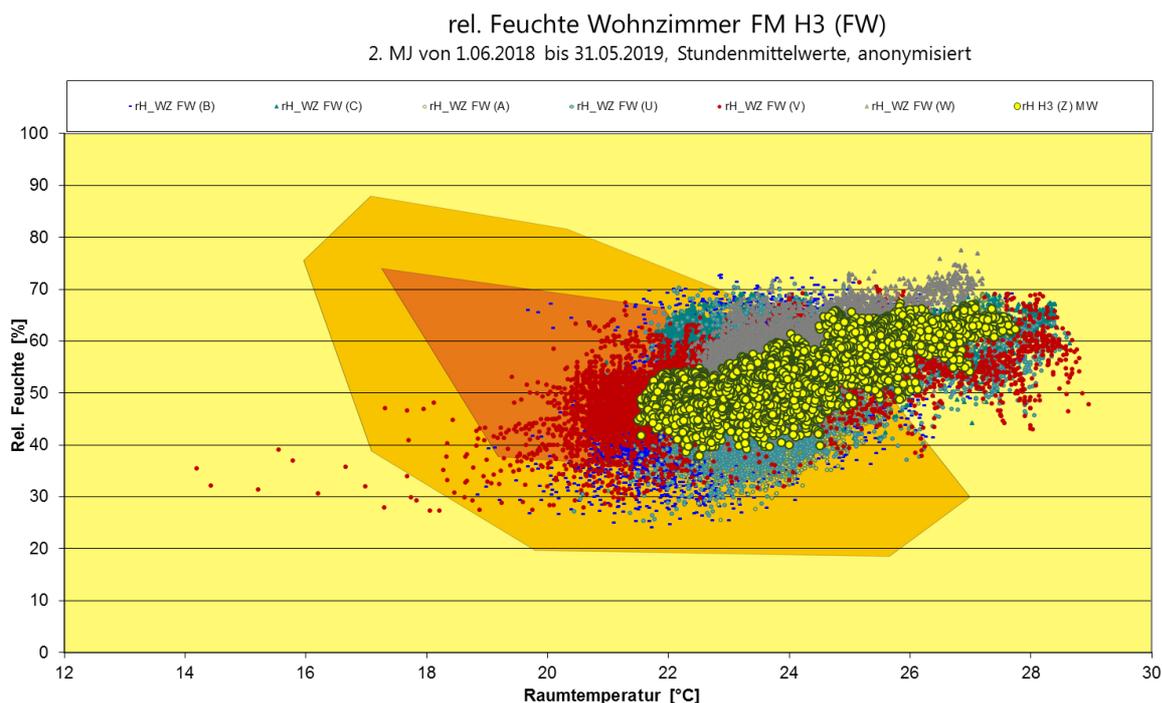
In den nachfolgend dargestellten Punktwolkendiagrammen sind die Stundenwerte der Raumluftfeuchten abgebildet. Die y-Koordinate stellt jeweils den relativen Feuchtegehalt dar, die x-Koordinate wird durch die jeweilige Raumlufttemperatur bestimmt. Die kleineren Punkte im Hintergrund sind die Werte der einzelnen Wohnungen, die stärkeren Punkte im Vordergrund stellen jeweils den Mittelwert für das jeweilige Haus dar. Jedes Diagramm enthält die Daten eines gesamten Auswertejahres.



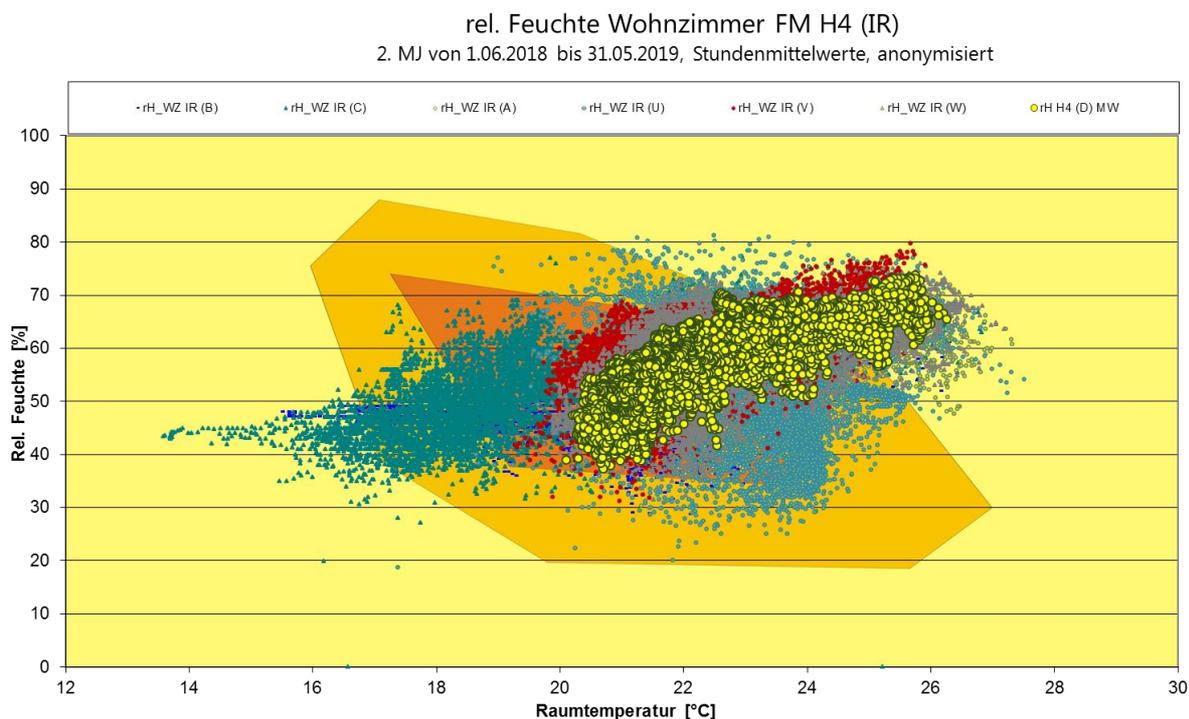
**Abb. 57 rel. Luftfeuchtigkeit über Raumtemperatur im Wohnzimmer - JAHR 1
Haus 3 - Fernwärme**



**Abb. 58 rel. Luftfeuchtigkeit über Raumtemperatur im Wohnzimmer - JAHR 1
Haus 4 – Infrarotheizung**



**Abb. 59 rel. Luftfeuchtigkeit über Raumtemperatur im Wohnzimmer – JAHR 2
Haus 3 - Fernwärme**



**Abb. 60 rel. Luftfeuchtigkeit über Raumtemperatur im Wohnzimmer – JAHR 2
Haus 4 – Infrarotheizung**

Sowohl im ersten Messjahr als auch im zweiten Messjahr gibt es im Haus mit den IR Paneelen immer einzelne Wohnungen mit sehr niedrigen Raumtemperaturen. Vermutlich waren die Wohnungen in dieser Zeit unbenutzt.

3.4 Befragungen zur Behaglichkeit

Allen Nutzern der Wohnungen wurde ein Fragebogen vorgelegt. Die erste Befragung wurde bereits wenige Monate nach Einzug (je nach Bezugstermin) durchgeführt. Sie diente vor allem als Referenz für die ein Jahr später stattfindende zweite Befragung. Bewohner aller Wohnungen nahmen an der Befragung teil.

Nachfolgend grafisch dargestellt die statische Auswertung der Antworten auf die Fragen nach der Einschätzung der Wohnsituation im Winter. Auf diese musste im Schulnotensystem eine Einschätzung über behaglichkeitsrelevante Faktoren in der Heizperiode durchgeführt werden.

Unten sind die Mittelwerte der Befragungen als farbige Balken dargestellt. Die einzelnen Antworten wurden jeweils zusätzlich als Markierungen eingetragen.

3.4.1 Erste Befragung

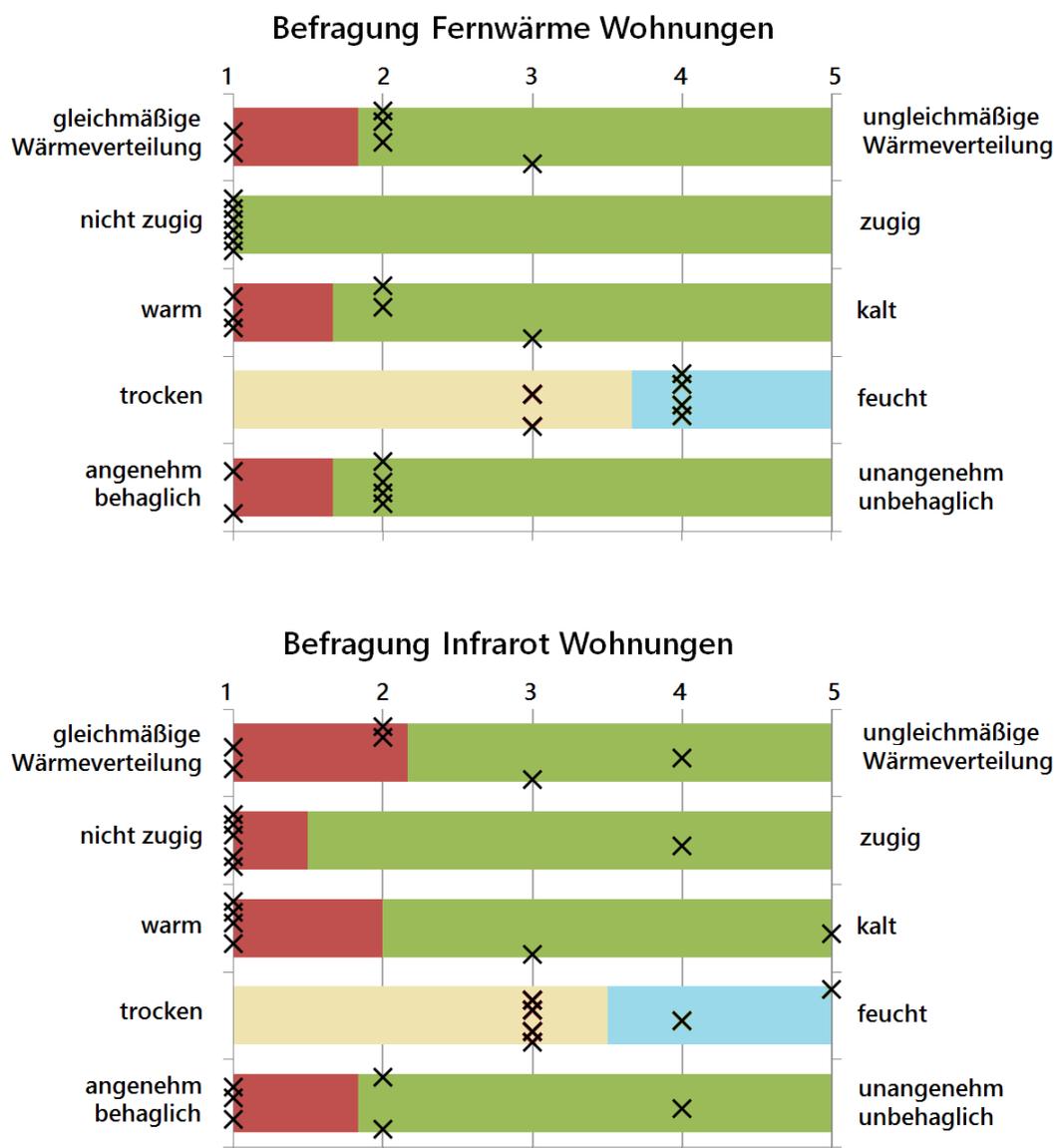


Abb. 61 Ergebnisse der ersten Befragung wenige Monate nach Bezug

3.4.2 Zweite Befragung

Die zweite Befragung erfolgte Anfang März 2018. Zu diesem Zeitpunkt hatten alle Bewohner eine vollständige Heizperiode in ihren Wohnungen verbracht. In jedem Objekt nahm jeweils eine Wohnung nicht an der Befragung teil. Die Ergebnisse der fünf verbleibenden Antworten sind unten dargestellt.



Abb. 62 Ergebnisse der zweiten Befragung im März 2018

Vergleicht man die Befragungsergebnisse mit den Ergebnissen der ersten Befragung so wird eine Zunahme der Zufriedenheit in den mit Radiator beheizten Wohnungen sichtbar. In der Kategorie „zugig“ trat eine leichte Verschlechterung ein (-0,4), jedoch wurden alle Kategorien mit den Noten „sehr gut“ bis „gut“ bewertet.

In den mit Infrarot-Paneelen beheizten Wohnungen hat die Zufriedenheit deutlich abgenommen. In allen Kategorien, außer der Kategorie „trocken/feucht“ wurden schlechtere Noten als bei der ersten Befragung gegeben. Deutlich am negativsten wurde die Gleichmäßigkeit der Wärmeverteilung beurteilt. Hier wurde von vier Nutzern die schlechteste Bewertung (5) vergeben, ein Nutzer hat jedoch in dieser, wie in allen weiteren, Kategorien die Bestnote (1) vergeben.

Infolge dieser Befragung und weiterer Behaglichkeitsuntersuchungen wurde im Wohnzimmer ein zusätzliches Paneel angebracht.

Zweite Befragung - Ergänzte Kommentare auf den Fragebogen

Der Fragebogen bot auch die Möglichkeit zusätzliche Kommentare frei zu ergänzen. Diese werden nachfolgenden in anonymisierter Form, aber ansonsten nicht weiter bearbeitet wiedergegeben.

HAUS 4 - INFRAROTHEIZUNG

Bewohner Whg. K

- Antwort auf die Frage „Wenn kalt/unangenehm in welchen Räumen?": *Vorraum*
- *Ich heize nicht im Vorraum, da es keinen Unterschied macht, ob das (für mich zu kleine) Paneel im Vorraum eingestellt wurde oder nicht! Ich weiß nicht ob das am Fliesenboden, der Haustür oder am Paneel liegt.*
- *IR-Paneel Wohnzimmer: liegt bei mir direkt über Esstisch – in meinen Augen unpraktisch montiert! Es wird sehr warm am Kopf wenn man das Paneel eingeschaltet hat und isst!*
- *Mir ist auch aufgefallen, dass es an anderen „Ecken“ im Wohnzimmer eher etwas kälter ist -> keine gleichmäßige Wärme im Raum!*

Bewohner Whg. L

- *Bin zufrieden, andere Bewohner kennen sich mit der Abrechnung nicht aus. Strompreis wurde nur für Periode Nov.-März berechnet, deshalb hoch. Stromkosten 70€.*

Bewohner Whg. M

- Antwort auf die Frage „Wenn kalt/unangenehm in welchen Räumen?": *überall*
- *Schaaß mit Quastel. Stromkosten waren Explosion 120€.*

Bewohner Whg. N

- Antwort auf die Frage „Wenn kalt/unangenehm in welchen Räumen?":
Alle Räume außer dem Badezimmer kalt, wahrscheinlich wegen dem Boiler.
- *Sehr kalt bei den Füßen*
- *Verteilung der Wärme*
- *Stromkosten bei höherer Einstellung als 20°C*

Bewohner Whg. O

- Antwort auf die Frage „Wenn kalt/unangenehm in welchen Räumen?":
Wohnzimmer am Größten.
- *Mit ganzer Heizung nicht zufrieden. Nur Strahlungswärme in der Mitte des Raums. Am Rand und an den Füßen kalt.*
- *Heizung schon auf 24°C -> Leistung des IR-Paneels zu gering. Mehrere Paneele wären sinnvoller.*
- *90€ Stromkosten.*
- *Was bringt die Photovoltaikanlage?*

HAUS 3 - FERNWÄRME

Bewohner Whg. P

- *Im Winter Problem mit Heißwasser (Luft im System). Wurde aber inzwischen behoben.*

Bewohner Whg. Q

- *Manchmal zu warm ohne zu heizen.*

Anmerkung: die angegebenen Stromkosten widerspiegeln i.d.R. nicht die zu erwartenden Jahresmittelwerte, da auf Grund des noch nicht lange zurückliegenden Bezugs die Bemessungen der Energieversorger noch nicht zuverlässig waren.

3.4.3 Dritte Befragung

Die dritte Befragung erfolgte nach Ende der Heizperiode 18/19. Zwischen der zweiten und der dritten Befragung erfolgte die Nachrüstung des Zusatzpaneels im Wohnzimmer. Wie bereits mehrfach erwähnt unterschieden sich die beiden Heizperioden deutlich. Die Heizperiode 17/18 war teils durch extrem tiefe Temperaturen gekennzeichnet, während die Heizperiode 18/19 durch ungewöhnlich lang andauernde, jedoch bei gemäßigten Temperaturen.

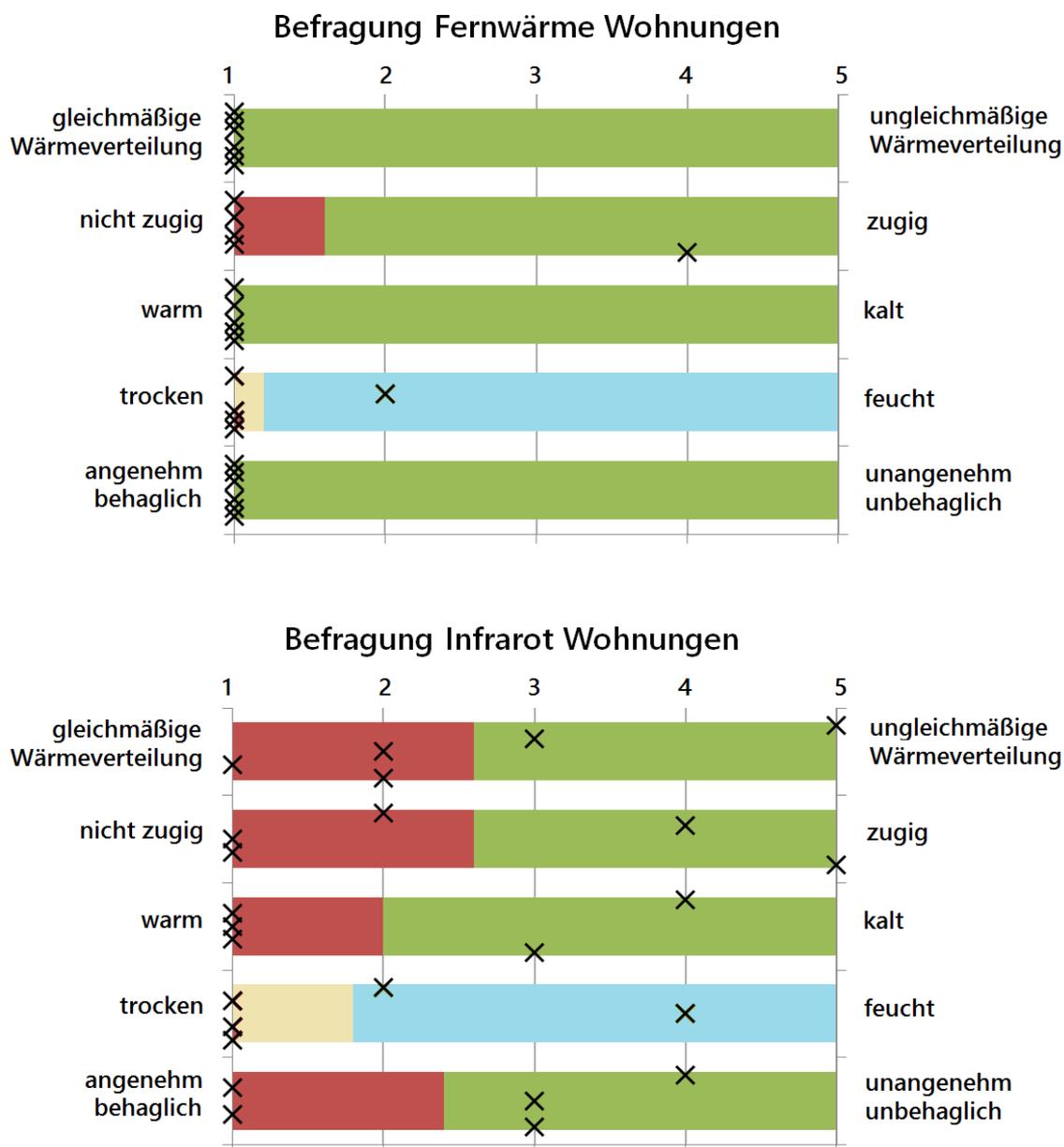


Abb. 63 Ergebnisse der dritten Befragung 2019

Im Vergleich zur zweiten Befragung ist die Zufriedenheit der Bewohner des Fernwärmeobjekts im darauffolgenden Jahr nochmals leicht angestiegen. Es wurden beinahe überall die Bestnoten vergeben. Auch im Haus mit Infrarotheizung ist die Zufriedenheit im Vergleich zur zweiten Befragung deutlich gestiegen. Insbesondere die zuvor signifikant als kritisch eingestufte ungleichmäßige Wärmeverteilung wurde nun besser beurteilt. Dies dürfte sich vorwiegend durch die Nachrüstung mit einem zusätzlichen Infrarot-Panel begründen, eventuell spielen auch die in diesem Jahr gemäßigteren Außentemperaturen eine Rolle. An der Befragung nahmen alle Parteien des Fernwärmeobjekts teil, und fünf Parteien im mit Infrarot-Paneelen beheizten Objekt.

Dritte Befragung - Ergänzte Kommentare auf den Fragebogen

Der Fragebogen bot auch die Möglichkeit zusätzliche Kommentare frei zu ergänzen. Diese werden nachfolgenden in anonymisierter Form, aber ansonsten nicht weiter bearbeitet wiedergegeben.

HAUS 4 – INFRAROTHEIZUNG

Bewohner Whg. W

- *Nach Einbau des 2. Paneels hat sich an der Behaglichkeit nichts geändert.*
- *Im Bereich des Oberkörpers ist es angenehm, bei den Füßen empfindet man es kalt.*
- *Die Wärmeverteilung wirkt nicht auf den gesamten Raum, das wird sowohl von mir, als auch von meinen Gästen so empfunden.*

Bewohner Whg. X

- *Ein bisserl besser geworden.*
- *Muss sehr hoch aufdrehen, damit Leistung ausreicht.*
- *Schlechte Isolierung vom Boden – lauter Kältequellen.*
- *Strahlung reicht nicht ganz zum Boden runter.*
- *Benachteiligung durch Ecklage der Wohnung.*
- *Problem nur in Wohnzimmer, andere Räume werden nicht zum Aufenthalt benutzt.*
- *Zweifle, dass Heizleistung in einem kalten Winter ausreicht.*

Bewohner Whg. Y

- *Bei mir kein Umbau gemacht. Hab Aufputzverlegung beim Nachbarn gesehen. Diese ist nicht schön. Weil sonst zufrieden mit Heizung, kein Umbau.*
- *Sehr gut gedämmtes Haus. Kühl im Sommer.*

Bewohner Whg. Z

- *Besser geworden; gleichmäßiger.*
- *Ende Juli ausgezogen, auch wegen den Kosten.*

HAUS 3 - FERNWÄRME

Bewohner Whg. D

- *Im Schlafzimmer ist die Heizung das ganze Jahr über aus.*
- *Im Winter eher zu warm als gewünscht.*
- *Erwärmung durch Verteilleitungen.*
- *Küchenfenster nicht ganz dicht.*

Bewohner Whg. E

- *Wie oft ruft ihr noch an?*
- *Keine Änderung bei der Heizung.*
- *Alles ok, Aussagen der letzten Befragung gelten immer noch.*

3.5 Behaglichkeitsmessung

3.5.1 Methode

Entsprechend der Vorgaben von ÖNORM ISO 7730 wurden in zwei der untersuchten Wohnungen mit unterschiedlichem Heizsystem vor-Ort Bestimmungen der Behaglichkeitssituation durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden in den Wohnzimmern von insgesamt vier Wohnungen Spot-Messungen mit speziellen Behaglichkeitsmessbäumen über einen Zeitraum von 10 bzw. 6 Tagen durchgeführt und ausgewertet. Um der charakteristischen Art der Energieabgabe des IR-Heizsystems Rechnung zu tragen, wurde bei dieser Wohnung zudem ein erweitertes, dreidimensionales Verfahren zur Analyse der Behaglichkeitssituation im Raum angewendet.

3.5.2 Behaglichkeitsmessung – Beschreibung

Zur Evaluierung der lokalen thermischen Behaglichkeit wurde eine Untersuchung gemäß der Methode nach FANGER durchgeführt. Es handelt sich hierbei um das derzeit gebräuchlichste Verfahren, welches von Prof. Ole Fanger bereits in den 1970er Jahren entwickelt wurde. Das Verfahren wird im Rahmen der Vorgaben der internationalen Norm ISO 7730 bzw. in Österreich auf Basis von ÖNORM 7730 angewendet. Die Grundlage für die Methode bildeten umfangreiche Klimakammerexperimente mit einer großen Zahl an Versuchspersonen. Auf Basis der Ergebnisse dieser Versuchsreihen wurde ein halbempirisches Wärmebilanzmodell entwickelt, welches es bei Messung der notwendigen physikalischen Parameter gestattet die thermische Behaglichkeit anhand des **PMV-Index (predicted mean vote)** vorherzusagen. Aus diesem Vorhersagewert kann der zu erwartende Anteil an unzufriedenen Personen **PPD (predicted percentage dissatisfied)** abgeleitet werden (*Anmerkung: es ist eine interessante Erkenntnis der Experimente von Fanger, dass dieser auch unter vermeintlich idealen Bedingungen nie unter 5% sinkt*).

Eingangsparameter der sogenannten PMV-Messung bzw. Auswertung sind:

- Wärmewiderstand der Kleidung (*clothing factor*)
- Aktivitätsgrad (*metabolic rate*)
- lokale Lufttemperatur
- lokale Strahlungstemperatur
- Strömungsgeschwindigkeit der Luft
- Luftfeuchte

PMV-Index (predicted mean value)

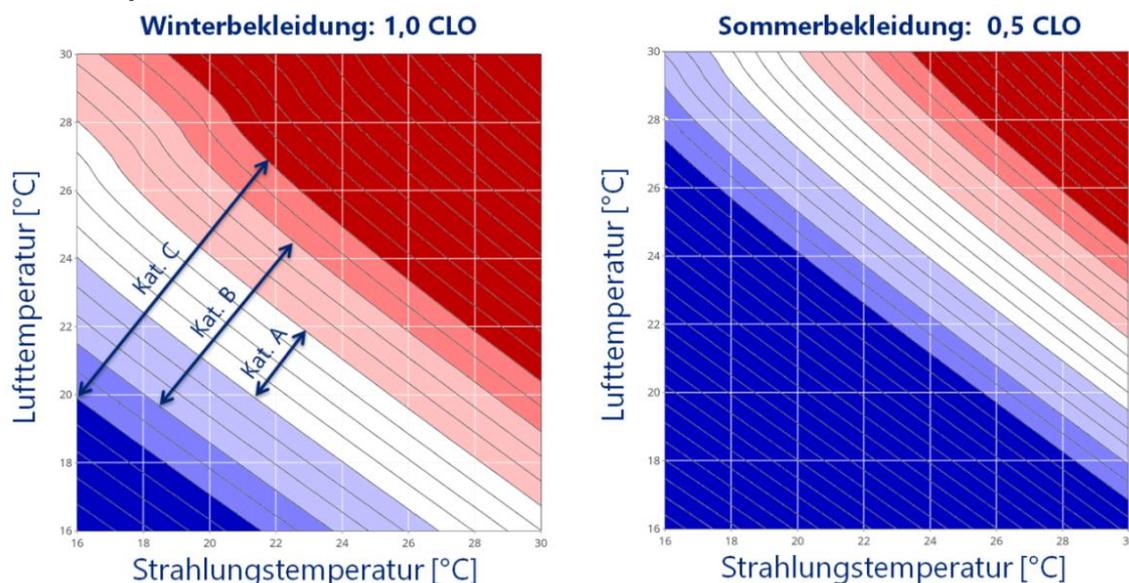


Abb. 64 Beispiel PMV-Indizes bei unterschiedlichen Strahlungs-/Lufttemperaturen und unterschiedlicher Bekleidung

Aktivitätsgrad: 1,2 met „sitzende Tätigkeit“, Luftzug: 0 m/s, Luftfeuchte: 50%
 PMV-Bandbreiten: Kategorie A $\pm 0,2$, Kategorie B $\pm 0,5$, Kategorie C $\pm 0,7$

Wie erwähnt, spiegelt der PMV-Index die zu erwartende mittlere Beurteilung einer größeren Gruppe an Personen hinsichtlich des thermischen Komforts wider. Der Optimalwert liegt bei 0. Selbst bei diesem Wert ist zu erwarten, dass 5% der Personen die gefühlte Temperatur als zu warm oder zu kühl beurteilt. In der Regel wird von guten thermischer Komfortbedingungen gesprochen wenn die Rate der vorhergesagten Unzufriedenen (PPD) einen Wert von 10% nicht übersteigt.

In Abb. 64 sind mit einer Auflösung von 0,1 PMV-Indizes für unterschiedliche Strahlungs- und Lufttemperaturkombinationen eingezeichnet. Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass bei höheren Strahlungstemperaturen der Optimalbereich bei niedrigeren Lufttemperaturen erzielt wird, z.B. Sonnenterasse im Winter. Umgekehrt ist bei geringen Strahlungstemperaturen eine entsprechend höhere Lufttemperatur notwendig ist, z.B. im Einflussbereich von kühlen Wand- oder Fensterflächen.

Verbal werden die PMV-Indizes mit der folgenden Skala assoziiert:

Beurteilung	kalt	kühl	leicht kühl	neutral	leicht warm	warm	heiß
PMV-Index	-3	-2	-1	0	1	2	3

Für eine vollständige Klassifizierung der thermischen Behaglichkeitssituation nach Fanger sind gemäß ÖNORM EN ISO 7730 neben dem PMV-Index, jedoch noch drei weitere Faktoren bestimmend, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Vertikale Lufttemperaturdifferenz

Ein hoher vertikaler Lufttemperaturunterschied beeinträchtigt die thermische Behaglichkeit. Maßgebend im Modell ist hier die Differenz der Lufttemperatur gemessen auf Fußgelenkhöhe und auf Kopfhöhe. Bei der Kopfhöhe wird auf zwei Ebenen gemessen um eine Vorhersage für eine sitzende und eine stehende Person treffen zu können. Als unangenehm wird eine nach oben hin ansteigende Temperatur wahrgenommen. Zur Einhaltung der Behaglichkeitsklasse A bzw. B sollte diese Temperaturdifferenz geringer als 3 bzw. 5 °C sein. Die voraussichtliche Anzahl der Unzufriedenen kann wieder auf Basis der von Fanger ermittelten Parameter berechnet werden.

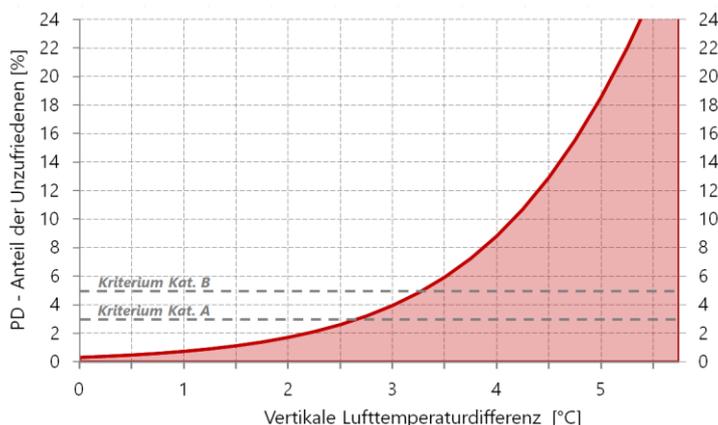


Abb. 65 Anteil der Unzufriedenen (PD) durch Temperaturgradient
bezogen auf Differenz in Fußgelenk- und Kopfhöhe

Warmer oder kalter Fußboden

Da in Innenräumen meist entsprechend leichtes Schuhwerk, oder keine Schuhe, getragen werden hat auch die Fußbodentemperatur einen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit. Sowohl ein zu kalter, als auch ein zu warmer Fußboden werden als unangenehm wahrgenommen. Gemäß den Untersuchungen von Fanger liegt die optimale Temperatur bei 23,5 °C. Abweichungen von wenigen Grad werden jedoch kaum wahrgenommen und sind immer noch als unkritisch einzustufen.

Zur Einhaltung der Behaglichkeitsklasse A und B gemäß ÖNORM müssen die Fußbodentemperaturen im Bereich zwischen 19 °C und 28 °C liegen.

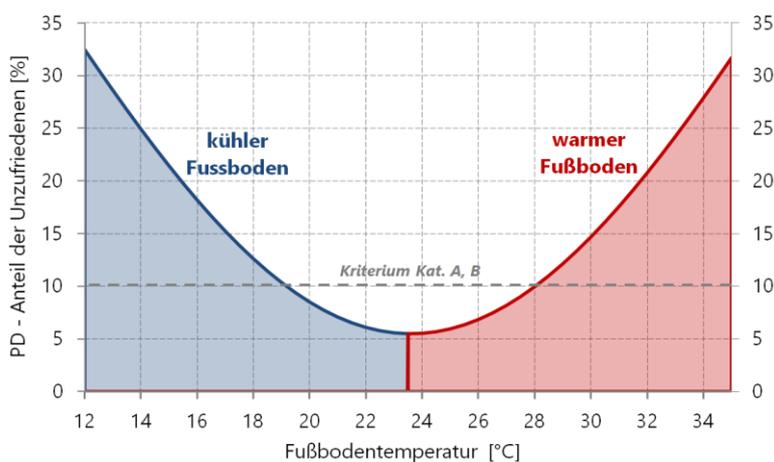


Abb. 66 Anteil der Unzufriedenen (PD) bei unterschiedlichen Fußbodentemperaturen

Strahlungsasymmetrie

Der Wärmeaustausch zwischen Personen und der Umgebung erfolgt bei üblichen Bedingungen vorwiegend über Strahlungsaustausch. Folglich werden Ungleichgewichte in der Strahlungsaustauschbilanz deutlich wahrgenommen. Die Sensitivitäten hinsichtlich der Richtung und der Temperaturdifferenz sind hier sehr unterschiedlich. Am empfindlichsten reagieren Menschen auf kalte Wandflächen (Fensterflächen) und noch ausgeprägter auf warme Decken. Umgekehrt werden in der Regel warme Wandflächen erst bei sehr hohen Temperaturdifferenzen als unangenehm empfunden.

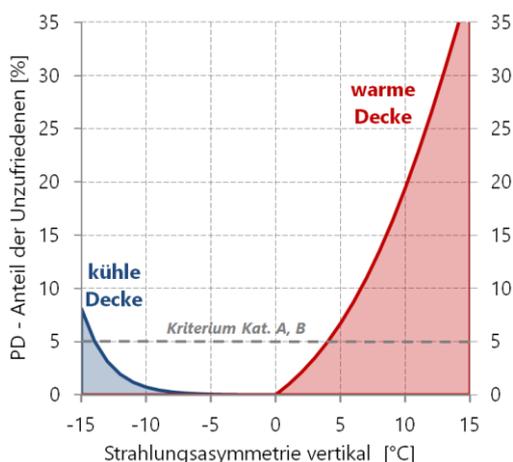


Abb. 67 Anteil der Unzufriedenen (PD) auf Grund vertikaler Strahlungsasymmetrie

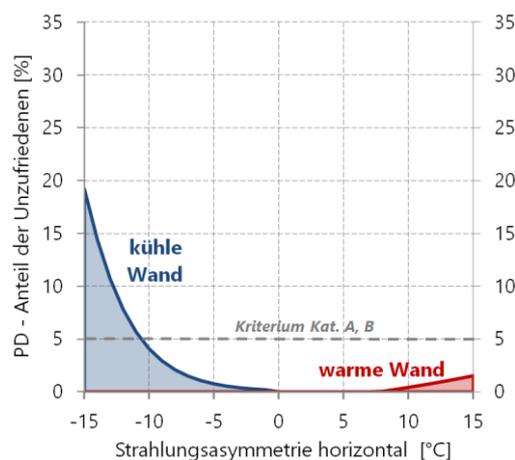


Abb. 68 Anteil der Unzufriedenen (PD) auf Grund horizontaler Strahlungsasymmetrie

Klassifizierung - Behaglichkeitskategorien

Um eine globale Aussage unter Berücksichtigung aller genannten Aspekte treffen zu können, wurde ein Klassifizierungssystem eingeführt, bei welchem für jedes Kriterium ein maximal zulässiger Prozentsatz an Unzufriedenen festgelegt wurde. Zur Erreichung der jeweiligen Kategorie ist es erforderlich diese Zielwerte in jeweils allen Kriterien zu erfüllen. Aus dieser Festlegung lassen sich die folgenden Grenzwerte für die maßgeblichen Parameter der einzelnen Kriterien ableiten.

Tab. 8 Einzuhaltende Grenzwerte zur Erreichung der jeweiligen Behaglichkeits-Kategorien

	PMV	Vert. Differenz	wärmer/kalter	Strahlungsasymmetrie	
	Index	Lufttemperatur	Fußboden	Wand	Decke
Kat. A	-0,2 < PMV < 0,2	$\Delta T < 2 \text{ }^\circ\text{C}$	19 °C < T < 29 °C	-10 °C < ΔT < 23 °C	-14 °C < ΔT < 5 °C
Kat. B	-0,5 < PMV < 0,5	$\Delta T < 3 \text{ }^\circ\text{C}$	19 °C < T < 29 °C	-10 °C < ΔT < 23 °C	-14 °C < ΔT < 5 °C
Kat. C	-0,7 < PMV < 0,7	$\Delta T < 4 \text{ }^\circ\text{C}$	17 °C < T < 31 °C	-13 °C < ΔT < 35 °C	-18 °C < ΔT < 7 °C

Anmerkung: die leichten Abweichungen zwischen den Temperaturen in der Tabelle und den Kategorie-Grenzen in den Abbildungen oben, ergeben sich durch Rundungen welche beim Erstellen der Grenzwerte von den Verfassern der Norm durchgeführt wurden.

3.5.3 Spot Messung - Beschreibung

Für die Spot-Messung wurde über einen Zeitraum von 10 bzw. 6 Tagen in den Wohnzimmern von vier ausgewählten Wohnungen zeitgleich jeweils ein Messbaum zur Erfassung der behaglichkeitsrelevanten Messgrößen installiert. Die Untersuchungen fanden paarweise jeweils in identisch gelegenen Wohnungen des Hauses 3 (Fernwärme) und Hauses 4 (Infrarotheizung) statt.

Die Spot-Messung stellt eine sehr genaue Methode zur Ermittlung der Behaglichkeit dar, da alle relevanten Messgrößen (siehe oben) lokal, zeitlich hochaufgelöst, erfasst und aufgezeichnet werden. Eine Einschränkung dieser Methode stellt naturgemäß die damit verbundene, notwendige feste räumliche Verortung des Auswertepunkts dar. Die Behaglichkeitsbewertung gilt folglich ausschließlich für den Ort der Messung, dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden in den beiden Wohnungen (Infrarot/Fernwärme) Aufstellungsorte mit vergleichbaren Bedingungen im jeweiligen Wohnzimmer gewählt. Ebenso wurde darauf geachtet zwei Wohnungen in gleicher Lage zu untersuchen. Bei Spotmessung A wurden vergleichbare Wohnungen im Erdgeschoss untersucht, bei Spotmessung B vergleichbare Wohnungen im Obergeschoss untersucht. Es gilt zu berücksichtigen, dass das Nutzerverhalten in beiden Wohnungen zu spezifischen Charakteristika führt.

Im Gegensatz zu den Messungen im ersten Auswertebericht, lagen bei diesen Untersuchungen die Außentemperaturen in einem gemäßigten Bereich. Zudem handelte sich um einen ausgesprochen sonnigen Zeitraum (siehe unten).

Für die vollständige Auswertung des PMV-Index nach Fanger war es notwendig weitere Eingangsgrößen festzulegen. Diese wurden wie folgt definiert:

Tab. 9 Festgelegte Eingangsparameter für die Behaglichkeitsmessung

	Wert	Anmerkung
Bekleidung	0,8 clo	leichte Winterbekleidung für Innen (langärmeliges Hemd mit Unterhemd)
	1,0 clo	Winterbekleidung (Pullover oder Strickweste)
Aktivitätsgrad	1,0 met	entspricht entspanntem Sitzen
Lufttemperatur 0,1 / 1,1 / 1,7 m	lokale MESSWERTE	
Strahlungstemperatur	lokale MESSWERTE	
Relative Luftfeuchte	lokale MESSWERTE	
Strömungsgeschwindigkeit Luft	lokale MESSWERTE	

Die PMV-Berechnung wurde somit jeweils für zwei unterschiedliche Bekleidungssituationen durchgeführt, da die Bandbreite der heute im Winter im Innenraum üblichen Bekleidung einerseits sehr groß ist, dieser Parameter andererseits aber einen relativ starken Einfluss auf das Ergebnis hat. Der Bekleidungsfaktor 0,8 CLO entspricht den heute in der Regel angetroffenen Bekleidungsverhältnissen im Innenraum. Der Bekleidungsfaktor 1,0 CLO entspricht einer etwas stärker der Jahreszeit angepassten Bekleidung, etwa durch das Tragen eines Pullovers oder einer Strickweste.

3.5.4 Spotmessung A – Ergebnisse und Interpretation

Positionierung

Auf Grund der abweichenden Position des Esstisches, wurde der Messbaum in den beiden Wohnungen jeweils vor der gegenüberliegenden Innenwand angeordnet, jedoch ansonsten in symmetrischer Positionierung.

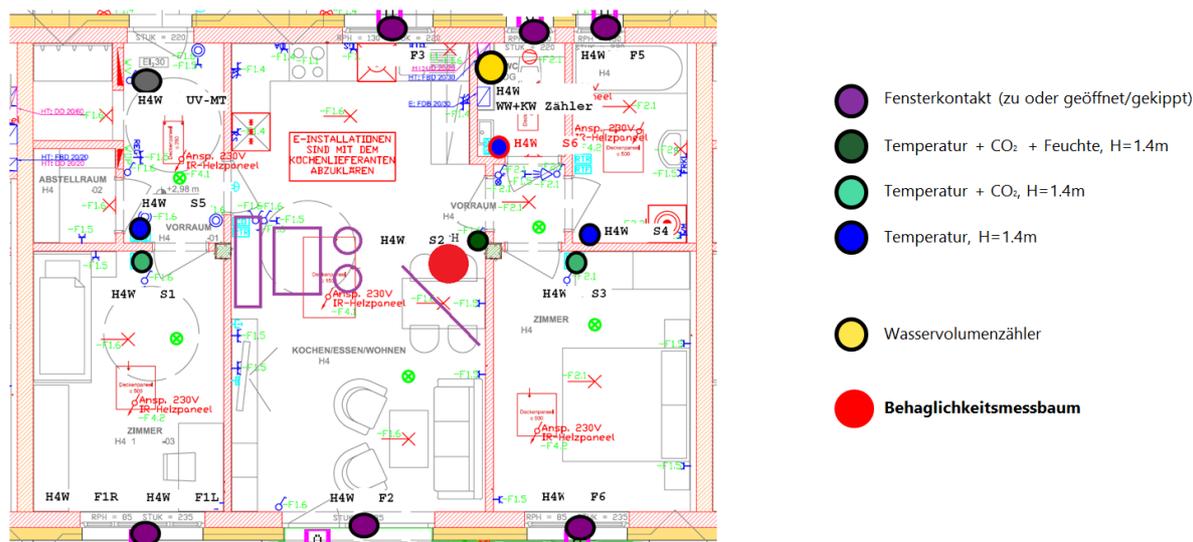


Abb. 69 Ort der Behaglichkeits-Spotmessung A, IR-Wohnung
(roter Kreis: Aufstellungsort des Messbaums, tatsächlicher Ort des Esstisch in Magenta angedeutet)

Anmerkung: bei der Installation der Messtechnik wurde festgestellt, dass das im Wohnzimmer installierte Infrarot-Panel ein vom Plan etwas abweichendes Maß von 120x75 cm aufweist. Diese wurde auch für die nachfolgende Modellierung des Raums herangezogen.



Abb. 70 Behaglichkeitsmessbaum Spotmessung A, IR-Wohnung

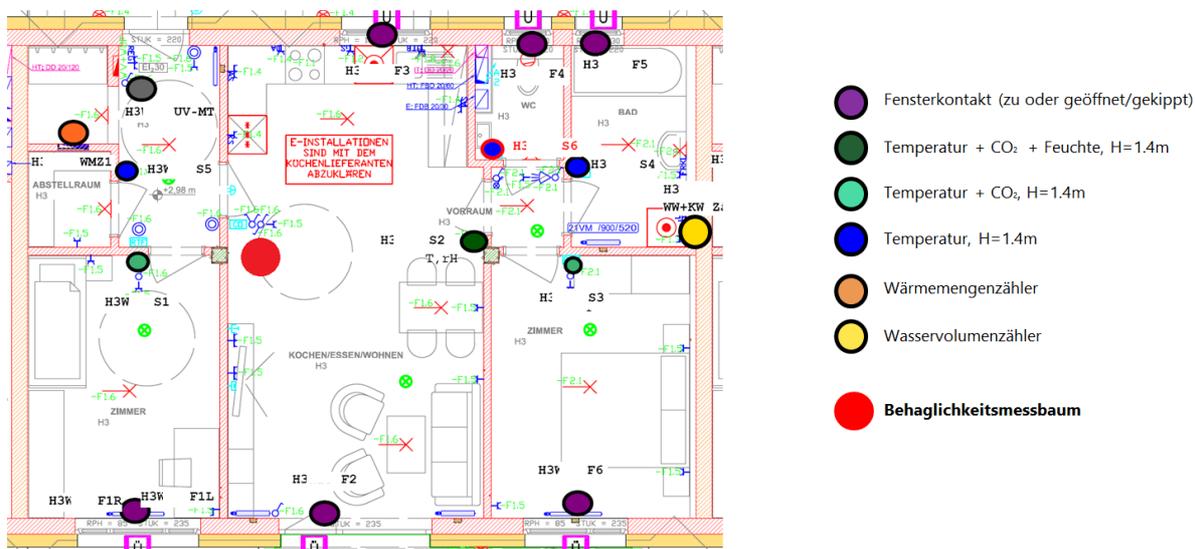


Abb. 71 Ort der Behaglichkeits-Spotmessung A, Fernwärme-Wohnung
 roter Kreis: Aufstellungsort des Messbaums



Abb. 72 Behaglichkeitsmessbaum während der Spotmessung A, Fernwärme-Wohnung

Außenklima während der Messung

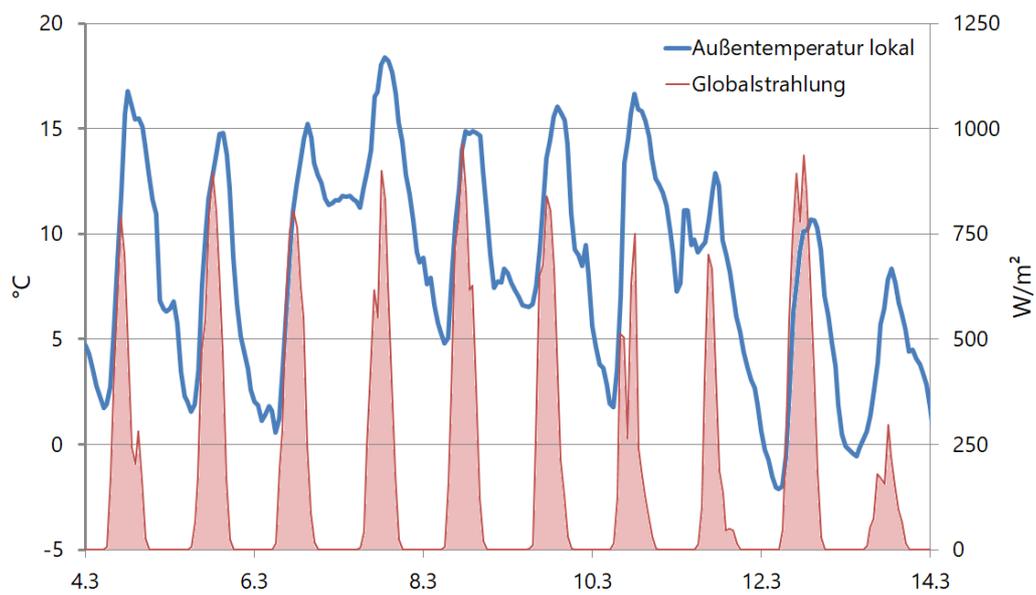


Abb. 73 Verlauf der Außenlufttemperatur und solaren Einstrahlung auf die Horizontale während der Spot-Messung A

PMV-Auswertung – Bekleidungsfaktor 0,8

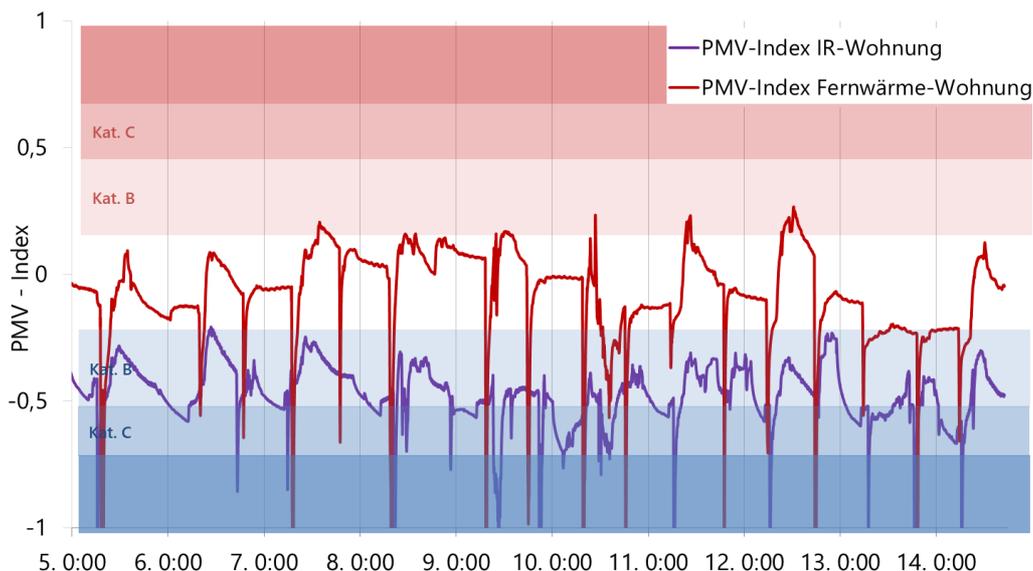


Abb. 74 PMV-Index zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen A bei Bekleidungsfaktor CLO=0,8

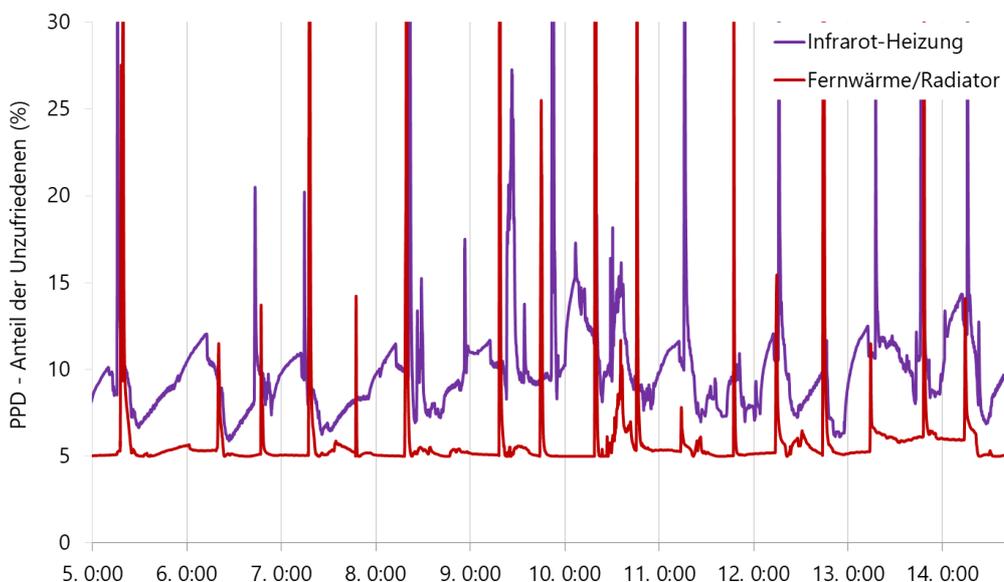


Abb. 75 Vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen (PPD) zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen A bei Bekleidungsfaktor 0,8 CLO

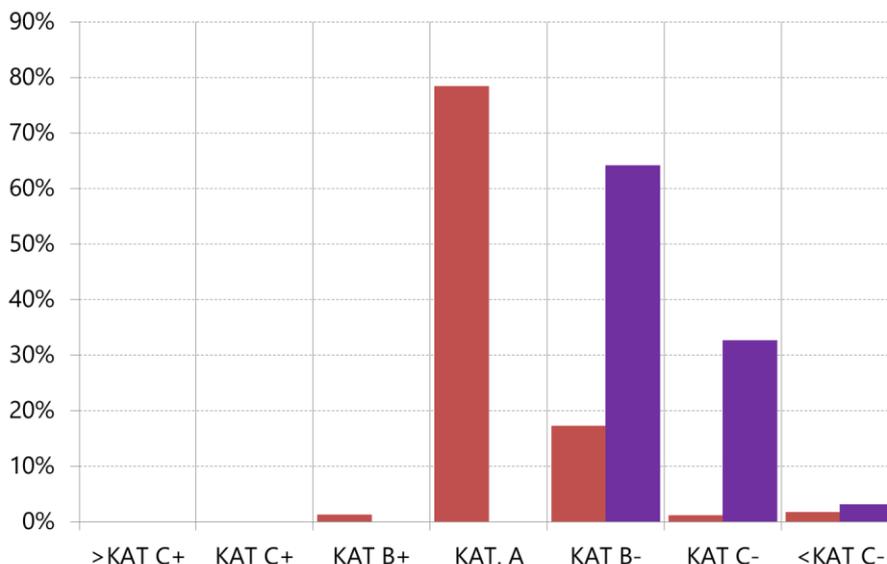


Abb. 76 Histogrammauswertung PMV-Index für beide Wohnungen A bei Bekleidungsfaktor 0,8 CLO

Interpretation: Beim Bekleidungsfaktor 0,8 CLO (leichte Winterbekleidung, z.B. Langarm-Hemd), liegen die ermittelten PMV-Indexwerte in der Fernwärme-Wohnung zumeist im optimalen Bereich der Kategorie A (Optimalwert $0 \pm 0,2$). Die gefühlte Temperatur erreicht bei dieser Bekleidungsituation am Standort der Spotmessung in der Infrarotwohnung zu keiner Zeit die Kategorie A, sondern liegt vorwiegend im kühlen Bereich der Kategorie B und C. Kategorie C wird jedoch vorwiegend infolge der Nachtabschaltung erreicht, und ist deshalb als unkritisch einzustufen. Die jeweils sichtbaren Ausreißer nach unten werden durch das Lüften der Wohnung oder Luftzug durch geöffnete Haustüre zurückzuführen. Dies ist üblich und naturgemäß nicht als kritisch zu beurteilen. Die durch den PMV-Index beschriebene wahrgenommene Temperatur liegt am Messstandort in der mit Infrarot beheizten Wohnung konstant unter jener mit Radiatorheizung.

PMV-Auswertung – Bekleidungsfaktor 1,0

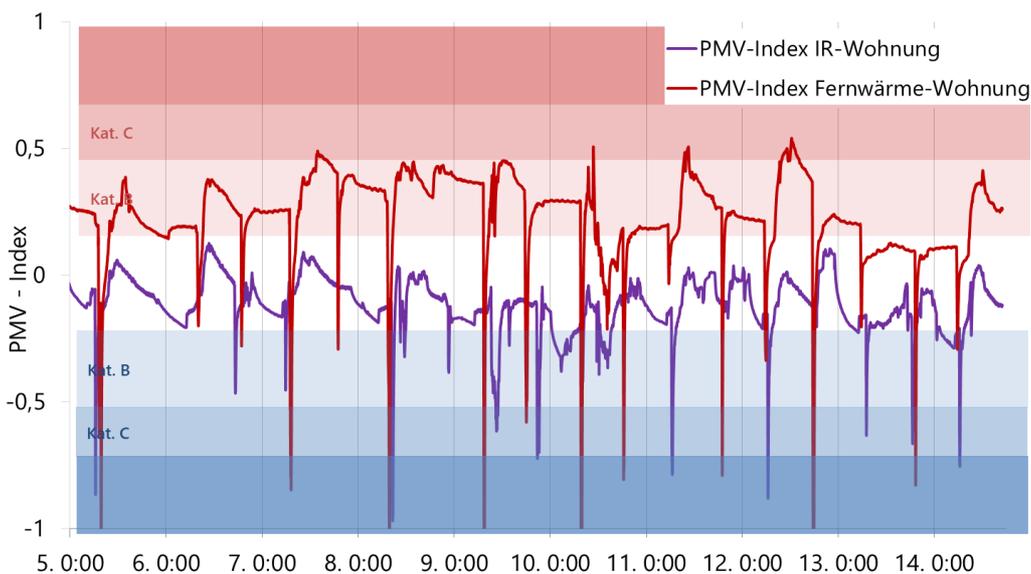


Abb. 77 PMV-Index zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen A bei Bekleidungsfaktor CLO=1,0

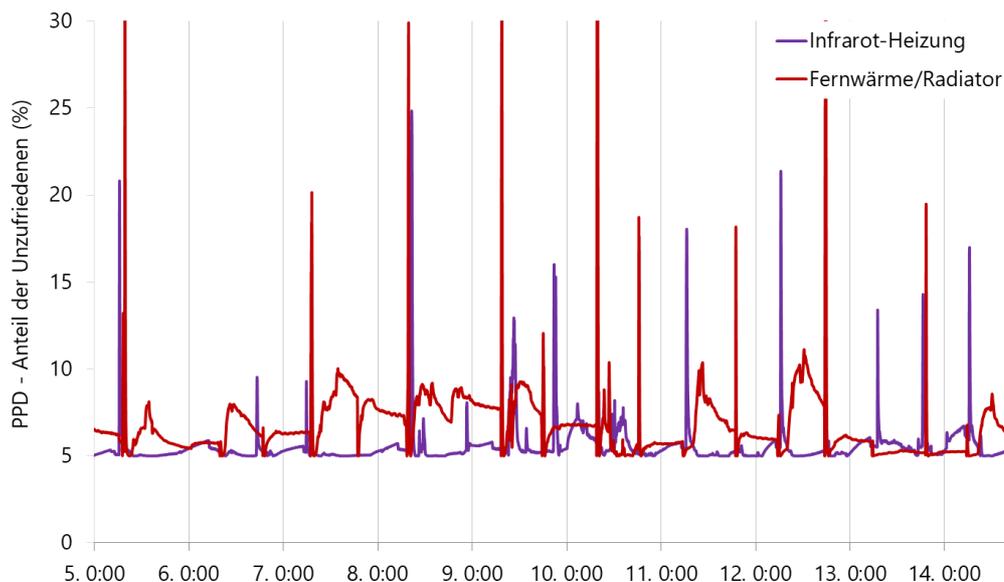


Abb. 78 Vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen (PPD) zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen A bei Bekleidungsfaktor 1,0 CLO

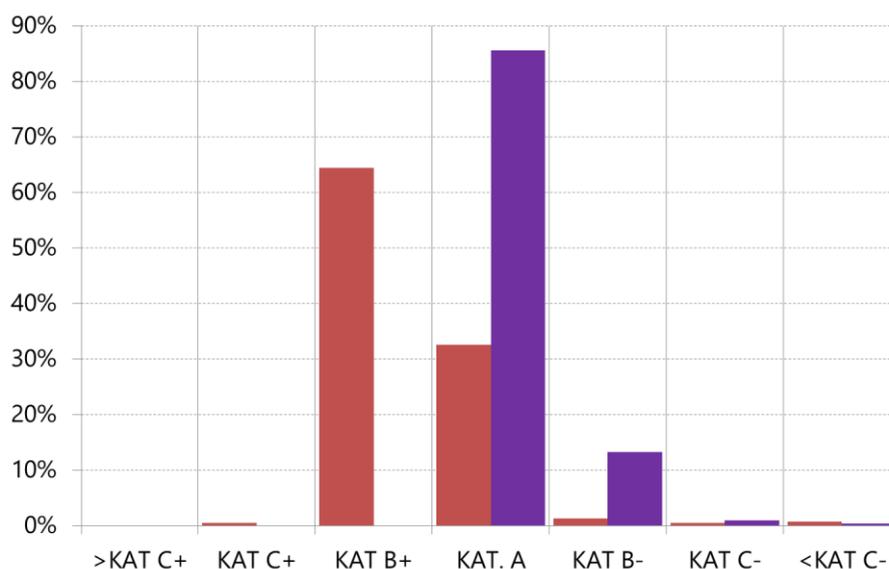


Abb. 79 Histogrammauswertung PMV-Index für beide Wohnungen A bei Bekleidungsfaktor 1,0 CLO

Interpretation: Beim Bekleidungsfaktor 1,0 CLO (Winterbekleidung, z.B. Strickpullover), liegen die ermittelten PMV-Indexwerte (wahrgenommene Temperatur) in der Fernwärme-Wohnung zumeist im warmen Bereich der Kategorie B. In der Infrarotwohnung liegen die Werte am Standort der Spotmessung vorwiegend im optimalen Bereich (Kategorie A). Die durch den PMV-Index beschriebene wahrgenommene Temperatur liegt am Messtandort in der mit Infrarot beheizten Wohnung konstant unter jener mit Radiatorheizung.

Auswertung vertikale Lufttemperaturdifferenz

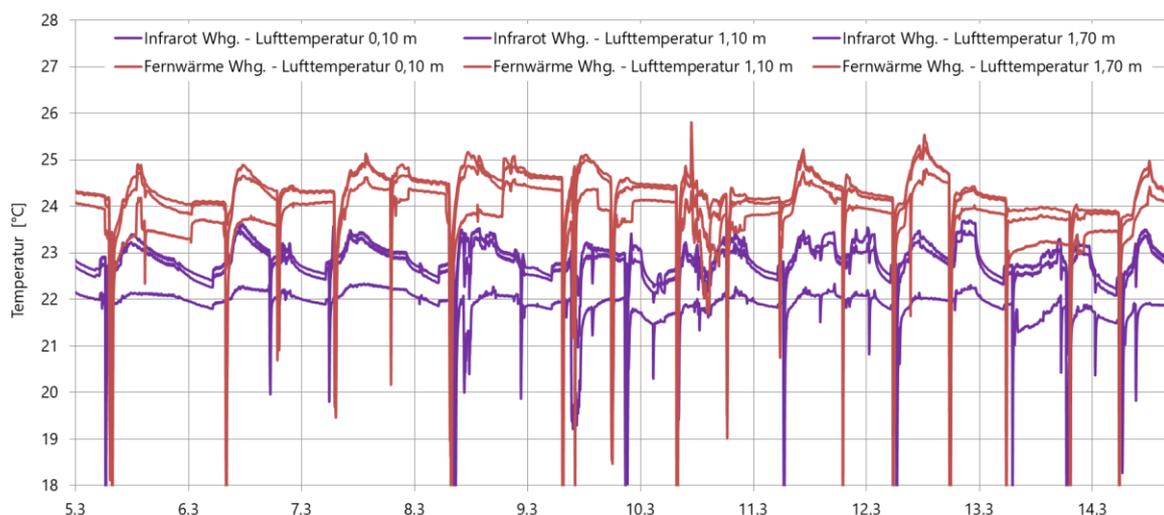


Abb. 80 Verlauf der Lufttemperaturen in unterschiedlichen Höhen bei der Spotmessung A

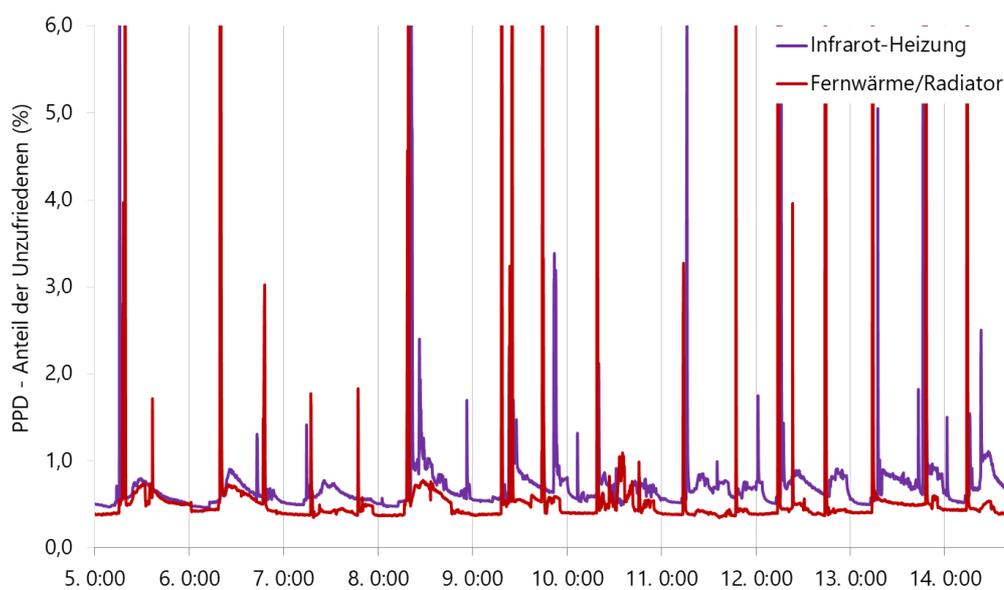


Abb. 81 Vertikaler Lufttemperaturunterschied – SITZEND: vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen, zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen A

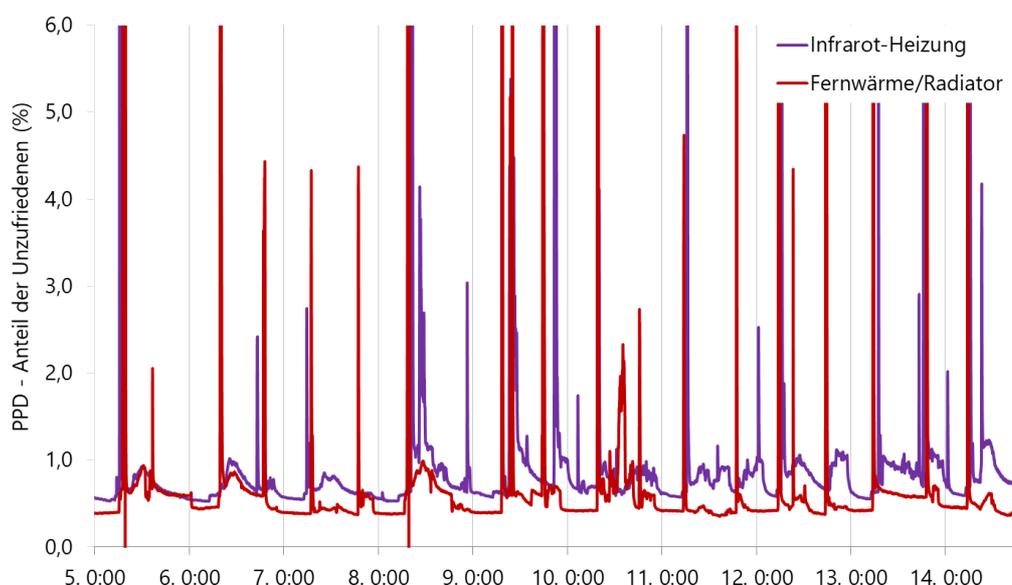


Abb. 82 Vertikaler Lufttemperaturunterschied – STEHEND: vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen, zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen A

Interpretation: das Kriterium der Kategorie A mit einem maximalen Lufttemperaturunterschied zwischen Knöchel- und Kopfposition von 2 °C wird am Messstandort in beiden Wohnungen sowohl für eine sitzende, als auch für eine stehende Person eingehalten (ausgenommen Lüftungssituation). Tendenziell wurde bei der mit Infrarot-Paneelen beheizten Wohnung ein leicht höherer Temperaturgradient festgestellt. (Über den gesamten Messzeitraum lag dieser für eine stehende Person in der Wohnung mit Infrarot-Heizung bei 1,02 °C, bei der Wohnung mit Radiator-Heizung bei 0,69 °C).

Verlauf der operativen Temperaturen Spotmessung A - informativ

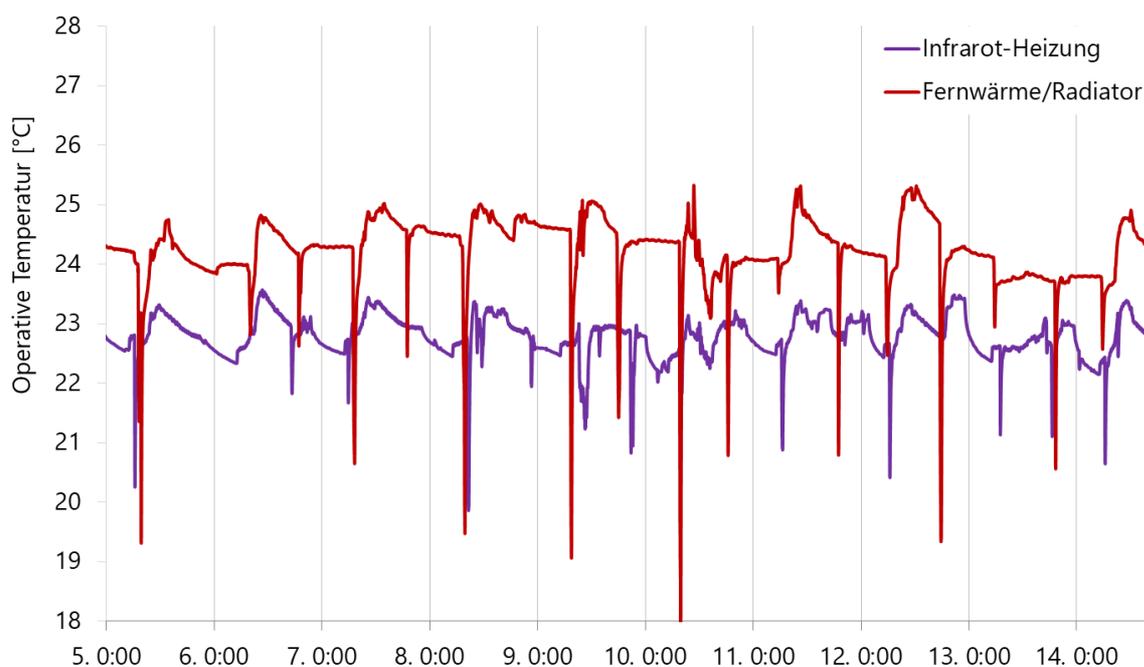


Abb. 83 Verlauf der operativen Temperaturen bei der Spotmessung A

Interpretation: Die operative Temperatur reflektiert die empfundene Temperatur als Mittelwert aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur. Im Gegensatz zum komplexeren PMV-Index werden hier weitere physiologische Einflussfaktoren wie Luftströmung oder Luftfeuchte nicht berücksichtigt. Auch hier ist deutlich zu sehen, dass die operative Temperatur in der Fernwärme-Wohnung konstant über jener in der mit Infrarot beheizten Wohnung liegt. Die Trägheit der beiden Systeme ist vergleichbar, da sie vorwiegend durch die Trägheit der thermisch aktivierten Massen bestimmt wird, welche in beiden Wohnungen praktisch identisch ist. Zu den größten Abweichungen kommt es im Zuge der Nachtabschaltung.

Strömungsgeschwindigkeit der Luft Spotmessung A - informativ

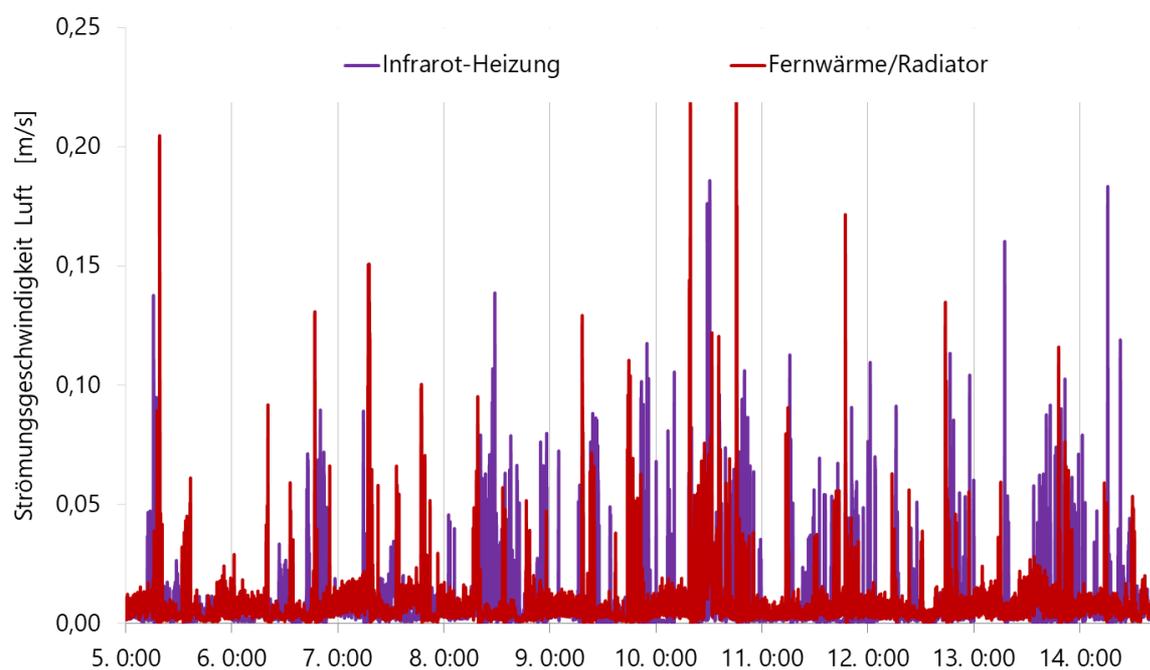


Abb. 84 Bei den Spotmessungen A gemessene Strömungsgeschwindigkeiten der Luft

Interpretation: Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft liegt in beiden Objekten im unkritischen Bereich. Die jeweiligen Ausreiser sind vorwiegend auf Türöffnungen, Lüftungssituationen oder vorbeigehende Personen zurückzuführen.

3.5.5 Spotmessung B – Ergebnisse und Interpretation

Positionierung

Auf Grund der abweichenden Position des Esstisches, wurde der Messbaum in den beiden Wohnungen jeweils vor der gegenüberliegenden Innenwand angeordnet, jedoch ansonsten in symmetrischer Positionierung.

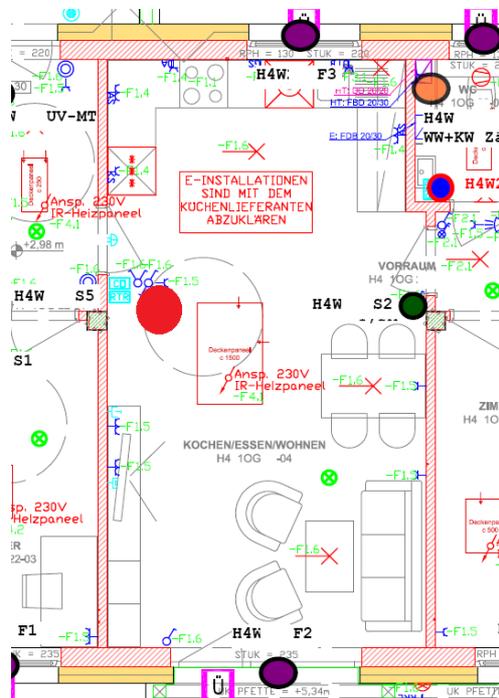


Abb. 85 Ort der Behaglichkeits-Spotmessung B, IR-Wohnung
(roter Kreis: Aufstellungsart des Messbaums)

Anmerkung: bei der Installation der Messtechnik wurde festgestellt, dass das im Wohnzimmer installierte Infrarot-Paneel ein vom Plan etwas abweichendes Maß von 120x75 cm aufweist. Diese wurde auch für die nachfolgende Modellierung des Raums herangezogen.



Abb. 86 Behaglichkeitsmessbaum Spotmessung A, IR-Wohnung

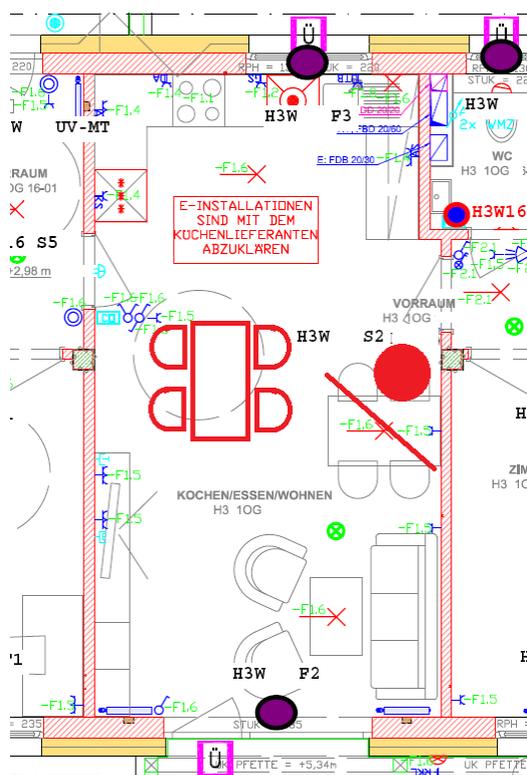


Abb. 87 Ort der Behaglichkeits-Spotmessung A, Fernwärme-Wohnung
 (roter Kreis: Aufstellungsort des Messbaums, rot angedeutet Position Esstisch)



Abb. 88 Behaglichkeitsmessbaum Spotmessung B, FW-Wohnung

Außenklima während der Messung

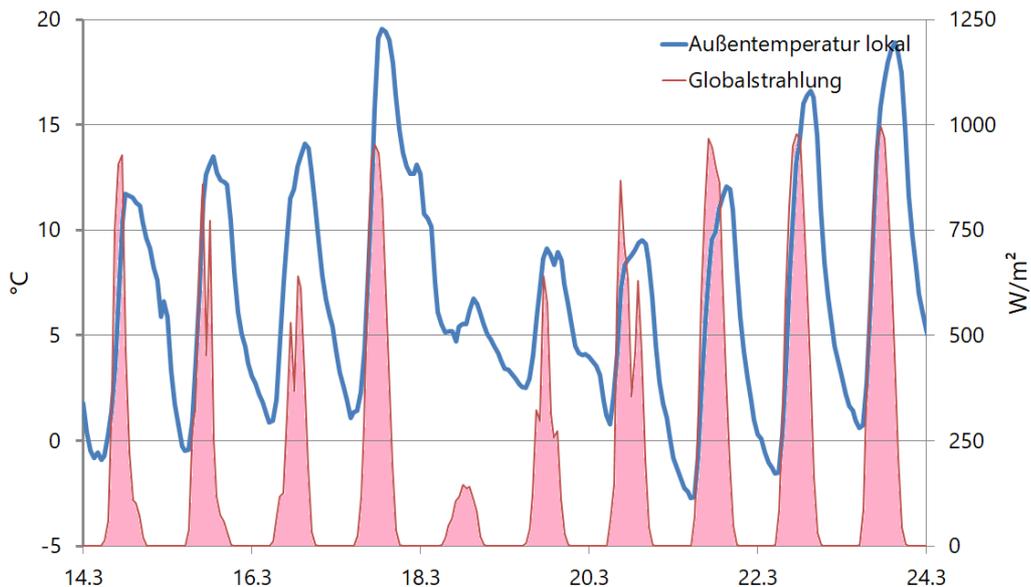


Abb. 89 Verlauf der Außenlufttemperatur und solaren Einstrahlung auf die Horizontale während der Spot-Messung B

Auch bei der zweiten Spotmessung „B“ lagen die Außentemperaturen in einem gemäßigten Bereich. Die Tage des Messzeitraums waren zudem durch recht hohe solare Einstrahlung gekennzeichnet. Lediglich in vier Nächten wurde der Gefrierpunkt unterschritten.

PMV-Auswertung – Bekleidungsfaktor 0,8

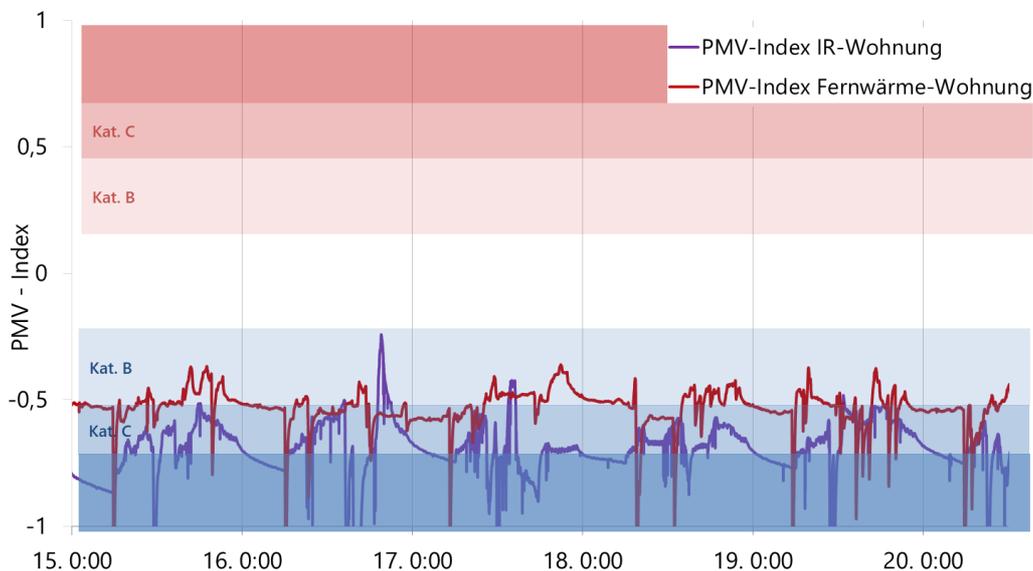


Abb. 90 PMV-Index zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen B bei Bekleidungsfaktor CLO=0,8

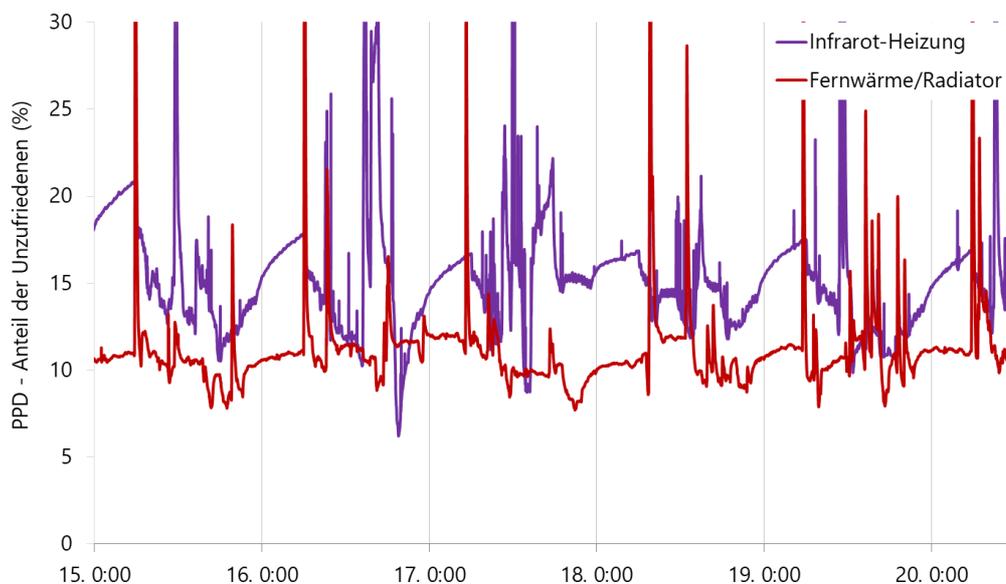


Abb. 91 Vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen (PPD) zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen B bei Bekleidungsfaktor 0,8 CLO

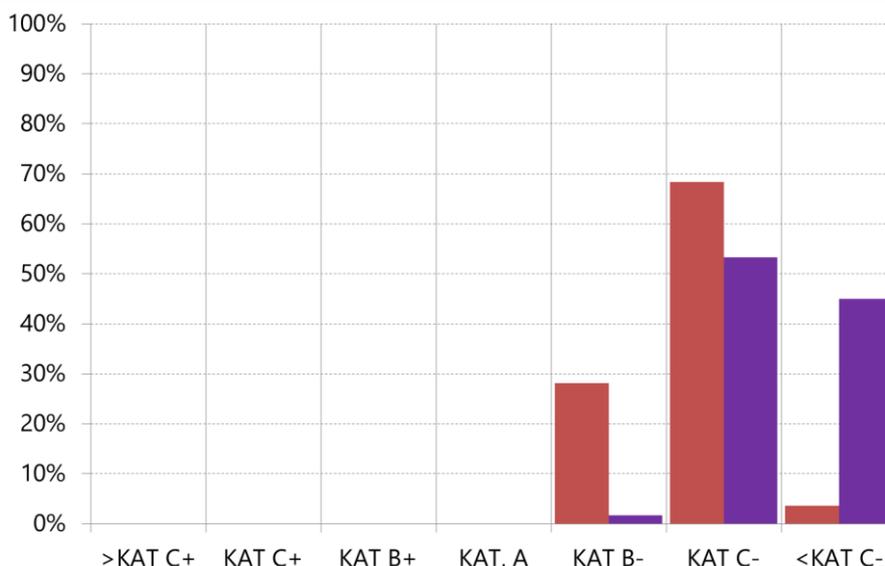


Abb. 92 Histogrammauswertung PMV-Index für beide Wohnungen B bei Bekleidungsfaktor 0,8 CLO

Interpretation: Beim Bekleidungsfaktor 0,8 CLO (leichte Winterbekleidung), liegen die ermittelten PMV-Indexwerte bei beiden Wohnungen im leicht zu kühlen Bereich der Kategorie B. Der Idealbereich Kategorie A wird ein keiner Wohnung zu keiner Zeit erreicht. Die empfundene Temperatur ist auch bei dieser Messung im Fernwärmeobjekt höher, die Differenz ist jedoch geringer als bei Spotmessung A.

PMV-Auswertung – Bekleidungsfaktor 1,0

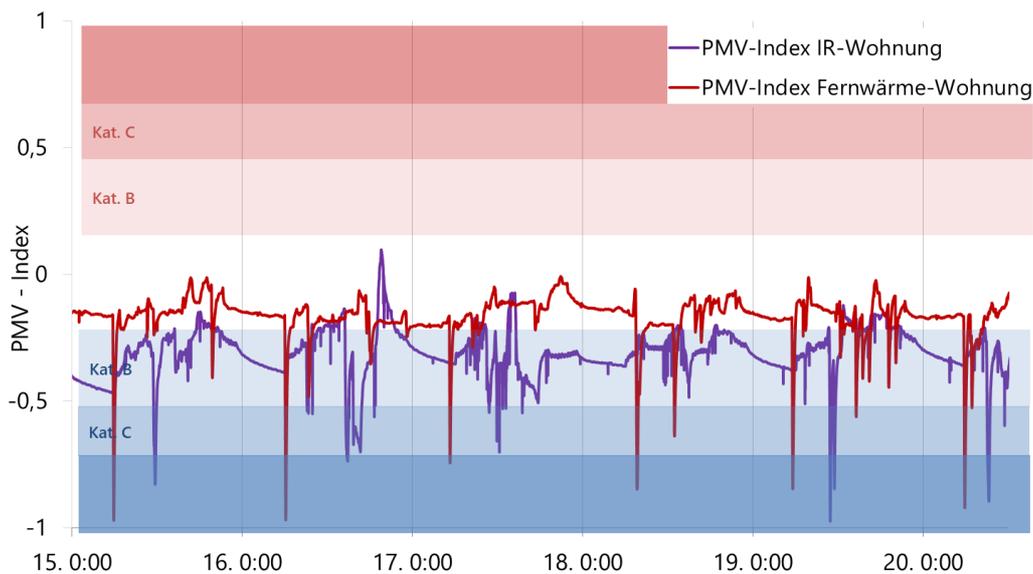


Abb. 93 PMV-Index zeitlicher Verlauf fur beide Wohnungen B bei Bekleidungsfaktor CLO=1,0

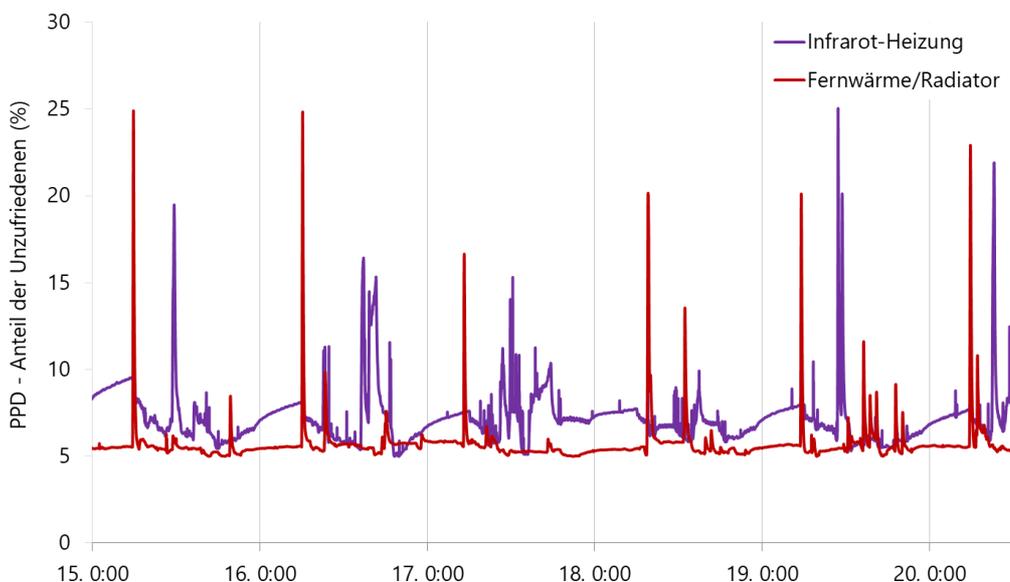


Abb. 94 Vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen (PPD) zeitlicher Verlauf fur beide Wohnungen B bei Bekleidungsfaktor 1,0 CLO

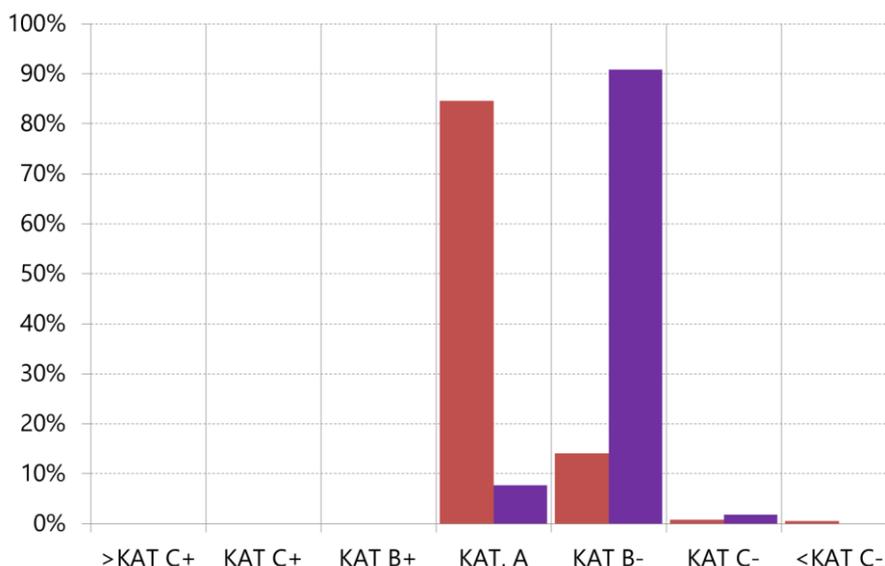


Abb. 95 Histogrammauswertung PMV-Index für beide Wohnungen B bei Bekleidungsfaktor 1,0 CLO

Interpretation: Beim Bekleidungsfaktor 1,0 CLO (Winterbekleidung), liegen die ermittelten PMV-Indexwerte in der Fernwärmewohnung überwiegend im Idealbereich der Kategorie A. In der Wohnung mit Infrarotheizung wird dieser Wert nur selten erreicht. Hier liegen die wahrgenommenen Temperaturen zu mehr als 90% der Messzeit im etwas zu kühlen Bereich der Kategorie B.

Auswertung vertikale Lufttemperaturdifferenz

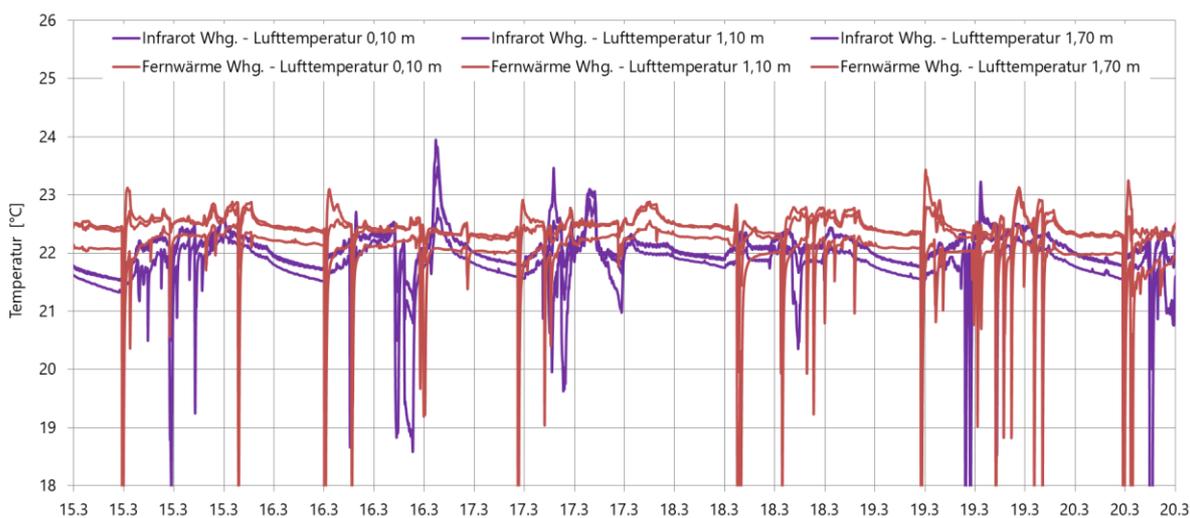


Abb. 96 Verlauf der Lufttemperaturen in unterschiedlichen Höhen bei der Spotmessung B

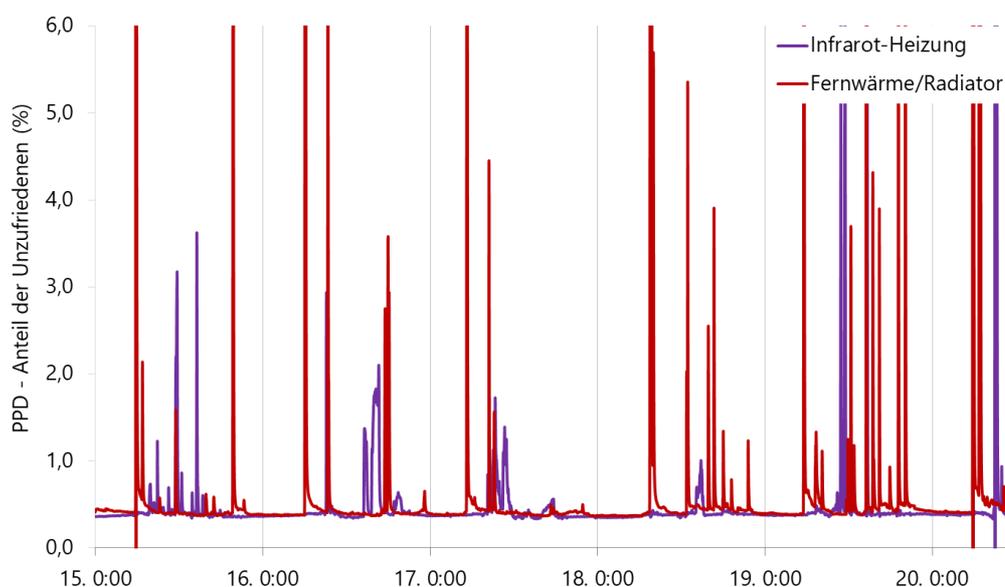


Abb. 97 Vertikaler Lufttemperaturunterschied – SITZEND: vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen, zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen B

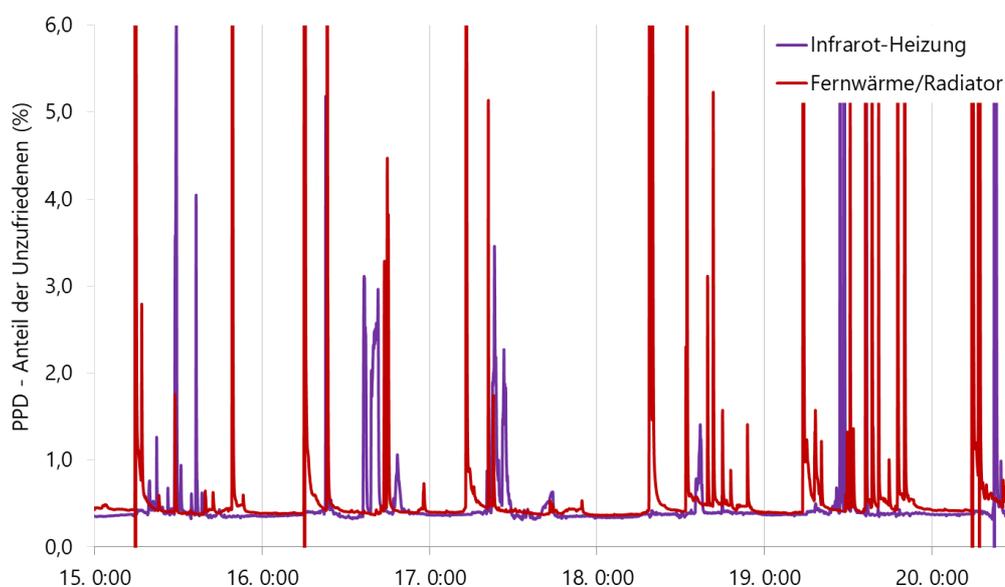


Abb. 98 Vertikaler Lufttemperaturunterschied – STEHEND: vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen, zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen B

Interpretation: das Kriterium der Kategorie A mit einem maximalen Lufttemperaturunterschied zwischen Knöchel- und Kopfposition von 2 °C wird am Messstandort in beiden Wohnungen sowohl für eine sitzende, als auch für eine stehende Person eingehalten. Die bei Spotmessung A auftretenden kühleren Lufttemperaturen im Bodenbereich, treten bei Spotmessung B nicht mehr auf. Spotmessung A wurde in einer Wohnung im Erdgeschoß mit nicht-unterkellertem Fußboden durchgeführt. Spotmessung B wurde im Obergeschoss durchgeführt. Darunter liegt eine Wohnung mit Infrarot-Deckenpaneelen. Dementsprechend kann bei Spotmessung A von einem Wärmeverlust über das Erdreich, bei Spotmessung B tendenziell jedoch eher von Wärmezufuhr ausgegangen werden. Dies erklärt die unterschiedlichen Bodentemperaturen.

Verlauf der operativen Temperaturen Spotmessung B - informativ

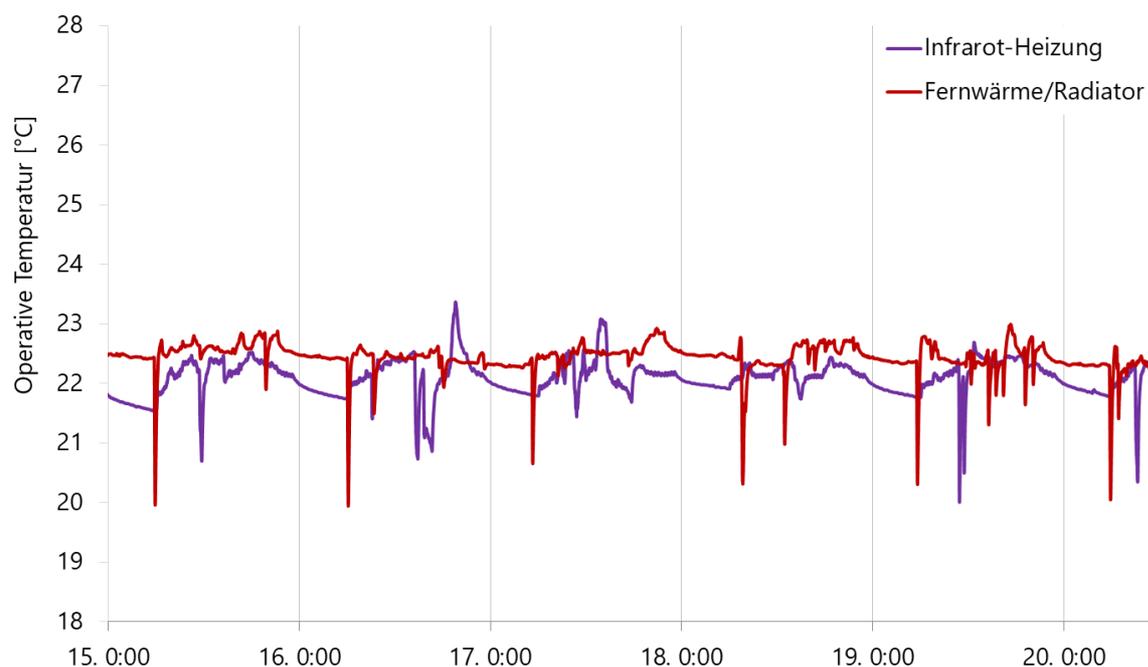


Abb. 99 Verlauf der operativen Temperaturen bei der Spotmessung B

Interpretation: Die operative Temperatur reflektiert die empfundene Temperatur als Mittelwert aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur. Im Gegensatz zum komplexeren PMV-Index werden hier weitere physiologische Einflussfaktoren wie Luftströmung oder Luftfeuchte nicht berücksichtigt. Analog zum PMV-Index zeigen sich geringere Abweichungen als bei Spotmessung A. Zumeist liegt die operative Temperatur in der mit Infrarot-Paneelen beheizten Wohnung unter jener in der mit Radiatoren beheizten Wohnung.

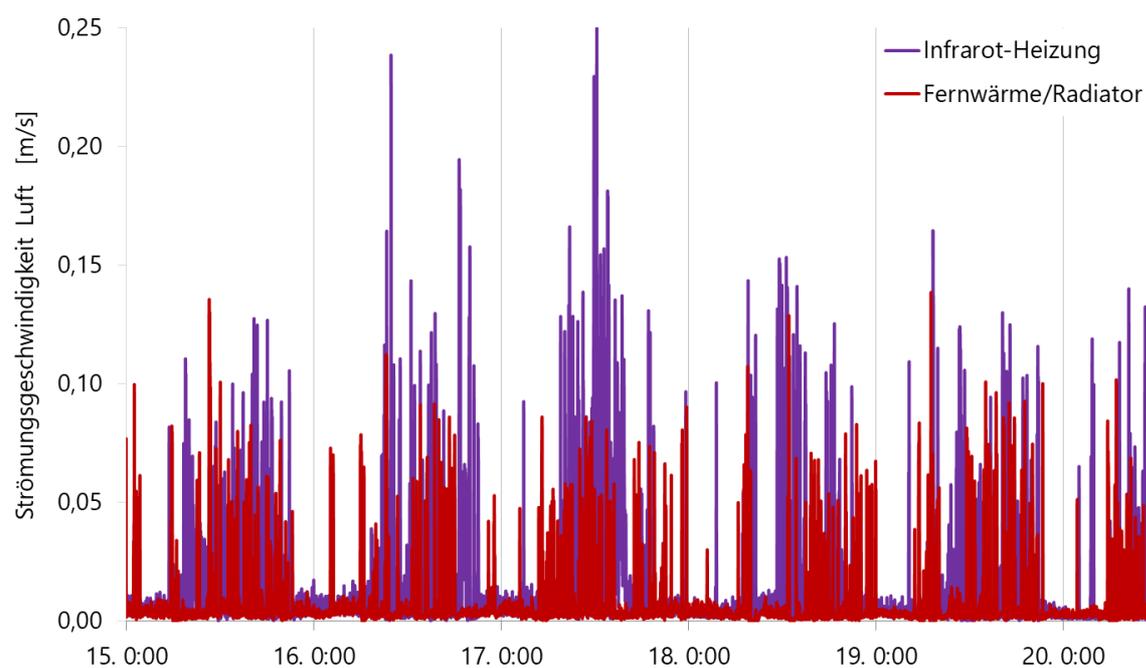
Strömungsgeschwindigkeit der Luft Spotmessung B - informativ

Abb. 100 Bei den Spotmessungen B gemessene Strömungsgeschwindigkeiten der Luft

Interpretation: Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft liegt in beiden Objekten im unkritischen Bereich. Die jeweiligen Ausreiser sind vorwiegend auf Türöffnungen, Lüftungssituationen oder vorbeigehende Personen zurückzuführen.

3.6 Dreidimensionale Behaglichkeitsanalyse – IR-Wohnung

3.6.1 Methode

Bei der Befragung der Nutzer zeigte sich, dass ein Großteil der Nutzer der Infrarot-Wohnungen eine ausgeprägte Ungleichverteilung der Wärme beanstandete. Auch bei der Begehung im Zuge der Spotmessung konnte mittels Thermografie in den mit Infrarot-Paneelen beheizten Wohnung eine relativ ausgeprägte inhomogene Temperaturverteilung beobachtet werden, welche sich auf das zugrundeliegende Prinzip des Heizungssystems zurückführen lässt. Da die Spotmessung nur ortsfest, für einen zuvor gewählten Punkt im Wohnzimmer durchgeführt werden konnte, kann hierbei die inhomogene Temperaturverteilung nicht abgebildet werden.

Um bei der Behaglichkeitsauswertung dieser ausgeprägten Ungleichverteilung adäquat begegnen zu können, wurde zur Erfassung und Darstellung derselben ein spezielles Verfahren entwickelt. Dieses ermöglicht es ein dreidimensionales Abbild, der für die Behaglichkeitsmessung relevanten, Strahlungstemperaturen und der daraus abgeleiteten Behaglichkeitsindikatoren zu erstellen.

Üblicherweise werden zur Ermittlung der Strahlungsasymmetrie bzw. Halbraum-Strahlungstemperaturen stark vereinfachende Annahmen getroffen, welche eine analytische Berechnung gestatten, beispielsweise die Vorgabe von sechs unterschiedlichen Temperaturen für die Wand-, Boden- und Deckenfläche. Um eine exakte rechnerische Ermittlung der lokalen Strahlungstemperaturen für beliebige Räume durchzuführen, ist es notwendig die Oberflächentemperaturen und sogenannten View-Factors (oder Einstrahlzahlen) aller sichtbaren Oberflächen zu ermitteln. Da im vorliegenden Fall die stark inhomogene Verteilung von besonderem Interesse war, wurde zur möglichst genauen Ermittlung derselben die folgende Vorgehensweise gewählt:

1. Erstellung eines geometrischen Modells des untersuchten Raums
2. Räumliche Berechnung der View-factors (Einstrahlzahlen) für alle Oberflächen
3. Zuordnung der messtechnisch ermittelten Temperaturen
4. Berechnung der lokalen Strahlungstemperatur aus Oberflächentemperaturen und View-factors

Die Methode wurde von AEE INTEC für diese Untersuchung extra entwickelt. Es stellt kein Simulationsverfahren, sondern quasi ein physikalisch basiertes, numerisches Interpolationsverfahren dar, welches es gestatten die Strahlungstemperaturen für jeden Punkt eines Raumes aus den messtechnisch ermittelten Oberflächentemperaturen zu bestimmen. Hierfür sind lediglich geringe Vereinfachungen notwendig, welche aus Gründen der Transparenz im Folgenden kurz erläutert werden.

Die Strahlungstemperatur ist definiert als jene Temperatur bei welcher ein Körper mit seiner Umgebung im Strahlungsgleichgewicht ist, die durch Strahlung abgegebene Wärme der aufgenommenen entspricht:

$$\sigma \varepsilon_r T_r^4 = \dot{q} \quad \rightarrow \quad T_r = \sqrt[4]{\frac{\dot{q}}{\sigma \varepsilon_r}}$$

ε...Emissionsgrad
σ...Stefan-Boltzmann-Konstante
T_r...Strahlungstemperatur
q̇...Wärmestrom

Die durch Wärmestrahlung eintreffenden Wärmeströme q_i ergeben sich als Summe über alle Flächen i unter Berücksichtigung derer Temperaturen T_i , Emissionsgrade ε_i und Einstrahlzahlen (View-factors φ_i):

$$\dot{q} = \sum_i \varphi_i \dot{q}_i = \sum_i \varphi_i \sigma \varepsilon_i T_i^4 \quad \sum_i \varphi_i = 1$$

φ_i...Einstrahlzahl der Fläche i
q̇_i...Wärmestrom der Fläche i

$$T_r = \sqrt[4]{\frac{\sum_i \varphi_i \sigma \varepsilon_i T_i^4}{\sigma \varepsilon_r}}$$

Der Emissionsgrad der Oberflächen hängt grundsätzlich von der Art und Beschaffenheit der Oberfläche sowie vom Abstrahlwinkel ab. Da die Winkelabhängigkeit für die meisten Oberflächen gering ist, bzw. in der Regel nur bei sehr flachen Winkeln abweicht, wird im Bereich der Wärmestrahlung üblicherweise die Näherung eines sogenannten Lambert-Strahlers, mit gleichmäßiger Abstrahlung in alle Raumrichtungen angewendet. Da jedoch glatte Flächen unter flachem Einstrahlungswinkel einen hohen Reflexionsgrad auch für Infrarot-Strahlung aufweisen, wurde das Verfahren im Vergleich zur letztjährigen Auswertung noch verfeinert.

Anstelle der Einstrahlzahlen wurden bei dieser Auswertung - noch exakter – die sogenannten verallgemeinerten Einstrahlzahlen berücksichtigt. Bei diesem Verfahren werden nur sowohl die Emissionsgrade der Oberflächen, als auch das charakteristische Reflexionsverhalten der unterschiedlichen Oberflächen berücksichtigt. Für die Glasflächen wurde das gerichtete Reflexionsverhalten der Oberflächen exakt nachgebildet, die übrigen Flächen verhalten sich wie diffuse, Lambert'sche-Reflektoren. Dies bedeuten, dass bei einem Emissionskoeffizienten von 0,9 zehn Prozent der eintreffenden Strahlung nach dem Lambert'schen Gesetz in alle Raumrichtungen reflektiert werden.

3.6.2 Geometrisches Modell des Wohnzimmers und Oberflächentemperaturen

Zur möglichst exakten orts aufgelösten Ermittlung der Einstrahlzahlen wurde ein maßgetreues, geometrisches Modell des untersuchten Raums erstellt. Größere Flächen wie Fußboden, Wand und Decke wurden jeweils in einige Subflächen unterteilt, um eine lokal feinere Temperaturaufteilung zu ermöglichen.

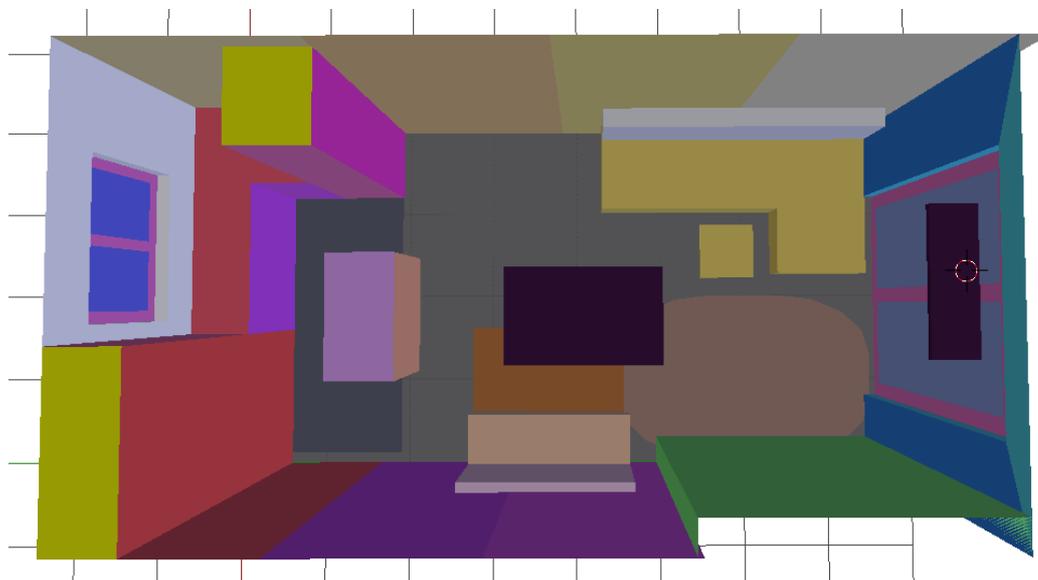


Abb. 101 Draufsicht geometrischen Modells zur räumlichen Ermittlung der mittleren Strahlungstemperaturen
IR-Wohnung

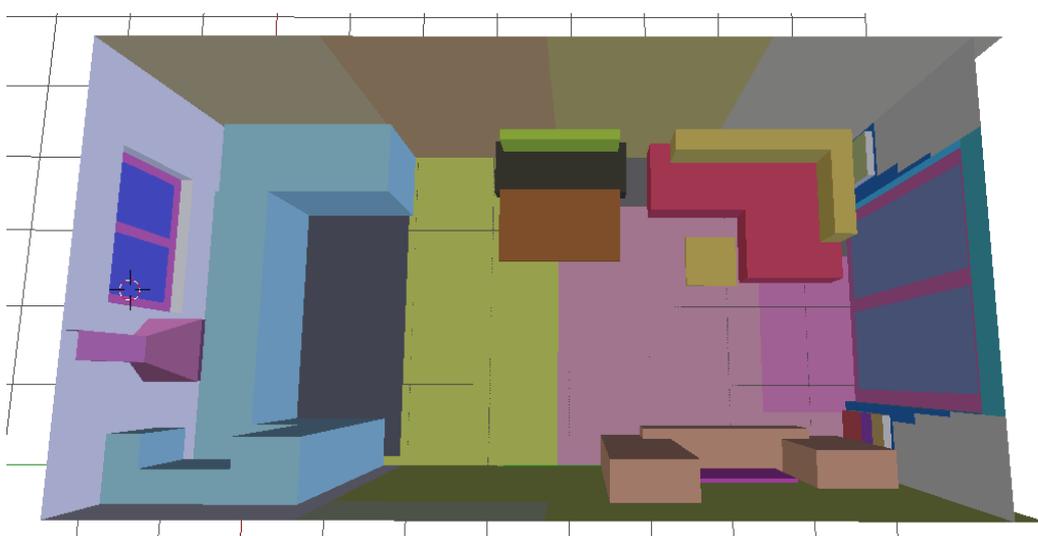


Abb. 102 Draufsicht geometrischen Modells zu räumlichen Ermittlung der mittleren Strahlungstemperaturen
FW-Wohnung

Die für die Simulation notwendigen Oberflächentemperaturen wurden vor Ort mittels Thermographie ermittelt. Für den Einsatz wurde vor Ort jeweils vor und nach der Begehung eine zusätzliche interne Kalibrierungsmessung der Infrarot-Kamera durchgeführt.

3.6.3 Ermittlung der View-Factors / Einstrahlzahlen

Zur Ermittlung der sogenannten View-Factors oder Einstrahlzahlen, welche die Gewichtung der jeweiligen Oberflächen bei der Ermittlung der Strahlungstemperatur darstellen, wurde ein, zuvor validierter, sogenannter Monte-Carlo Raytracing Algorithmus angewendet. Das Verfahren wurde wie bereits erwähnt im Vergleich zur letzten Auswertung weiter verfeinert. Es werden nun die verallgemeinerten Einstrahlzahlen ermittelt, welche auch das Reflexionsverhalten der Oberflächen hinsichtlich thermischer Strahlung berücksichtigt. Diese verallgemeinerten Einstrahlzahlen werden zusätzlich jeweils in Oktanten aufgelöst erfasst (siehe Abb. 103). Auf diese Weise lassen sich neben den omnidirektionalen Strahlungstemperaturen ebenso die – für die Fangermethode relevanten - Strahlungsasymmetrien bezüglich der vertikalen und horizontalen Halbräume ermitteln. Die Berechnungen der Einstrahlzahlen wurden für den gesamten Raum mit einer räumlichen Rasterauflösung von 15x15x15 cm durchgeführt.

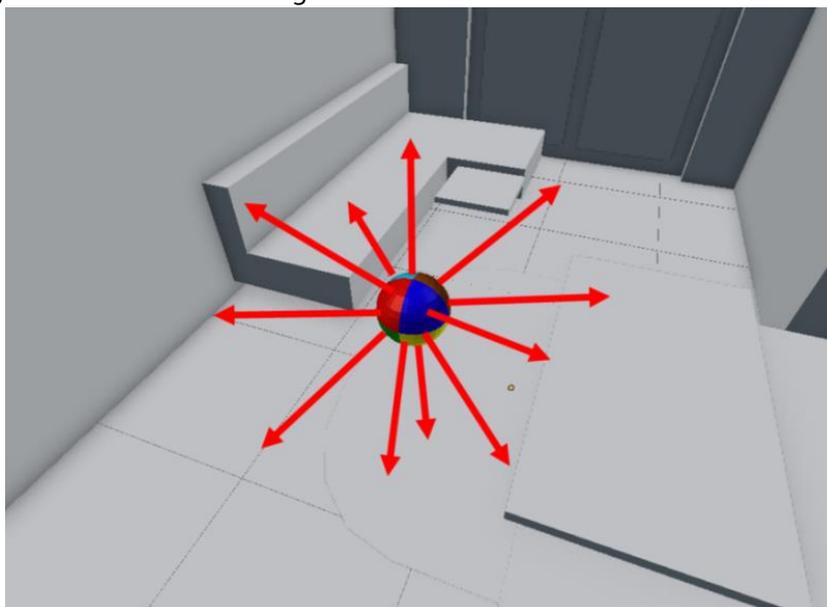


Abb. 103 Oktantenweise Ermittlung der verallgemeinerten View-Factors mittels Monte-Carlo Raytracing (inklusive Reflexion)

3.6.4 Dreidimensionale Berechnung des PMV-Index

Liegen die Strahlungstemperaturen dreidimensional vor, so kann auch der behaglichkeitsrelevante PMV-Index dreidimensional ausgewertet werden. In der Regel wird der PMV-Index ausschließlich für einen oder wenige Orte ausgewertet, üblicherweise für stehende oder sitzende Personen. Naturgemäß ist eine dreidimensionale Ermittlung nicht an jedem Ort sinnvoll bzw. aussagekräftig, dennoch erlaubt die umfassende dreidimensionale Berechnung und Darstellung im 15 cm Raster eine aussagekräftige Veranschaulichung der maßgeblichen Zusammenhänge.

3.6.5 Vor-Ort Messung – thermographische Begehung

Die nachfolgenden Auswertungen wurden auf Basis von Messungen zweier identisch orientierten Wohnungen in den beiden Objekten durchgeführt. Es wurde angestrebt die thermographische Begehung bei möglichst geringen Außentemperaturen durchzuführen, da hierdurch eine bessere Charakterisierung der Heizsysteme möglich ist. Im bereits letzten veröffentlichten Bericht konnte dies durchgeführt werden. Im Jahr 2019 waren Begehungen für den Zeitraum nach dem 6. Jänner geplant. Leider konnten in diesem Zeitfenster keine Begehungen bei Temperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt durchgeführt werden. Insgesamt wurden drei thermographische Begehungen durchgeführt. Die hier ausgewertete thermographische Untersuchung der beiden Wohnungen fand am 14. September in der Zeit von 17:15-17:45 (FW) bzw. 17:45-18:15 (IR) statt, also am Ende der Spotmessung A.

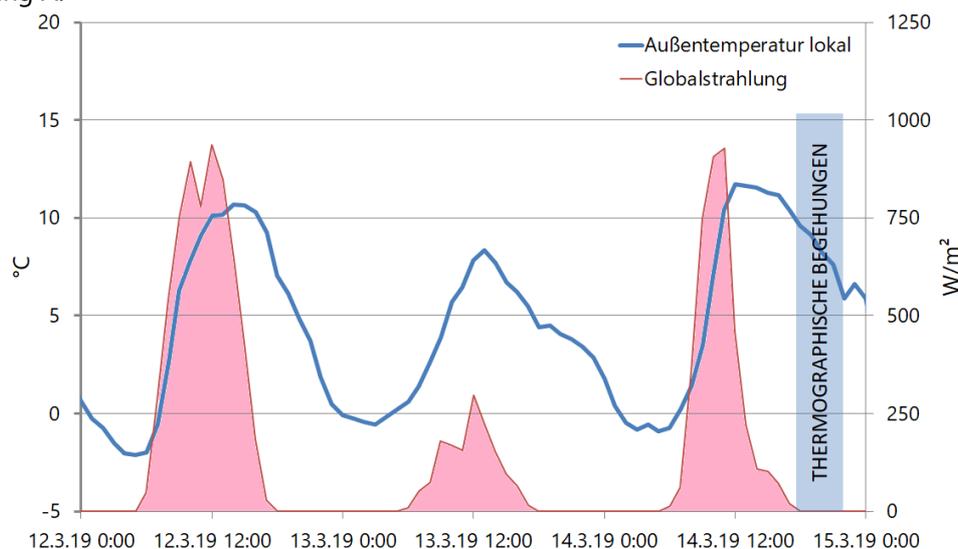


Abb. 104 Außenbedingungen zum Zeitpunkt der Begehungen für die dreidimensionale Auswertung

Wie in der Abbildung oben zu sehen ist, lagen die Außenlufttemperaturen zu diesem Zeitpunkt in einem Bereich von 6 °C bis 9 °C. In den drei vorausgehenden Tagen lagen die Außentemperaturen im Bereich von -2 °C bis 12 °C. Der Tag der Begehung war nur gering bewölkt.

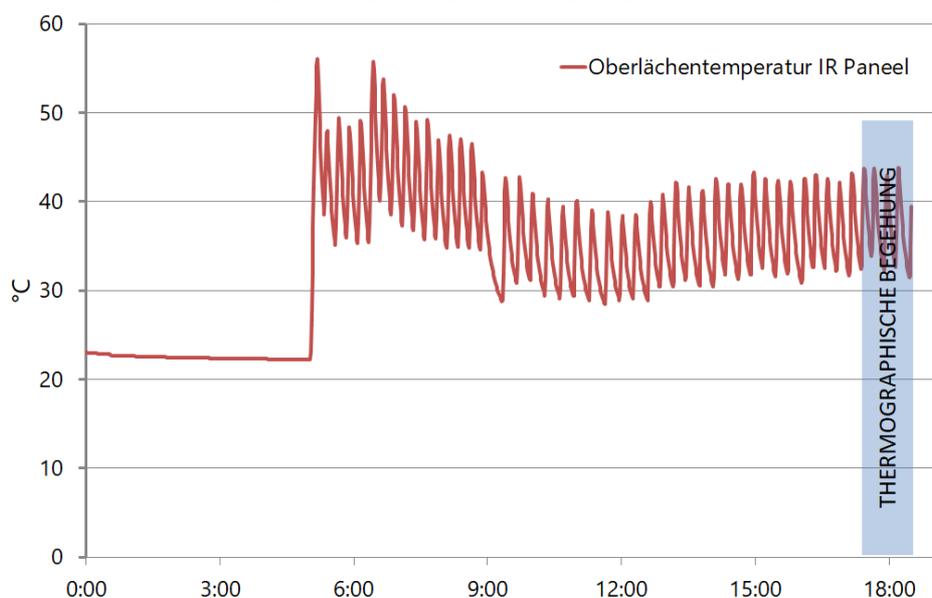


Abb. 105 Oberflächentemperaturen des zentralen Paneels am Tag der Begehung

Aufgrund des mäßigen Heizbedarfs lagen zum Zeitpunkt der Messung die Oberflächentemperaturen des zentralen Heizpaneels nur in einem Bereich von 32 °C bis 44 °C Grad. Für die Berechnung der mittleren Strahlungstemperaturen im Raum wurde der zeitliche Mittelwert der Begehung von 37,3 °C angewendet.

3.6.6 Angewendete Lufttemperaturen und festgelegte Parameter

Für die dreidimensionale Berechnung des PMV-Index ist neben der Strahlungstemperatur die dreidimensionale Ermittlung der Lufttemperatur erforderlich. Unter Vernachlässigung allenfalls vorhandener konvektiver Luftströmungen kann, insbesondere als Folge der Deckenmontage der Paneele, von einer stabilen horizontalen Schichtung der Lufttemperatur ausgegangen werden. Der zugrundeliegende vertikale Temperaturverlauf wurde auf Basis der in 10, 110, 170 und 255 cm Höhe gemessenen Lufttemperatur mit Hilfe eines Polynoms zweiter Ordnung angenähert. Als Stützpunkte für den Fit wurden die gemittelten Lufttemperaturen herangezogen, welche in der Zeit vor der Begehung gemessen wurden. Durch die Begehung wurden die Lufttemperaturen jedoch beeinflusst, weshalb die vorhergehenden Werte benutzt wurden.

Für die vollständige Berechnung des PMV-Index sind, wie bereits oben ausgeführt, weitere Parameter notwendig. Diese wurden wie folgt festgelegt.

Tab. 10 Festgesetzte Parameter für die 3d-Behaglichkeitsanalyse

	Wert	Anmerkung
Bekleidung	0,8 clo	heute übliche, leichte Winterbekleidung für Innen (entspricht langärmeligem Hemd mit Unterhemd)
Aktivitätsgrad	1,0 met	entspricht entspanntem Sitzen
Relative Luftfeuchte	50%	typischer Wert (geringer Einfluss auf Berechnungsergebnis)
Luft Strömungsgeschwindigkeit	1 cm/s	typischer Wert (geringer Einfluss auf Berechnungsergebnis)
Paneel-Oberflächentemperatur	37,3 °C	Zeitlicher Mittelwert der Begehung (siehe Abb. 105)

3.6.7 3d-Behaglichkeit: Omnidirektionale mittlere Strahlungstemperaturen

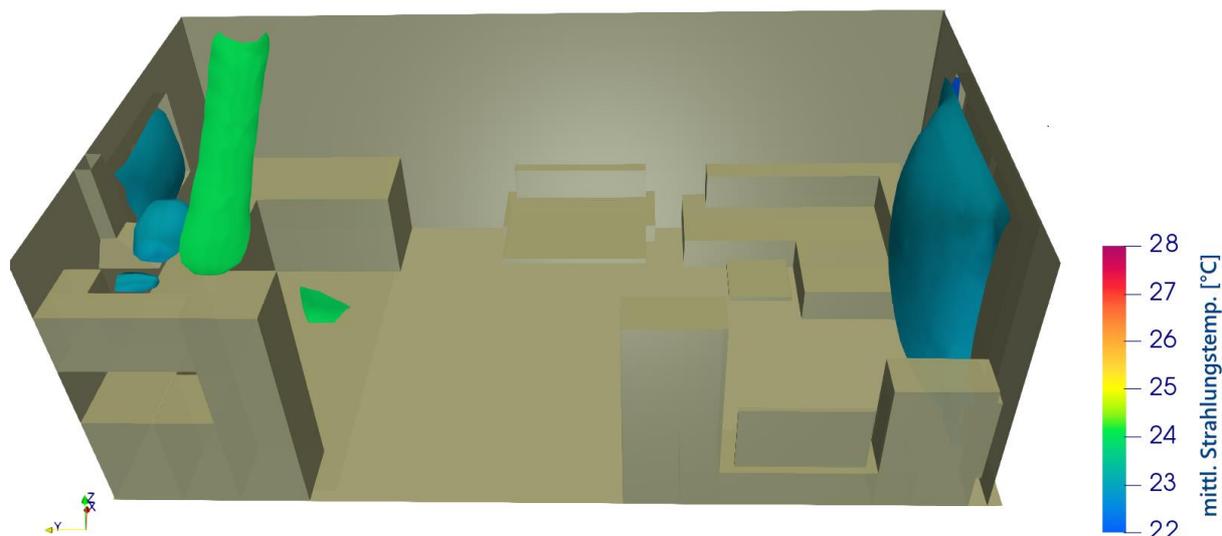


Abb. 106 mittlere Strahlungstemperaturen als Isoflächen dargestellt – FW-Wohnung

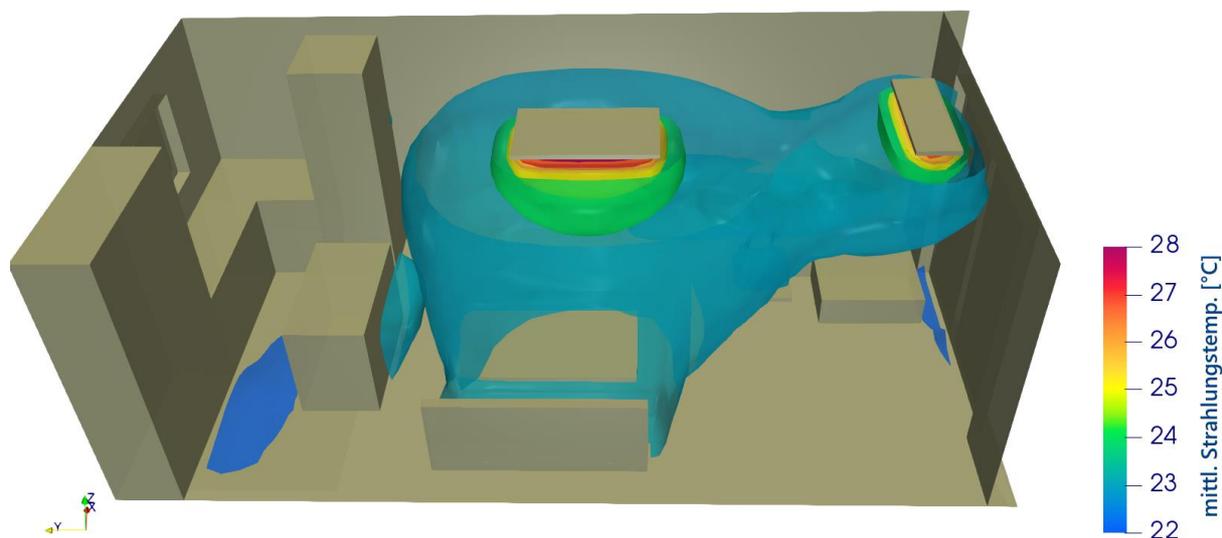


Abb. 107 mittlere Strahlungstemperaturen als Isoflächen dargestellt – IR-Wohnung

Interpretation:

In der mit Radiator beheizten Fernwärme-Wohnung ist die mittlere Strahlungstemperatur sehr ausgeglichen und liegt konstant zwischen 23 und 24 °C. Lediglich im Bereich der Fenster wird der 23 °C Wert unterschritten. Im Deckenbereich über der Küche ist eine Überschreitung der 24 °C erkennbar. Dies ist eine Folge der Deckenerwärmung durch darüber liegende Verteilleitung.

In der mit Infrarotpaneelen beheizten Wohnung zeigt sich eine deutlich inhomogenere Verteilung der Strahlungstemperaturen. Im zentralen Bereich liegen die Strahlungstemperaturen im Bereich zwischen 23 °C und 24 °C. Im Nahfeld der Infrarot-Paneele steigen die mittleren Strahlungstemperaturen entsprechend an. Im Küchenbereich und im Bereich der Fenstertüren liegen die Strahlungstemperaturen zwischen 22 °C und 23 °C.

3.6.8 3d-Auswertung Behaglichkeit: PMV-Index bei CLO = 0,8

Unter der Annahme von leichter Winterbekleidung (CLO=0,8) wurde eine PMV-Berechnung für jeden Punkt des Raumes durchgeführt. Der dabei vorhergesagte thermische Behaglichkeitsgrad (PMV-Index) ist unten graphisch dargestellt.

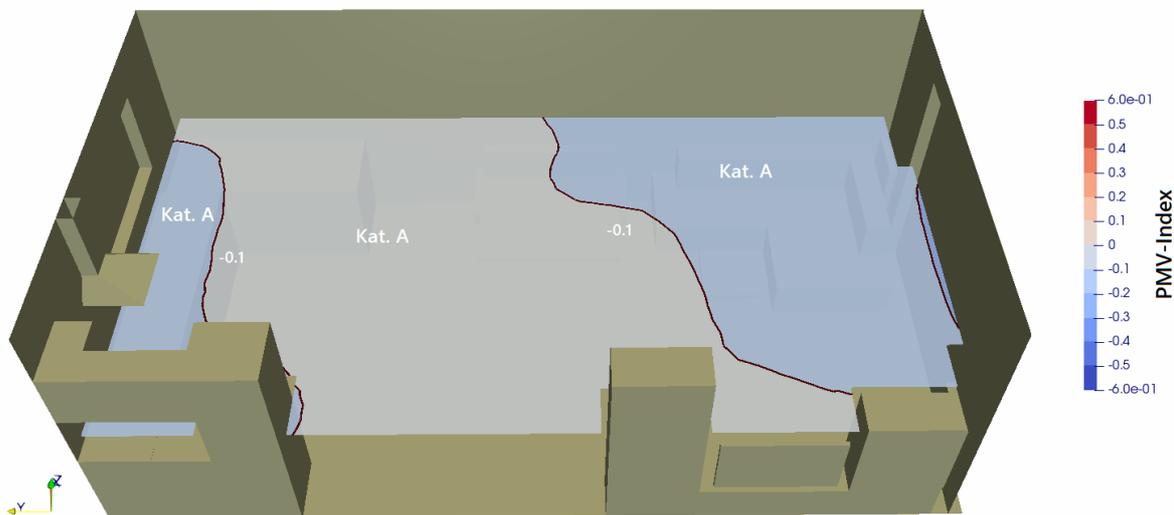


Abb. 108 PMV-Index (vorhergesagte thermische Behaglichkeit) – Schnitt in halber Raumhöhe - FW-Wohnung, CLO=0,8

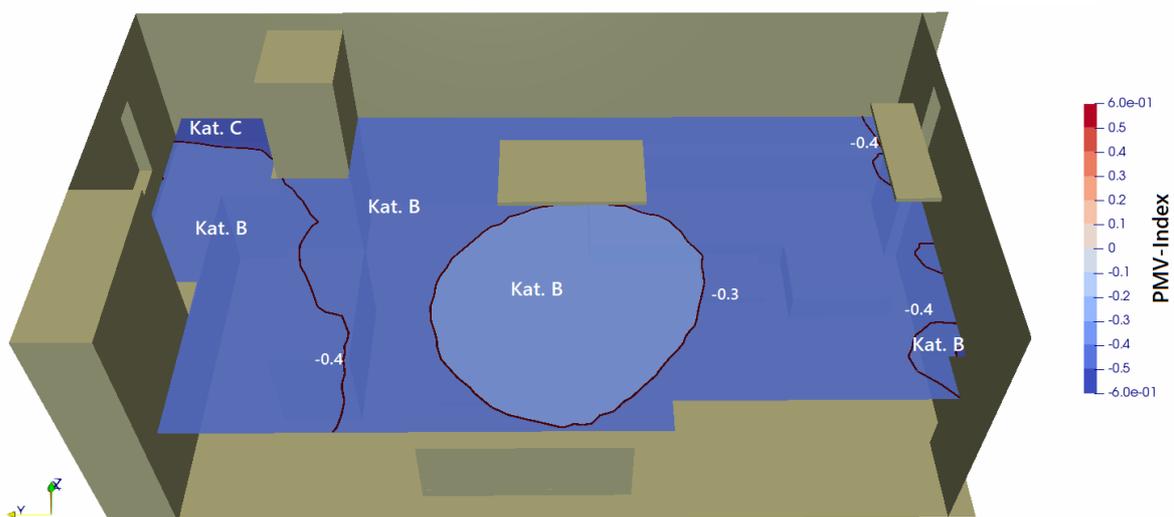


Abb. 109 PMV-Index (vorhergesagte thermische Behaglichkeit) – Schnitt in halber Raumhöhe - IR-Wohnung CLO=0,8

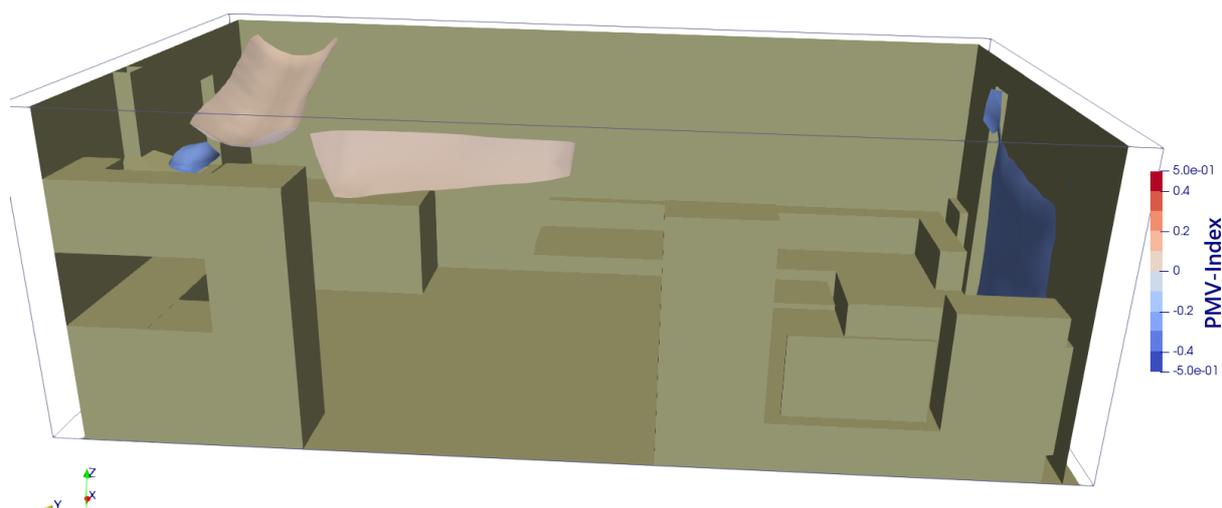


Abb. 110 PMV-Index (vorhergesagte thermische Behaglichkeit) – Isoflächen 3d-Darstellung - FW-Wohnung, CLO=0,8

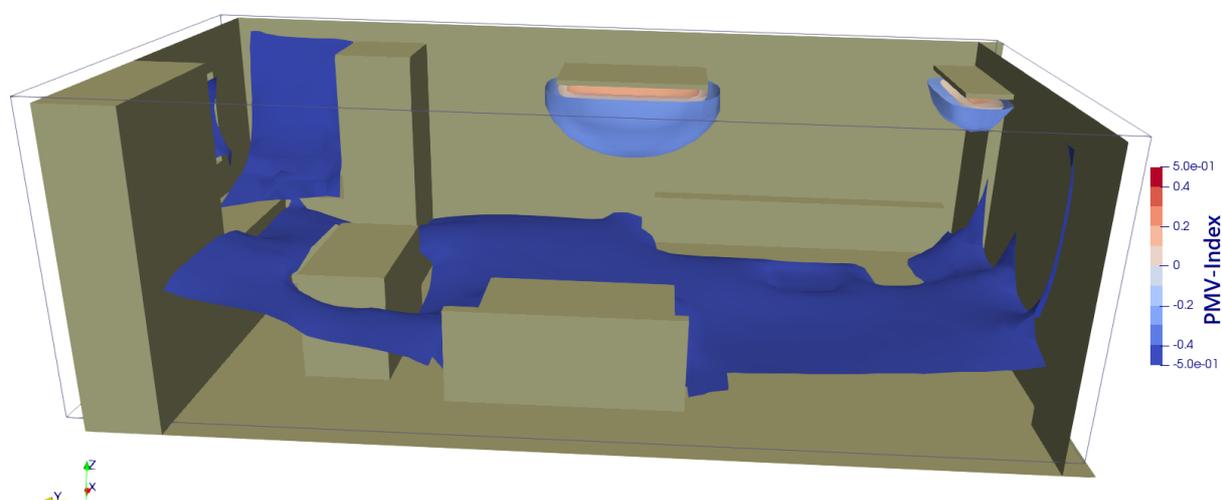


Abb. 111 PMV-Index (vorhergesagte thermische Behaglichkeit) – Isoflächen 3d-Darstellung - IR-Wohnung, CLO=0,8

Interpretation:

Bei einem Bekleidungsfaktor von 0,8 CLO (leichte Winterbekleidung) liegt der PMV Index, also die vorhergesagte Empfindungstemperatur, in der mit Radiatoren beheizten Wohnung praktisch im gesamten Bereich im Optimalbereich der Kategorie A. Bei derselben Bekleidung liegen die vorhergesagten Temperaturen in der mit Infrarotpaneelen beheizten praktisch in der gesamten Wohnung im Bereich der Kategorie B, die Temperaturen würden bei dieser Bekleidung also leicht zu kühl eingestuft werden. Im Bodenbereich und im unteren Bereich der Küche bzw. auch im Wandbereich der Küche wird die Kategorie C erreicht.

3.6.9 3d-Auswertung Behaglichkeit: PMV-Index bei CLO = 1,0

Unter der Annahme von Winterbekleidung (CLO=1,0) wurde eine PMV-Berechnung für jeden Punkt des Raumes durchgeführt. Der dabei vorhergesagte thermische Behaglichkeitsgrad (PMV-Index) ist unten graphisch dargestellt.

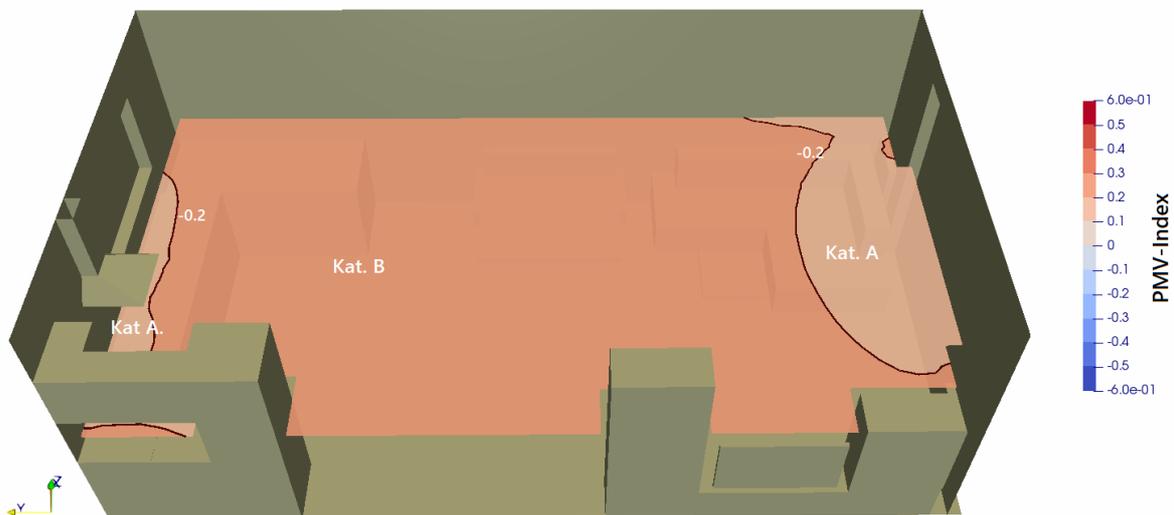


Abb. 112 PMV-Index (vorhergesagte thermische Behaglichkeit) – Schnitt in halber Raumhöhe - FW-Wohnung, CLO=1,0



Abb. 113 PMV-Index (vorhergesagte thermische Behaglichkeit) – Schnitt in halber Raumhöhe - IR-Wohnung CLO=1,0

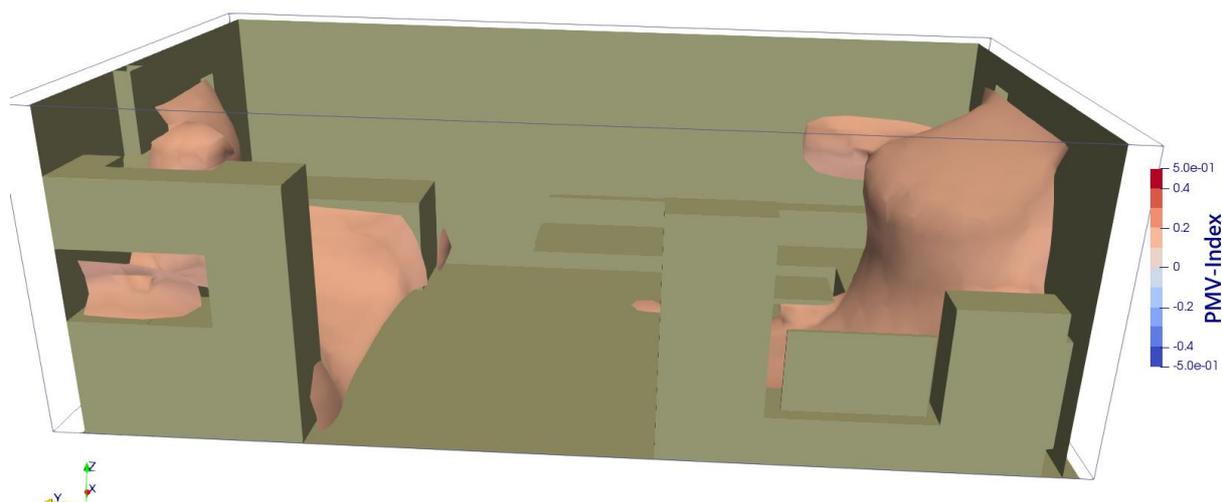


Abb. 114 PMV-Index (vorhergesagte thermische Behaglichkeit) – Isoflächen 3d-Darstellung - FW-Wohnung, CLO=1,0

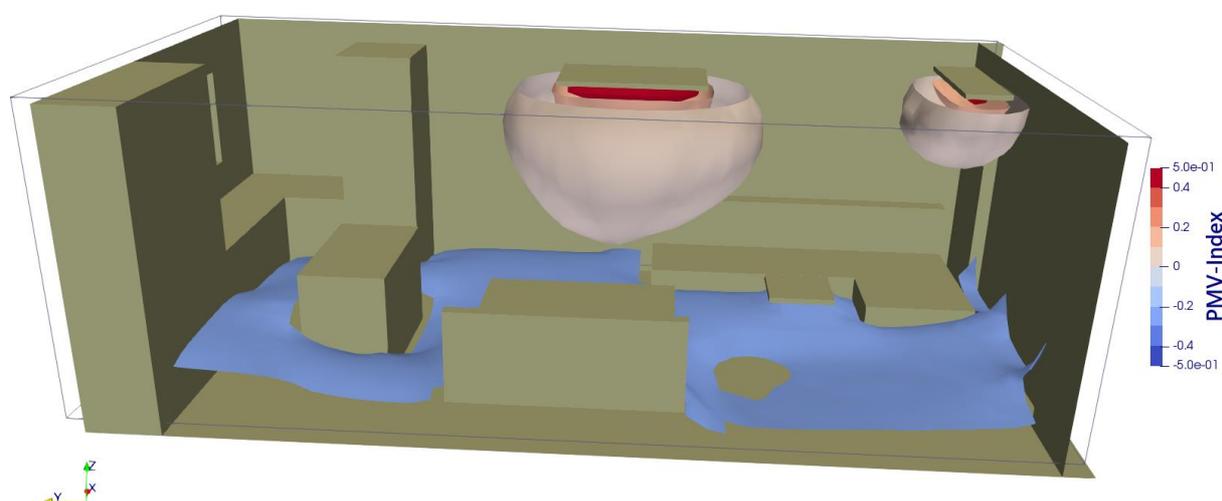


Abb. 115 PMV-Index (vorhergesagte thermische Behaglichkeit) – Isoflächen 3d-Darstellung - IR-Wohnung, CLO=1,0

Interpretation:

Bei einem Bekleidungsfaktor von 1,0 CLO (Winterbekleidung) liegt der PMV Index, also die vorhergesagte Empfindungstemperatur, in der mit Radiatoren beheizten Wohnung im zentralen Bereich bei Kategorie B., wird also zu leicht zu warm empfunden. Nur im Bereich der Küche und im Bereich der Fenstertüren wird aufgrund der etwas kühleren Temperaturen die Kategorie A erreicht. Bei derselben Bekleidung liegen die vorhergesagten Temperaturen in der mit Infrarotpaneelen beheizten im Großteil des Raums im Optimalbereich der Kategorie A. Nur im nicht zugänglichen direkten Nahbereich der Paneele wird die Kategorie B (leicht zu warm) und im Bodenbereich die Kategorie B (leicht zu kühl) erreicht.

3.6.10 3d-Behaglichkeit: Vertikale Strahlungsasymmetrie im Bereich des IR-Panels

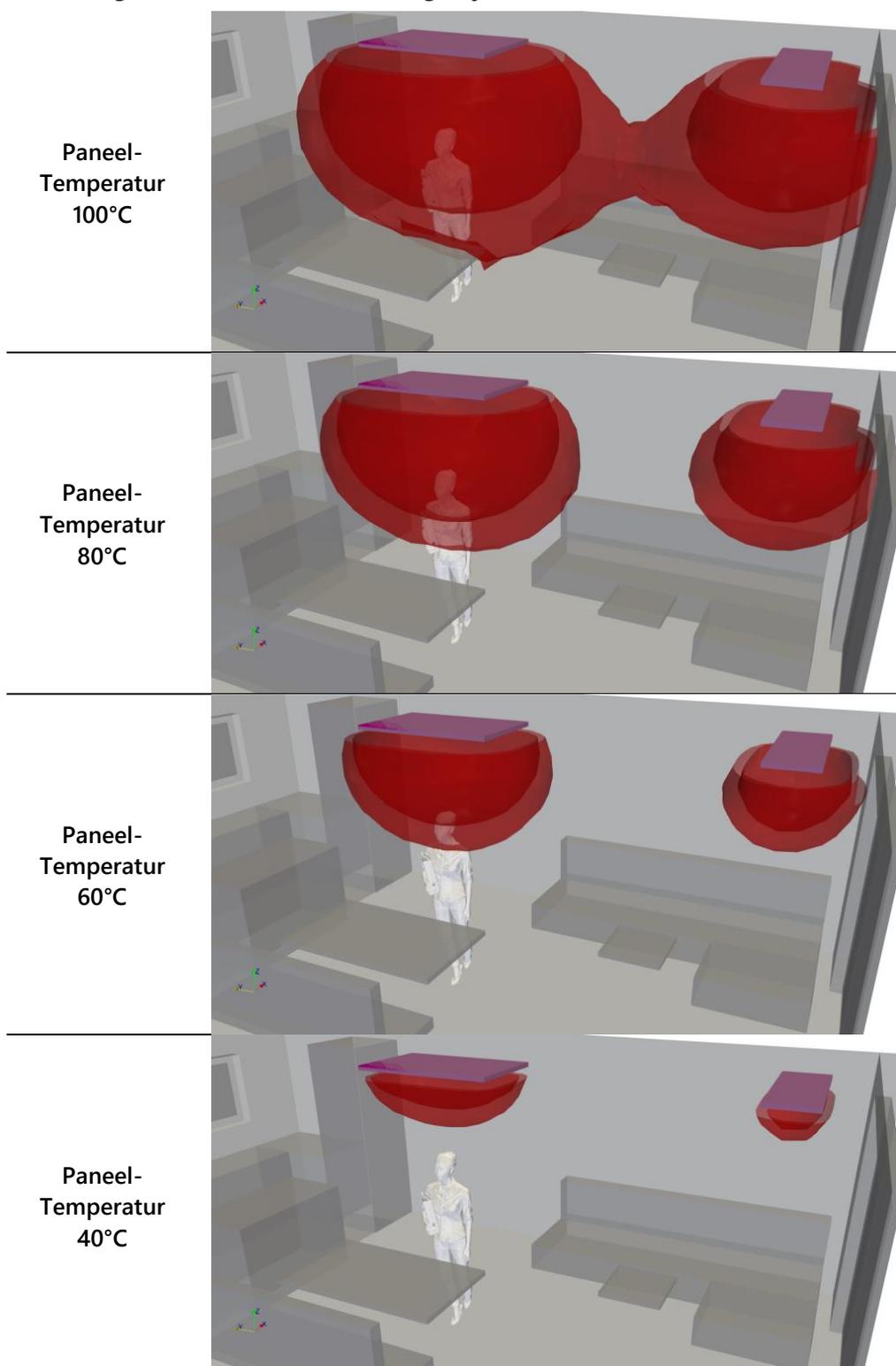


Abb. 116 Vertikale Strahlungsasymmetrie, Unterschreitung der Kategorie A und C

Interpretation: In der Abbildung oben wurden im Vergleich zu den oben gezeigten Ansichten lediglich die Paneel-Temperaturen variiert. Diese haben den größten Einfluss auf die lokale Strahlungsasymmetrie. Die Temperaturen der übrigen Oberflächen des Raums werden gleich wie beim Ausgangsfall angenommen.

Die zuvor durchgeführten Berechnungen basieren auf den Paneel Oberflächentemperaturen welche bei der Begehung vorgefunden wurden. Auf Grund des geringen Heizbedarfs infolge der gemäßigten Außentemperaturen und der Sonneneinstrahlung während des Tages lagen diese im Mittel nur bei 37,3 °C. Die von den Herstellern

angegebenen Zieltemperaturen liegen in einem Bereich von 60 bis 120 °C. Aus diesem Grund wurde die Strahlungsasymmetrie auch für höhere Oberflächentemperaturen untersucht.

Es ist gut ersichtlich, dass im Bereich direkt unter dem IR-Paneel die Kriterien der Behaglichkeitsklassen A und B (roter Bereich) bzw. der Klasse C (weißer Bereich) nicht erfüllt werden. Der Grund hierfür ist das Behaglichkeitskriterium welches fordert, dass die vertikale Strahlungsasymmetrie bei Wärme von oben, die Werte +5 °C (Klasse A und B, roter Bereich) bzw. +7 °C (Klasse C, weißer Bereich) nicht überschreiten darf. (Die dargestellte Person weist eine Körpergröße von 1,7 m auf.) Wie bereits oben erläutert (siehe Abb. 67) reagiert der menschliche Körper deutlich am sensibelsten auf positive vertikale Strahlungsasymmetrien. Warme Deckenbereiche werden deshalb schnell als unbehaglich empfunden. So wird gemäß der Berechnungen nach Fanger etwa eine warme Decke mit einer Strahlungsasymmetrie von +7 °C bereits von 10% der Personen als unangenehm wahrgenommen. Bei einer warmen Wandfläche wird eine vergleichbare Anzahl an Unzufriedenen gemäß der Methode nach Fanger erst ab einer Temperaturdifferenz von +35 °C erreicht.

Anmerkung: wie bereits in 3.6.1 erwähnt, wird im Vergleich zu den Berechnungen des Vorjahrs im Zuge der Verfeinerung des Verfahrens, nun auch die diffuse Reflexion der thermischen Strahlung beim Eintreffen auf Oberflächen berücksichtigt, bzw. bei den Glasoberflächen auch die gerichtete Reflexion.

3.6.11 Behaglichkeitsanalyse – IR-Wohnung Fazit

Entsprechend der durchgeführten Analyse zeigt sich, dass bei Einsatz der, im Verhältnis zu beheizten Grundfläche, relativ kleinen IR-Paneelen eine lokal konzentrierte Wärmeabgabe erfolgt. Entsprechend dem zugrundeliegenden physikalischen Prinzip nimmt die Strahlungsleistung, bei gleichmäßiger Abstrahlung in alle Raumrichtungen, mit dem Quadrat des Abstands zur Strahlungsquelle ab ($\propto 1/r^2$). Dies führt dazu, dass weiter entfernte (oder abgeschattete) Bauteile eine signifikant reduzierte Wärmezufuhr aufweisen. Bei der Behaglichkeitsbetrachtung zeigt sich dies anhand einer stark inhomogenen Verteilung der Strahlungstemperatur. Die inhomogene Verteilung führt vereinfacht ausgedrückt zu drei unterschiedlichen behaglichkeitsrelevanten Effekten: Erstens führt sie dazu, dass in vom IR-Paneel weiter entfernten Bereichen des untersuchten Wohnraums die mittleren Strahlungstemperaturen geringer sind, und somit auch der hieraus berechnete PMV-Index. Die lokale Umgebung wird deshalb unter den vorliegenden Annahmen in vom Paneel weiter entfernten Bereichen als kühler empfunden. Zweitens führt die inhomogene Verteilung dazu, dass die Strahlungsabgabe in einem Nahbereich zum Paneel zu sehr hohen, als zu warm empfundenen PMV-Indizes führt. Da bei der Deckenmontage dieser als „heiß“ empfundene Bereich i.d.R. kaum zugänglich ist oder kein Aufenthaltsbereich darstellt, spielt dieser Effekt hier eine untergeordnete Rolle.

Signifikant ist jedoch der damit verbundene dritte Effekt: neben den hohen Strahlungstemperaturen kommt es auch zu einer ausgeprägten vertikalen Strahlungsasymmetrie in einem ausgedehnten Bereich. Durch die „über-Kopf“-Anordnung der Paneele wirkt sich diese physiologisch ungünstig aus (vgl. Abb. 116), das heißt, die vertikal ungleiche Verteilung der Wärmestrahlung wird in einem „wespennestförmigen“ Bereich unter dem IR-Paneel als unbehaglich empfunden. Die tatsächliche Ausdehnung dieses Bereichs ist stark von der Oberflächentemperatur des Paneels abhängig.

3.7 Funktionsweise der Heizungsregelung des Infrarot-Panels

Wie bei der messtechnischen Untersuchung der Wohnung mit Infrarot-Heizung festgestellt wurde, arbeitet die Heizungssteuerung auf Basis einer Ein/Aus-Intervallregelung. Das Arbeitsintervall beträgt 15 Minuten. Sofern die Paneele nicht auf Maximalleistung betrieben werden, bedeutet dies, dass sich in dieser Zeit die Temperatur der Paneele binnen 7,5 Minuten um 10 °C bis 20 °C ändert. Da dies, wie oben erwähnt, mit einer spürbaren Änderung der Strahlungstemperatur bzw. wahrgenommenen Strahlungsasymmetrie verbunden ist, wirkt sich dies ungünstig auf die Behaglichkeit aus (siehe z.B. Abb. 67 oder Abb. 116). Die sich zyklisch ändernden Strahlungstemperaturen wurden vom Nutzer der untersuchten Wohnung wahrgenommen und bei der Installation der Messtechnik von den Bewohnern aktiv angesprochen. Ebenso ist davon auszugehen, dass die zyklischen Erwärmungs- und Abkühlungsphasen mit deutlichen Spannungen im Material der Paneele einhergehen und deshalb negative Auswirkungen auf die Lebensdauer derselben haben.

Durch eine direkte Ansteuerung der Leistungsabgabe (Thyristorsteller) oder eine Ein-/Aus-Steuerung mit sehr kurzem Regelintervall könnten die resultierenden, behaglichkeitsrelevanten Temperaturspitzen in Zeiten an denen die IR-Paneele nicht auf Höchstlast laufen, gedämpft werden. In der untersuchten Wohnung mit gewählter Nachtabstaltung, wurde jedoch über einen Zeitraum von mehreren Stunden die Maximallast abgegeben (bei ca. 90 °C). In diesem Zeitraum hätte die Optimierung der Regelungstechnik naturgemäß keine Auswirkung auf die Behaglichkeitssituation.

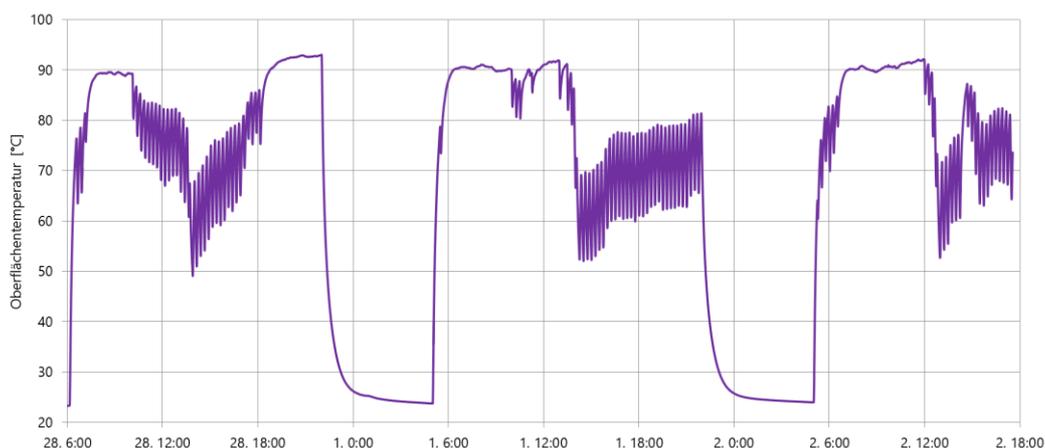


Abb. 117 gemessene Oberflächentemperaturen am IR-Paneel – 3 Tage

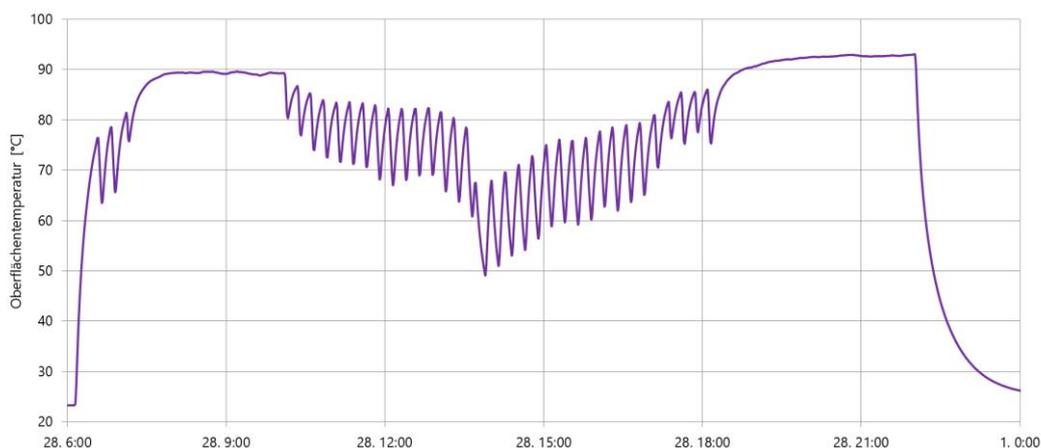


Abb. 118 gemessene Oberflächentemperaturen am IR-Paneel – 1 Tag

3.8 Verteilungsverluste Fernwärme – Wohnung

3.8.1 Wärmeverteilung

Die Wärmemengen bei den mit Fernwärme versorgten Gebäuden werden in zwei Ebenen gemessen. Einmal direkt an der Fernwärmeübergabestation, welche in einem Kellerersatzraum außerhalb des Wohngebäudes situiert ist, und einmal an den Wohnungsübergabestationen.

Die an der Fernwärmeübergabestation gezählte Wärmemenge wird für die Fernwärme Abrechnung verwendet. Die Wärmemengenzähler in den Wohnungsübergabestationen werden für die anteilige Aufteilung der Kosten herangezogen.

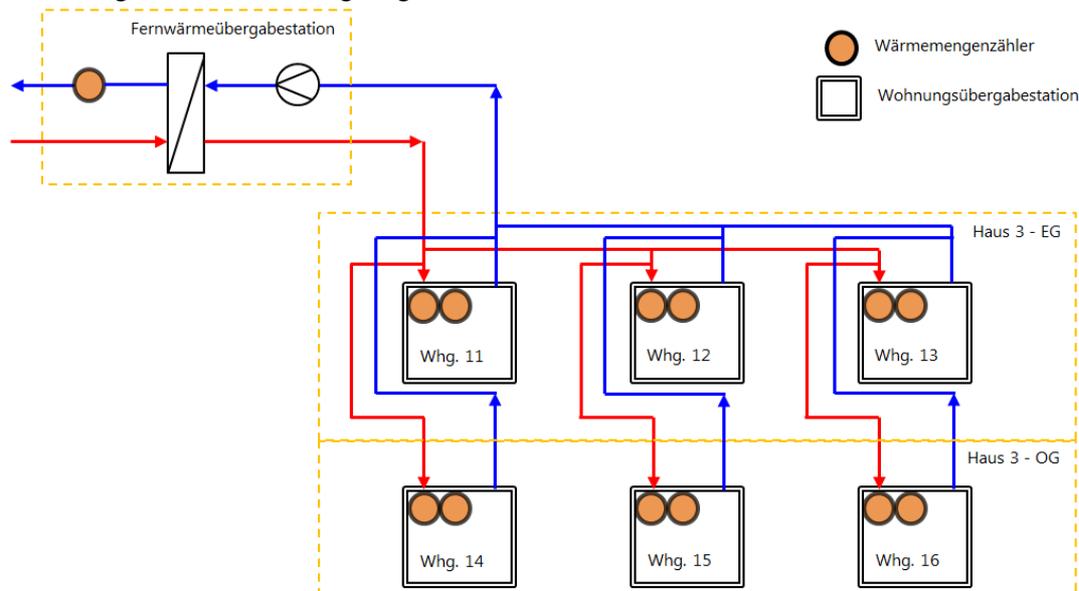


Abb. 119 Verteilungen von der Fernwärmeübergabestation zu den Wohnungsübergabestationen.

3.8.2 Messung der Verteilungsverluste

Zwischen der Fernwärmeübergabestation und den Wohnungsübergabestationen treten thermische Verluste auf. Diese Verluste können als Differenz aus der Wärmemenge gemessen an der Fernwärmeübergabestation und der Summe der Wärmemengen gemessen an den Wohnungsübergabestationen ermittelt werden. Die Verluste fließen zum Teil in das Gebäude und kommen dort in der Heizperiode den einzelnen Wohnungen zugute. Ein weiterer Teil fließt nicht nutzbar ins Erdreich ab.

Für die Ermittlung und Zuordnung der Verteilungsverluste ein Intervall von 46 Tagen, vom 19.02.2017 bis zum 06.04.2017, ausgewertet, da für diese Zeitraum zeitlich hochaufgelöste Daten vom Versorger zur Verfügung gestellt wurden. In diesem Zeitraum war die Fernwärmeverteilung durchgehend in Betrieb.

Die Wärmemenge welche bei der Fernwärmeübergabestation gezählt wurde, betrug 5680 kWh. Die Summe der bei den Wohnungsübergabestationen übergebenen Energiemengen betrug 3507 kWh. Als Verteilungsverluste ergaben sich somit 2172 kWh, entsprechend einem Anteil von 38%.

Zur ersten Validierung dieser Verluste wurde die Temperaturdifferenz zwischen dem Temperaturfühler auf der Sekundärseite der Fernwärmeübergabestation, den Temperaturfühlern bei den Wohnungsübergabestationen und die Volumenströme durch die Wohnungsübergabestationen verwendet. Der damit ermittelte Verteilverlust zwischen dem Austritt aus der Fernwärmeübergabestation und dem Eintritt in die Wohnungsübergabestation betrug 1352 kWh. Damit sind 62,3 % der Verteilverluste klar der Verteilung zu bzw. in den Objekten zuordenbar. Bei der Differenz von 820 kWh handelt es sich um Verluste die in der Fernwärmeübergabestation entstehen und eventuell um Abweichungen durch Messunsicherheiten.

3.8.3 Thermische Simulation Rohrleitungsverluste

Anhand von zweidimensionalen thermischen Simulationen der Rohrleitungsquerschnitte konnten die gemessenen Energieverluste plausibilisiert werden. Zudem konnte auf Basis der thermischen Simulation eine Bilanzierung der Verluste durchgeführt werden, d.h. es konnte der Anteil der Verluste bestimmt werden, welcher in der Heizperiode als Nutzwärme den einzelnen Wohneinheiten zufließt.

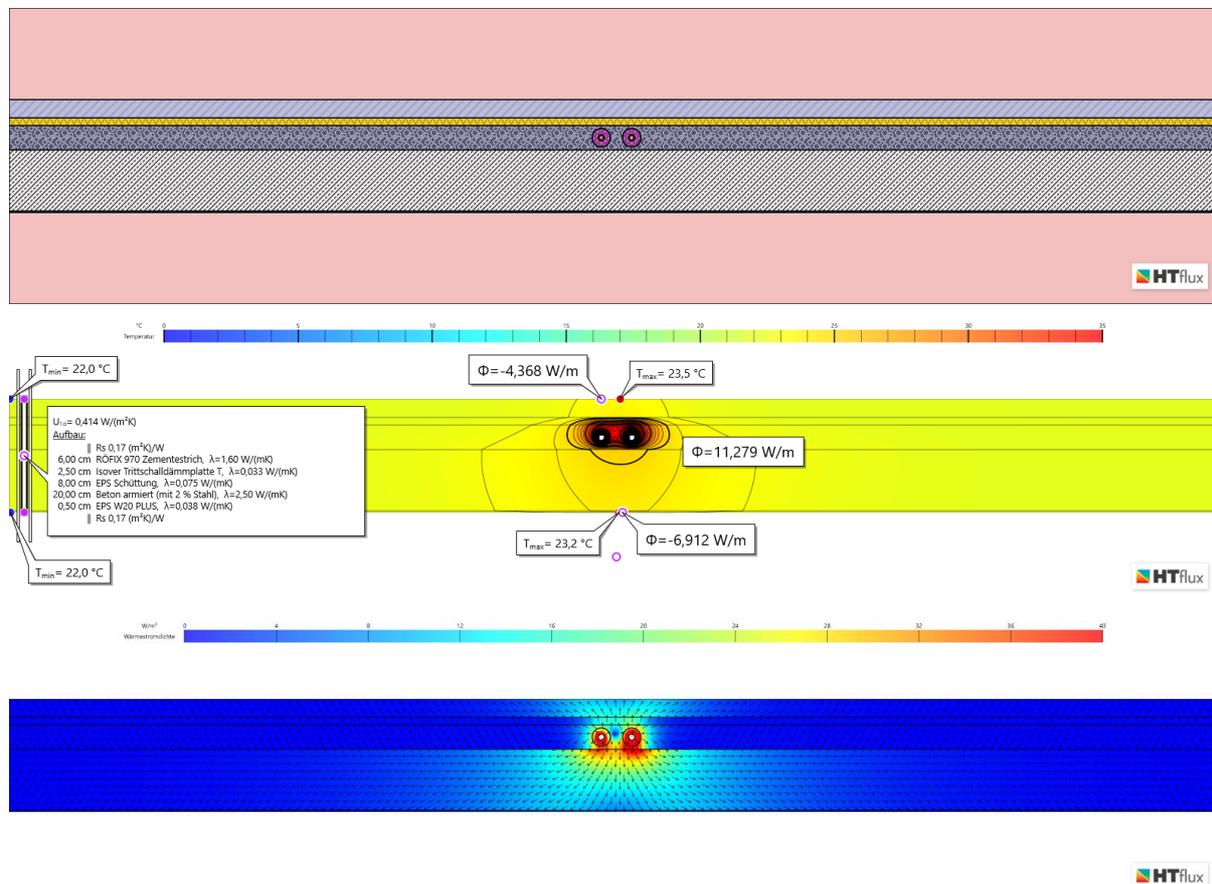
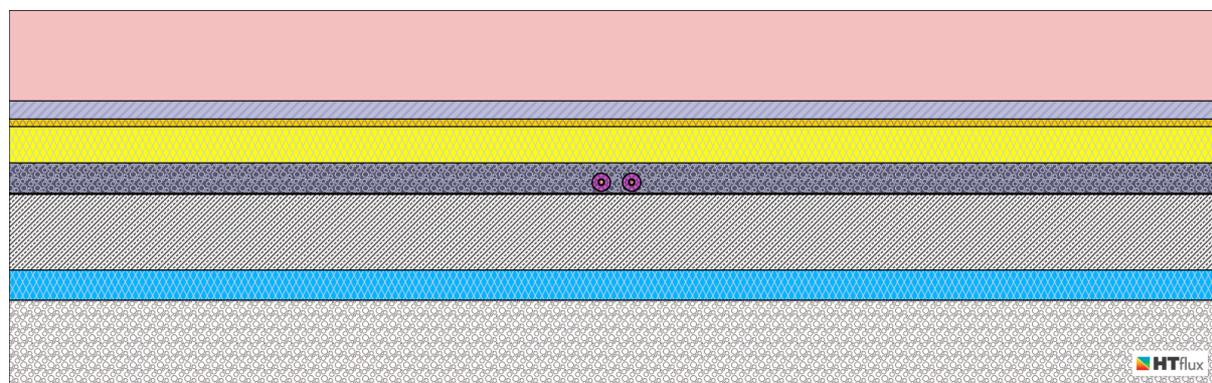


Abb. 120 Thermische Simulation Verteilungsverlust Decke EG, Vorlauf-/Rücklaufftemp. 65/66 °C



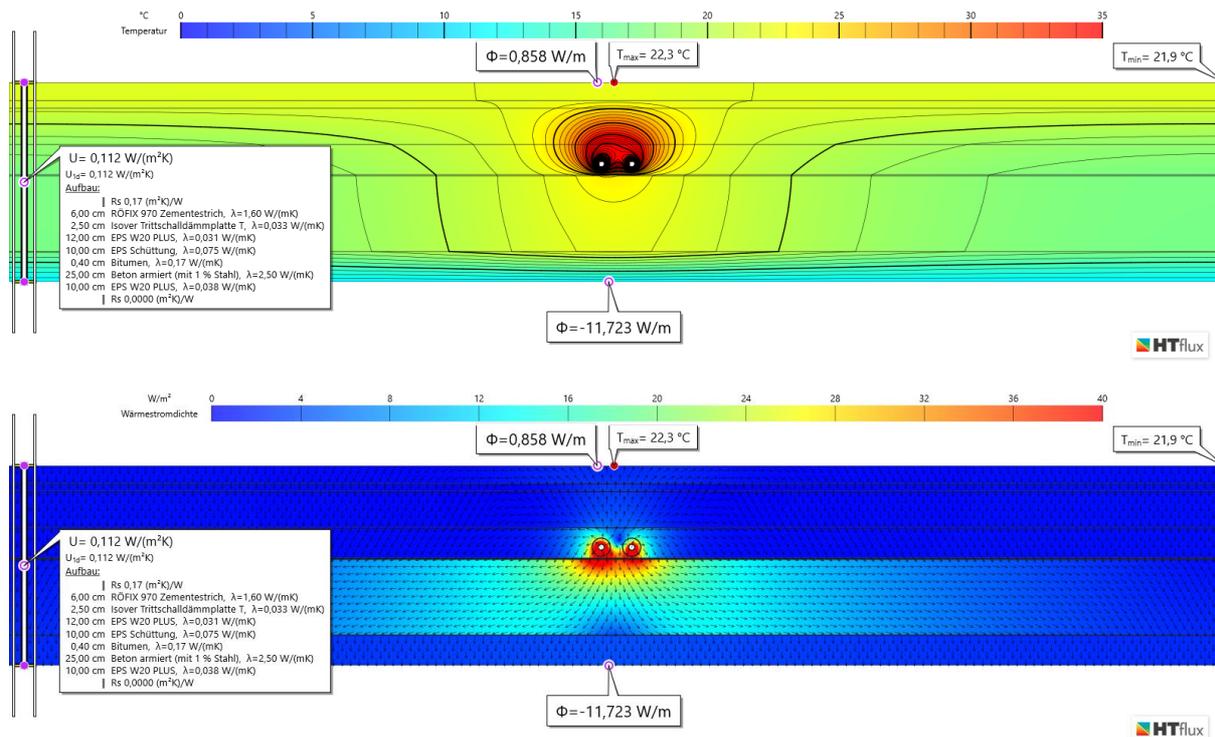


Abb. 121 Thermische Simulation Verteilungsverlust Fußboden EG, Vorlauf-/Rücklauf temp. 65/66 °C

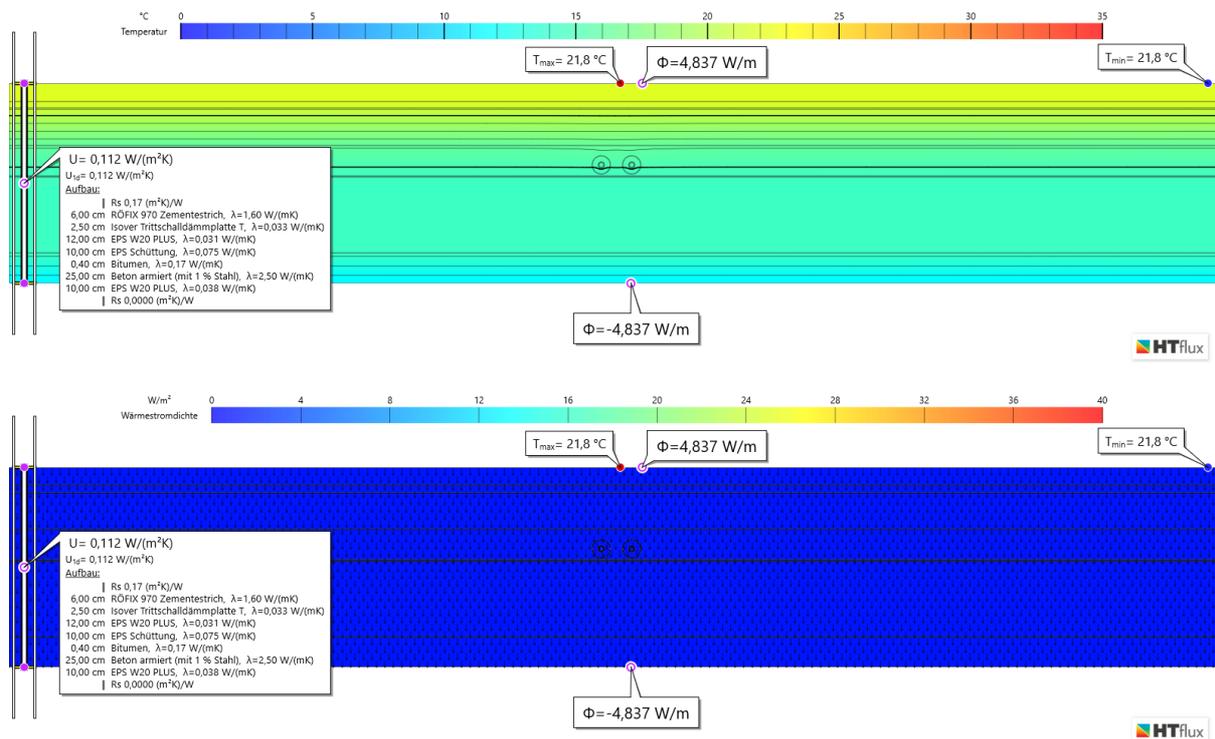


Abb. 122 Thermische Simulation Verteilungsverlust Fußboden EG, Heizung inaktiv

3.8.4 Bilanzierung der Verteilungsverluste

Aus den thermischen Simulationen können für die einzelnen Rohrleitungen die folgenden spezifischen Verluste ermittelt werden:

Tab. 11 Spezifische Verlustleistungen

Querschnitt	spez. Verlust	Quelle
FB01 gegen Erdreich	6,86 W/m	therm. Sim.
FB01 gegen Whg	3,98 W/m	therm. Sim.
FB03 gegen Whg oben	4,37 W/m	therm. Sim.
FB03 gegen Whg unten	6,91 W/m	therm. Sim.
Wand/Steigleitung	5 W/m	Schätzung

Auf Basis der Rohrführung im Haustechnikplan können die spezifischen Verlustleistungen in Gesamtverluste umgerechnet und den jeweiligen Zonen als Nutzenergiegewinn zugeschlagen werden. Die Länge der Rohrleitungen innerhalb der Fernwärmeübergabestation und der Zuleitung war aus dem Haustechnikplan nicht ersichtlich und wurde daher abgeschätzt.

Tab. 12 Rechnerische Ermittlung der gesamten Verteilungsverluste

zu	zu	Beschreibung	Länge [m]	DN	Dämmst. [mm]	P _{verlust oben} [W]	P _{verlust unten} [W]
Erdreich/außen	Erdreich/außen	STATION	8	32	40	54,88	54,88
Erdreich/außen	Erdreich/außen	ZULEITUNG	8	32	40	54,88	54,88
Whg 11	Erdreich/außen	FB01	0,9	32	20	3,6	6,2
Whg 11	Erdreich/außen	FB01	0,5	32	20	2,0	3,4
Whg 11	Erdreich/außen	FB01	4,2	20	20	16,7	28,8
Whg 11	Erdreich/außen	FB01	1,8	20	20	7,2	12,3
Whg 11	Whg 12	Wand	3	20	20	15,0	15,0
Whg 11	Erdreich/außen	FB01	4,5	25	20	17,9	30,9
Whg 12	Erdreich/außen	FB01	0,6	25	20	2,4	4,1
Whg 12	Erdreich/außen	FB01	2,7	20	20	10,7	18,5
Whg 12	Erdreich/außen	FB01	6,2	25	20	24,7	42,5
Whg 12	Erdreich/außen	FB01	4	20	20	15,9	27,4
Whg 12	Whg 12	Wand	3	20	20	15,0	15,0
Whg 12	Erdreich/außen	FB01	3,7	20	20	14,7	25,4
Whg 13	Erdreich/außen	FB01	0,6	20	20	2,4	4,1
Whg 13	Erdreich/außen	FB01	2,7	20	20	10,7	18,5
Whg 13	Erdreich/außen	FB01	10,5	20	20	41,8	72,0
Whg 13	Whg 13	Wand	3	20	20	15,0	15,0
Whg 14	Whg 11	FB03	4,5	20	20	19,7	31,1
Whg 15	Whg 12	FB03	9,5	20	20	41,5	65,6
Whg 16	Whg 13	FB03	9,5	20	20	41,5	65,6

Bilanziert für die einzelnen Zonen, bzw. Wohneinheiten ergeben sich die unten stehenden monatlichen Zuflüsse. Wie zu sehen ist sind diese bezüglich der spezifischen Wohnungen sehr unterschiedlich verteilt.

Tab. 13 Übersicht Zufluss der Verteilverluste in der Heizperiode nach Ziel

	Zufluss [W]	relativ	monatl. Zufluss [kWh]	spez. monatl. Zufluss [kWh/m ²]
Summe	1039,6	100%	758,9	
Erdreich/außen	513,8	49%	375,1	
Whg 11	93,5	9%	68,2	1,37
Whg 12	179,1	17%	130,7	1,80
Whg 13	150,6	14%	109,9	1,50
Whg 14	19,7	2%	14,4	0,15
Whg 15	41,5	4%	30,3	0,41
Whg 16	41,5	4%	30,3	0,41

3.8.5 Gegenüberstellung von Simulation und Messung

Rechnet man die im Kapitel 3.8.2 messtechnisch ermittelten Energieverluste der Verteilungen zwischen Fernwärmeübergabestation-Austritt und Wohnungsübergabestation-Eintritt für den betrachteten Zeitraum in einer Dauerverlustleistung um, so ergibt sich ein Wert von 1225 W. Auf Basis der thermischen Simulationen wurde ein Wert von 1040 W ermittelt. Der theoretisch ermittelte Wert zeigt somit eine gute Übereinstimmung mit dem messtechnisch ermittelten Wert. Dies bestätigt die Annahme, dass die signifikante Differenz bei der Wärmezählerbilanzierung vorwiegend durch Verteilungsverluste bedingt ist.

3.8.6 Thermografie – Verteilungsverluste

Bei der vor-Ort Begehung konnte mittels Thermografie die Verteilungsverluste sichtbar gemacht werden. In der untersuchten Wohnung im Erdgeschoss waren diese durch lokal deutlich erhöhte Oberflächentemperaturen der Decke im Wohn-/Essbereich, im Flur und in der Abstellkammer gekennzeichnet. Die Temperaturen waren lokal um bis zu 10 °C erhöht.

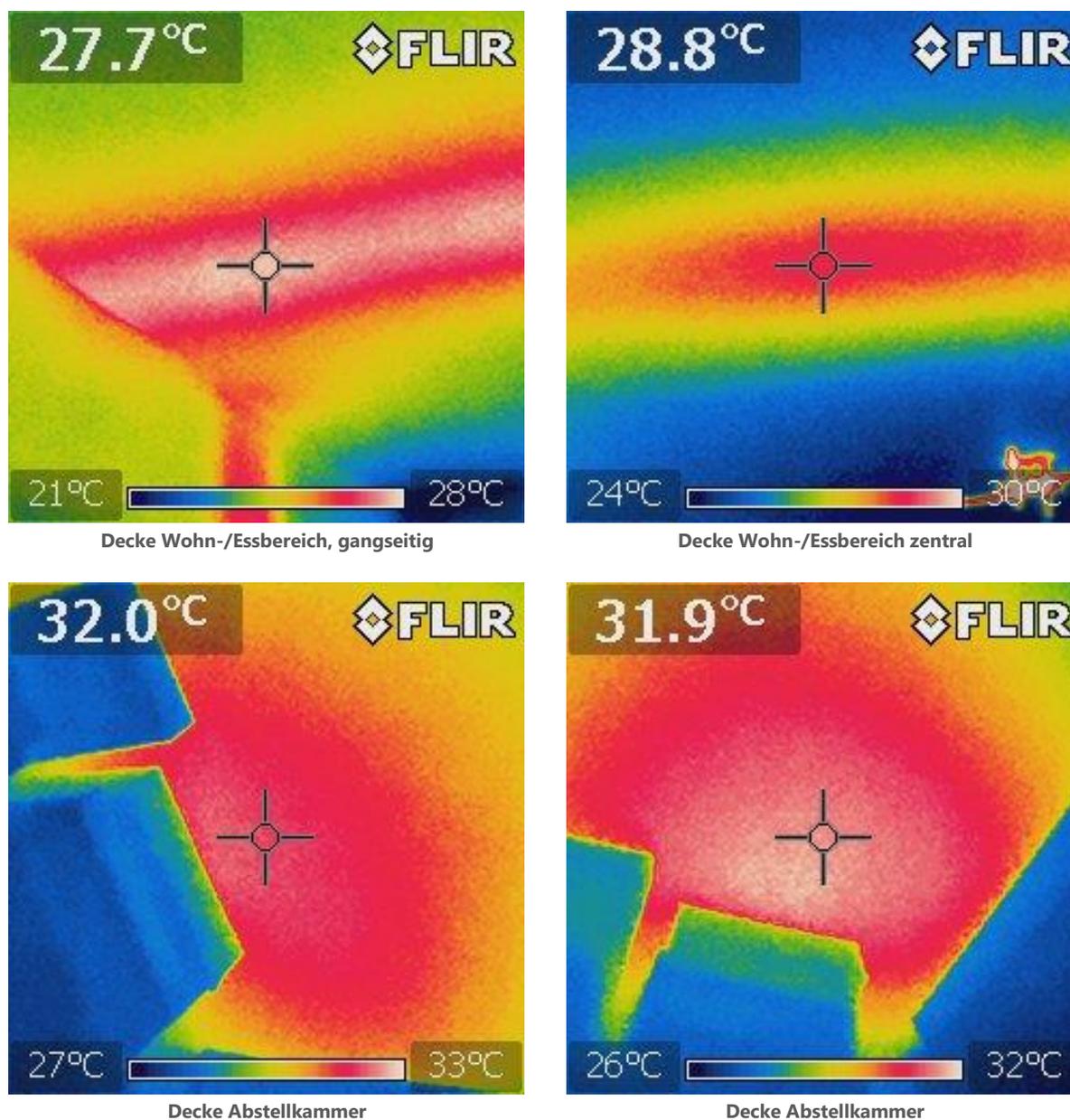


Abb. 123 Detektierte, signifikante Verteilungsverluste in der untersuchten Fernwärme-Wohnung

3.8.7 Optimierungspotential Verteilungsverluste

Die Verteilungsverluste sind für einen erheblichen Anteil des Energieverbrauchs verantwortlich. Diese Verluste sind in einer guten Näherung proportional zur Leitungslänge. Somit ist eine Optimierung der Leitungsführungen essentiell.

Zur Abschätzung der Auswirkung von Optimierungsmaßnahmen bei der Leitungsführung wurde ein Leitungslängenfaktor definiert. Der Faktor gibt an wie sich die reale Leitungslänge zur idealen Leitungslänge verhält. Eine ideale Leitungsführung ist in der Praxis nicht realisierbar, der Faktor soll zur Beurteilung des Potentials dienen.

$$F_{ideal} = \frac{l_{ideal}}{l_{real}}$$

Die unterschiedlichen Leitungsdimensionen sind in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, auch nicht berücksichtigt ist wohin die Verluste der unterschiedlichen Leitungen übertragen werden. Der Faktor kann deshalb nur für eine grobe Abschätzung herangezogen werden.

Für das ideale Szenario wurde eine Situation angenommen, in welcher die Wohnungsübergabestationen in den Wohnungen auf kürzestem Weg verbunden wurden. Von den Erdgeschoßwohnungen geht jeweils eine Stichleitung von der Wohnungsübergabestation zur darüber liegenden Wohnung. Die tatsächlichen Leitungslängen zwischen der Fernwärmeübergabestation und der ersten Wohnungsübergabestation sind den Autoren nicht bekannt. Diese Leitungslängen wurden auf Basis des Lageplans geschätzt und bleiben bei allen durchgeführten Berechnungen konstant.

Die gesamte Länge aller Verteilungen laut Plan und Abschätzung beträgt 91,4 m für den Doppelstrang, bei der optimierten Variante beträgt die Leitungslänge nur 41 m. Das ergibt einen Verteilungs-Faktor von 0,45. Das bedeutet dass bei einer idealen Leitungsführung die Verluste nur 45% der tatsächlichen Verluste betragen würden.

Die nicht nutzbaren Verluste die der Heizung zugeordnet wurden haben für das Jahr 2017 7,6 kWh/m²a betragen. Das ist ein Anteil von 18,1 % des Endenergieverbrauchs der Heizung. Für eine Abschätzung des Optimierungspotentials kann dieser Wert mit dem Leitungslängen-Faktor multipliziert werden. Somit könnte der relative Anteil der nicht-nutzbaren Verluste der Heizung auf 8,1 % reduziert werden. Die nicht nutzbaren Verluste der Warmwasserbereitung haben im Jahr 2017 56,2 kWh/m³ betragen. Das ist ein Anteil von 31,1 % des Endenergieverbrauchs für die Warmwasserbereitung. Hier könnten die relativen Verluste theoretisch, bei idealer Leitungsführung, auf 14,0 % reduziert werden.

Wie zu sehen ist, sind die Verteilungsverluste auch bei normengerechter Rohrleitungs-Dämmung erheblich. Auch wenn ein Teil der Verteilungsverluste in der Heizperiode als Nutzwärme den Wohnungen zufließt, stellt dies zumindest ein verrechnungstechnisches Problem dar, da die Zuflüsse aus den Verteilungsverlusten sehr ungleich auf die einzelnen Wohnungen verteilt sind. Jene Verluste welche außerhalb der Heizperiode anfallen, oder an die Außenluft oder das Erdreich abgegeben werden, verringern die Energieeffizienz des Systems.

Zur Verringerung der Verluste insgesamt sollte einerseits der Dämmstandard für Verteilungen erhöht werden, andererseits sollte die Anlagen so geplant werden, dass Verteilungen möglichst kurz geführt werden.

3.9 Wirtschaftlichkeitsvergleich (Herstellkosten-Betriebs- und Wartungskosten)

3.9.1 Allgemeines

Auf Basis der von der Wohnbaugesellschaft übermittelten Unterlagen konnten die Herstellungskosten und die laufenden Kosten für Heizung und Warmwasserbereitung verglichen werden. Herangezogen wurden alle tatsächlich abgerechneten Beträge. Der Vergleich gilt spezifisch für das untersuchte Objekt. Dem Monitoring-Auftrag entsprechend wird keine Beurteilung hinsichtlich der Höhe der einzelnen Kostenpositionen durchgeführt.

3.9.2 Herstellungskosten

In den Vergleich der Herstellungskosten wurden ausschließliche jene Gewerke eingeschlossen, bei welchen sich aufgrund des Heizungssystems Unterschiede ergaben.

3.9.2.1 Haus 3 (Fernwärme/Radiator):

In der nachfolgenden Tabelle werden die Herstellungskosten für das Haus 3 mit Fernwärmeanschluss und Radiatorheizung aufgelistet.

Die Position „Sanitär“ enthält die Sanitärausstattung exklusive Heizung. Der Warmwasserspeicher ist in dieser Position enthalten. Nicht enthalten ist der Versorgungsanschluss für den Warmwasserspeicher, dieser ist in der Position Heizungssystem enthalten. In der Position „Elektroinstallation“ ist die konventionelle Elektroinstallation enthalten. Bei der Position „Heizsystem“ sind alle Kosten für die Heizungsinstallation (Radiatoren, Leitungen, Wohnungsübergabestationen etc.), sowie für die Wärmeversorgung des Warmwasserspeichers enthalten.

In der Position „Fernwärmeanschluss“ sind die Errichtungskosten für die Fernwärmeübergabestation enthalten.

Tab. 14 Übersicht Herstellungskosten Haus 3 „Fernwärme“

	Haus 3 - FW		
	Kosten	Kosten/Whg	Kosten/m ² _{WNF}
Sanitär	30.861,23 €	5.143,54 €	70,44 €
Elektroinstallation	35.559,30 €	5.926,55 €	81,16 €
Heizungssystem	39.563,93 €	6.593,99 €	90,30 €
Fernwärmeanschluss	11.029,34 €	1.838,22 €	25,17 €
Gesamtkosten (netto)	117.013,80 €	19.502,30 €	267,07 €

3.9.2.2 Haus 4 – Infrartheizung ohne Berücksichtigung PV

In der nachfolgenden Tabelle werden die Herstellungskosten für das Haus 4 mit Infrartheizung aufgelistet. Haus 4 wurde mit einer Photovoltaik-Anlage errichtet. Zusätzlich wurde das Haus 4 auch ohne Photovoltaik-Anlage berechnet. Somit gibt es auch eine fiktive Variante Haus4 IR ohne Photovoltaik. Diese Variante wird als „Haus 4 IR“ geführt. Die Position „Sanitär“ enthält analog dieselben Posten wie beim Fernwärme-Gebäude.

In der Position „Elektroinstallation“ ist die konventionelle Elektroinstallation enthalten, der Versorgungsanschluss für den elektrischen Warmwasserspeicher ist hier nicht enthalten.

In der Position „Heizungssystem (IR)“ sind alle Kosten enthalten welche die Anschaffung und Installation der Infrarotpaneele verursachten. Zusätzlich ist hier auch die Elektroinstallation der Warmwasserspeicher enthalten.

Tab. 15 Übersicht Herstellungskosten Haus 4 „Infrarot“ – ohne PV-Anlage

	Haus 4 - IR		
	Kosten	Kosten/Whg	Kosten/m ² _{WNF}
Sanitär	30.861,23 €	5.143,54 €	70,44 €
Elektroinstallation	35.559,30 €	5.926,55 €	81,16 €
Heizungssystem (IR)	38.051,23 €	6.341,87 €	86,85 €
IR Nachrüstpaneel	3.950,00 €	658,33€	9,02 €
Gesamtkosten (netto)	108.421,76 €	18.070,29 €	247,46 €

3.9.2.3 Haus 4 – Variante mit PV (Infrarotheizung mit PV-Anlage)

In der nachfolgenden Tabelle werden die Herstellungskosten für das Haus 4 mit Infrarotheizung und PV Anlage aufgelistet. Die Positionen „Sanitär“, „Elektroinstallation“ und „Heizungssystem (IR)“ sind analog zur oben beschriebenen Variante ohne Berücksichtigung der PV-Anlage.

In der Position „PV-Anlage“ sind nun alle Kosten enthalten, welche durch die Anschaffung und Installation der PV-Anlage entstanden.

Tab. 16 Übersicht Herstellungskosten Haus 4 „Infrarot“ – mit PV-Anlage

	Haus 4 - IR mit PV		
	Kosten	Kosten/Whg	Kosten/m ² _{WNF}
Sanitär	30.861,23 €	5.143,54 €	70,44 €
Elektroinstallation	35.559,30 €	5.926,55 €	81,16 €
Heizungssystem (IR)	38.051,23 €	6.341,87 €	86,85 €
IR Nachrüstpaneel	3.950,00 €	658,33€	9,02 €
PV-Anlage	26.662,50 €	4.443,75 €	60,85 €
Gesamtkosten (netto)	135.084,26 €	22.514,04 €	308,31 €

3.9.2.4 Vergleichsdarstellung

Im nachfolgenden Diagramm werden die Kosten für die Errichtung der oben beschriebenen drei Varianten gegenübergestellt: Fernwärme-Wohnungen, Infrarot-Wohnungen (ex. PV), Infrarot-Wohnung inklusive PV. Die Mehrkosten für die Heizungs-Klima-Sanitär Installation in den Fernwärmewohnungen werden zum Großteil von den Errichtungskosten für das Infrarot-Heizsystem kompensiert. Die Variante Infrarot ohne Berücksichtigung der PV-Anlage liegt um 19,6€ je Quadratmeter Wohnnutzfläche unter der Fernwärme-Wohnung.

Berücksichtigt man die Errichtung der PV-Anlage so liegen die Errichtungskosten für die betrachteten Gewerke um 41,2€/m² über jenen der Fernwärme-Wohnung.

Die Unterschiede bei den Kosten werden also maßgeblich nur von den Posten „Fernwärme-Anschluss“ und den Errichtungskosten für die PV-Anlage verursacht.

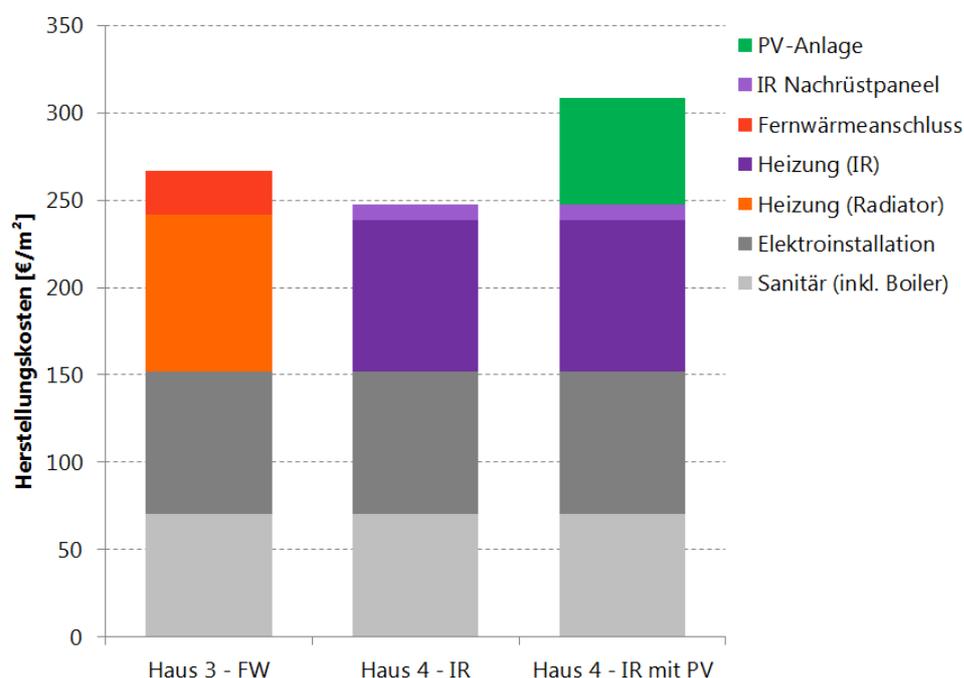


Abb. 124 Vergleich der Herstellungskosten je Quadratmeter Wohnnutzfläche

3.9.3 Betriebs- und Wartungskosten

Für die beiden Messjahre wurden die Betriebs- und Wartungskosten miteinander verglichen. Die Basis für den Kostenvergleich sind dabei die aufgezeichneten Energiemengen und die Fernwärme und Stromabrechnungen.

Da sich das Nutzerverhalten stark auf die Betriebskosten auswirkt, wurde der Warmwasserverbrauch auf einen einheitlichen Verbrauch normiert. Der Heizungsverbrauch konnte naturgemäß, aufgrund des unterschiedlichen Heizungssystems, nicht auf einen einheitlichen Verbrauch normiert werden. Aus Transparenzgründen werden die Betriebskosten in den nachfolgenden Tabellen jeweils mit den tatsächlichen Kosten (Ausgangsdaten) und zusätzlich mit den normierten Kosten (gleicher Warmwasserverbrauch) angegeben.

Der Warmwasserverbrauch wurde in allen Wohnungen mit separaten Warmwasserverbrauchszählern erfasst. In den Wohnungen mit der Infrarotheizung war der Warmwasserverbrauch deutlich geringer als in den Wohnungen mit Fernwärmeanschluss. Der Gesamtwarmwasserbrauch für das Gebäude mit Infrarotheizung lag im Jahr 1 bei 67,12 m³ und im Jahr 2 bei 77,47 m³, im Gebäude mit der Fernwärmeheizung lag der Gesamtwarmwasserverbrauch im Jahr 1 bei 120,36 m³ und im Jahr 2 bei 101,59 m³. Der Warmwasserverbrauch wurde deshalb für beide Wohngebäude im Jahr 1 auf 93,74 m³ und im Jahr 2 auf 89,53 m³ normiert. Die Normierung erfolgte linear, also unter Annahme gleichbleibender relativer Verluste.

Der markant geringere Warmwasserbezug dürfte vorwiegend auf die geringere Belegung und vermehrten Abwesenheitszeiten zurückzuführen sein (siehe auch Kapitel 3.2, „Raumfühler“). Im Jahr 2 haben sich die Warmwasserverbräuche aber angenähert.

3.9.3.1 Haus 3 (Fernwärme/Radiator):

In den nachfolgenden Tabellen ist die Zusammenstellung der Betriebskosten für Heizung und Warmwasserbereitung dargestellt. Die Aufteilung der Kosten in Warmwasserbereitung und Heizung wurde entsprechend dem gemessenen Energieverbrauch durchgeführt. Die Kosten werden als Gesamtkosten für ein Wohngebäude mit sechs Wohnungen für ein Jahr, als Kosten für eine durchschnittliche Wohnung für ein Jahr und als monatliche spezifische Kosten für einen Quadratmeter Wohnnutzfläche angegeben.

Da die Messjahre eine andere Zeitperiode abdecken als die Heizkostenabrechnung wurde der Arbeitspreis über die Energiemenge im Jahr und dem kWh-Preis ermittelt. Fixkosten die einen anderen Zeitbereich abdecken als ein Jahr wurden auf ein Jahr umskaliert (Hilfsstrom und Heizungswasseranalyse).

Tab. 17 Übersicht Betriebskosten Haus 3 „Fernwärme“ - JAHR 1

Haus 3	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² _{WNF} [€]
Fernwärme Arbeitspreis (5,9c/kWh)	2.347,45	391,24	0,45
Fernwärme Leistungspreis (1 Jahr)	516,00	86,00	0,10
Fernwärme Messpreis (1 Jahr)	180,85	30,14	0,03
Hilfsstrom Heizung (1 Jahr)	209,52	34,92	0,04
Abrechnung Messeinrichtung (1 Jahr)	179,01	29,84	0,03
Zählermiete (1 Jahr)	113,25	18,88	0,02
Wartung (1 Jahr)	189,00	31,50	0,04
Heizungswasseranalyse (1 Jahr)	32,50	5,42	0,01
Gesamtkosten (netto) (39787 kWh)	3.767,58	627,93	0,72
Heizkosten (netto) (16709 kWh)	1.582,24	263,71	0,30
Warmwasserkosten (netto) (23078 kWh)	2.185,35	364,22	0,42

Tab. 18 Übersicht Betriebskosten Haus 3 „Fernwärme“ - JAHR 2

Haus 3	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² _{WNF} [€]
Fernwärme Arbeitspreis (5,97c/kWh)	2.160,87	360,15	0,41
Fernwärme Leistungspreis (1 Jahr)	516,00	86,00	0,10
Fernwärme Messpreis (1 Jahr)	180,85	30,14	0,03
Hilfsstrom Heizung (1 Jahr)	160,59	26,77	0,03
Abrechnung Messeinrichtung (1 Jahr)	183,60	30,60	0,03
Zählermiete (1 Jahr)	116,40	19,40	0,02
Wartung (1 Jahr)	189,00	31,50	0,04
Heizungswasseranalyse (1 Jahr)	32,50	5,42	0,01
Gesamtkosten (netto) (36196 kWh)	3.539,81	589,97	0,67
Heizkosten (netto) (13009 kWh)	1.272,19	212,03	0,24
Warmwasserkosten (netto) (23187 kWh)	2.267,62	377,94	0,43

Trotz leicht gestiegener Kosten bei der Fernwärme sind aufgrund des niedrigeren Energieverbrauchs im Jahr 2 die Gesamtkosten für Heizung und Warmwasser um 6% gesunken.

Aufgrund des im Wohngebäude mit Fernwärmeanschluss wesentlich höheren Warmwasserverbrauchs im Vergleich zum Infrarotbeheizten Gebäudes wurde der Warmwasserverbrauch auf einen mittleren Verbrauch normiert. In der nachfolgenden Tabelle werden die Betriebskosten für den normierten Warmwasserverbrauch dargestellt.

Da sich durch die Umrechnung auf einen niedrigeren Warmwasserverbrauch auch die Anteile von Warmwasserenergie zu Heizenergie ändern, verschiebt sich dadurch ein Teil der Warmwasser-Fixkosten zu den Heizenergie-Fixkosten.

In den beiden nachfolgenden Tabellen werden die Kosten bei einem normierten Warmwasserverbrauch dargestellt.

Tab. 19 Übersicht Betriebskosten Haus 3 „Fernwärme“. (normierter Warmwasserverbrauch) - JAHR 1

Haus 3	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² WNF [€]
Fernwärme Arbeitspreis (5,9c/kWh)	2.046,31	341,05	0,39
Fernwärme Leistungspreis (1 Jahr)	516,00	86,00	0,10
Fernwärme Messpreis (1 Jahr)	180,85	30,14	0,03
Hilfsstrom Heizung (1 Jahr)	209,52	34,92	0,04
Abrechnung Messeinrichtung (1 Jahr)	179,01	29,84	0,03
Zählermiete (1 Jahr)	113,25	18,88	0,02
Wartung (1 Jahr)	189,00	31,50	0,04
Heizungswasseranalyse (1 Jahr)	32,50	5,42	0,01
Gesamtkosten (netto) (34683 kWh)	3.466,44	577,74	0,66
Heizkosten (netto) (16709 kWh)	1.670,00	278,33	0,32
Warmwasserkosten (netto) (17974 kWh)	1.796,44	299,41	0,34

Tab. 20 Übersicht Betriebskosten Haus 3 „Fernwärme“. (normierter Warmwasserverbrauch) - JAHR 2

Haus 3	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² WNF [€]
Fernwärme Arbeitspreis (5,97c/kWh)	1.996,56	332,76	0,38
Fernwärme Leistungspreis (1 Jahr)	516,00	86,00	0,10
Fernwärme Messpreis (1 Jahr)	180,85	30,14	0,03
Hilfsstrom Heizung (1 Jahr)	160,59	26,77	0,03
Abrechnung Messeinrichtung (1 Jahr)	183,60	30,60	0,03
Zählermiete (1 Jahr)	116,40	19,40	0,02
Wartung (1 Jahr)	189,00	31,50	0,04
Heizungswasseranalyse (1 Jahr)	32,50	5,42	0,01
Gesamtkosten (netto) (33443 kWh)	3.375,50	562,58	0,64
Heizkosten (netto) (13009 kWh)	1.312,98	218,83	0,25
Warmwasserkosten (netto) (20435 kWh)	2.062,52	343,75	0,39

Auch die auf denselben Warmwasserverbrauch normierten Kosten sind im Jahr 2 gesunken. Die normierten Kosten sind im Jahr 2 um 2,4% niedriger.

3.9.3.2 Haus 4 (Infrarotheizung ohne PV-Anlage)

In den nachfolgenden Tabellen wird die Zusammenstellung der Betriebskosten für Heizung- und Warmwasserbereitung im Haus 4 mit Infrarotheizung gezeigt. Es fallen bei der Infrarotheizung keine zusätzlichen Fixkosten (Grundgebühr) an, d.h. der Stromanschluss wird als ohnehin vorhanden angenommen und deshalb nicht berücksichtigt.

Die angewendeten Stromtarife wurden einer Wohnungsabrechnung der Energie-Steiermark entnommen, da der Großteil der Wohnungen von diesem Stromanbieter beliefert wird.

Die Gesamtkosten sind im Jahr2 um 3,3% leicht angestiegen. Die Heizkosten sind im Jahr1 und Jahr2 ident geblieben. Der Warmwasserverbrauch war im Jahr1 wesentlich höher als im Jahr2, der Anstieg der Gesamtkosten ist daher ausschließlich auf den höheren Warmwasserverbrauch zurückzuführen.

Tab. 21 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – ohne PV-Anlage - JAHR 1

Haus 4	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² _{WNF} [€]
Energieentgelte (6,20c)	1.261,64	210,27	0,24
Netzentgelte (5,12c)	1.041,87	173,65	0,20
Steuern und Abgaben (2,87c)	584,02	97,34	0,11
Gesamtkosten (netto) (20349 kWh)	2.887,53	481,26	0,55
Heizkosten (netto) (13377 kWh)	1.898,24	316,37	0,36
Warmwasserkosten (netto) (6972 kWh)	989,29	164,88	0,19

Tab. 22 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – ohne PV-Anlage - JAHR 2

Haus 4	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² _{WNF} [€]
Energieentgelte (6,71c)	1.403,18	233,86	0,27
Netzentgelte (5,31c)	1.110,42	185,07	0,21
Steuern und Abgaben (2,24c)	468,42	78,07	0,09
Gesamtkosten (netto) (20912 kWh)	2.982,02	497,00	0,57
Heizkosten (netto) (13338 kWh)	1.902,03	317,01	0,36
Warmwasserkosten (netto) (7574 kWh)	1.079,99	180,00	0,21

In der nachfolgenden Tabelle werden für Vergleichszwecke die Betriebskosten bei normiertem Warmwasserverbrauch dargestellt.

Tab. 23 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – ohne PV-Anlage. (normierter Warmwasserverbrauch) - JAHR 1

Haus 4	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² WNF [€]
Energieentgelte (6,20c)	1.433,06	238,84	0,27
Netzentgelte (5,12c)	1.183,43	197,24	0,23
Steuern und Abgaben (2,87c)	663,37	110,56	0,13
Gesamtkosten (netto) (23114 kWh)	3.279,87	546,64	0,62
Heizkosten (netto) (13377 kWh)	1.898,24	316,37	0,36
Warmwasserkosten (netto) (9737 kWh)	1.381,62	230,27	0,26

Tab. 24 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – ohne PV-Anlage. (normierter Warmwasserverbrauch) - JAHR 2

Haus 4	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² WNF [€]
Energieentgelte (6,71c)	1.482,28	247,05	0,28
Netzentgelte (5,31c)	1.173,01	195,50	0,22
Steuern und Abgaben (2,24c)	494,83	82,47	0,09
Gesamtkosten (netto) (22091 kWh)	3.150,12	525,02	0,60
Heizkosten (netto) (13338 kWh)	1.902,03	317,01	0,36
Warmwasserkosten (netto) (8752 kWh)	1.248,09	208,02	0,24

Der normierte Warmwasserverbrauch war im Jahr 1 höher als im Jahr 2 (93,74 m³ zu 89,53 m³). Aufgrund dessen waren auch die Warmwasserkosten und die Gesamtkosten niedriger als im Jahr 1.

3.9.3.3 Haus 4 (Infrarotheizung mit PV-Anlage)

In den nachfolgenden Tabellen wird die Zusammenstellung der Betriebskosten für Heizung- und Warmwasserbereitung im Haus 4 mit Infrarotheizung gezeigt. Es fallen bei der Infrarotheizung keine zusätzlichen Fixkosten (Grundgebühr) an, d.h. der Stromanschluss wird als ohnehin vorhanden angenommen und deshalb nicht berücksichtigt.

Die angewendeten Stromtarife wurden einer Wohnungsabrechnung der Energie-Steiermark entnommen, da der Großteil der Wohnungen von diesem Stromanbieter beliefert wird.

Der Energieverbrauch für die Heizung ist im ersten und im zweiten Jahr annähernd ident. Im Jahr 2 war aber die Eigendeckung von der PV-Anlage höher als im Jahr 1. Die Kosten für die Heizung sind dadurch um 6,2% gesunken.

Aufgrund des höheren Warmwasserverbrauchs sind die Kosten für die Warmwasserbereitung gestiegen. Durch die bessere PV-Eigendeckung wurde der Kostenanstieg aber abgedämpft.

Tab. 25 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – mit PV-Anlage - JAHR 1

Haus 4	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² _{WNF} [€]
Energieentgelte (6,20c)	1.074,75	179,12	0,20
Netzentgelte (5,12c)	887,53	147,92	0,17
Steuern und Abgaben (2,87c)	497,50	82,92	0,09
Gesamtkosten (netto) (17335 kWh)	2.459,78	409,96	0,47
Heizkosten (netto) (11308 kWh)	1.604,57	267,43	0,31
Warmwasserkosten (netto) (6027 kWh)	855,22	142,54	0,16

Tab. 26 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – mit PV-Anlage - JAHR 2

Haus 4	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² _{WNF} [€]
Energieentgelte (6,71c)	1.127,92	187,99	0,21
Netzentgelte (5,31c)	892,58	148,76	0,17
Steuern und Abgaben (2,24c)	376,53	62,76	0,07
Gesamtkosten (netto) (16809 kWh)	2.397,03	399,51	0,46
Heizkosten (netto) (10550 kWh)	1.504,45	250,74	0,29
Warmwasserkosten (netto) (6259 kWh)	892,58	148,76	0,17

In der nachfolgenden Tabelle werden für Vergleichszwecke die Betriebskosten bei normiertem Warmwasserverbrauch dargestellt.

Tab. 27 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – mit PV-Anlage. (normierter Warmwasserverbrauch) - JAHR 1

Haus 4	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² WNF [€]
Energieentgelte (6,20c)	1.222,94	203,82	0,23
Netzentgelte (5,12c)	1.009,91	168,32	0,19
Steuern und Abgaben (2,87c)	566,10	94,35	0,11
Gesamtkosten (netto) (19725 kWh)	2.798,95	466,49	0,53
Heizkosten (netto) (11308 kWh)	1.604,57	267,43	0,31
Warmwasserkosten (netto) (8417 kWh)	1.194,38	199,06	0,23

Tab. 28 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – mit PV-Anlage. (normierter Warmwasserverbrauch - JAHR 2

Haus 4	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatl. Kosten je m ² WNF [€]
Energieentgelte (6,71c)	1.193,29	198,88	0,23
Netzentgelte (5,31c)	944,32	157,39	0,18
Steuern und Abgaben (2,24c)	398,36	66,39	0,08
Gesamtkosten (netto) (17784 kWh)	2.535,97	422,66	0,48
Heizkosten (netto) (10550 kWh)	1.504,45	250,74	0,29
Warmwasserkosten (netto) (7234 kWh)	1.031,52	171,92	0,20

Bei einem ähnlich normierten Warmwasserverbrauch in Jahr 1 und Jahr 2 (93,74 m³ und 89,53 m³) sind die Kosten im Jahr 2 um 9,4% gefallen. Das ist noch wesentlich mehr als beim System ohne PV Anlage. Im Jahr 2 war die Eigendeckung für Warmwasser und Heizung wesentlich besser als im Jahr 1.

Vergleichsdarstellung Heizkosten

Die Heizkosten sind bei den mit Fernwärme beheizten Wohnungen geringer, als bei der fiktiven Variante ohne Photovoltaik-Anlage. Dieser Unterschied ist im Jahr 2 noch deutlich stärker.

Die Variante mit der Berücksichtigung der PV-Eigennutzung hat im Jahr 1 etwa dieselben Heizkosten (+1,4%) wie das mit Fernwärme beheizte Objekt. Im Jahr 2 lagen die Heizkosten des elektrischen beheizten Objekts um 18,3% höher. Der Energieverbrauch in den IR-Wohnungen war im Jahr 2 in etwa gleich wie im Jahr 1. Aufgrund einer höheren Eigendeckung der PV Anlage für den Heizungsstrom sind die Heizkosten bei der Variante mit PV-Eigennutzung im Jahr 2 dennoch leicht gesunken. Beim mit Fernwärmewärme beheizten Objekt sind diese im zweiten Messjahr jedoch deutlich mehr gesunken.

Die Fixkosten bilden einen hohen Anteil der Kosten der Beheizung mit Fernwärme, während die Kosten Infrarotheizung verbrauchsgebunden sind. Das untersuchte Wohngebäude hat einen relativ geringen Heizwärmebedarf von 28 kWh/m²(BGF) im Jahr. Bei höherem Heizwärmebedarf wäre entsprechend die Beheizung mit Fernwärme günstiger, bei geringerem Heizwärmebedarf würden relativ gesehen die Kosten Infrarot-Heizsystems sinken.

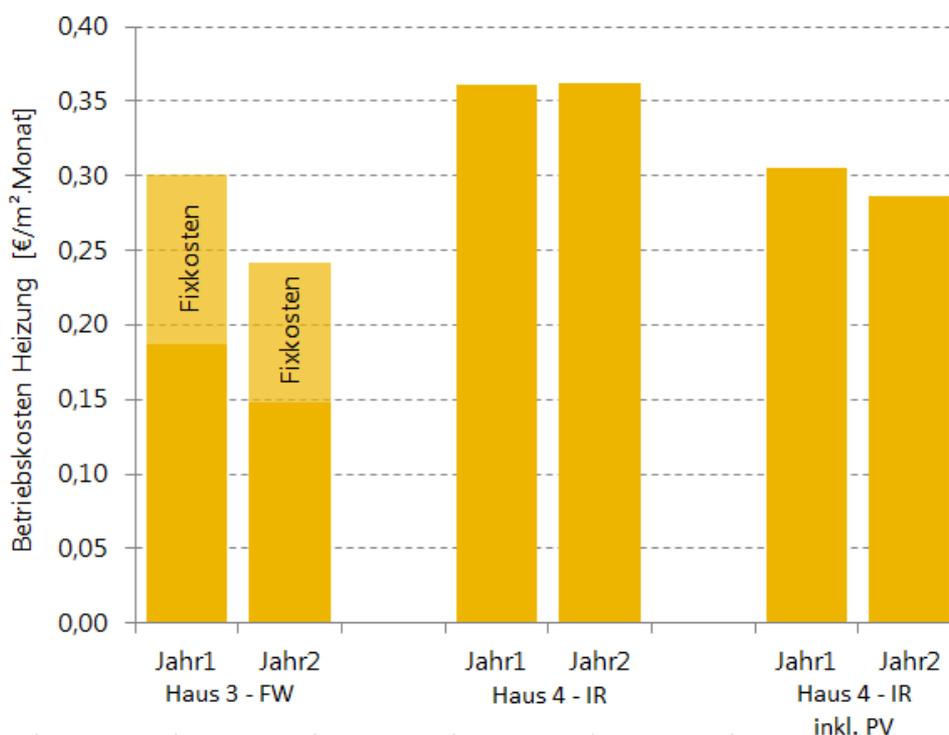


Abb. 125 Vergleich der Heizkosten.
spezifische Kosten je m² und Monat gezeigt für Jahr1 und Jahr2

Warmwasserbereitung

Die Kosten für die Warmwasserbereitung sind beim Wohngebäude mit Fernwärmeanschluss am höchsten. Hier haben die Fixkosten (Grundgebühr) einen großen Anteil an den Gesamtkosten. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die Kosten auf einen Kubikmeter Warmwasser bezogen.

Im Wohngebäude mit der Warmwasserversorgung über Fernwärme sind der Warmwasserverbräuche vom Jahr 1 zum Jahr 2 gesunken. Die relativen Kosten bezogen auf einen Kubikmeter Warmwasser sind dadurch aber gestiegen. Im Wohngebäude mit der elektrischen Warmwasserbereitung sind die Warmwasserverbräuche hingegen gestiegen, die relativen Kosten sind daher gesunken.

Insgesamt liegen die Kosten für die Warmwasserbereitung mit Fernwärme aufgrund der hohen Verluste deutlich über jenen der elektrischen Warmwasserbereitung. Signifikant sind hier vor allem die Verluste außerhalb der Heizperiode, da diese dann gänzlich der Warmwasserbereitung zugeschrieben werden müssen. In dieser Zeit wäre eine Kombination mit Solarthermie oder elektrischer Warmwasserbereitung mit PV-Strom wirtschaftlich sinnvoller.

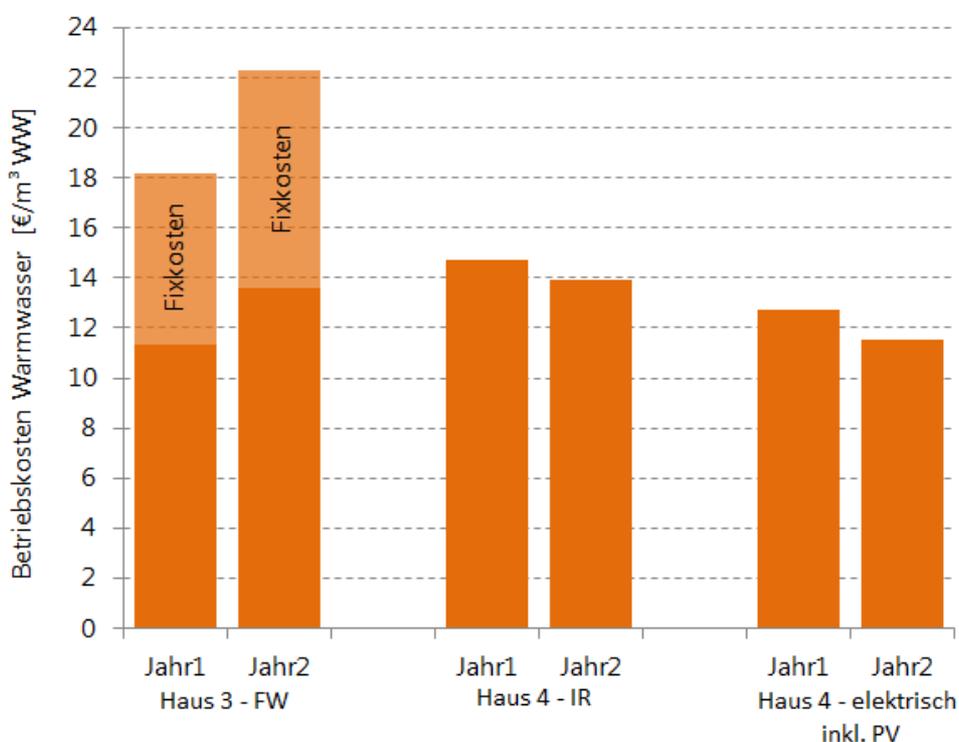


Abb. 126 Vergleich der spezifischen Warmwasserkosten.
spezifische Kosten je m³ gezeigt für Jahr1 und Jahr2

Heizung und Warmwasserbereitung

Die Wohnungen mit Fernwärmeanschluss haben in etwa dieselben Betriebskosten für Warmwasser und Heizung wie die Wohnungen mit Infrarotheizung und elektrischer Warmwasserbereitung (-5,4% und -6,9%). Bei Berücksichtigung der PV-Eigennutzung sind die Betriebskosten beim Infrarot-Objekt geringer als bei den beiden anderen Varianten (-19,3% und -24,9%). Ausschlaggebend für die höheren Kosten beim Fernwärmesystem sind die hohen Verluste bei der Warmwasserbereitung.

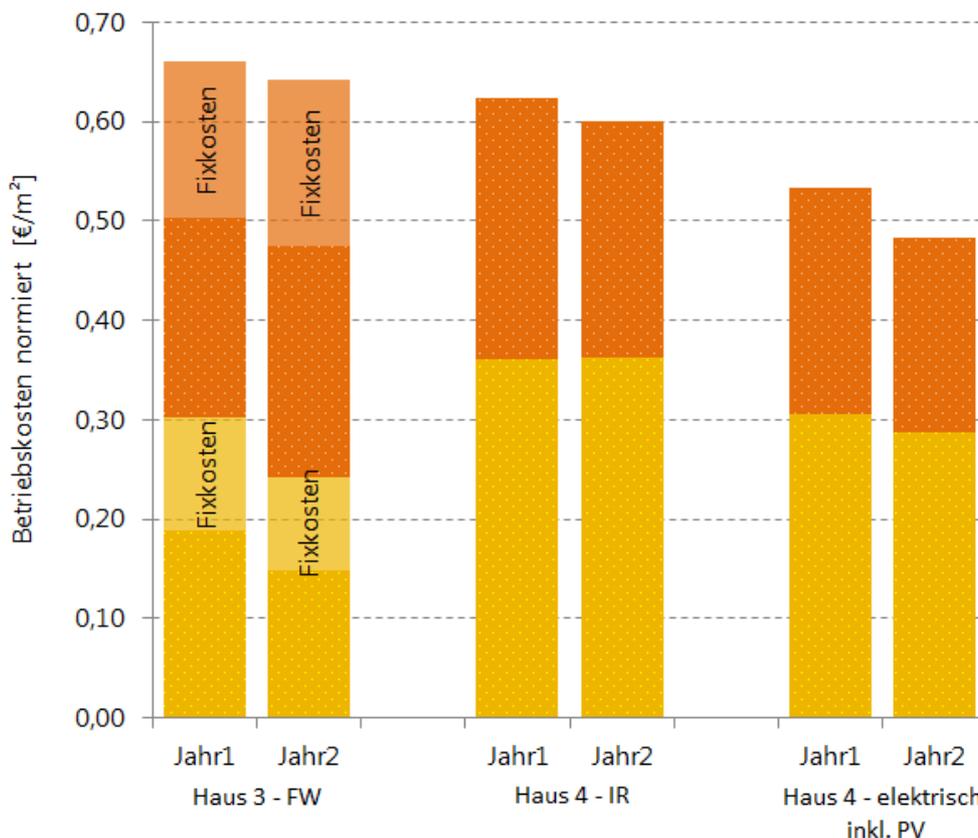


Abb. 127 Vergleich der Betriebskosten für Heizung und Warmwasser
spezifische Kosten je m² und Monat bei normierten Warmwasserverbrauch gezeigt für Jahr1 und Jahr2

Unterschiede bezüglich der Abrechnung

Hinsichtlich der Abrechnung in den beiden Objekten ist zu bemerken, dass es bezüglich der Verrechnung für die einzelnen Parteien Unterschiede gibt. Beim Fernwärme gespeisten Objekt sind entsprechend dem österreichischen Heizkostenabrechnungsgesetz sind 25 bis 45 % der Kosten (i.d.R. 35 %) als verbrauchsunabhängige Kosten entsprechend der Nutzflächen aufzuteilen. Beim elektrisch beheizten Objekt trägt naturgemäß jede Partei die verbrauchsabhängigen Kosten welche aufgrund des Strombedarfs in der Wohnung anfallen. Ein verbrauchsunabhängiger Sockel existiert somit hier nicht (so ferne keine beheizten Allgemeinflächen bestehen). Vom bauphysikalischen Standpunkt her ist ein flächenbezogener, gemeinsamer Sockelbetrag sinnvoll, da die thermische Gebäudehülle jeweils alle Wohnungen gemeinsam umschließt und es deshalb zu einem Wärmeaustausch zwischen den Wohnungen kommt. Wohnungstrennwände und Zwischendecken innerhalb des Gebäudes weisen einen deutlich geringeren Dämmwert auf, während hingegen der Flächenanteil dieser Flächen in der Regel maßgeblich höher ist als jener der Außenwände. Dies bedeutet, dass es bei ungleichmäßig gewählten Temperaturen und insbesondere etwa bei nicht beheizten Wohnungen zu einem signifikanten Energieaustausch unter den Wohnungen kommt. Ebenso führen auch die Lokalisierung und Geometrie der Wohnung innerhalb des Objekts zu Abweichungen des Heizwärmebedarfs (wie auch in dieser Studie gezeigt wurde). Diese Effekte können mit nur wohnungsweiser, verbrauchsabhängiger Abrechnung nicht abgebildet werden.

3.9.4 Wirtschaftlichkeitsabschätzung – 30 Jahre Zyklus

Zur effizienten Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden das Berechnungstool **econ calc V3**, welches vom Energieinstitut Vorarlberg, mit Unterstützung von klima:aktiv, sowie der IG Passivhaus Österreich, entwickelt wurde, herangezogen.

Aus Ressourcengründen, und infolge der wenig detaillierten verfügbaren Ausgangsdaten, konnte lediglich eine grobe Berechnung durchgeführt werden. Bei der Untersuchung wurden ausschließlich die für den Vergleich relevanten Komponenten Heizung, Sanitär, Elektroninstallation und Photovoltaik berücksichtigt.

Die Gesamtkosten für die Infrarot-Heizung wurden indirekt durch Vergleich mit den Elektroinstallationskosten der Fernwärme-Wohnung ermittelt. Da die Wohnungen ansonsten baugleich waren, ist dieser Ansatz zweckmäßig.

Hinsichtlich der technischen Lebensdauer der Komponenten konnten nur pauschale Werte für die einzelnen Kategorien angesetzt werden. Diese basieren auf üblichen Richtwerten, wie sie etwa in der Richtlinie VDI 2067 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ aufgelistet sind.

Betreffend der Wartungskosten und Lebensdauer der Infrarot-Heizsysteme (Paneele und Regelungskomponenten) konnten ebenfalls nur Schätzungen vorgenommen werden. Auf Grund der Neuheit der Produkte existieren hier noch keine zuverlässigen Daten, bzw. objektive Quellen.

Tab. 29 Festgelegte Parameter hinsichtlich der Kosten und Lebensdauer der einzelnen Komponenten

Komponente	Herstellungskosten [€]	Wartung	Techn. Lebensdauer	Haus 3 FW	Haus 4 IR	Haus 4 IR/PV
HLS ex Heizung	5.143,54	1,0%	30	X	X	X
HLS Heizung	6.593,99	2,0%	30	X		
Fernwärme-Anschluss	1.838,22	0,0%	-	X		
Elektroinst. ex Heizung	5.926,55	0,5%	40	X	X	X
Elektroinst. Heizung/IR	7.000,20	0,5%	25		X	X
Elektroinst. PV	4.443,75	1,0%	25			X

Aus heutiger Sicht die volkswirtschaftlichen Randbedingungen und Preissteigerungen für die nächsten 30 Jahre festzulegen stellt eine schwierige Aufgabe dar. Die hier zu treffenden Annahmen beeinflussen jedoch naturgemäß massiv die Resultate der Wirtschaftlichkeitsanalyse. Auf Basis der Daten des letzten Jahrzehnts und der derzeit üblichen Bewertungen, wurden als konservative Annahme die folgenden Festlegungen getroffen.

Tab. 30 Festgelegte Parameter hinsichtlich Kosten und Lebensdauer der einzelnen Komponenten

Betrachtungszeitraum	30 Jahre
Inflationsrate	2%
Eigenkapitalzinssatz	2%
Kapitalzinssatz	2%
Energiepreissteigerung FW	3% (real 1%)
Energiepreissteigerung IR	3% (real 1%)
Einspeisevergütung	0,06* / 0,03 c (+3% p.a.)

*für die ersten 1000 kWh eines Jahres

Die aufgewendete Heizenergie für eine Wohnung wurde als Mittelwert der Wohnungen des jeweiligen Objekts entsprechend der tatsächlichen Verbrauchswerte berücksichtigt. Für die Mittelung der Verbrauchsdaten wurden beide Auswertejahre herangezogen. Auf gleiche Weise wurden der Photovoltaik-Eigenverbrauch und die PV-Einspeisung ermittelt. Da der Warmwasserverbrauch in beiden Objekten sehr unterschiedlich war, wurde der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung auf eine mittlere Bezugsmenge (91,6m³) skaliert - unter der Annahme gleichbleibender relativer Verluste.

Tab. 31 Energiekennwerte (Mittelung beider Jahre, gemittelter Warmwasserbezug):

Fernwärme-Whg. Heizung	34,98 kWh/m ² .a
Fernwärme-Whg. Warmwasser	42,90 kWh/m ² .a
Infrarot-Whg Heizung	30,03 kWh/m ² .a
Infrarot-Whg-Warmwasser	22,90 kWh/m ² .a
Infrarot-Whg PV-Ertrag gesamt	2343 kWh/a
Infrarot-Whg. Eigennutzung	817 kWh/a

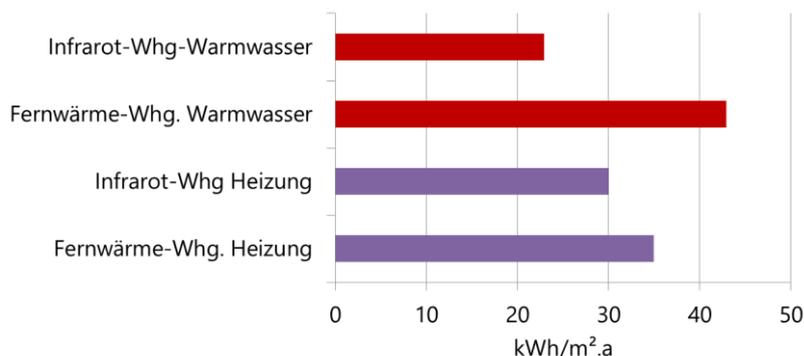


Abb. 128 Übersicht der flächenspezifischen Energieverbrauchswerte

Bezüglich der Energiepreise wurden die letztgültigen, abgerechneten Preise aus dem Jahr 2019 herangezogen. Angesetzt wurden folgenden Werte:

Tab. 32 Festgelegte Parameter hinsichtlich Energiepreise

Energietarif Fernwärme	0,0597 c/kWh
Grundgebühr Fernwärme	230 €
Energietarif Strom	0,1420 c/kWh
Grundgebühr Strom	0 €*
Einspeisevergütung	0,0602** / 0,0445 c/kWh

**für die ersten 1000 kWh eines Jahres

*im untersuchten Objekt, entstanden für den Heizstrom keine zusätzlichen Kosten, da kein spezieller Anschluss oder zusätzlicher Zähler erforderlich war. Die Grundgebühr wurde dem Haushaltsstrom zugeordnet und bei diesem Vergleich nicht berücksichtigt.

Alle genannten Preise verstehen sich netto, exklusive Umsatzsteuer.

Die Berechnung wurde jeweils bezogen auf eine Wohnung in drei Varianten durchgeführt:

- Wohnung mit Fernwärme/Radiator Heizung
- Wohnung mit Infrarot-Heizung (ohne Berücksichtigung der PV-Anlage)
- Wohnung mit Infrarot-Heizung mit PV-Anlage

Auf Basis obiger Festlegungen ergeben sich bei der Berechnung mit **econ-calc** die folgenden Annuitätswerte:

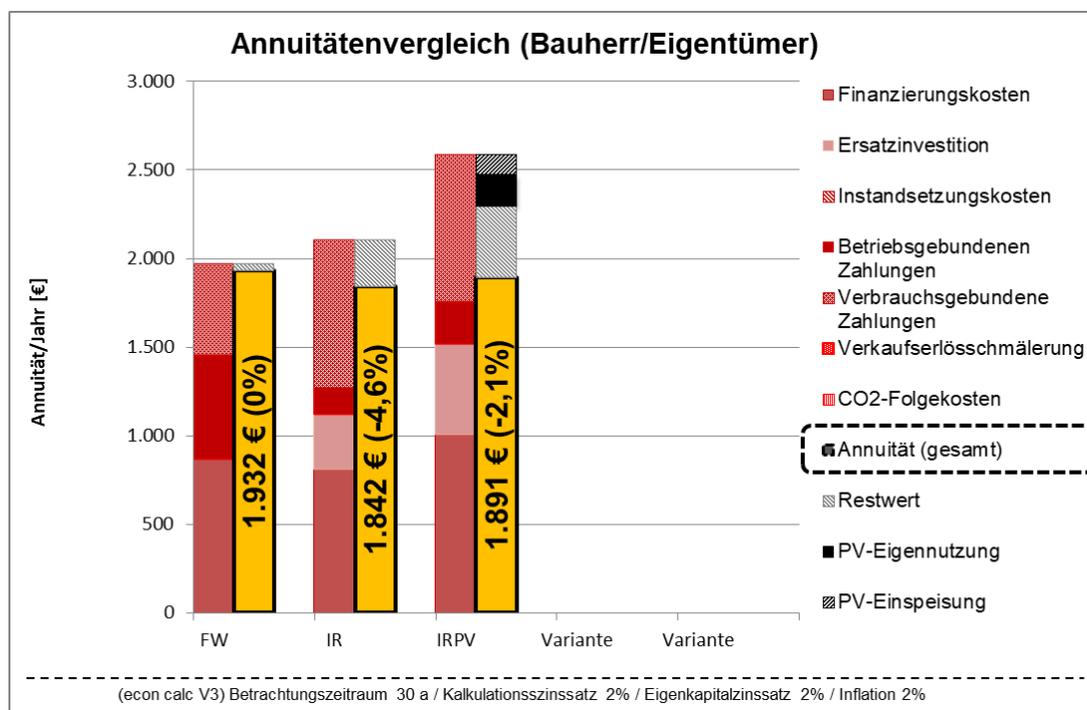


Abb. 129 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Wie zu sehen ist, ergeben sich unter den obigen Annahmen über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren nur geringe Unterschiede. Die geringsten Annuitäten fallen bei der mit Infrarot beheizten Wohnung ohne Berücksichtigung der PV-Anlage an. Hier liegen die jährlichen Zahlungen um 4,6% unter jenen der Fernwärme-Wohnung. Berücksichtigt man die PV-Anlage, so liegen die jährlichen Zahlungen um 2,1% unter jenen der Fernwärme-Wohnungen, d.h. die PV-Anlage amortisiert sich unter den getroffenen Annahmen, und ohne Berücksichtigung allfälliger Förderungen, im Betrachtungszeitraum nicht vollständig. Es ist wichtig hervorzuheben, dass bei diesem Vergleich sowohl der Energieverbrauch für Warmwasser als auch der Energieverbrauch für das Heizsystem berücksichtigt wird. Die größte Energiebezugsquelle stellt in obigem Vergleich die Warmwasserbereitung in der Fernwärme-Wohnung dar (siehe Abb. 128).

Insgesamt liegen die ermittelten Ergebnisse jedoch so nahe beieinander, dass selbst durch geringe Variation der Eingangsparameter (z.B. Energiepreissteigerungen, Zinssätze, Inflation) jeweils eine andere der drei Variante die kostengünstigste ist. Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist deshalb, dass hier im Rahmen der anzusetzenden Unsicherheiten kein klarer Vor- oder Nachteil für eine der drei Varianten erkennbar ist.

3.10 Vergleich Primärenergieverbrauch und CO₂ Äquivalente Emissionen

3.10.1 Übersicht Berechnungsmethodik

Die Berechnung des Primärenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen wurde bei dieser Auswertung zweifach durchgeführt. Im ersten Ansatz („ÖKOBILANZ“) wurden die exakte stündliche Stromzusammensetzung im österreichischen Netz inklusiver aller Importe und Export berücksichtigt. Die jeweiligen Energiequellen wurden auf Basis des schweizerischen Ökobilanz-Verfahrens bewertet.

Im zweiten Ansatz („OIB“) wurden für die Bewertung der Energiequellen die Konversionsfaktoren, welche als Monatswerte in den Erläuterungen zur Richtlinie 6 (2019) des Österreichischen Instituts für Bautechnik veröffentlicht sind herangezogen.

Qualitativ zeigen sich bei beiden Berechnungsansätzen ähnliche Ergebnisse, quantitativ liegen die mit dem ÖKOBILANZ-Verfahren erzielten Werte durchwegs höher.

Die Gründe für diese systematische Abweichung sind nachfolgend beschrieben:

- Für die Bewertung der Fernwärme steht nach OIB nur der Wert „Fernwärme erneuerbar“ zur Verfügung, die Art der Fernwärmeerzeugung (Heizkraftwerk Holz) kann bei diesen Verfahren nicht berücksichtigt werden.
- Die vom OIB ermittelten Monatswerte liegen tendenziell tiefer, als die von uns ermittelten Werte. Dies begründet sich eventuell durch einen anderen Auswerteansatz, oder durch die Wahl des Mittelungszeitraums.
- Beim OIB-Ansatz können zeitlich höheraufgelöste Effekte (Tageschwankungen etc.) nicht abgebildet werden.
- Beim OIB-Ansatz kann die konkrete Klimasituation nicht berücksichtigt. Bei Wetterlagen mit geringen Außentemperaturen und/oder geringer solarer Einstrahlung steigt der Strombedarf an und die Stromzusammensetzung hinsichtlich der Umweltauswirkungen wird tendenziell ungünstiger. Dieser Korrelationseffekt kann mit Monatsmittelwerten, welche über einen Zeitraum von mehreren Jahren bestimmt wurden naturgemäß nicht abgebildet werden. Bei der von uns durchgeführten Auswertung unter Verwendung der Ökobilanz-Faktoren wurde über die gesamten beiden Jahre eine stündliche Bewertung vom Strommix erstellt. Dies führt naturgemäß zu genaueren, und mitunter stark abweichenden Ergebnissen.

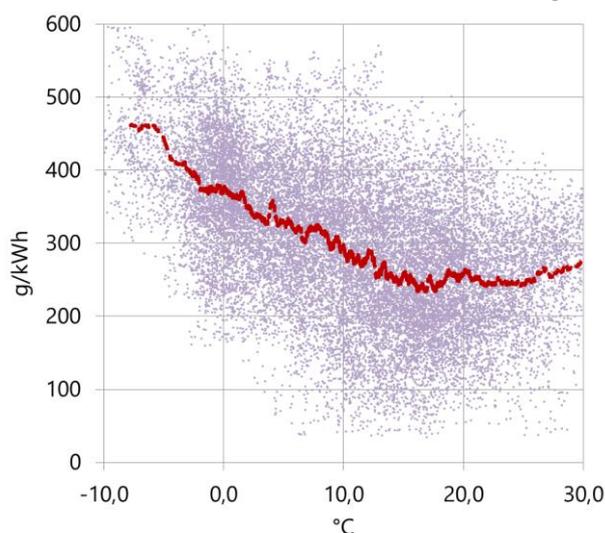


Abb. 130 Treibhausgasemissionsfaktor österr. Netz über Außentemperatur am Standort Kaindorf an der Sulm (Auswertejahr 2)

In der obigen Abbildung ist gut ersichtlich, dass es eine signifikante Korrelation zwischen den lokalen Außentemperaturen und der Stromzusammensetzung im österreichischen Netz gibt. Dieser kann mittels der Monatswerte des OIB-Ansatzes nur bedingt abgebildet werden.

3.10.2 Methodik und Analyse Strommix Österreich – ÖKOBILANZ-Faktoren

Bei der Berechnung des Primärenergieverbrauchs, bzw. der CO₂ Äquivalent-Emission existieren unterschiedliche Ansätze, welche zu abweichenden Ergebnissen führen. In dieser Untersuchung werden die Primärenergie- und Emissionsfaktoren, welche im schweizerischen Ökobilanz-Verfahren Anwendung finden herangezogen. Diese beinhalten einen umfassenden Datensatz, welcher unter der Federführung von Dr. Rolf Frischknecht fortwährend aktualisiert wird.¹

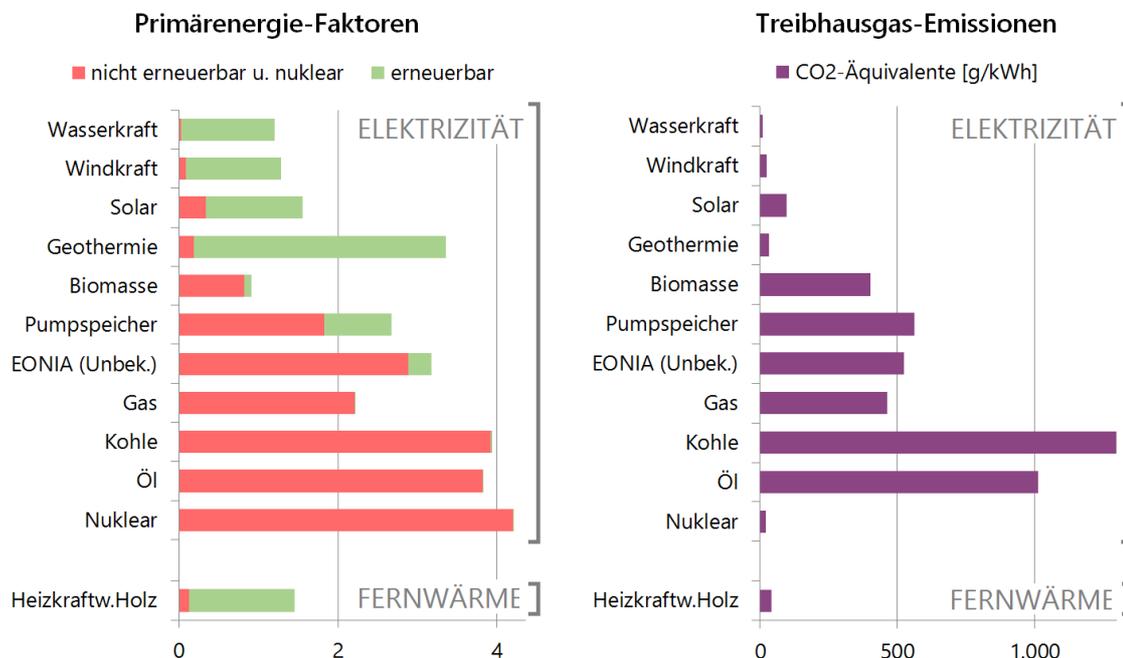


Abb. 131 Angewendete Umweltfaktoren gemäß KBOB-Ökobilanzdatenbestand (CH)

Bei dieser Aufstellung wird die Verstromung der einzelnen Energiequellen explizit berücksichtigt. Dies ist wichtig, da hierbei Transport und allfällige Hilfsenergiequellen ebenfalls berücksichtigt werden. Obwohl die Werte explizit für die Schweiz gelten, können diese weitgehend auch für Österreich übernommen werden. Lediglich zur Bewertung der Umweltfaktoren des Pumpspeichers wurde abweichend zu den Angaben der schweizerischen Ökobilanzierung der jeweilige österreichische Strommix exklusive Pumpspeicher herangezogen und ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 75% angenommen. Auf diese Weise entstehen für Österreich günstigere Werte, da der Schweizer Energiemix einen ungleich höheren Anteil an Nuklearstrom aufweist.

Da die Stromzusammensetzung jahreszeitlich stark variiert und der Anteil der erneuerbaren Energieträger insbesondere in der Heizperiode geringer ist, wurde eine Auswertung auf Stundenbasis für den gesamten Zeitraum durchgeführt. Für die aktuell zu bewertende Stromzusammensetzung („Strommix“) wurden zeitlich hochaufgelöste Daten von *electricitymap.org* bezogen. Diese basieren auf Daten der Vereinigung der europäischen Netzbetreiber *ENTSO-E*. Bei der Berechnung des Verbrauchermix werden auch die aktuellen Stromimporte bzw. -exporte berücksichtigt. Bewertet werden diese nach dem sogenannten Kupferplattenmodell, bei welchem sich die Zusammensetzung des Import- bzw. Exportstroms jeweils aus dem Erzeugermix des jeweiligen Produktionslandes ergibt. Es existieren auch andere Berechnungsansätze. Der von uns verwendete Ansatz ist jedoch etabliert und physikalisch plausibel. Die Elektrizitätsnetze sind physikalisch verbunden und zum Ausgleich der aktuellen Kapazitäten von Stromimporten bzw. -exporten abhängig. Berechnungen bei welchen nur erneuerbare Energiequellen zugeordnet werden sind für die eine Berechnung der

¹ siehe https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/publikationen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html

Umweltauswirkungen zu hinterfragen. Erstens wäre hierfür eine zwingende zeitliche Übereinstimmung zwischen Bezug und Produktion notwendig und zweitens die strikte Trennung der unterschiedlichen Energiequellen am Strommarkt.

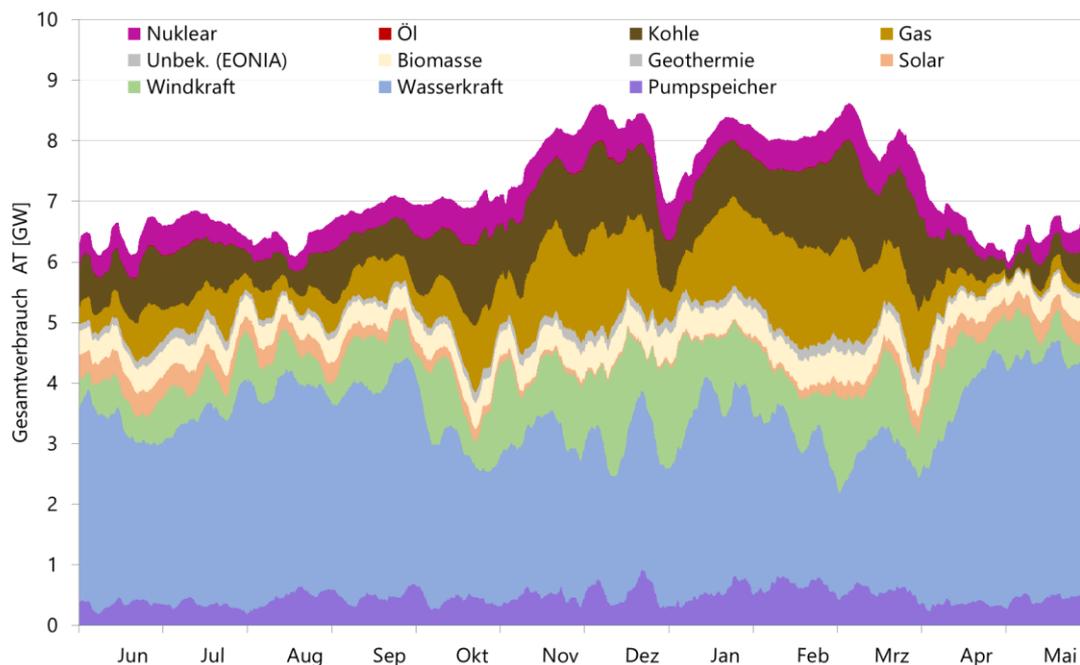


Abb. 132 Zusammensetzung des österreichischen Verbraucherstrommix für das Auswertejahr 1 (17/18)

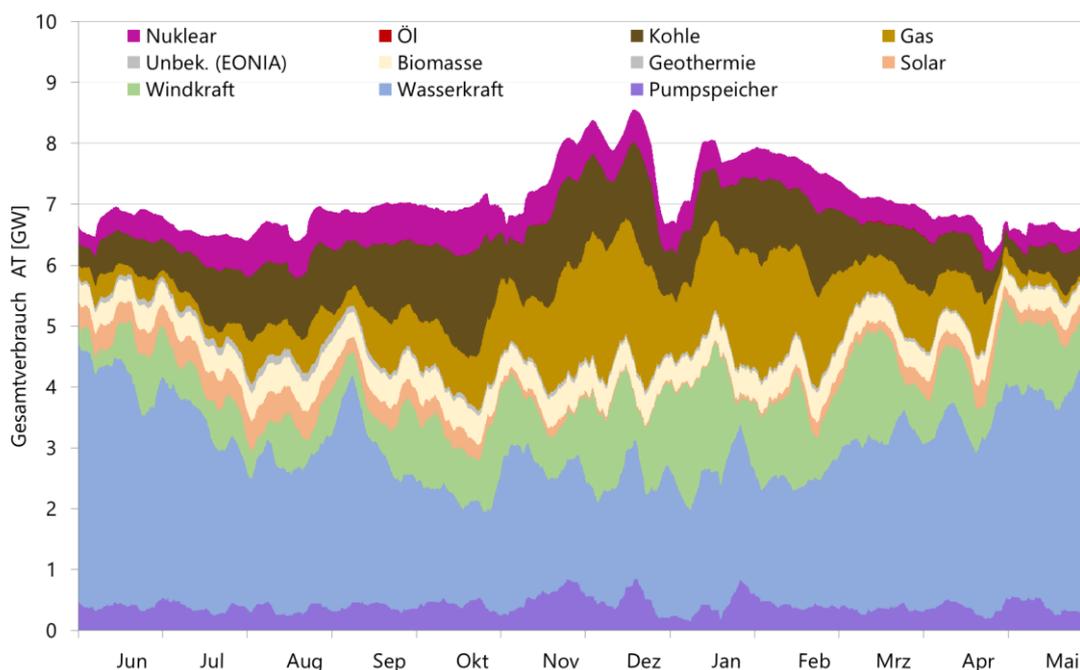


Abb. 133 Zusammensetzung des österreichischen Verbraucherstrommix für das Auswertejahr 2 (18/19)

Anmerkung: zur besseren Veranschaulichung der jahreszeitlichen Abhängigkeiten wurde in den obigen Darstellungen eine Glättung der einzelnen Komponenten mit Hilfe eines gleitenden Mittelwerts mit Periodendauer 168 Stunden durchgeführt. Es existieren auch sehr kurzfristige Schwankungen der Zusammensetzung, diese lassen sie jedoch in einem Jahresdiagramm nicht darstellen.

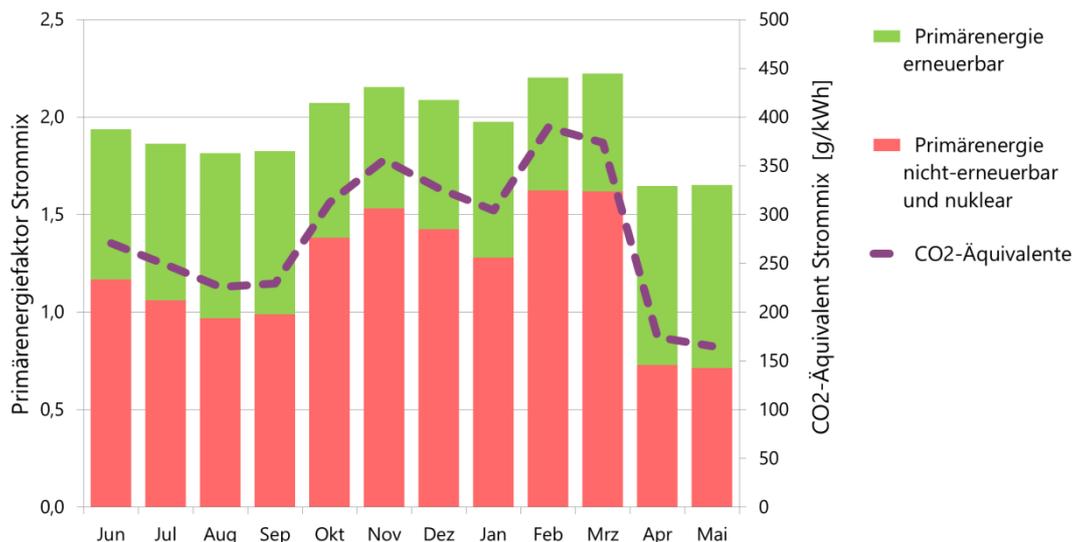


Abb. 134 Monatliche Mittelwerte für den Primärenergie-Aufwand, die PE-Zusammensetzung und die CO₂-Äquivalenten Treibhausgasemissionen für den österr. Netzstrom – JAHR 1

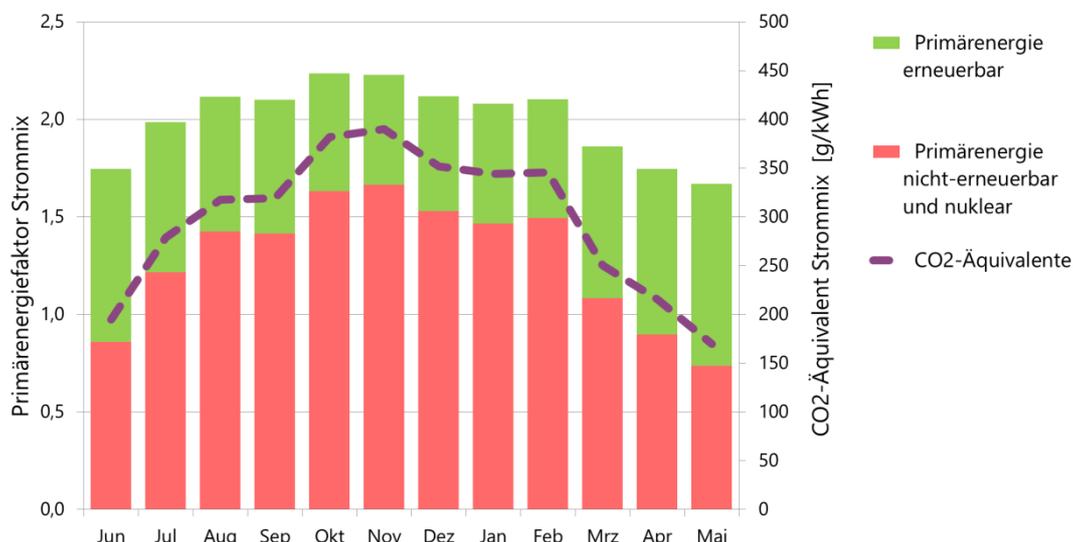


Abb. 135 Monatliche Mittelwerte für den Primärenergie-Aufwand, die PE-Zusammensetzung und die CO₂-Äquivalenten Treibhausgasemissionen für den österr. Netzstrom – JAHR 2

Wie in obigen Abbildungen zu sehen, ist der Anteil der nicht-erneuerbaren bzw. nuklearen Energieträger insbesondere in der kalten Jahreszeit noch immer sehr hoch. Grund hierfür sind einerseits der höhere Bedarf, und andererseits die, saisonal bedingt, geringeren Erträge bei den erneuerbaren Quellen.

Zur Veranschaulichung der Zusammensetzung des für den Heizbedarf relevanten Stroms wurde eine Auswertung für einen charakteristischen Heiztag generiert. Hierfür wurde für den gesamten Auswertungszeitraum eine Mittelung der tageszeitlich Verläufe auf Basis der Heizgrad-Zahlen durchgeführt.

Es zeigen sich hierbei eher geringe tageszeitliche Schwankungen mit Maximalwerten in der Nacht und in der Tagesmitte, insbesondere aber ein deutlich höherer Anteil der nicht-erneuerbaren und nuklearen Energieträgern (siehe Abb. 136) und ein im Vergleich zum Jahresmittelwert deutlich höherer Emissionswert für die CO₂-Äquivalente.

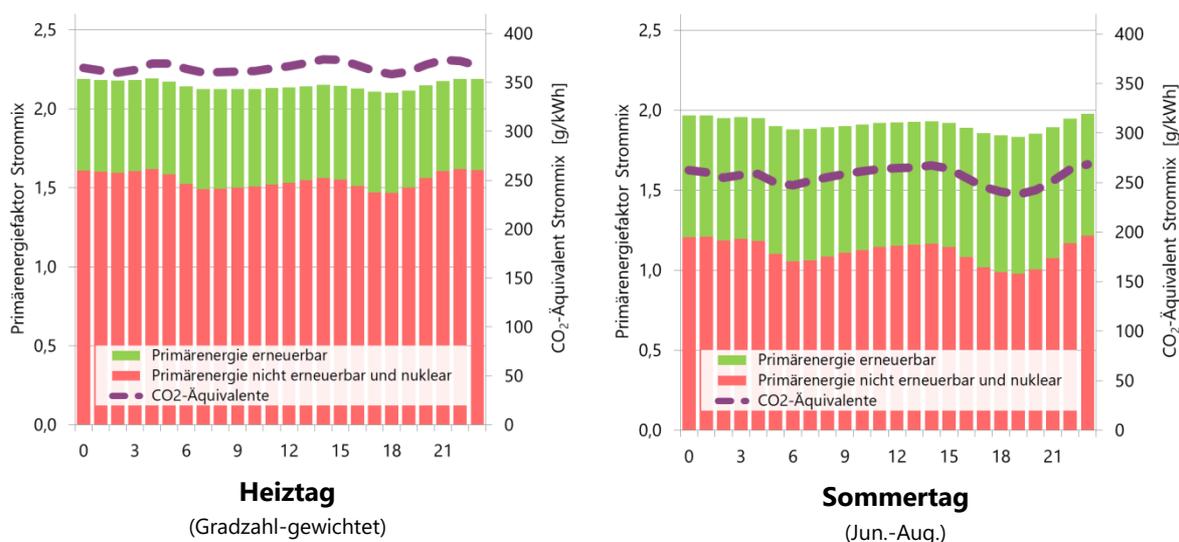


Abb. 136 Tageszeitliche Verteilung des Primärenergie-Aufwands, der PE-Zusammensetzung und Emissionen der CO₂-Äquivalente für den österr. Netzstrom an einem mittleren Heiztag (Heizgradtag-Gewichtung) bzw. Sommertag

Die oben dargestellten monatlichen und tageszeitlichen Analysen haben nur informativen Charakter. Für die Auswertung bei dieser Untersuchung wurden jeweils auf Stundenbasis die tatsächlichen aktuellen Strombezüge mit der zu diesem Zeitpunkt bezogenen Stromzusammensetzung berücksichtigt.

Anmerkung: die auf diese Weise von uns ermittelten Primärenergiefaktoren liegen ca. 15% über jenen, welche als Monatswerte im derzeit vorgeschlagenen Entwurf der OIB-Richtlinien 6 aufgelistet sind. Die Treibhausgasemissionen sind ca. 25% erhöht. Grund hierfür sind einerseits leicht abweichende Annahmen bei der Bewertung der Energiequellen, andererseits war das Jahr 2017 von sogenannten Dunkelflauten, also beinahe Totalausfällen des Wind- und Solarstroms, zu Jahresbeginn gekennzeichnet.

Für die objektspezifische Auswertung wurde auf Basis der stündlichen Verbrauchswerte jeweils der Primärenergieaufwand für erneuerbar und nicht-erneuerbar bzw. nuklear, sowie die relevanten CO₂-Äquivalentemissionen berechnet und statistisch ausgewertet. Die Auswertungen wurden jeweils wieder für die drei Varianten durchgeführt:

- Haus 3 – Fernwärme
- Haus 4 – Fernwärme: ohne Berücksichtigung der PV-Eigennutzung
- Haus 4 – Fernwärme: mit Berücksichtigung der PV-Eigennutzung

3.10.3 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Heizsystem – ÖKOBILANZ-Faktoren

Die Ergebnisse der Auswertungen sind unten dargestellt, die flächenspezifischen Angaben sind jeweils auf einen Quadratmeter Wohnnutzfläche bezogen.

Tab. 33 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Jahressummen bezogen auf den Quadratmeter Nutzfläche- Heizsystem

		Primärenergie erneuerbar [kWh/m ²]	Primärenergie nicht erneuerbar und nuklear [kWh/m ²]	Primärenergie gesamt [kWh/m ²]	CO ₂ - Äquivalente gesamt [kg/m ²]
Haus 3 FW	Jahr 1	50,7	5,0	55,7	1,65
	Jahr 2	42,3	4,1	46,4	1,37
Haus 4 IR	Jahr 1	20,2	43,4	63,6	10,26
	Jahr 2	20,0	42,4	62,4	9,95
Haus 4 IR mit PV-Eigenn.	Jahr 1	16,9	37,1	54,0	10,26
	Jahr 2	15,6	34,2	49,7	8,02

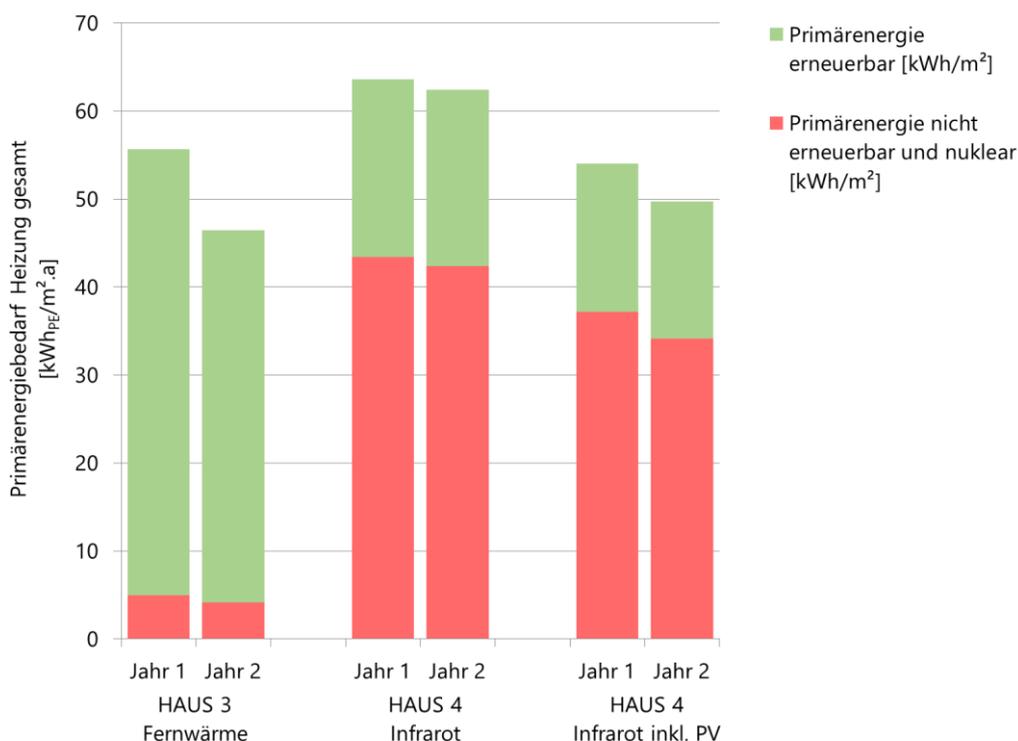


Abb. 137 Primärenergieverbrauch Heizung gesamt je Quadratmeter Wohnnutzfläche und Jahr

Um eine nutzungsunabhängige Analyse zu erhalten werden die Primärenergie-Jahressummen auf den gemessenen Energiebezug bezogen, bei der Fernwärme inklusive der Verteilverluste. Auf diese Weise lassen sich effektive Primärenergiefaktoren und Emissionsfaktoren ermitteln, welche jeweils auf eine Kilowattstunde Nutzenergie bezogen sind und so die Heizsysteme charakterisieren.

Tab. 34 Ermittelte effektive Primärenergie-Faktoren und Emissionsfaktoren für CO₂-Äquivalente - Heizsystem

		effektiver PE-Faktor erneuerbar	effektiver PE-Faktor nicht erneuerbar und nuklear	effektiver PE-Faktor gesamt	effektiver CO ₂ -Äq.-Faktor [g/kWh]
Haus 3 FW	Jahr 1	1,65	0,16	1,81	53,6
	Jahr 2	1,77	0,17	1,94	57,5
Haus 4 IR	Jahr 1	0,66	1,42	2,08	336,0
	Jahr 2	0,66	1,39	2,05	326,8
Haus 4 IR mit PV-Eigenn.	Jahr 1	0,55	1,22	1,77	336,0
	Jahr 2	0,51	1,12	1,63	263,6

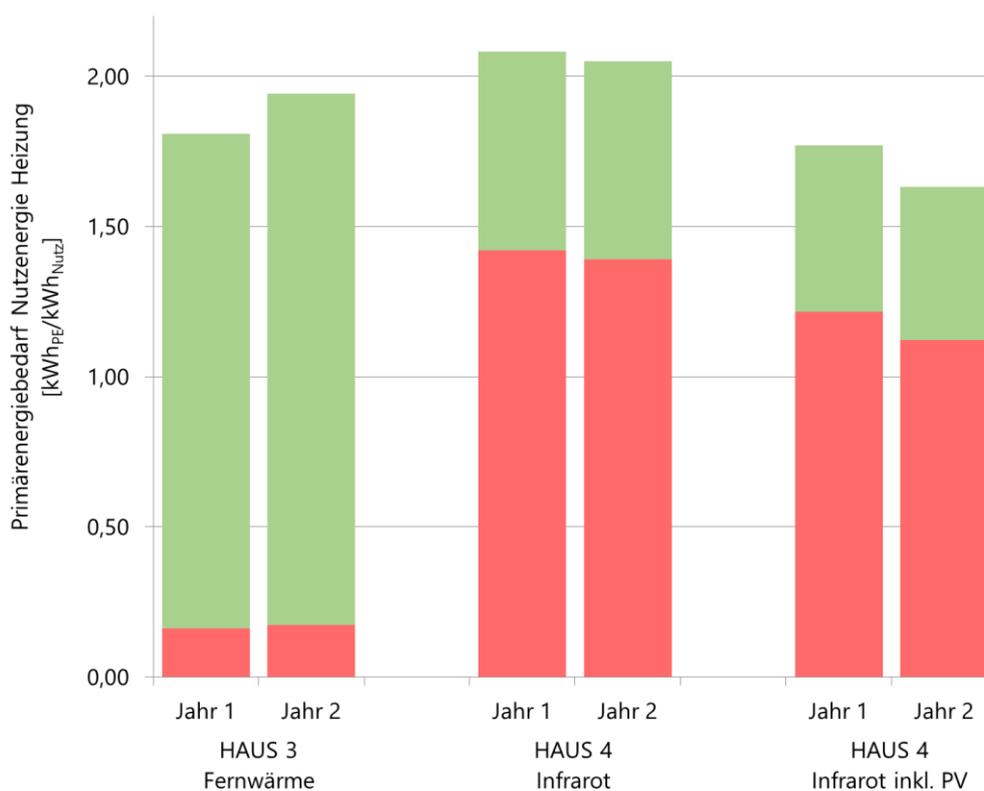


Abb. 138 Ermittelte effektive Primärenergie-Faktoren - Heizsystem

Während der gesamte Primärenergiebezug im mit Fernwärme beheizten Haus in vergleichbarer Höhe liegt, wie jener des mit Infrarot-Paneelen beheizten Hauses unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung (-9%), gibt es hinsichtlich des wesentlichen Anteils an nicht-erneuerbaren und nuklearen Energiequellen markante Unterschiede. Während die Kilowattstunde Heiznutzenergie bei der Beheizung mit Fernwärme im Mittel einen nicht-erneuerbaren Anteil von 0,17 kWh benötigt, sind bei der Beheizung mit Strom 1,41 kWh notwendig (Faktor 8,4). Bei Berücksichtigung der PV-Eigennutzung sinkt der Anteil auf 1,17 kWh (Faktor 7,0).

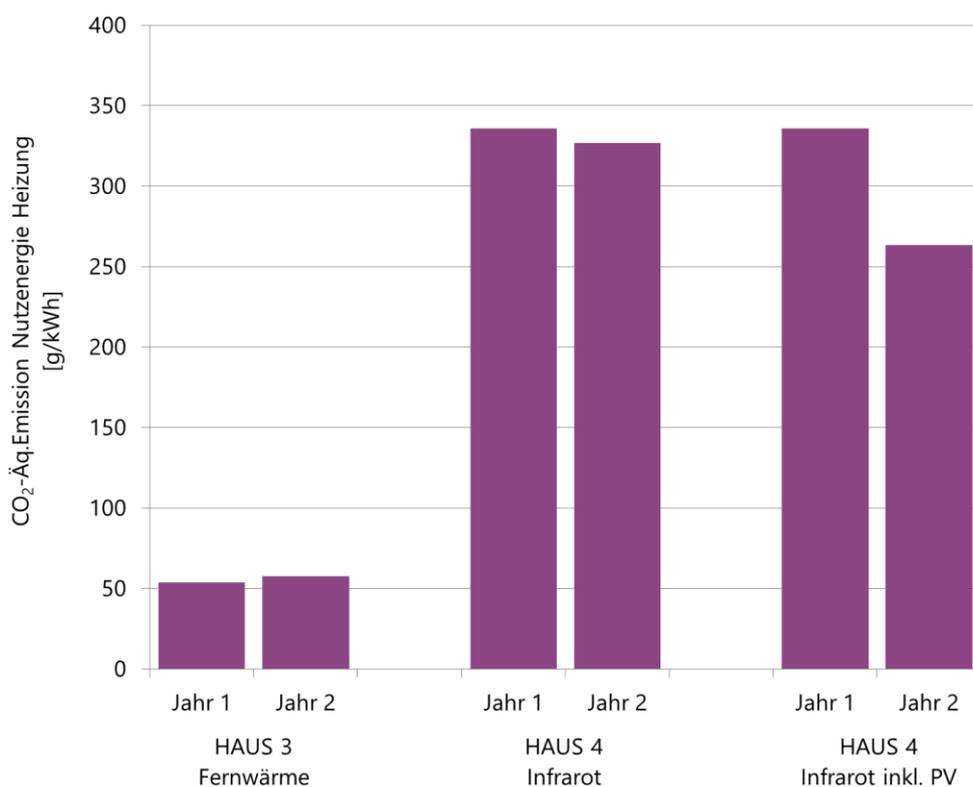


Abb. 139 Ermittelte Treibhausgasemissionsfaktoren (CO₂-Äquivalente) - Heizsystem

Die unterschiedliche Zusammensetzung der für die Beheizung relevanten Energiequellen hat insbesondere bei den verursachten Emissionen der Treibhausgase massive Auswirkungen. Während eine Kilowattstunde Heiznutzenergie im mit Fernwärme beheizten Haus 55,5 g Emissionen an CO₂-Äquivalenten verursacht, sind dies im elektrisch beheizten Haus, selbst unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung, noch 299,8 g. Die Treibhausgas-Emissionen liegen also um 440 % höher (Faktor 5,4).

3.10.4 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Warmwasserbereitung – ÖKOBILANZ-Faktoren

Die Ergebnisse der Auswertungen der Umweltauswirkungen der Warmwasserbereitung sind unten dargestellt. Die Berechnung wurde jeweils für einen bezogenen Kubikmeter Warmwasser berechnet, da der Warmwasserverbrauch in den beiden Objekten unterschiedlich war.

Tab. 35 Primärenergie und CO₂-Äquivalente je bezogenem Kubikmeter Warmwasser

		Primärenergie erneuerbar [kWh/m ³]	Primärenergie nicht erneuerbar und nuklear [kWh/m ³]	Primärenergie gesamt [kWh/m ³]	CO ₂ - Äquivalente [kg/m ³]
Haus 3 FW	Jahr 1	255,0	24,9	279,9	8,3
	Jahr 2	291,4	28,5	319,9	9,5
Haus 4 elektrisch	Jahr 1	77,4	126,6	203,9	29,7
	Jahr 2	70,1	124,2	194,3	29,1
Haus 4 elektr. mit PV-Eigenn.	Jahr 1	65,8	112,3	178,1	29,7
	Jahr 2	57,4	103,5	161,0	24,4

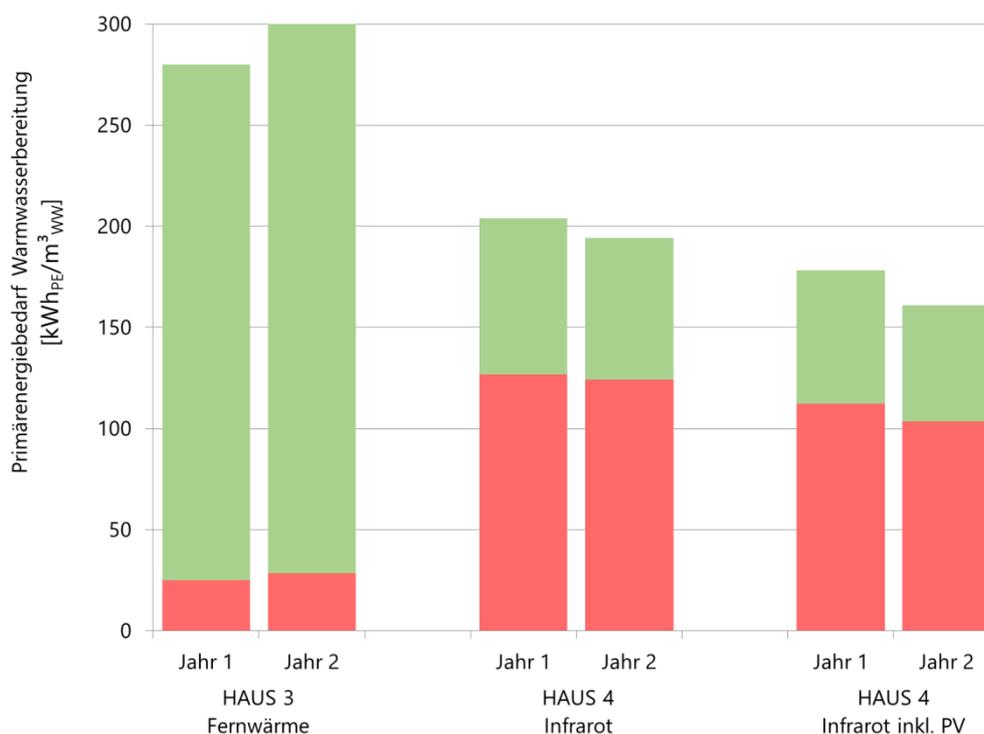


Abb. 140 Ermittelte effektiver Primärenergieverbrauch – Warmwasserbereitung bezogen auf einen Kubikmeter

Während beim Heizenergie-Vergleich der gesamte Primärenergieaufwand vergleichbar war, liegt dieser aufgrund der geringeren Verluste bei der elektrischen Warmwasserbereitung niedriger. Berücksichtigt man die PV-Eigennutzung so ist dieser im Mittel um 43 % geringer.

Vergleicht man wiederum den wichtigen Anteil an nicht erneuerbarer und nuklearer Primärenergie, so liegt die elektrische Warmwasserbereitung jedoch deutlich über der fernwärmebasierten. Mit Berücksichtigung der PV-Anlage ergibt sich ein Mehrverbrauch von 304 % (Faktor 4,0). Im Vergleich

zur Heizenergie fällt der Vergleich etwas günstiger aus. Dies liegt einerseits an den geringeren Verlusten und andererseits an der günstigeren Stromzusammensetzung im Sommer

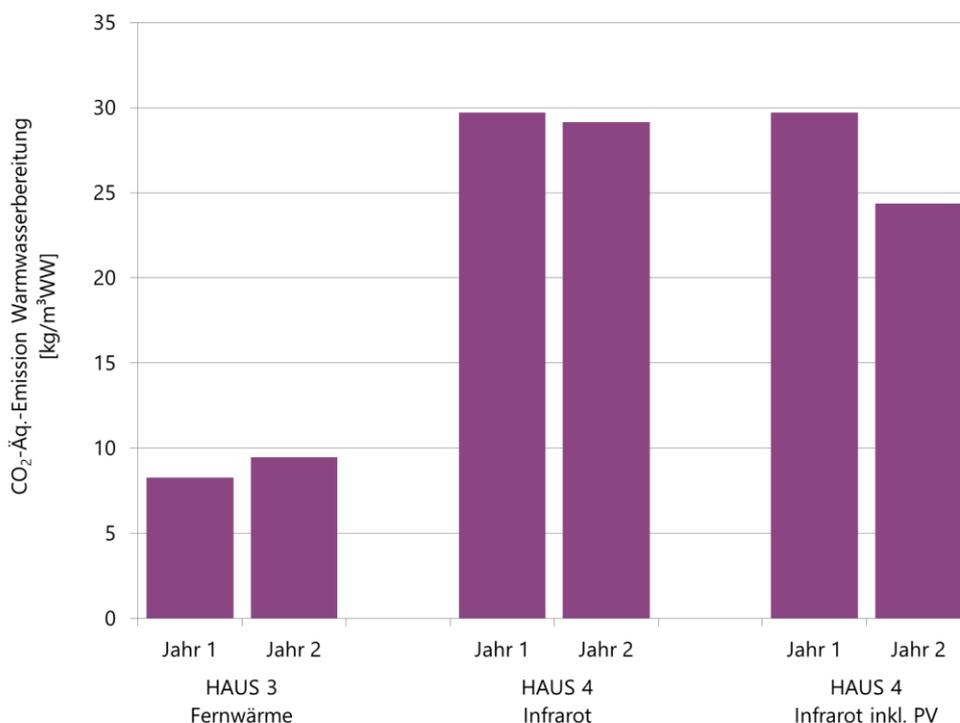


Abb. 141 Ermittelte Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) – Warmwasserbereitung bezogen auf einen Kubikmeter Warmwasser

Entsprechend dem hohen Anteil an nicht-erneuerbaren Energiequellen zeigt sich auch beim Vergleich der Treibhausgas-Emissionen ein deutlicher Unterschied. Selbst unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung liegen die Emissionen der CO₂-Äquivalente bei der elektrischen Warmwasserbereitung um 205 % höher. Im Vergleich zum Faktor 5,4 bei den durch die Heizung verursachten Emissionen sinken die Unterschiede bei der Warmwasserbereitung auf einen Faktor von 3. Dies liegt an den geringeren Verlusten der elektrischen Warmwasserbereitung und der günstigeren Stromzusammensetzung außerhalb der Heizperiode.

3.10.5 Methodik und Analyse – OIB Monatsfaktoren

Gemäß dem Wunsch des Auftraggebers wurde die Berechnung des Primärenergieverbrauchs sowie der CO₂-Äquivalentenemissionen auch auf Basis der vom Österreichischen Institut für Bautechnik (OIB) in Richtlinien 6 (2019) veröffentlichten Konversionsfaktoren ermittelt. Für die Berechnung beim Energieausweis wären die Jahresmittelwerte heranzuziehen. Aufgrund der starken saisonalen Schwankungen in der Zusammensetzung des Strommixes wird dieser Ansatz von den Autoren jedoch als ungeeignet für die Bewertung eines Heizsystems eingestuft.

Die vom OIB ermittelten Konversionsfaktoren beruhen auf Auswertungen der Stromzusammensetzung für das Jahr 2013 bis 2018. Im Zug der Auswertung zur Ermittlung der Jahresmittelwerte wurden auch die zugehörigen monatlichen Mittelwerte gebildet und in den *Erläuternden Bemerkungen zur OIB Richtlinie 6* als Tabelle zur Verfügung gestellt.

Tab. 36 Konversionsfaktoren Primärenergie und CO₂ – Monatsmittelwerte für den österreichischen Strommix
(Quelle: *Erläuternden Bemerkungen zur OIB Richtlinie 6*)

Monat	Strommenge	f _{PE}	f _{PE,n.ern}	f _{PE,ern}	f _{CO₂,equ}
Jänner	36.357 GWh	1,8224	1,3540	0,4684	296
Februar	32.837 GWh	1,8250	1,3487	0,4763	295
März	33.741 GWh	1,7821	1,2596	0,5225	274
April	30.374 GWh	1,5141	0,8738	0,6403	195
Mai	30.189 GWh	1,2874	0,5381	0,7493	131
Juni	29.289 GWh	1,3235	0,5759	0,7476	135
Juli	29.551 GWh	1,3935	0,6742	0,7193	152
August	29.364 GWh	1,4035	0,6973	0,7062	158
September	28.786 GWh	1,5589	0,8722	0,6867	203
Oktober	31.207 GWh	1,7602	1,1819	0,5783	266
November	32.363 GWh	1,7760	1,2358	0,5402	276
Dezember	33.875 GWh	1,8813	1,3882	0,4931	301
Liefermix	377.933 GWh	1,6229	1,0189	0,6040	227

Wie ersichtlich weisen auch die vom OIB ermittelten Werte im Winter signifikante höhere Werte aus als im Sommer. Die Variation ist mit den von uns ermittelten Schwankungen vergleichbar die Werte liegen jedoch insgesamt auf einem etwas geringeren Niveau. Der Grund hierfür kann in dem anderen Auswertzeitraum, abweichenden Bewertungsfaktoren für die einzelnen Energieerzeuger oder einer abweichenden Auswertemethode begründet liegen und wurde nicht näher untersucht.

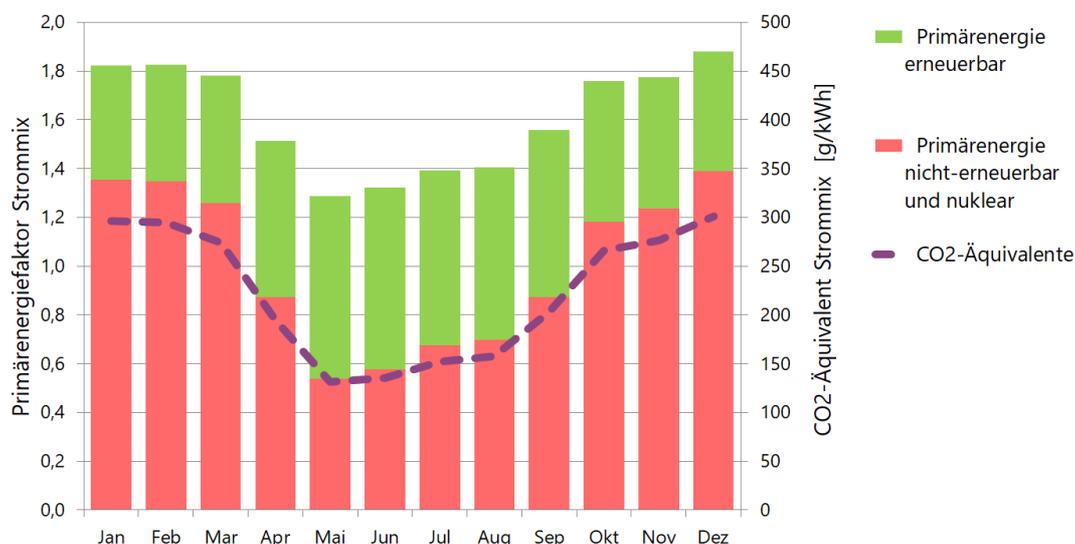


Abb. 142 Monatliche Mittelwerte für den Primärenergie-Aufwand, die PE-Zusammensetzung und die CO₂-Äquivalenten Treibhausgasemissionen für den österr. Netzstrom – OIB-Monatswerte

Zur Bewertung der Energie aus Fernwärme wurde ebenfalls der in der OIB-Richtlinie 6 veröffentlichte Mittelwert herangezogen. Im Gegensatz zum ÖKOBILANZ-Ansatz, war hier keine genaue Differenzierung des Brennstoffs möglich. Es wurden die Konversionsfaktoren für den Typ „Fernwärme aus Heizwerk (erneuerbar)“ herangezogen.

Tab. 37 Konversionsfaktoren Primärenergie und CO₂ zur Bewertung der Fernwärme
(Quelle: Richtlinie 6)

Anteil	f _{PE}	f _{PE,n.ern}	f _{PE,ern}	f _{CO₂,equ}
Fernwärme aus Heizwerk (erneuerbar)	1,60	0,28	1,32	59

3.10.6 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Heizsystem – OIB-Monatsfaktoren

Die Ergebnisse der Auswertungen sind unten dargestellt, die flächenspezifischen Angaben sind jeweils auf einen Quadratmeter Wohnnutzfläche bezogen.

Tab. 38 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Jahressummen bezogen auf den Quadratmeter Nutzfläche- Heizsystem

		Primärenergie erneuerbar [kWh/m ²]	Primärenergie nicht erneuerbar und nuklear [kWh/m ²]	Primärenergie gesamt [kWh/m ²]	CO ₂ - Äquivalente gesamt [kg/m ²]
Haus 3 FW	Jahr 1	50,34	10,68	61,02	2,25
	Jahr 2	41,99	8,91	50,90	1,88
Haus 4 IR	Jahr 1	15,82	38,68	54,50	8,49
	Jahr 2	16,14	37,39	53,52	8,23
Haus 4 IR mit PV-Eigenn.	Jahr 1	13,24	33,02	46,27	8,49
	Jahr 2	12,62	30,02	42,64	6,60

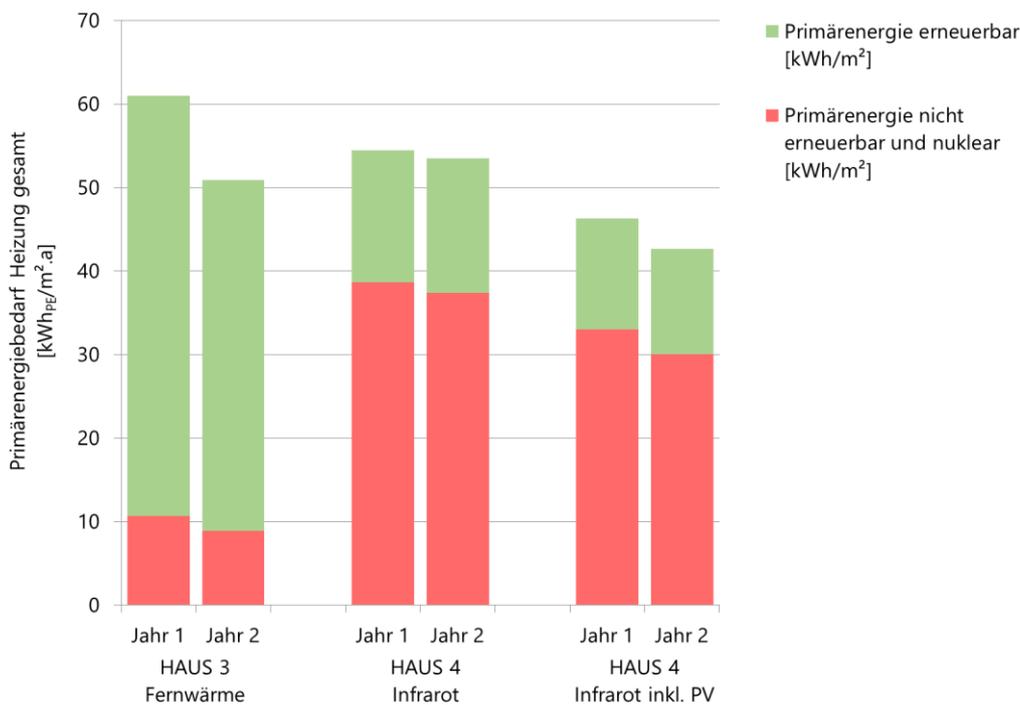


Abb. 143 Primärenergieverbrauch Heizung gesamt je Quadratmeter Wohnnutzfläche und Jahr

Während der gesamte Primärenergiebezug im mit Fernwärme beheizten Haus insgesamt höher liegt, wie jener des mit Infrarot-Paneelen beheizten Hauses unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung, gibt es hinsichtlich des wesentlichen Anteils an nicht-erneuerbaren und nuklearen Energiequellen signifikante Unterschiede. Während für die Beheizung eines Quadratmeter Wohnnutzfläche im elektrisch beheizten Objekt im Mittel um 21% weniger Primärenergie benötigt wurde, lag der erforderliche Anteil an nicht erneuerbaren und nuklearen Primärenergiequellen um 222% höher (Faktor 3,2).

Um eine nutzungsunabhängige Analyse zu erhalten werden die Primärenergie-Jahressummen auf den gemessenen Energiebezug bezogen, bei der Fernwärme inklusive der Verteilverluste. Auf diese Weise lassen sich effektive Primärenergiefaktoren und Emissionsfaktoren ermitteln, welche jeweils auf eine Kilowattstunde Nutzenergie bezogen sind und so die Heizsysteme charakterisieren.

Tab. 39 Ermittelte effektive Primärenergie-Faktoren und Emissionsfaktoren für CO₂-Äquivalente - Heizsystem

		effektiver PE-Faktor erneuerbar	effektiver PE-Faktor nicht erneuerbar und nuklear	effektiver PE-Faktor gesamt	effektiver CO ₂ -Äq.-Faktor [g/kWh]
Haus 3 FW	Jahr 1	1,64	0,35	1,98	73,2
	Jahr 2	1,76	0,37	2,13	78,5
Haus 4 IR	Jahr 1	0,52	1,27	1,79	278,2
	Jahr 2	0,53	1,23	1,76	270,3
Haus 4 IR mit PV-Eigenn.	Jahr 1	0,43	1,08	1,52	278,2
	Jahr 2	0,41	0,99	1,40	216,8

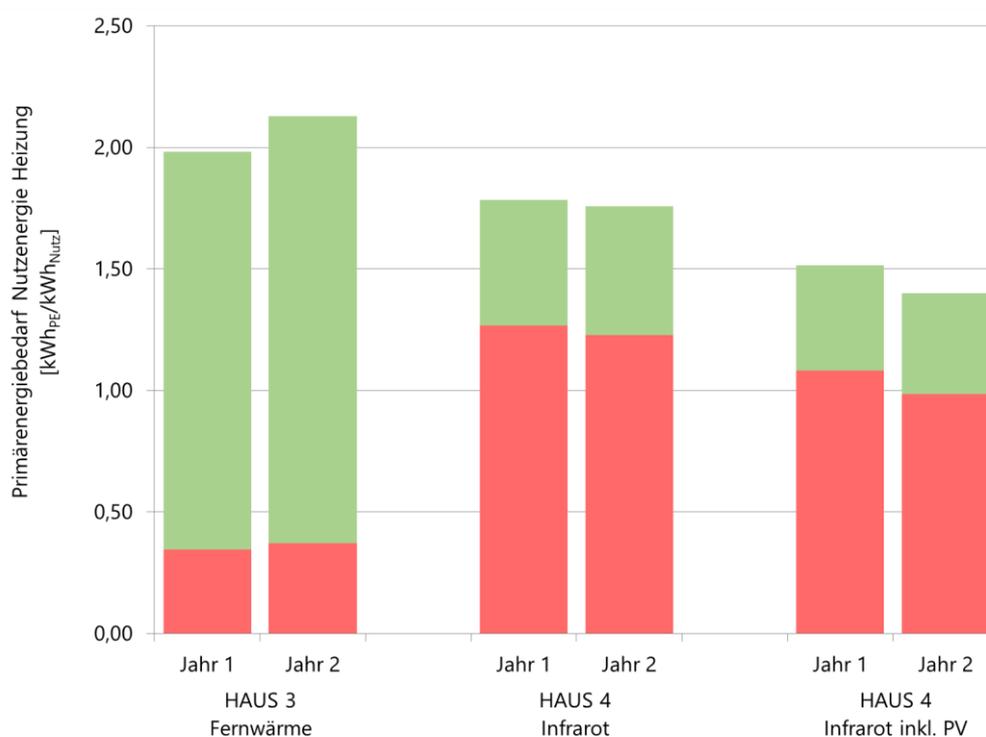


Abb. 144 Ermittelte effektive Primärenergie-Faktoren - Heizsystem

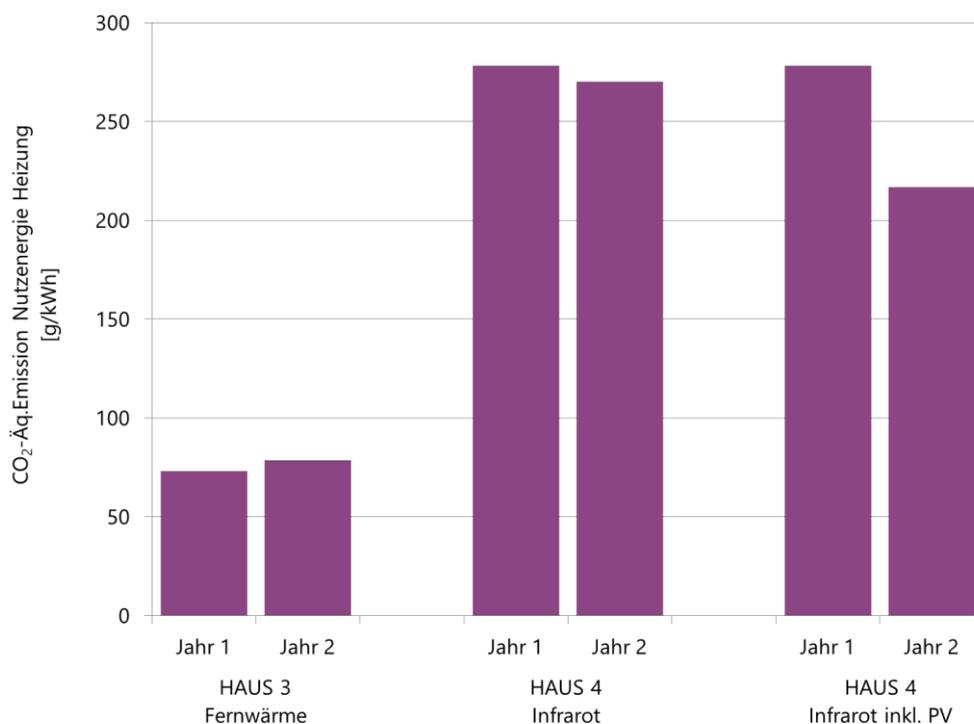


Abb. 145 Ermittelte Treibhausgasemissionsfaktoren (CO₂-Äquivalente) - Heizsystem

Die unterschiedliche Zusammensetzung der für die Beheizung relevanten Energiequellen hat insbesondere bei den verursachten Emissionen der Treibhausgase massive Auswirkungen. Während eine Kilowattstunde Heiznutzenergie im mit Fernwärme beheizten Haus im Mittel beider Jahre 75,8 g an CO₂-Äquivalenten Emissionen verursacht, sind dies im elektrisch beheizten Haus, selbst unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung, noch 247,5 g. Die Treibhausgas-Emissionen liegen also um 226 % höher (Faktor 3,3).

3.10.7 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Warmwasserbereitung – OIB-Monatsfaktoren

Die Ergebnisse der Auswertungen der Umweltauswirkungen der Warmwasserbereitung sind unten dargestellt. Die Berechnung wurde jeweils für einen bezogenen Kubikmeter Warmwasser berechnet, da der Warmwasserverbrauch in den beiden Objekten jeweils unterschiedlich war.

Tab. 40 Primärenergie und CO₂-Äquivalente je bezogenem Kubikmeter Warmwasser

		Primärenergie erneuerbar [kWh/m ³]	Primärenergie nicht erneuerbar und nuklear [kWh/m ³]	Primärenergie gesamt [kWh/m ³]	CO ₂ - Äquivalente [kg/m ³]
Haus 3 FW	Jahr 1	253,08	53,68	306,76	11,31
	Jahr 2	289,18	61,34	350,53	12,93
Haus 4 elektrisch	Jahr 1	62,32	106,90	169,22	23,82
	Jahr 2	58,48	101,10	159,57	22,53
Haus 4 elektr. mit PV-Eigenn.	Jahr 1	52,90	95,48	148,38	23,82
	Jahr 2	47,20	86,79	133,98	19,29

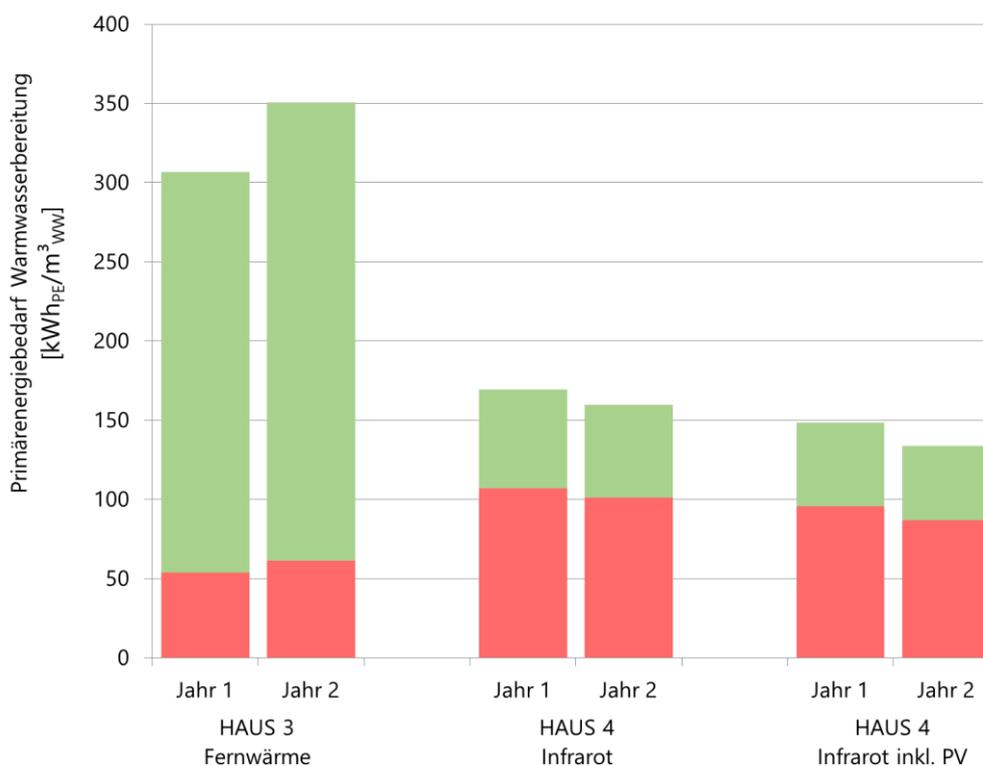


Abb. 146 Ermittelte effektiver Primärenergieverbrauch – Warmwasserbereitung bezogen auf einen Kubikmeter

Während beim Heizenergie-Vergleich der gesamte Primärenergieaufwand vergleichbar war, liegt dieser aufgrund der geringeren Verluste bei der elektrischen Warmwasserbereitung deutlich niedriger.

Vergleicht man wiederum den wichtigen Anteil an nicht erneuerbarer und nuklearer Primärenergie, so liegt die elektrische Warmwasserbereitung jedoch deutlich über der fernwärmebasierten, selbst wenn die Eigendeckung durch die PV-Anlage mitberücksichtigt wird. Im Vergleich zur Heizenergie fällt der Vergleich günstiger aus. Dies liegt einerseits an den geringeren Verlusten bei der elektrischen Warmwasserbereitung und andererseits an der günstigeren Stromzusammensetzung im Sommer

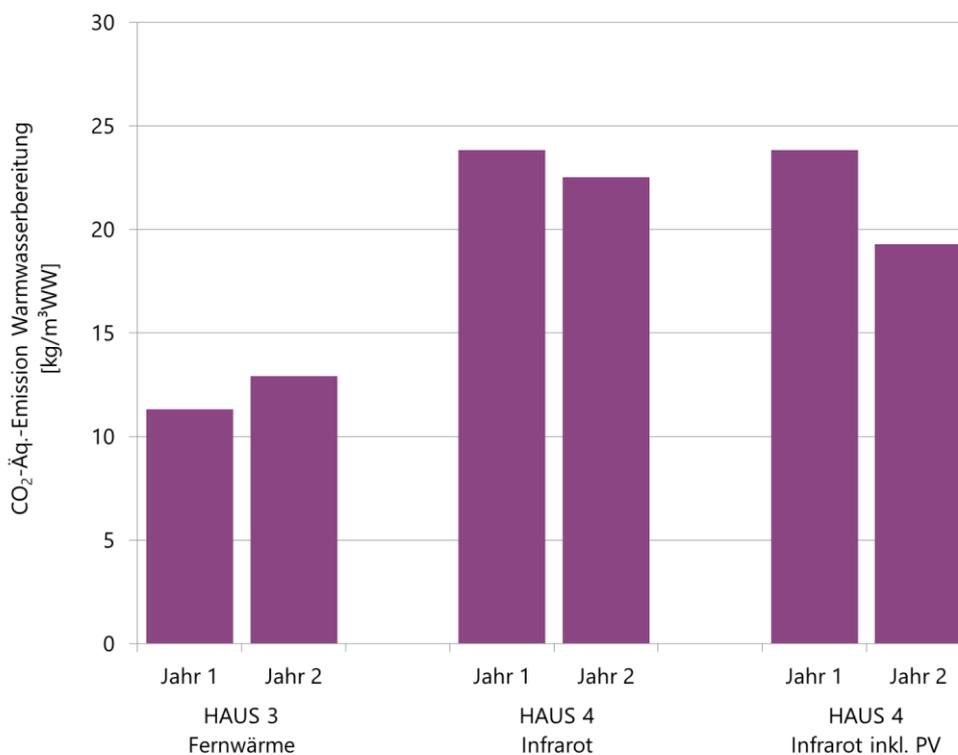


Abb. 147 Ermittelte Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) – Warmwasserbereitung bezogen auf einen Kubikmeter Warmwasser

Entsprechend dem hohen Anteil an nicht-erneuerbaren Energiequellen zeigt sich auch beim Vergleich der Treibhausgas-Emissionen ein deutlicher Unterschied. Auch unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung liegen die Emissionen der CO₂-Äquivalente bei der elektrischen Warmwasserbereitung höher. Während bei der Heizenergie die Emissionen um 226% höher liegen, sind es bei der Warmwasserbereitung nur +78%. Dies liegt an den geringeren Verlusten der elektrischen Warmwasserbereitung und der günstigeren Stromzusammensetzung außerhalb der Heizperiode.

3.10.8 Gegenüberstellung der Monatsmittelwerte der Konversionsfaktoren ÖKOBILANZ-Ansatz und OIB-Werte

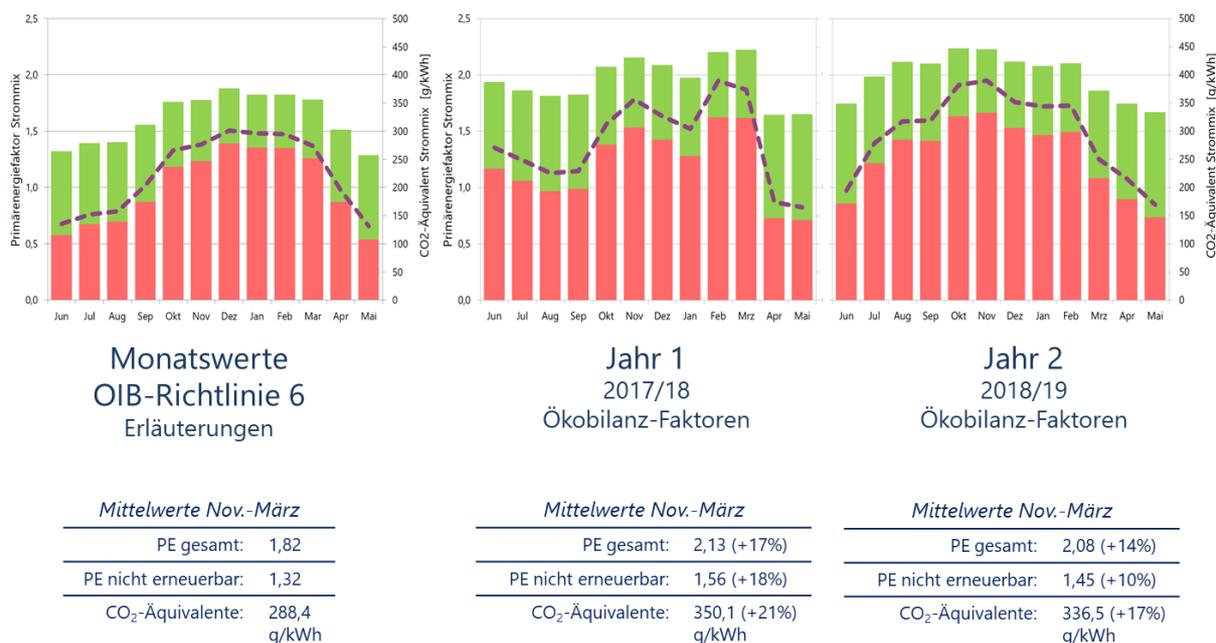


Abb. 148 Gegenüberstellung der monatlichen Konversionsfaktoren ÖKOBILANZ Ansatz für die beiden konkreten Jahren vs. OIB-Werte (Mittelung von 5 Jahren)

Wie in Abbildung Abb. 148 liegen die relevanten Monatswerte für nicht erneuerbare und nukleare Primärenergie, sowie Treibhausgasemission bei der von uns durchgeführten Auswertung um 10% bis 20% höher. Die konkret für das Objekt mittels der beiden Ansätze ermittelten Umweltfaktoren weichen erheblich stärker ab. Die Gründe hierfür wurden im Kapitel 3.10.1 dargelegt.

3.11 PV Eigenverbrauch

3.11.1 Allgemein

Jede Wohnung im Haus 4 verfügt über eine eigene PV Anlage mit einer Peak-Leistung von jeweils 2 kW. Ein Teil der von der PV-Anlage generierten Energie wird direkt in den jeweiligen Wohnungen verbraucht. Der nicht verbrauchte Überschuss wird ins Stromnetz eingespeist. Die von der PV-Anlage generierte Energiemenge, der Netzbezug und die Netzeinspeisung werden mittels Wirkstromzählern erfasst. Die elektrischen Verbraucher werden in die drei Komponenten Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom unterteilt. Der Energieverbrauch für Heizung und die Warmwasserbereitung werden jeweils mit spezifischen Stromzählern erfasst. Der verbleibende Haushaltsstromverbrauch kann über Bilanzrechnung ermittelt werden.

Die Energiemessung der Stromzähler wird mit einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten durchgeführt. Dies ermöglicht eine leistungsabhängige, genaue Zuordnung des PV-Eigenverbrauchs. Die exakte Zuordnung des Eigenverbrauchs ist physikalisch nicht möglich, bzw. sinnvoll, sondern erfordert die Festlegung eines entsprechenden Modells. Auf Grund des Untersuchungsgegenstandes wurde hierfür die folgende Priorisierung festgelegt:

1. Heizung
2. Warmwasser
3. Haushaltsstrom

D.h. so fern Bedarf gegeben ist, wird der aktuell erzeugte PV-Strom zuerst der Heizung zugeordnet, wenn die Heizung nicht den gesamten generierten Strom verbraucht wird der restliche Strom der Warmwasserbereitung zugewiesen. Wenn auch hier kein Bedarf besteht, kommt der verbleibende Rest dem Haushaltsstrom zu Gute. Überschreitet die Produktion des PV-Stroms den Eigenbedarf so erfolgt schließlich eine Einspeisung ins Elektrizitätsnetz.

Bei Festlegung einer abweichenden Priorisierung bliebe der Eigenverbrauch gleich, die Anteile würden sich jedoch innerhalb der Eigenverbrauchskomponenten verschieben.

3.11.2 Eigennutzung

Der Stromverbrauch beim Wohngebäude mit Infrarotheizung teilt sich auf die Komponenten Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom auf. Der spezifische Stromverbrauch lag in den beiden Auswertejahren für die Infrarotheizung bei 29,6 (J1) bzw. 30,4 kWh/m² (J2), für die Warmwasserbereitung bei 15,5 bzw. 17,3 kWh/m² und für den Haushaltsstrom bei 14,1 kWh/m² bzw. 18,0 kWh/m² (jeweils auf die Wohnnutzflächen bezogen). Die PV Anlagen haben im ersten Auswertejahr 31,4 kWh/m², im zweiten 32,7 kWh/m² generiert. Hiervon wurden 4,6 bzw. 6,4 kWh/m² der Infrarotheizung, 2,1 bzw. 3,0 kWh/m² der Warmwasserbereitung und 3,0 bzw. 3,4 kWh/m² dem Haushaltsstrom zugeordnet.

Damit wurden im ersten Jahr 31 %, im zweiten Jahr 39% des generierten PV-Stroms in den Wohnungen verbraucht. Der überwiegende Teil des Solarstroms wurde eingespeist. Der Eigenverbrauch der einzelnen Komponenten ist in Abb. 153 ersichtlich.

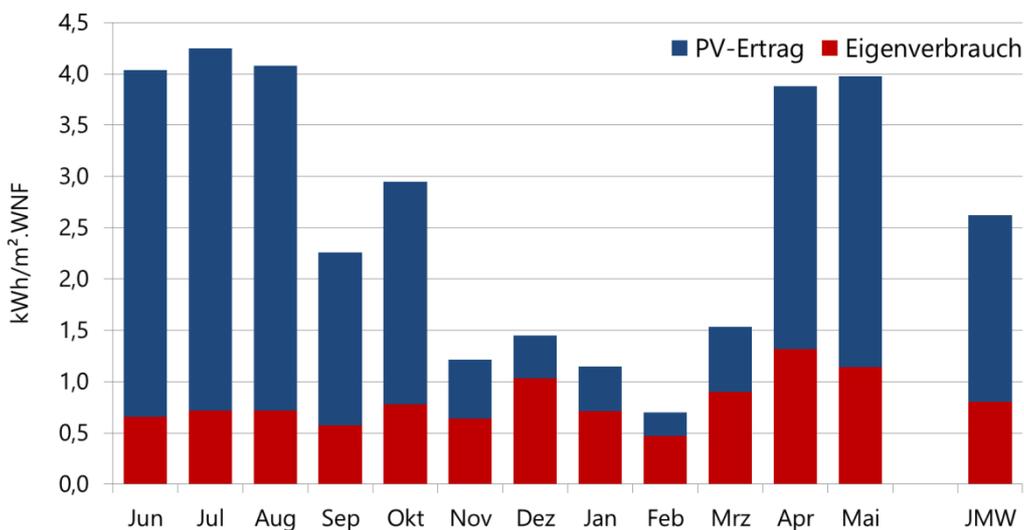


Abb. 149 spezifischer PV-Ertrag und Eigennutzung Jahr 1

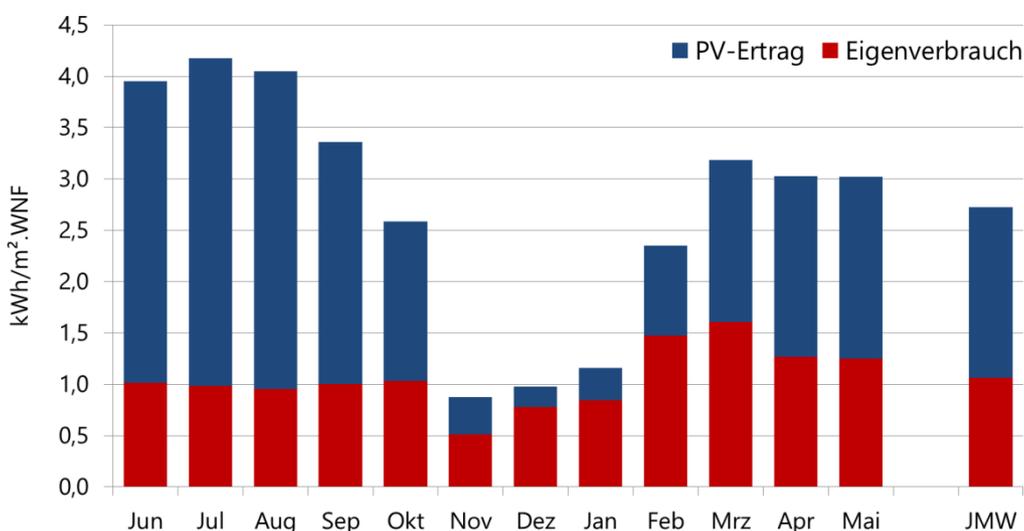


Abb. 150 spezifischer PV-Ertrag und Eigennutzung Jahr 2

In den Diagrammen oben ist gut erkennbar, dass im Sommer tagsüber wesentlich mehr Strom produziert wird, als abnehmbar ist. Die höchsten Eigenverbrauchswerte wurden jeweils März erzielt, da witterungsbedingt ein höherer Ertrag erzielt wird und ein maßgeblicher Teil vom Infrarot-Heizsystem bezogen werden kann (Sonnenschein bei niedrigen Außentemperaturen).

Berechnet man die monatlichen Eigennutzungsgrade so ergibt sich das folgende Bild.

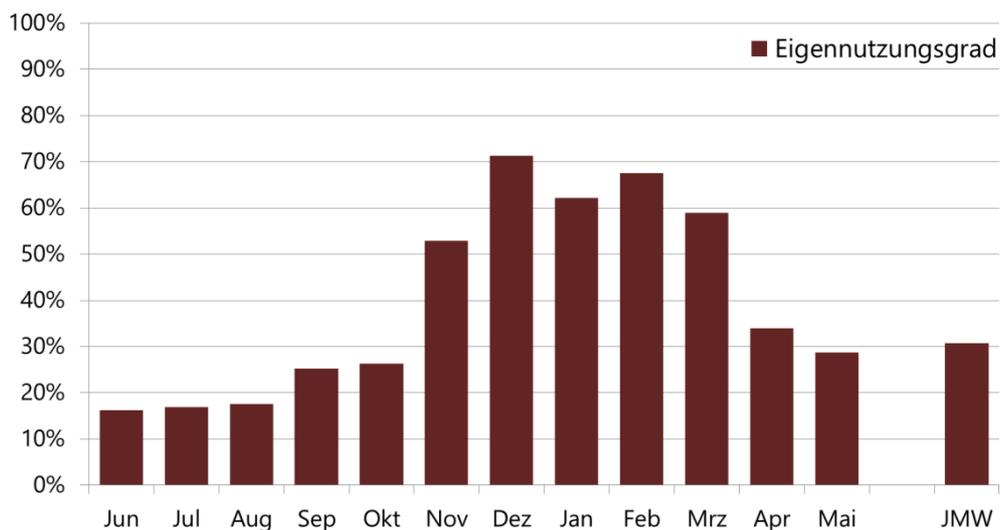


Abb. 151 Eigennutzungsgrad der PV-Anlage Jahr 1

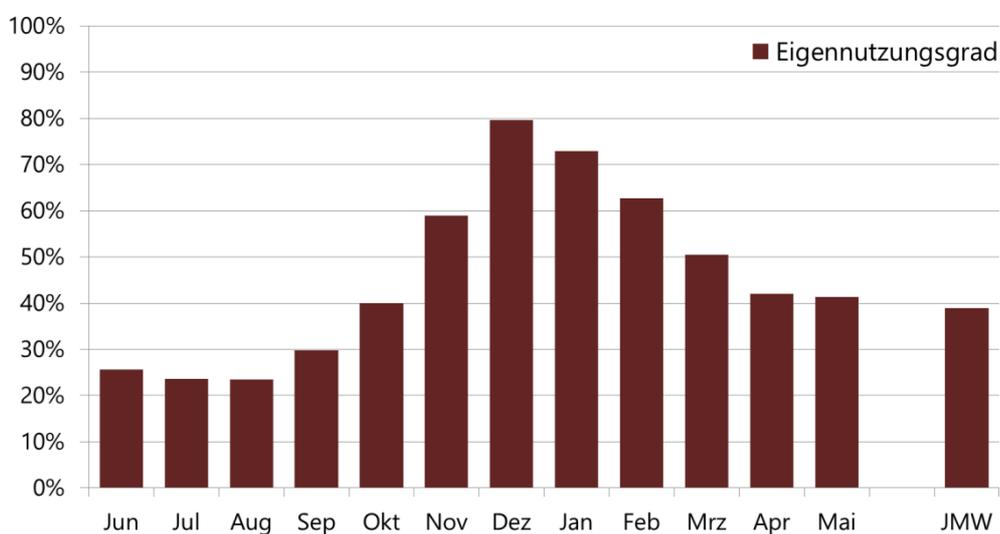


Abb. 152 Eigennutzungsgrad der PV-Anlage Jahr 2

Auf Grund des geringen Angebots an Solarstrom ist die Eigennutzung insbesondere im Winter hoch. Im Sommer können nur ca. 20% des anfallenden Solarstroms in der Wohnung genutzt werden.

Nachfolgend eine Übersicht über die Stromverbrauchskomponenten und die jeweiligen Eigenverbrauchskomponenten in beiden Auswertejahren. Wie zu sehen ist stellt die Heizung sowohl die größte Verbrauchskomponente, als auch die größte Eigennutzungskomponente dar. Der überwiegende Teil des produzierten Solarstroms wird jedoch ins Netz eingespeist, da die größten Erträge jeweils dann anfallen, wenn kein oder nur geringer Eigenbedarf vorliegt.

Die Eigendeckung für den Gesamtstromverbrauch (Heizung, Warmwasser und Haushalt) hat im Jahr 1 16,3% und im Jahr 2 19,4% betragen. Die restlichen 83,7% bzw. 80,6% werden über das Stromnetz bezogen.

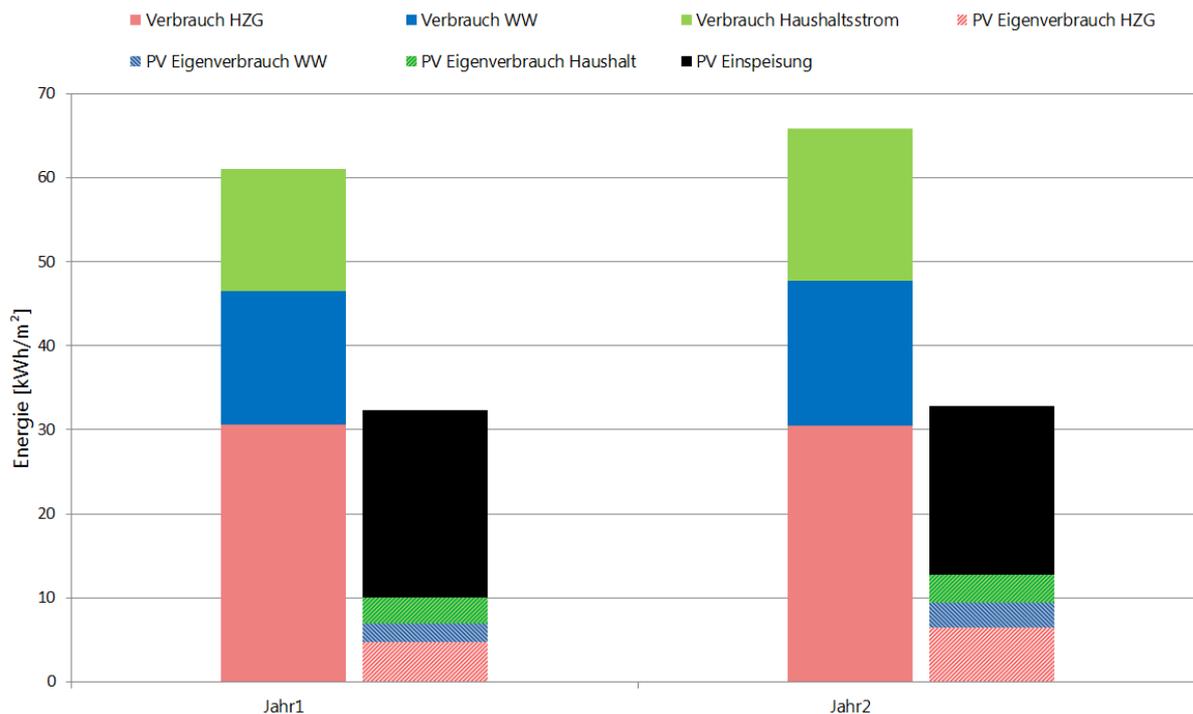


Abb. 153 Jahresstrombilanz Verbrauch/PV-Nutzung für das Wohngebäude mit IR-Heizung, elektrischer Warmwasserbereitung und PV-Anlage

3.11.3 Eigendeckung des Heizstroms

Auf das Jahr bezogen konnten nur 15% (Jahr 1) bzw. 21% (Jahr 2) des benötigten Heizstroms mit der eigenen Photovoltaikanlage generiert werden. Der Grund für die geringe Eigendeckung ist prinzipieller Natur. Insbesondere bei Gebäuden mit modernem Dämmstandard wird die höchste Heizleistung immer dann benötigt, wenn die solaren Einträge ausbleiben bzw. gering sind. Dies gilt sowohl jahreszeitlich (tiefer Sonnenstand im Winter), tageszeitlich (Tag-Nacht Zyklus) und auch witterungsbedingt (Nebel, Bewölkung). Naturgemäß kann in diesen Zeiten, mit dem relativ gesehen höchsten Heizbedarf, die Photovoltaik-Anlage keine, oder nur geringe Energiemengen zur Verfügung stellen. Dies bedeutet auch, dass mit einer Vergrößerung der PV-Anlage die Eigendeckungsrate nicht proportional gesteigert werden kann.

Entsprechend der obigen Argumentation wurde, absolut gesehen, der höchste PV-Beitrag zum Heizstrom im Monat März geliefert, da bei zunehmender solarer Einstrahlung noch kühle Außenlufttemperaturen vorherrschten.

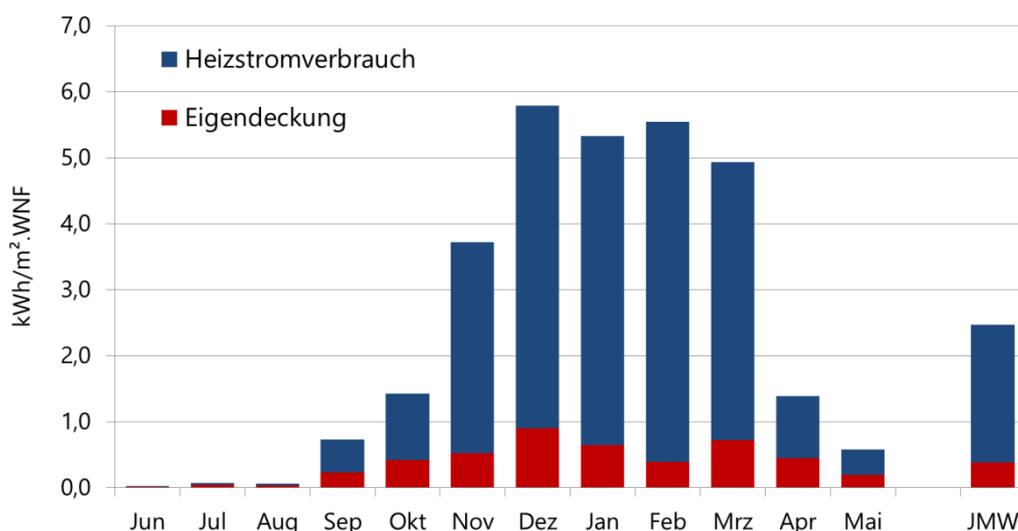


Abb. 154 spezifischer Heizstromverbrauch und Eigendeckung - JAHR 1

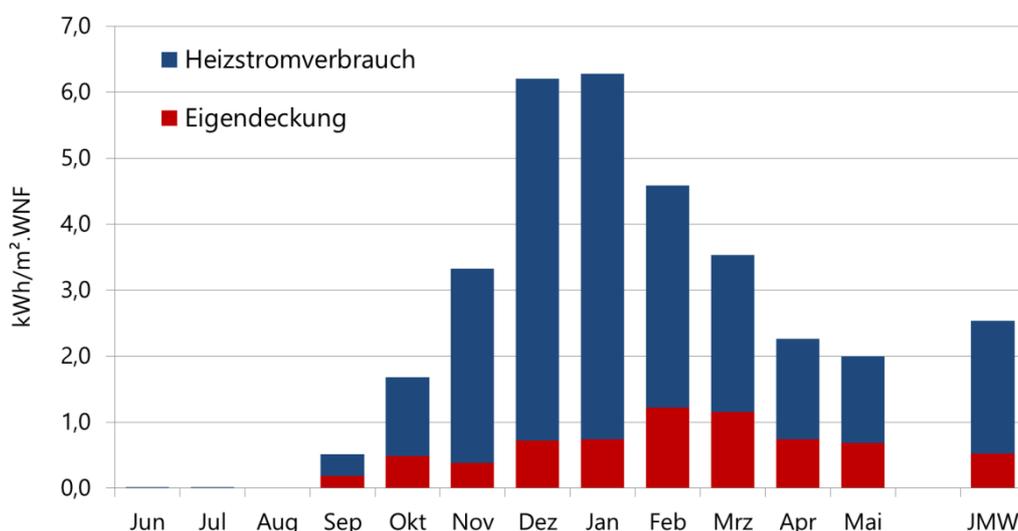


Abb. 155 spezifischer Heizstromverbrauch und Eigendeckung - JAHR 2

Der obigen Argumentation entsprechend liegt der ermittelte Eigendeckungsgrad des Heizstroms in den heizintensivsten Monaten November bis Februar im Mittel nur bei 12,2% (J1) bzw. 15,4% (J2). In den Monaten der Übergangsjahreszeit zeigten sich höhere Eigendeckungen bis 30% und darüber,

jedoch bei, absolut gesehen, geringen Heizenergieverbräuchen. Gesamt lag die der Eigendeckungsgrad des Heizstrombedarfs im Jahr 1 bei 15,5% im Jahr 2 bei 20,9%. Die höhere Eigendeckung im Jahr 2 begründet sich vorwiegend aus den wetterbedingten höheren Eigendeckungsgraden in den Monaten Februar bis Mai.

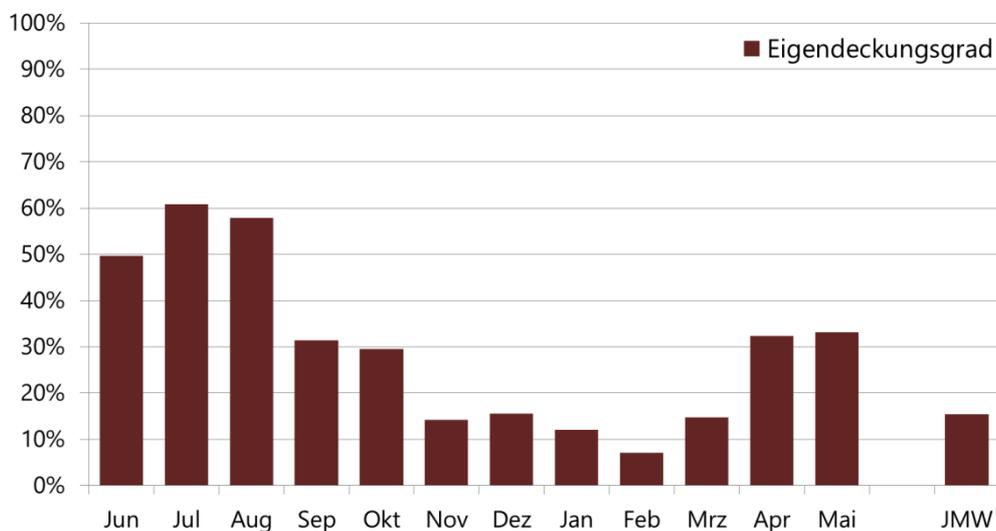


Abb. 156 Eigendeckungsgrad des Heizstroms - JAHR 1

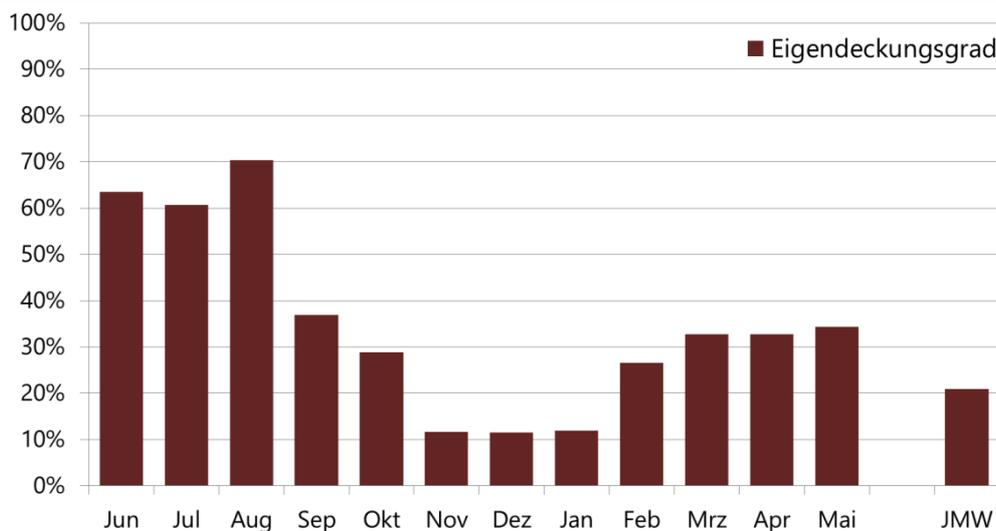


Abb. 157 Eigendeckungsgrad des Heizstroms - JAHR 2

3.11.4 Monats-Bilanzierung

Bei der Monatsbilanzierung ist der Sommer-/Winterzyklus deutlich erkennbar. Der Energieverbrauch der Infrarotheizung ist gegenläufig zur von der PV-Anlage generierten Energiemenge. Der Energieverbrauch der Infrarotheizung ist naturgemäß im Winter hoch und geht im Sommer gegen Null. Die PV-Anlage generiert im Sommer wesentlich mehr Energie als im Winter. Beim Eigenverbrauch stellte das Heizsystem dennoch den größten Verbraucher dar. Der beobachtete geringe Eigenverbrauch für die Warmwasserbereitung im untersuchten Jahr 2017 ist auf eine nicht angepasste Regelung der Warmwasserbereitung zurückzuführen (siehe nächstes Kapitel). Grundsätzlich stellt die Warmwasserbereitung eine wichtige Eigenverbrauchskomponente für Photovoltaikstrom dar, da diese ganzjährig gleichmäßig und insbesondere im Sommer auch sehr effizient genutzt werden kann.

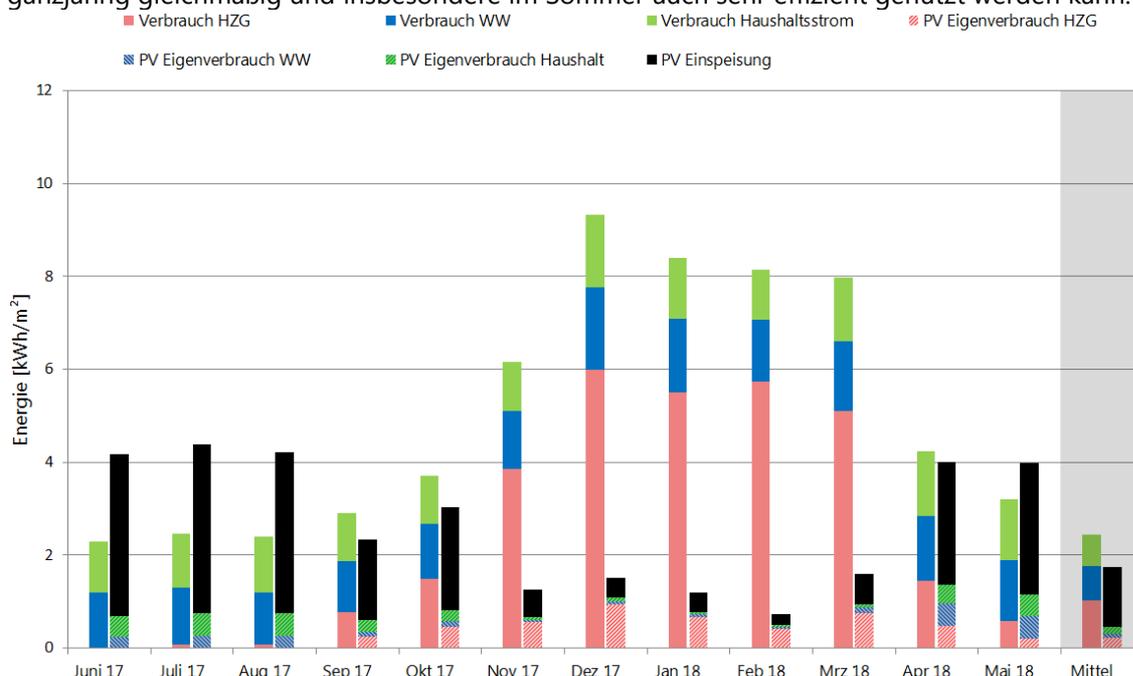


Abb. 158 Monatsstrombilanz für das Wohngebäude mit IR-Heizung, elektrischer Warmwasserbereitung und PV-Anlage – JAHR 1

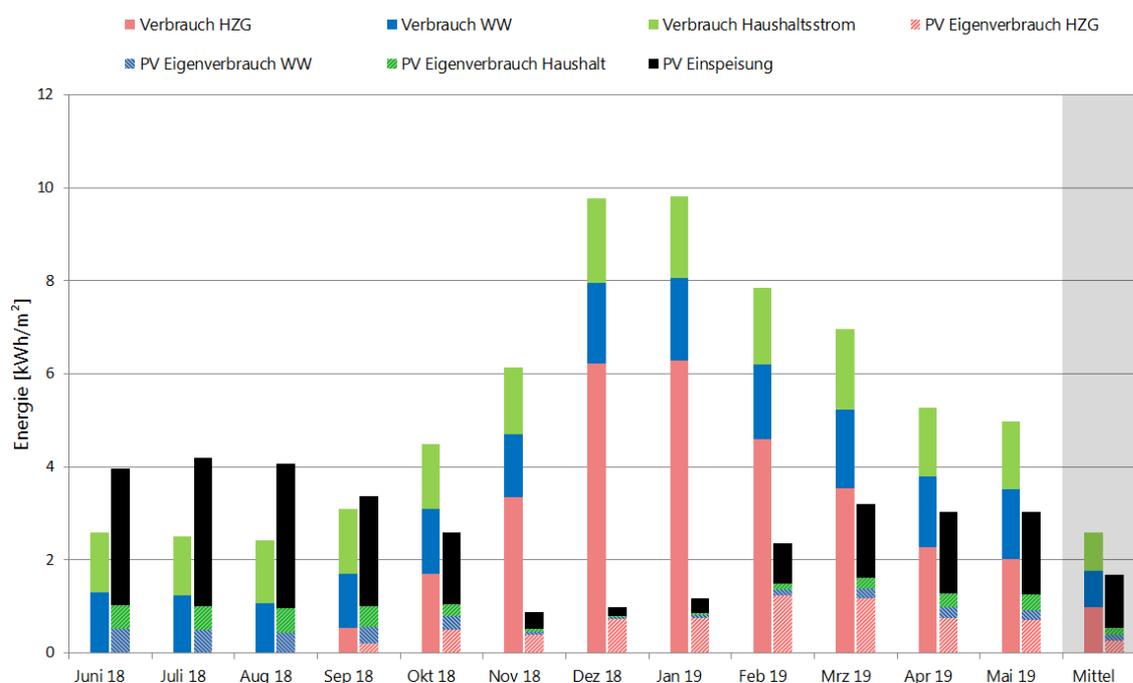


Abb. 159 Monatsstrombilanz für das Wohngebäude mit IR-Heizung, elektrischer Warmwasserbereitung und PV-Anlage – JAHR 2

Das Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch ist auch in der nachfolgenden Tabelle gut erkennbar.

Tab. 41 Monatswerte des PV-Eigenverbrauchs - JAHR 1

	PV-Energie kWh/m ²	Eigenverbrauch Gesamt	Eigenverbrauch Heizung	Eigenverbrauch Warmwasser	Eigenverbrauch Haushalt
Jun	4,04	16%	0%	5%	11%
Jul	4,25	17%	1%	5%	11%
Aug	4,08	18%	1%	5%	12%
Sep	2,26	25%	10%	5%	11%
Okt	2,95	26%	14%	4%	8%
Nov	1,21	53%	44%	3%	6%
Dez	1,45	71%	62%	4%	5%
Jan	1,15	62%	56%	4%	2%
Feb	0,70	67%	56%	6%	5%
Mrz	1,53	59%	47%	7%	4%
Apr	3,88	34%	12%	12%	10%
Mai	3,98	29%	5%	12%	12%
GESAMT Jahr 1	31,46	31%	15%	7%	9%

Tab. 42 Monatswerte des PV-Eigenverbrauchs - JAHR 2

	PV-Energie kWh/m ²	Eigenverbrauch Gesamt	Eigenverbrauch Heizung	Eigenverbrauch Warmwasser	Eigenverbrauch Haushalt
Jun	3,95	26%	0%	13%	13%
Jul	4,18	24%	0%	11%	12%
Aug	4,05	23%	0%	10%	13%
Sep	3,36	30%	6%	11%	13%
Okt	2,58	40%	19%	11%	10%
Nov	0,87	59%	44%	7%	8%
Dez	0,98	80%	73%	4%	3%
Jan	1,16	73%	64%	5%	4%
Feb	2,35	63%	52%	5%	5%
Mrz	3,18	50%	36%	7%	7%
Apr	3,03	42%	25%	7%	10%
Mai	3,02	41%	23%	7%	11%
GESAMT Jahr 2	32,72	40%	19%	9%	10%

4 Zusammenfassung

Aus der vergleichenden Untersuchung der beiden baugleichen Gebäude am selben Standort mit unterschiedlichen Heizsystemen konnten zu allen gesetzten Fragestellungen Erkenntnisse gewonnen werden. Die Ergebnisse beziehen sich hierbei naturgemäß nur auf die beiden analysierte Gebäude mit je sechs Wohneinheiten, und sind zum Teil von den spezifischen Rahmenbedingungen abhängig. Dennoch sind aus einigen der erzielten Ergebnisse durchaus systematische Zusammenhänge und verallgemeinerte Aussagen ableitbar. Die Auswertungen wurden jeweils für drei Varianten durchgeführt:

1. beheizt mit Fernwärme (Radiatoren)
2. elektrisch beheizt/Infrarot (ohne Berücksichtigung der PV-Anlage)
3. elektrisch beheizt/Infrarot mit Berücksichtigung der PV-Anlage

4.1 Herstellungskosten

Auf Basis der Unterlagen der Wohnbaugesellschaft wurden die tatsächlich verrechneten Kosten für Sanitärinstallation, Elektroinstallation, Heizanlage, Fernwärmeanschluss und Photovoltaik-Anlage verglichen. In Summe betragen die Kosten für die Installation 267€ pro Quadratmeter Wohnnutzfläche bei den Fernwärme-Wohnungen, 247€/m²_{WNF} (-7%) bei den Infrarot-Wohnungen ohne Berücksichtigung der PV-Anlage und 308€/m²_{WNF} (+15%) mit Berücksichtigung der PV-Anlage. Aus dem Vergleich der Kosten der beiden Objekte konnten indirekt die Kosten für die Heizungsanlage abgeleitet werden. Diese betragen beim Fernwärme-Objekt 90,3€/m²_{WNF} und beim Infrarot-Objekt 95,9€/m²_{WNF} (+6%). Die Differenzen bei den Gesamtkosten sind also vorwiegend auf den Fernwärme-Anschluss (25,2€/m²_{WNF}) und die Photovoltaikanlage (60,85€/m²_{WNF}) zurückzuführen.

4.2 Betriebskosten

Vergleicht man die Heizkosten der beiden Objekte so lag im Jahr 1 bzw. 2 das elektrisch beheizte Objekt um 1,4% bzw. 18,3% über dem mit Fernwärme beheizten Objekt. Die spezifischen Heizkosten lagen im Mittel beider Jahre bei 0,30€/m²_{WNF} beim IR-Objekt (inkl. PV) und bei 0,27€/m²_{WNF} beim mit Infrarot beheizten Objekt. Ohne Berücksichtigung der PV-Eigenproduktion würden die Kosten für die elektrische Beheizung um 20,0% (J1) bzw. 49,5% (J2) höher liegen.

Die Kosten für die Warmwasserbereitung hingegen lagen im Mittel beider Jahre beim Fernwärme gespeisten Objekt mit 20,2€ je Kubikmeter Warmwasser, deutlich über jenen der elektrischen Warmwasserbereitung (inkl. PV) mit 12,1€/m³ (+66,8%).

Vergleicht man die gesamten Betriebskosten für Beheizung und Warmwasserbereitung unter Annahme eines mittleren Warmwasserverbrauchs, so ergeben sich im Mittel beider Jahre spezifische Kosten von 0,51€/m²_{WNF} beim elektrisch beheizten Objekt und 0,65€/m²_{WNF} beim mit Fernwärme gespeisten Objekt. Insbesondere durch die deutlich geringeren Kosten der elektrischen Warmwasserbereitung liegen die Gesamtkosten im Vergleich zum elektrisch beheizten Objekt um 22% tiefer.

Es gilt zu berücksichtigen, dass bei der Fernwärme die Fixkosten (Wartung, Zählermiete, Ablesung etc.) eine signifikante Rolle spielen. Berücksichtigt man nur die verbrauchsgebundenen Kosten so wären diese geringer. Bei Objekten mit höherem Heizwärmebedarf (oder Warmwasserbedarf) ist davon auszugehen, dass der Betrieb mit Fernwärmenutzung günstiger ist. Bei Objekten mit noch geringerem Heizwärmebedarf spielen die Fixkosten die dominierende Rolle, deshalb wird die elektrische Beheizung relativ gesehen günstiger.

4.3 Wirtschaftlichkeit

Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde unter konservativen Annahmen eine Betrachtung für einen Zeitraum von 30 Jahren für alle Installationskomponenten und eine mittlere Wohnungsgröße (73 m²) durchgeführt. Für die technische Lebensdauer und jährlichen Wartungskosten der Infrarot-Heizung gibt es noch keine zuverlässigen Quellen. Die entsprechenden Werte wurden mit 30 Jahren bzw. 0,5% abgeschätzt. Der Vergleich beinhaltet neben dem Heizsystem auch die Warmwasserbereitung, welche bei der Fernwärme-Wohnung der größte Energieverbraucher darstellt. Hierbei ergab sich eine jährliche Zahlungsleistung von 1932 € für die Fernwärme-Wohnung, für die Infrarot-Wohnung lag diese um 4,6% niedriger bei 1842 €. Berücksichtigt man allerdings die Photovoltaik-Anlage so steigen die Annuitäten auf 1891 € und liegen damit nur mehr 2,1% unter jenen der Fernwärme-Wohnung, d.h. die Photovoltaik-Anlage amortisiert sich, ohne Berücksichtigung allfälliger Förderungen, im Betrachtungszeitraum noch nicht.

Beim Vergleich zeigte sich jedoch eine hohe Sensitivität bezüglich der volkswirtschaftlichen Parameter. Die Wirtschaftlichkeit über 30 Jahre wird maßgeblich von den angenommenen Energiepreissteigerungen, Zinssätzen und Inflationsraten bestimmt. Werden diese Parameter nur um ein Prozent variiert, so ist jeweils eine andere der drei Variante die wirtschaftlichste.

4.4 Energieverbrauch Heizung und Warmwasser

Im Mittelwert der beiden ausgewerteten Jahre lag der flächenspezifische, gemessene Endenergieverbrauch für die Heizung beim mit Fernwärme beheizten Objekt bei 34,3 kWh/ m²_{WNF.a} und bei 30,5 kWh/ m²_{WNF.a} beim elektrisch beheizten Objekt (-11%). Bezogen auf die Bruttogrundfläche sind das 26,8 kWh/m²_{BGF.a} bzw. 23,9 kWh/m²_{BGF.a}. Bei der Energieausweisberechnung ergab sich ein nomineller Bedarfswert von 28,4 kWh/m²_{BGF.a}.

Der Großteil des Mehrverbrauchs bei der Fernwärme lässt sich auf Verteilungsverluste im bzw. zum Objekt zurückführen. Eine Bereinigung bezüglich Abwesenheiten wurde nicht durchgeführt. Es ist jedoch aus den Messdaten der Raumsensoren und Befragungen ersichtlich, dass die Belegung im elektrisch beheizten Objekt signifikant geringer war.

Infolge der abweichenden Belegung, und des daraus resultierenden stark unterschiedlichen Warmwasserbezugs wurde der Energieverbrauch auf einen Kubikmeter Warmwasser bezogen. Hierbei ergab sich im Mittel beider Jahre ein spezifischer Energieverbrauch von 208,6 kWh/m³ beim Fernwärme-Haus, beim elektrisch betriebenen Warmwasserspeicher waren es nur 100,8 kWh/m³ (-45%). Die Unterschiede erklären sich systematisch aus den Verteilverlusten, welche bei der Warmwasserbereitung per Fernwärme erheblich sind.

4.5 Primärenergieverbrauch Heizung und Warmwasser

Berechnung mit monatlichen OIB-Konversionsfaktoren

Der flächenspezifische Gesamtprimärenergieverbrauch für die Heizung lag beim Fernwärme-Objekt im Mittel beider Jahre bei 56,0 Kilowattstunden pro Jahr und Quadratmeter Wohnnutzfläche, beim Infrarot-Objekt bei 54,0 kWh/m²_{WNF.a} (-3%), und unter Berücksichtigung der Photovoltaik-Eigennutzung bei 44,5 kWh/m²_{WNF.a} (-21%). Vergleicht man die wesentliche Komponente des Primärenergieverbrauchs aus nicht-erneuerbaren und nuklearen Energiequellen so zeigen sich erhebliche Unterschiede: Während das mit erneuerbarer Fernwärme beheizte Objekt nur 9,8 kWh/m²_{WNF.a} an nicht-erneuerbare oder nukleare Primärenergie benötigt, sind dies beim elektrisch beheizten 38,0 kWh/m²_{WNF.a} (+288%), bzw. bei Berücksichtigung der PV-Eigennutzung 31,5 kWh/m²_{WNF.a} (+222%).

Bei der Warmwasserbereitung per Fernwärme ergab sich ein Primärenergieverbrauch von 329 kWh je Kubikmeter Warmwasser. Die elektrische Warmwasserbereitung liegt auf Grund der geringeren Verluste um 50% bzw. 57% (mit PV Eigennutzung) niedriger. Berücksichtigt man nur Energie aus nicht erneuerbaren oder nuklearen Quellen, so dreht sich das Bild um, die elektrische Warmwasserbereitung liegt mit +81% bzw. +58% (inkl. PV-Nutzung) über dem Wert der Fernwärme.

Berechnung mit Ökobilanz-Ansatz

Der flächenspezifische Gesamtprimärenergieverbrauch für die Heizung lag beim Fernwärme-Objekt bei 51,1 Kilowattstunden pro Jahr und Quadratmeter Wohnnutzfläche, beim Infrarot-Objekt bei 63,0 kWh/m²_{WNF.a} (+23%), und unter Berücksichtigung der Photovoltaik-Eigennutzung bei 51,9 kWh/m²_{WNF.a} (+2%). Vergleicht man die wesentliche Komponente des Primärenergieverbrauchs aus nicht-erneuerbaren und nuklearen Energiequellen so zeigen sich erhebliche Unterschiede: Während das mit Fernwärme (Biomasse Holz) beheizte Objekt nur 4,5 kWh/m²_{WNF.a} an nicht-erneuerbare oder nukleare Primärenergie benötigt, sind dies beim elektrisch beheizten 42,9 kWh/m²_{WNF.a} (+843%), bzw. bei Berücksichtigung der PV-Eigennutzung 35,6 kWh/m²_{WNF.a} (+684%).

Bei der Warmwasserbereitung per Fernwärme ergab sich ein Primärenergieverbrauch von 299 kWh je Kubikmeter Warmwasser. Die elektrische Warmwasserbereitung liegt auf Grund der geringeren Verluste um 34% bzw. 43% (mit PV Eigennutzung) niedriger. Berücksichtigt man nur Energie aus nicht erneuerbaren oder nuklearen Quellen, so dreht sich das Bild um, die elektrische Warmwasserbereitung liegt mit +369% bzw. +304% erheblich über dem Wert der Fernwärme.

4.6 Treibhausgas-Emissionen

Berechnung mit monatlichen OIB-Konversionsfaktoren

Der hohe Verbrauch von Energie aus nicht-erneuerbaren Energiequellen schlägt sich bei den Emissionen der CO₂-Äquivalenten nieder. Während für eine Kilowattstunde Heiznutzenergie im Fernwärme-Objekt im Mittel nur 75,8 g an Treibhausgasen emittiert werden, sind dies bei der elektrischen Beheizung 274 g (+262%) bzw. unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung 248 g (+226%).

Für die Warmwasserbereitung werden beim Fernwärmeobjekt 12,1 kg an Treibhausgasen je Kubikmeter Warmwasser emittiert, bei der elektrischen sind dies 23,2 kg (+91%) bzw. unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung 21,6 kg (+78%).

Die markant höheren Treibhausgasemissionen sowohl bei der elektrischen Warmwasserbereitung (Faktor 1,8), als insbesondere auch bei der elektrischen Beheizung (Faktor 3,3), begründen sich in der aktuellen Stromzusammensetzung in Österreich, bei welcher nicht-erneuerbare bzw. fossile Energieträger immer noch einen erheblichen Anteil haben und insbesondere in der Heizperiode sogar überwiegen.

Berechnung mit Ökobilanz-Ansatz

Der hohe Verbrauch von Energie aus nicht-erneuerbaren Energiequellen schlägt sich bei den Emissionen der CO₂-Äquivalenten nieder. Während für eine Kilowattstunde Heiznutzenergie im Fernwärme-Objekt im Mittel nur 55,5 g an Treibhausgasen emittiert werden, sind dies bei der elektrischen Beheizung 331 g (+497%) bzw. unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung 300 g (+440%).

Für die Warmwasserbereitung werden beim Fernwärmeobjekt 8,9 kg an Treibhausgase je Kubikmeter Warmwasser emittiert, bei der elektrischen sind dies 29,4 kg (+232%) bzw. unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung 27,0 kg (+205%).

Die markant höheren Treibhausgasemissionen sowohl bei der elektrischen Warmwasserbereitung (Faktor 3), als insbesondere auch bei der elektrischen Beheizung (Faktor 5,4), begründen sich in der aktuellen Stromzusammensetzung in Österreich, bei welcher nicht-erneuerbare bzw. fossile Energieträger immer noch einen erheblichen Anteil haben und insbesondere in der Heizperiode sogar überwiegen.

Die markanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Berechnungsmethoden sind einerseits auf abweichende Konversionsfaktoren zurückzuführen, insbesondere aber darauf, dass beim von uns durchgeführten Ökobilanz-Ansatz die tatsächliche, stündliche Stromzusammensetzung zur Bewertung verwendet wurde. Bei regional hohem Heizbedarf infolge von Kaltwetterlagen ist in der Regel auch die Stromzusammensetzung deutlich ungünstiger, dieser Zusammenhang kann unter Verwendung von Monatsmittelwerten nicht abgebildet werden (siehe auch 3.10.1).

4.7 Behaglichkeit

Sowohl bei den Befragungen der Bewohner, als auch bei den Begehungen wurden nach der ersten Heizperiode signifikante Beeinträchtigungen der Behaglichkeitssituation bei den mit Infrarotpaneelen beheizten Wohnungen festgestellt. Beinahe alle Bewohner bemängelten die ungleichmäßige Verteilung der Wärme im großen Koch-Ess-Wohnbereich. Es konnte durch Modellierung und dreidimensionale Auswertung gezeigt werden, dass zentral im Raum eine physiologisch ungünstige, hohe vertikale Strahlungsasymmetrie vorliegt, während weiter entfernte und abgeschattete Bereiche des Raums als zu kühl empfunden werden. Durch die Nachrüstung von jeweils einem zusätzlichen Paneel in diesem Bereich konnte die Wärmeverteilung verbessert werden. Dies zeigte sich sowohl bei den Befragungen, als auch bei den durchgeführten dreidimensionalen Behaglichkeitsberechnungen.

Die gleichmäßige Verteilung der Strahlungswärme im Raum stellt jedoch grundsätzlich - und insbesondere bei Paneelen mit geringen Flächen und hohen Oberflächentemperaturen - auf Grund der physikalisch wirksamen Prinzipien (Abstandsgesetz) eine maßgebliche Herausforderung dar. Insbesondere bei der Deckenmontage gilt es auch zusätzliche physiologische Sensitivitäten zu berücksichtigen.

4.8 Photovoltaik-Eigendeckung

Bei der Analyse der Photovoltaik Eigendeckung des Heizstroms zeigt sich das natürlich bedingte Missverhältnis zwischen Bedarf und Angebot. Naturgemäß ist der Heizbedarf bei modernen Gebäuden immer dann am höchsten, wenn jahreszeitlich, tageszeitlich oder witterungsbedingt nur ein geringer solarer Eintrag verfügbar ist. Zu diesen Zeiten steht folglich in der Regel auch nur wenig Photovoltaik-Strom zur Verfügung. Dementsprechend liegt der Eigendeckungsgrad des Heizstroms als Mittelwert beider Auswertjahre in den heizintensivsten Monaten November bis Februar nur bei 13,8%. In den Monaten der Übergangsjahreszeit ergeben sich höhere Eigendeckungen bis 30% und darüber. Insgesamt wurde im Mittel über beide Heizperioden ein Eigendeckungsgrad des Heizstroms von 18,2% ermittelt.

Analysiert man den Eigennutzungsgrad der Photovoltaikanlage im Mittel über beide Auswertjahre so ergeben sich umgekehrt, in den Wintermonaten Werte von 50% bis 80%, während im Sommer auf Grund des Überangebots im Mittel nur 21% in der Wohnung genutzt werden können. Für das gesamte Jahr gesehen lag der gesamte Eigennutzungsgrad bei 35%. Der überwiegende Teil des erzeugten PV-Stroms wird also in das Netz eingespeist.

