

Abschlussbericht InfraMess

Fachabteilung Energie und Wohnbau



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

September 2018





ÖKOLOGISCHE WOHNBAUFÖRDERUNG

Für den Inhalt verantwortlich: FAEW Energietechnik und Klimaschutz

Layout: Ing. Marco Umgeher

www.wohnbau.steiermark.at

Herausgeber
Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Abt 15 - Fachabteilung Energie und Wohnbau
Landhausgasse 7
A – 8010 Graz

Telefon: +43/(0)316/877-3719
Fax: +43/(0)316/877- 4569
E-Mail: wohnbau@stmk.gv.at

© September 2018



Abschlussbericht

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 2018

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	5
1.1	Ausgangssituation / Motivation	5
1.2	Hintergrund und Zielsetzungen.....	6
1.3	Untersuchungsgegenstand und Methodik	9
2	MESSKONZEPT	15
2.1.1	Allgemeines.....	15
2.1.2	Messtechnikschema	15
3	ERGEBNISSE	19
3.1	Energieverbrauch	19
3.1.1	Monatsaufstellung der bezogenen Energiemengen.....	19
3.1.2	Energieverbrauch Heizung - Jahresvergleich.....	22
3.1.3	Energieverbrauch - Warmwasserbereitung	23
3.2	Raumfühler	24
3.2.1	Kohlenstoffdioxid	24
3.2.2	Fensterkontakte	26
3.2.3	Raumlufttemperatur	27
3.2.4	Relative Luftfeuchte.....	31
3.3	Befragungen zur Behaglichkeit	32
3.4	Behaglichkeitsmessung	35
3.4.1	Methode	35
3.4.2	Behaglichkeitsmessung – Beschreibung.....	35
3.4.3	Spot Messung - Beschreibung.....	39
3.4.4	Spotmessung – Ergebnisse und Interpretation.....	42
3.4.5	Verlauf der operativen Temperatur - informativ	46
3.4.6	Strömungsgeschwindigkeit der Luft - informativ	47
3.5	Dreidimensionale Behaglichkeitsanalyse – IR-Wohnung	48
3.5.1	Methode	48
3.5.2	Geometrisches Modell des Wohnzimmers und Oberflächentemperaturen	49
3.5.3	Ermittlung der View-Factors / Einstrahlzahlen	51
3.5.4	Dreidimensionale Berechnung des PMV-Index	51
3.5.5	Angewendete Lufttemperaturen und festgelegte Parameter	51
3.5.6	3d-Behaglichkeit: Omnidirektionale Strahlungstemperaturen	53
3.5.7	3d-Auswertung Behaglichkeit: PMV-Index.....	54
3.5.8	3d-Behaglichkeit: Vorhergesagter Prozentsatz Unzufriedener (PPD)	55
3.5.9	3d-Behaglichkeit: Vertikale Strahlungsasymmetrie	56
3.5.10	3d-Behaglichkeit: Vertikale Strahlungsasymmetrie im Bereich des IR-Paneels ...	57
3.5.11	Behaglichkeitsanalyse – IR-Wohnung Fazit.....	58
3.6	Funktionsweise der Heizungsregelung des Infrarot-Paneels.....	59
3.7	Verteilungsverluste Fernwärme – Wohnung	60
3.7.1	Wärmeverteilung.....	60

3.7.2	Messung der Verteilungsverluste	60
3.7.3	Thermische Simulation Rohrleitungsverluste	61
3.7.4	Bilanzierung der Verteilungsverluste	63
3.7.5	Gegenüberstellung von Simulation und Messung	64
3.7.6	Thermografie – Verteilungsverluste.....	65
3.7.7	Optimierungspotential Verteilungsverluste	66
3.8	Wirtschaftlichkeitsvergleich (Herstellkosten-Betriebs- und Wartungskosten)	67
3.8.1	Allgemeines.....	67
3.8.2	Herstellungskosten.....	67
3.8.3	Betriebs- und Wartungskosten.....	70
3.8.4	Wirtschaftlichkeitsabschätzung – 30 Jahre Zyklus.....	78
3.9	Vergleich Primärenergieverbrauch und CO₂ Äquivalente Emissionen	80
3.9.1	Methodik und Analyse Strommix Österreich	80
3.9.2	Primärenergie und CO ₂ -Äquivalente Heizsystem	83
3.9.3	Primärenergie und CO ₂ -Äquivalente Warmwasserbereitung.....	86
3.9.4	Vergleich der Treibhausgas-Emissionen.....	88
3.10	PV Eigenverbrauch.....	89
3.10.1	Allgemein	89
3.10.2	Eigennutzung.....	89
3.10.3	Eigendeckung des Heizstroms.....	91
3.10.4	Monats-Bilanzierung.....	92
3.10.5	Eigenverbrauch-Optimierung	93
4	ZUSAMMENFASSUNG.....	94
4.1	Herstellungskosten	94
4.2	Betriebskosten	94
4.3	Wirtschaftlichkeit.....	94
4.4	Energieverbrauch Heizung und Warmwasser.....	95
4.5	Primärenergieverbrauch Heizung und Warmwasser.....	95
4.6	Treibhausgas-Emissionen	95
4.7	Behaglichkeit	96
4.8	Photovoltaik-Eigendeckung.....	96

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 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. 1), 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).

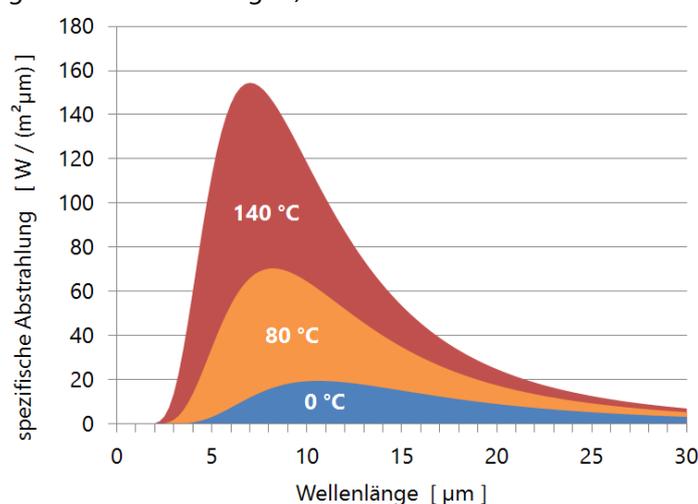


Abb. 1 Wärmestrahlung bei unterschiedlichen Temperaturen

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. 2).

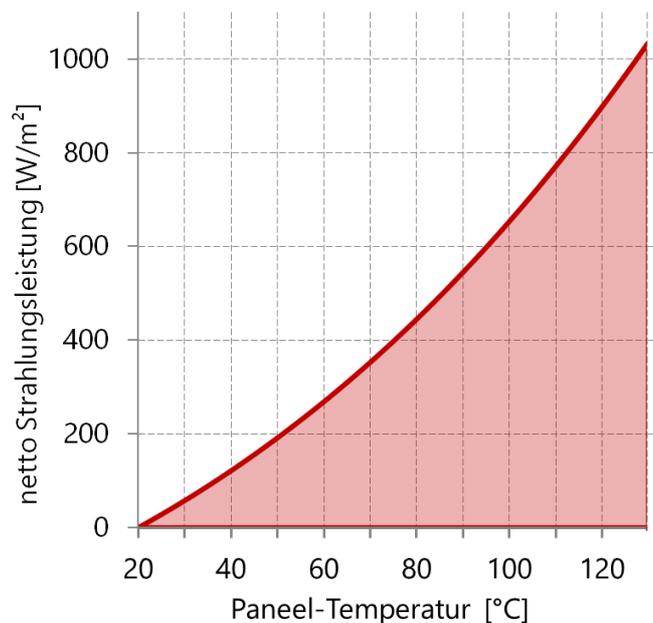


Abb. 2 Beispiel abgegebene Strahlungsleistung abhängig von der Paneel-Temperatur
(bei 20°C Umgebungstemperatur, 0.96 Emissionsgrad)

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

1.3 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. 3). 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	
Bruttogeschossfläche (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

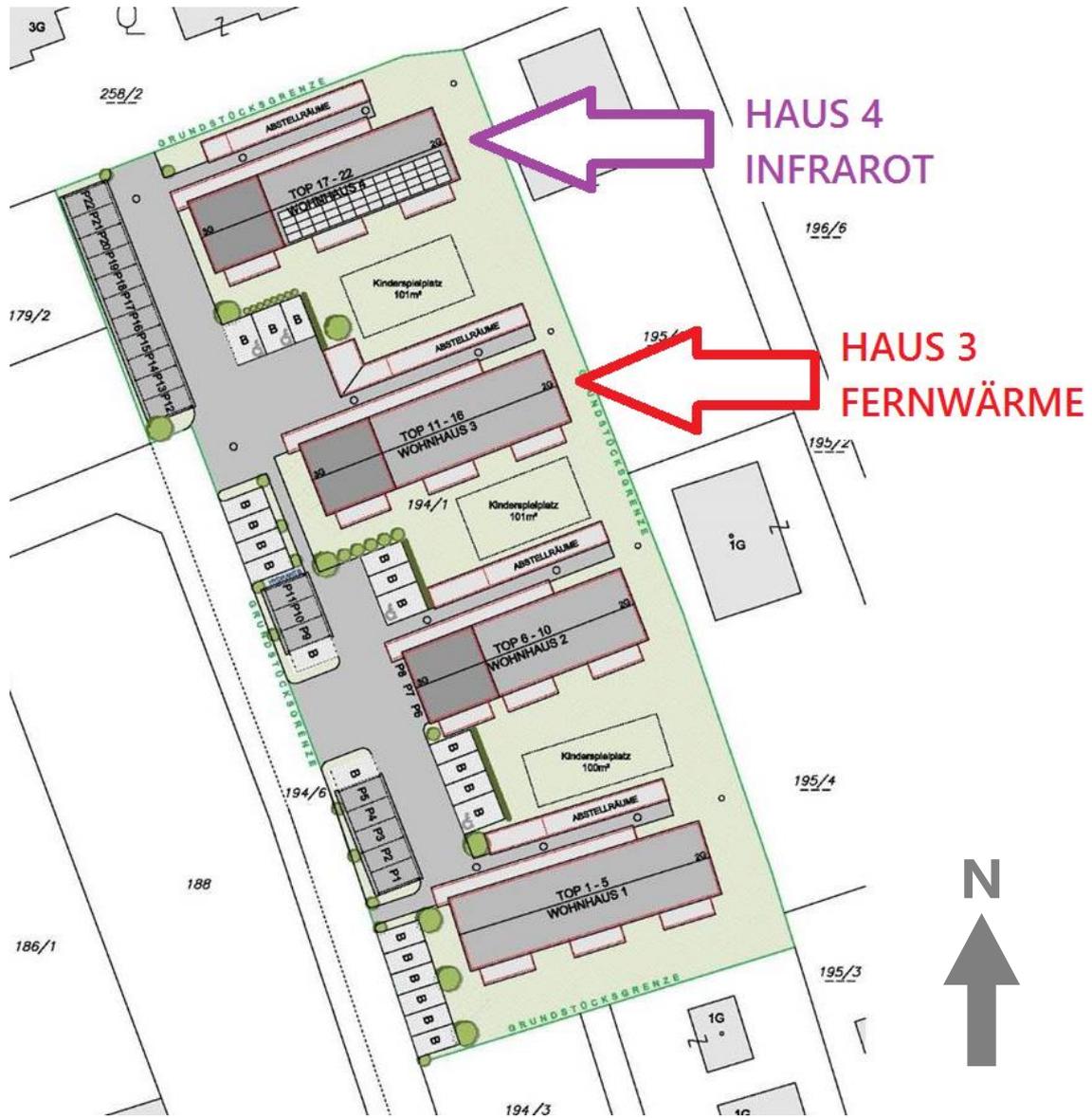


Abb. 3 Lageplan – Siedlung

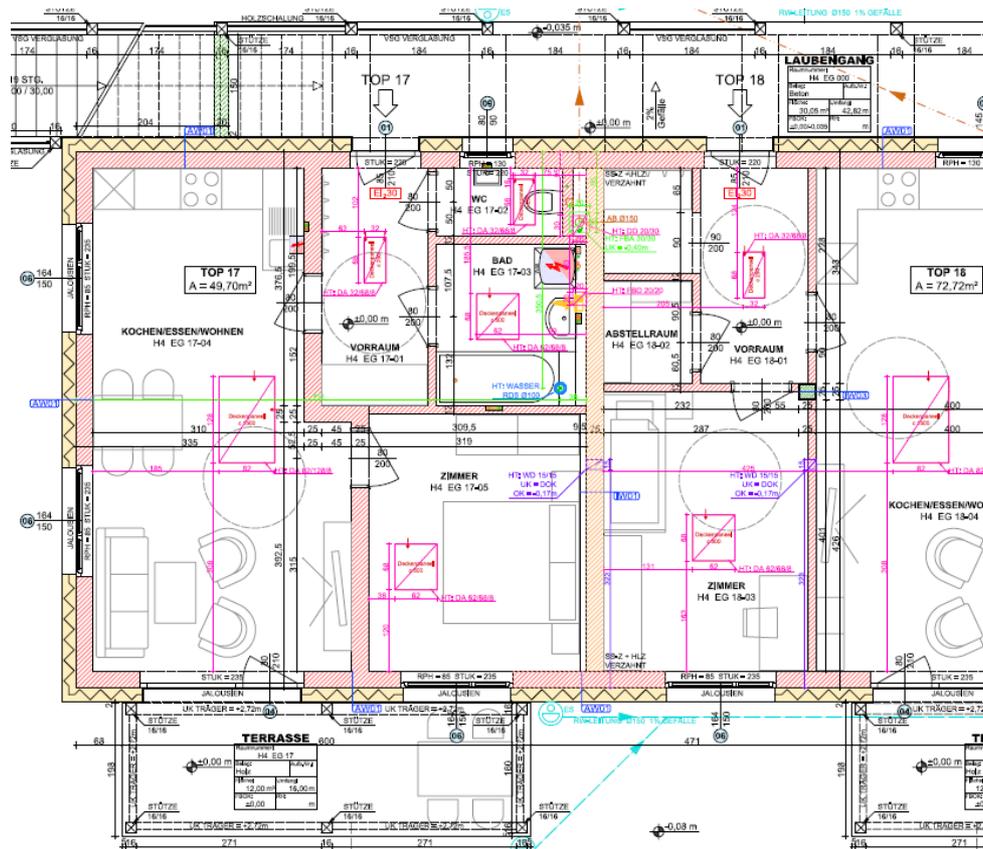


Abb. 4 Grundriss EG – Wohnung in Haus 4

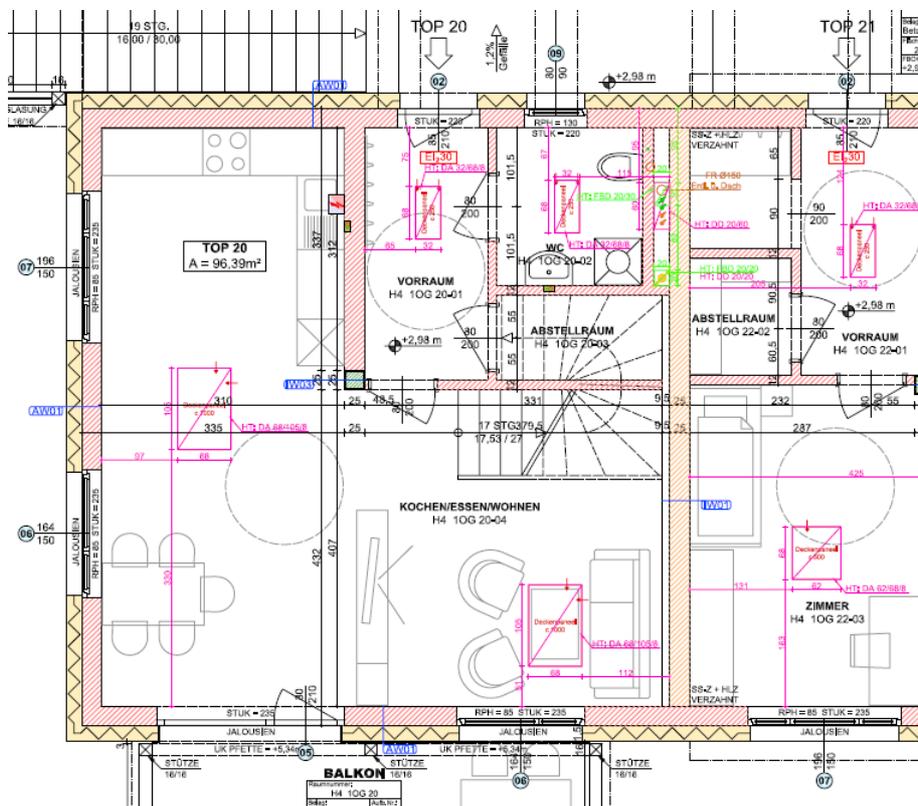


Abb. 5 Grundriss OG – Wohnung in Haus 4

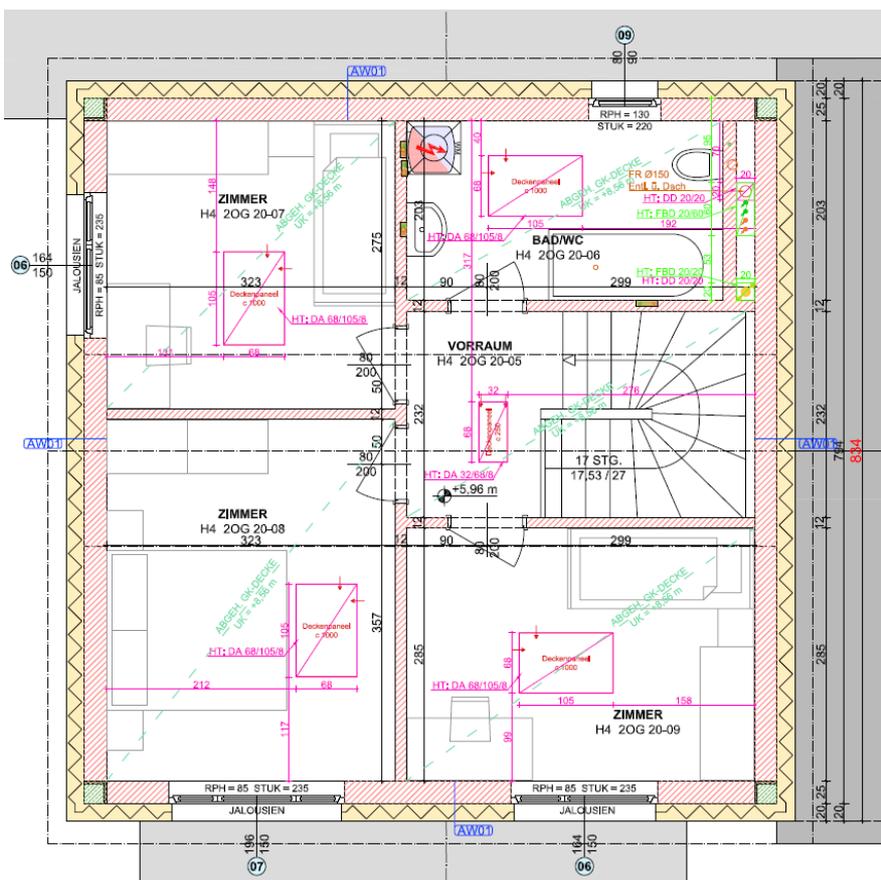


Abb. 6 Grundriss DG – Wohnung in Haus 4

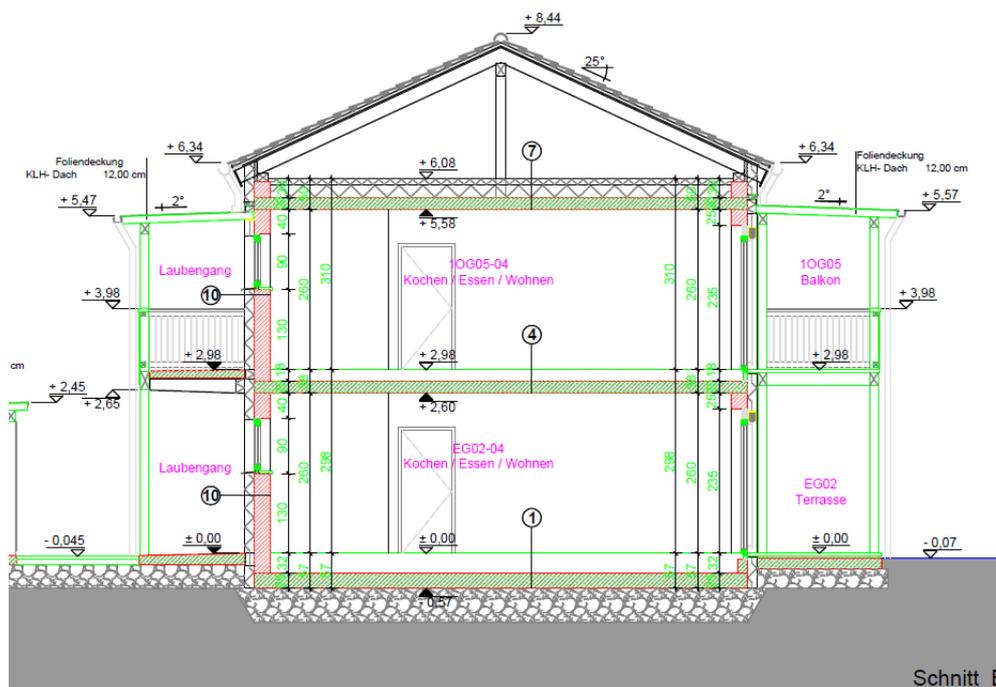


Abb. 7 Vertikalschnitt Haus 4



Abb. 8 Foto Siedlung
(Haus 4 ganz hinten mit PV-Anlage, Haus 3 davor)



Abb. 9 Haus 4 bei Fertigstellung - Südseite



Abb. 10 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.

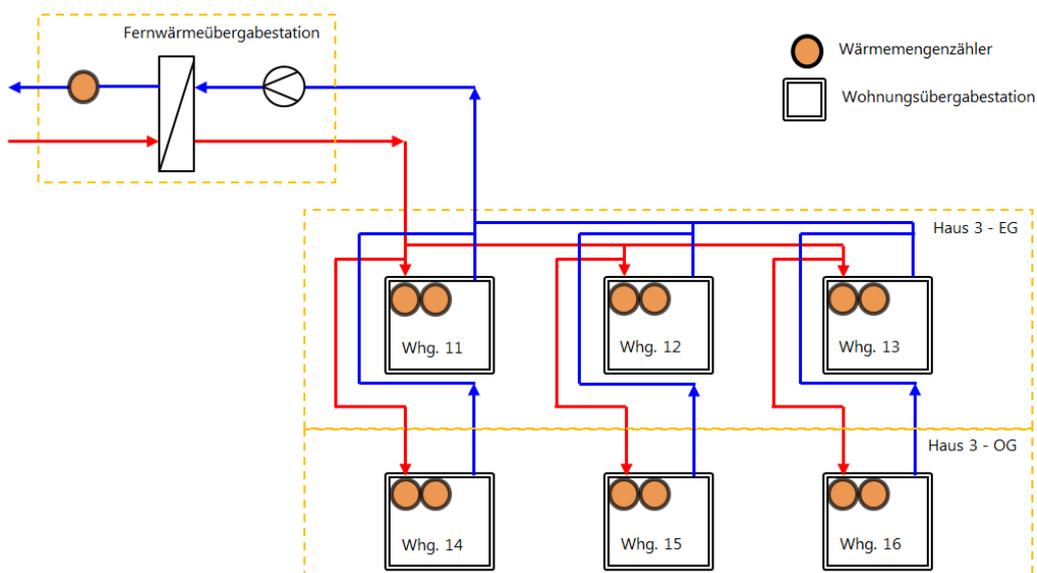


Abb. 11 Übersichts-Schema der Wärmeversorgungsleitungen.

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

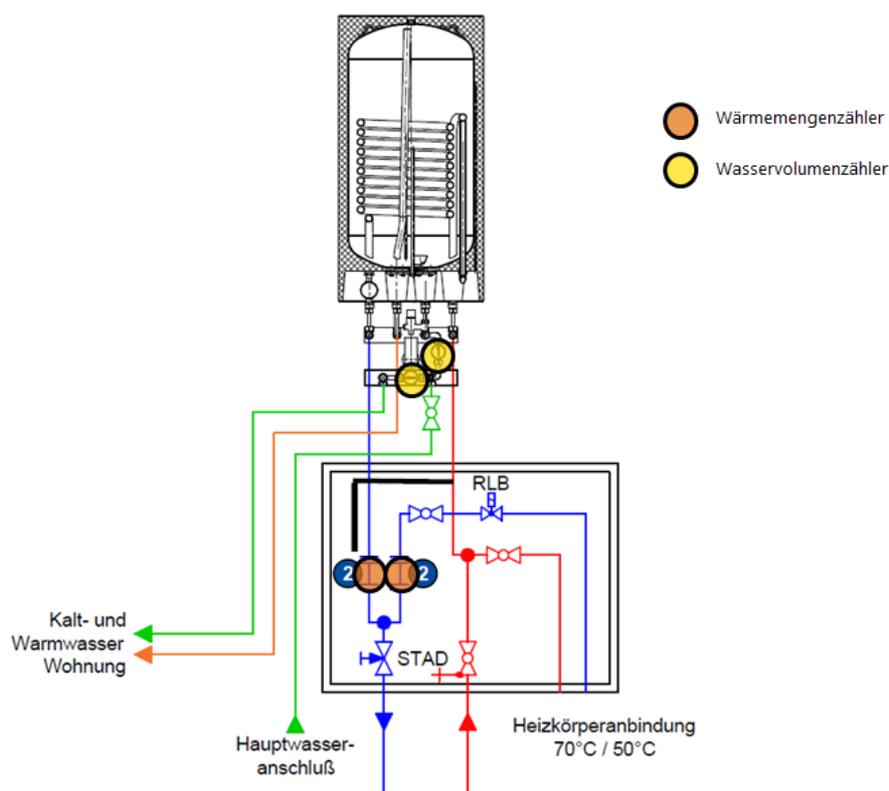


Abb. 12 Wärme- und Wasserversorgung der Wohnungen im Detail,

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)

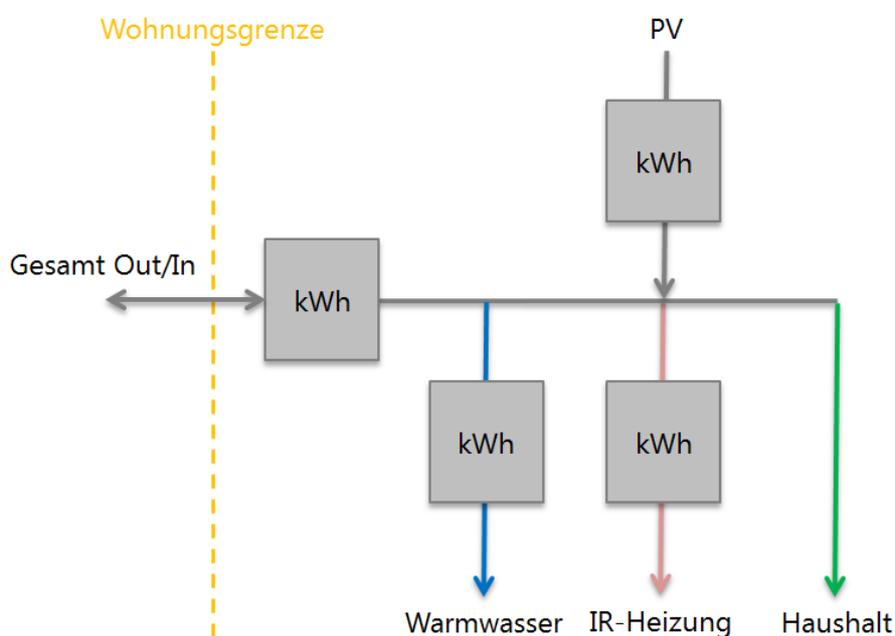


Abb. 13 Messung der elektrischen Leistung und Energie: Netzbezug, Netzeinspeisung, PV-Produktion und der Stromverbraucher: Warmwasser, Heizung und Haushaltstrom (indirekt)

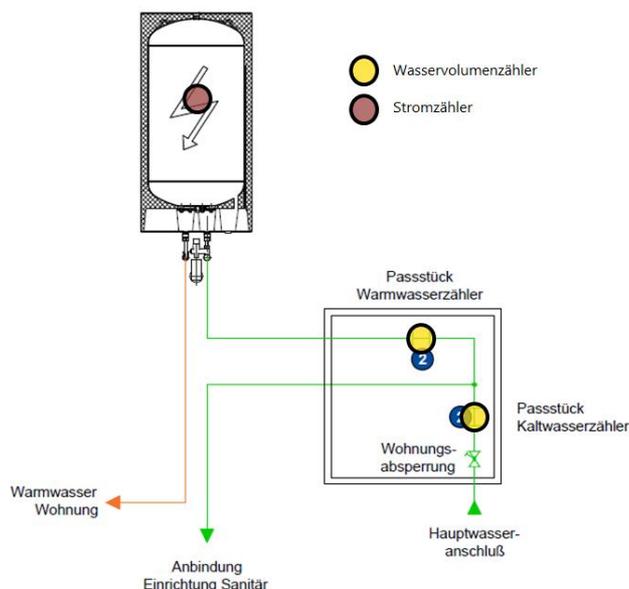


Abb. 14 Messung der Kalt- und Warmwasservolumina in den Infrarot-Wohnungen.

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.

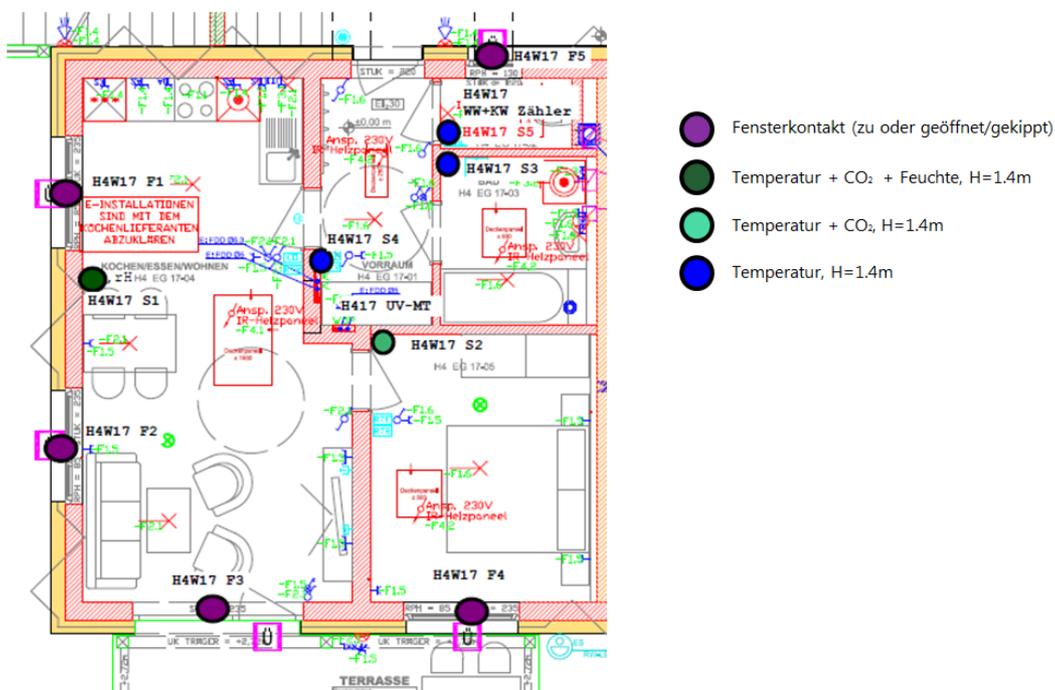


Abb. 15 Anordnung der Sensoren zur Bestimmung des Raumklimas
(am Beispiel von Wohnung 17 im IR-Gebäude)

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 das Jahr 2017 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 Summe der Wohnungszähler ermitteln.

Tab. 2 Monatswerte des Energieverbrauchs von Haus 3 – Fernwärme

	Gesamtenergie (Übergabestation) [kWh]	Heizenergie- verbrauch (Wohnungszähler) [kWh]	Warmwasser- energieverbrauch (Wohnungszähler) [kWh]	Verteilungsver- luste (Differenz) [kWh]
Jan. 17	6538	3589	1597	1352
Feb. 17	4735	2273	1386	1076
Mrz. 17	3670	1066	1408	1196
Apr. 17	3011	554	1341	1116
Mai. 17	2159	139	1184	836
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
Gesamt 2017	40262	12270	15056	12936

Anhand von Simulationen und weiteren Berechnungen konnte eine gute Abschätzung der Verlustverteilung durchgeführt werden (siehe Kapitel 3.7). 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 Wohnungsinnere 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.

Tab. 3 monatliche Zuordnung der Leitungsverluste für Haus 3 – Fernwärme

	Verteilungsverluste [kWh]	nutzbar als Heizwärme [kWh]	nicht nutzbar	
			der Heizung zugeordnet [kWh]	der Warmwasser- bereitung zugeordnet [kWh]
Jan. 17	1352	426	641	285
Feb. 17	1076	339	458	279
Mrz. 17	1196	377	353	466
Apr. 17	1116	352	223	541
Mai. 17	836	0	88	748
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
Gesamt 2017	12936	2794	3352	6790

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. 4 Monatswerte des elektrischen Energieverbrauchs von Haus 4 – Infrarot

	Heizung [kWh]	Warmwasserbereitung [kWh]
Jan. 17	3757	578
Feb. 17	2593	565
Mrz. 17	1408	753
Apr. 17	976	769
Mai. 17	364	658
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
Gesamt 2017	14448	7193

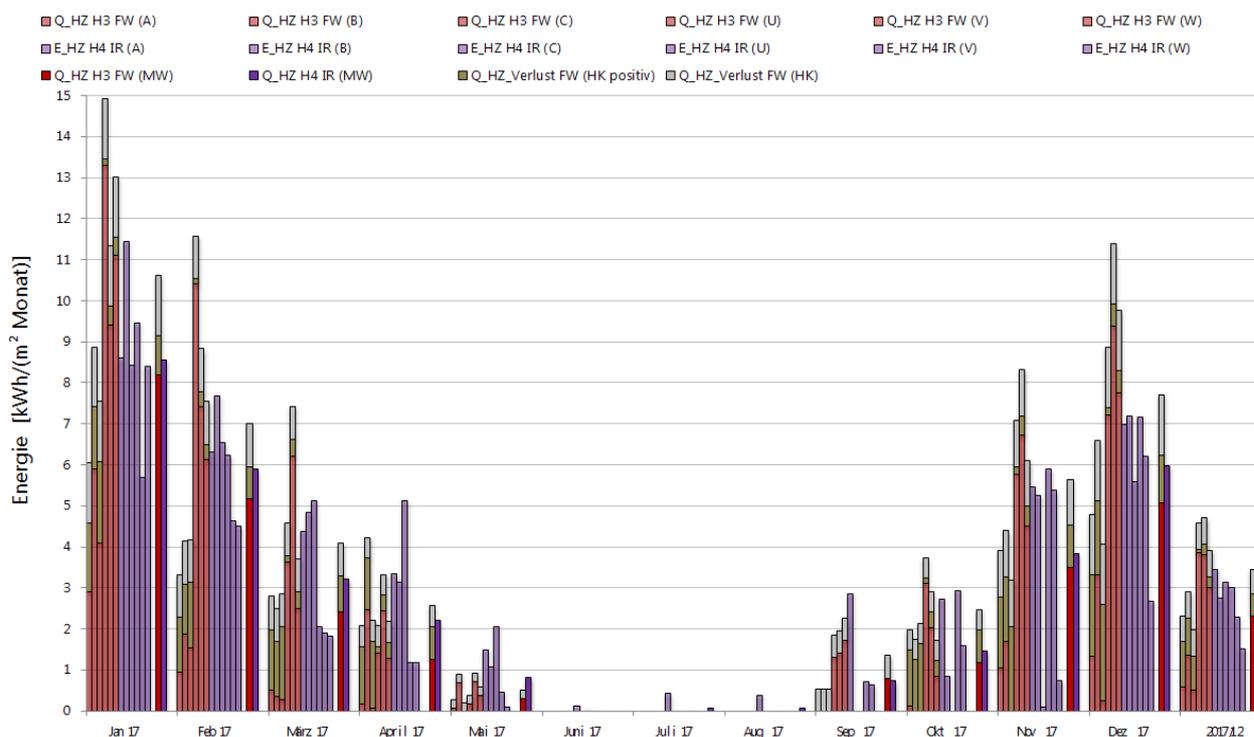


Abb. 16 Monatsdarstellung der Heizwärmern für die untersuchten Objekte

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 3.7).

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 2017 messtechnisch ermittelte - tatsächliche - spezifische Heizendenergieverbrauch, bezogen auf die Wohnnutzfläche, lag beim Fernwärme-Haus bei 42,0 kWh/m²_{WNFA} und beim IR-Haus bei 32,6 kWh/m²_{WNFA}. Beim Endenergieverbrauch des Fernwärme-Hauses wurden die Verteilverluste gemäß der durchgeführten Verlustzuordnung berücksichtigt (siehe Kapitel 3.7). Entsprechend dieser Bilanzierung sind 7,6 kWh/m²_a nicht nutzbar, da sie an die Umgebung (Erdreich, Außenluft) abgegeben werden. Nutzbar hingegen sind 6,4 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 34,4 kWh/m²_{WNFA} welcher als Nutzenergie für die Heizung abgegeben wurde. Die Abweichungen zwischen Realverbräuchen und Heizwärmebedarfswert des Energieausweises liegen 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.

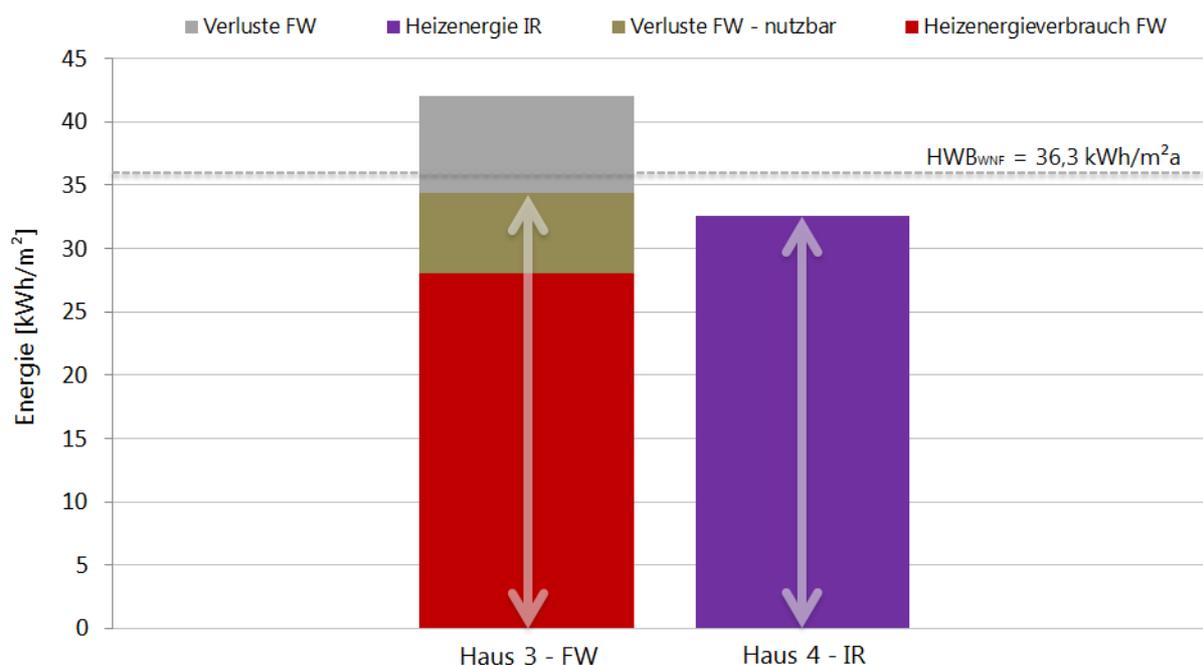


Abb. 17 Jahresvergleich des Heizwärmeverbrauchs, bezogen auf die Wohnnutzfläche
(Pfeile: in die Wohnungen abgegebene Nutzwärme; Gesamthöhe der Balken: Endenergie)

Wie in der Abbildung oben erkennbar ist, liegt der Nutzenergieverbrauch der beiden Objekte in einem vergleichbaren Bereich in der Nähe des im Rahmen des Energieausweises berechneten Wertes. Alle Werte wurden auf die Wohnnutzfläche bezogen. Der Endenergieverbrauch des mit Fernwärme beheizten Gebäudes ist auf Grund der Verteilverluste im bzw. zum Objekt deutlich höher.

3.1.3 Energieverbrauch - Warmwasserbereitung

Entsprechend des im Kapitel 3.7 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 wurden deshalb vernachlässigt.

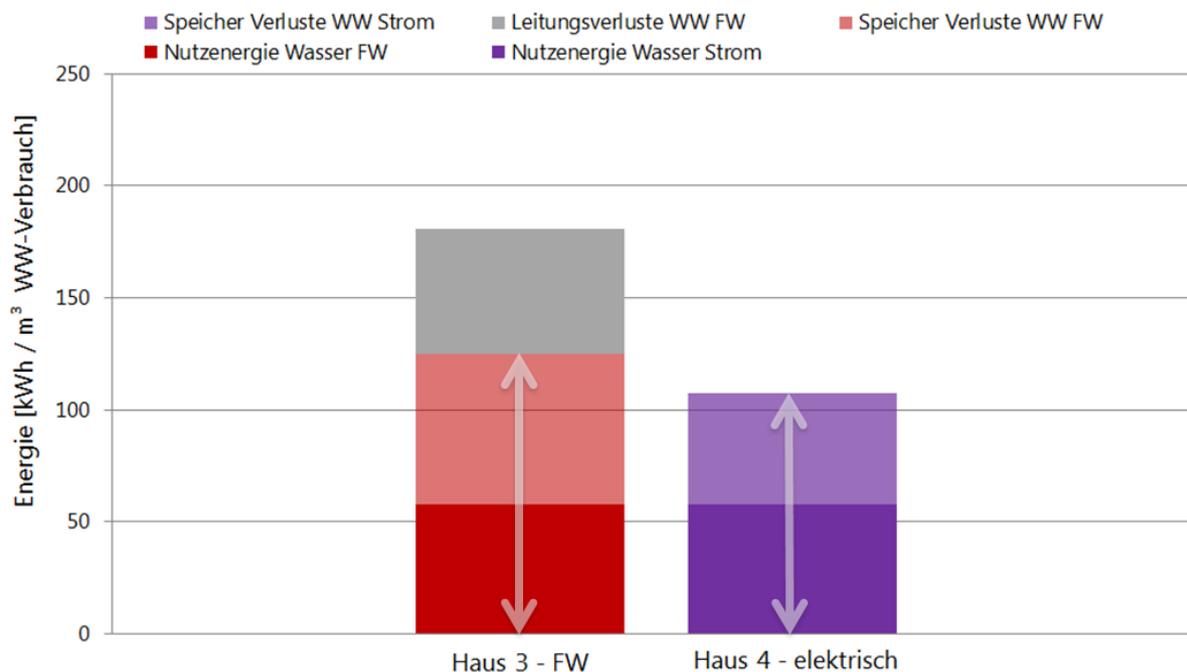


Abb. 18 Jahresvergleich des Energieverbrauchs für die Warmwasserbereitung bezogen auf einen Kubikmeter Warmwasser

(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 180,9 kWh aufgewendet, beim elektrisch betriebenen Warmwasserspeicher im Infrarot-Haus sind es nur 107,6 kWh. Unter der Annahme einer Kaltwassertemperatur von 10 °C und einer Warmwassertemperatur von 60 °C ergibt sich kalorimetrisch ein Energieaufwand von 58,0 kWh/m³ welcher für die entsprechende Erhöhung der Wassertemperatur mindestens erforderlich ist (unterster Bereich im Diagramm). Die darüber liegenden Bereiche stellen die Speicherverluste dar. 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 56,2 kWh/m³.

3.2 Raumfühler

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

3.2.1 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.

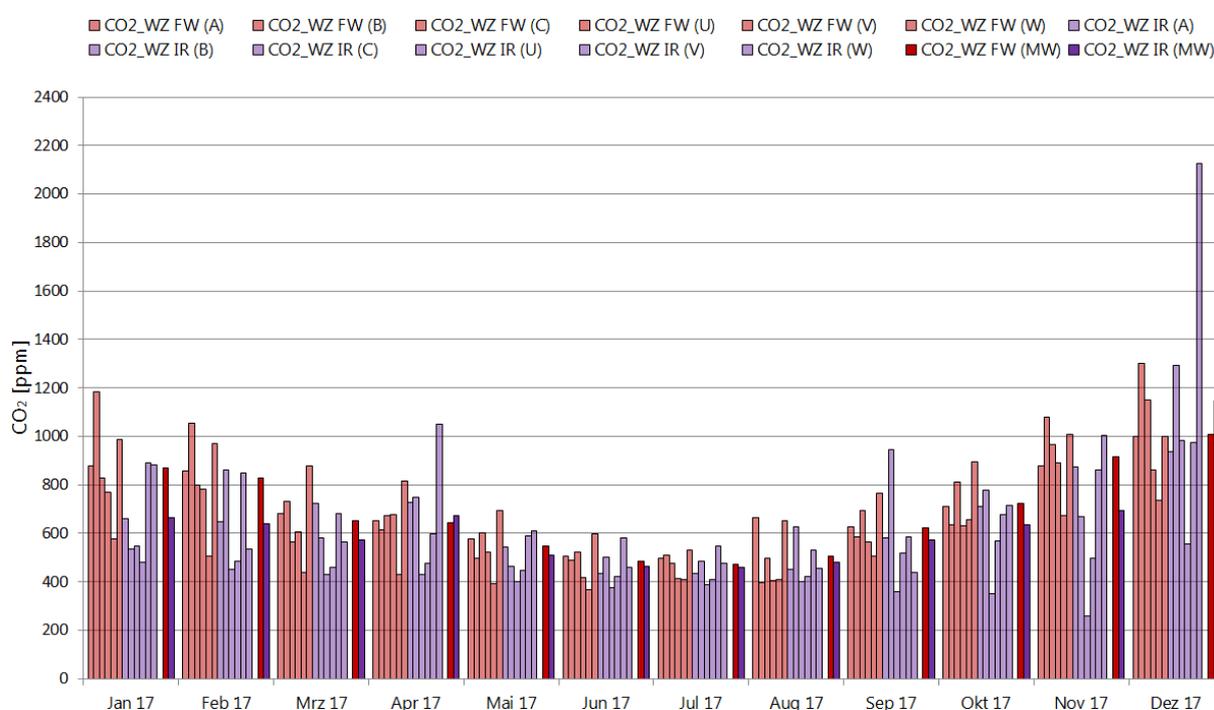


Abb. 19 CO₂ Konzentration im Wohnzimmer.
Monatsmittelwerte aller Wohnungen

Bei den Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen in den Wohnzimmern sind keine großen Unterschiede erkennbar. In den Monaten September bis November sind in jeweils einer Infrarot-Wohnung sehr geringe Werte erkennbar, welche auf eine vermehrte Abwesenheit der jeweiligen Nutzer zurückzuführen sein dürften. Der Ursache für den hohen Wert im Dezember wurde nicht nachgegangen. Die vom Sensor aufgezeichneten Werte deuten nicht auf einen Messfehler hin.

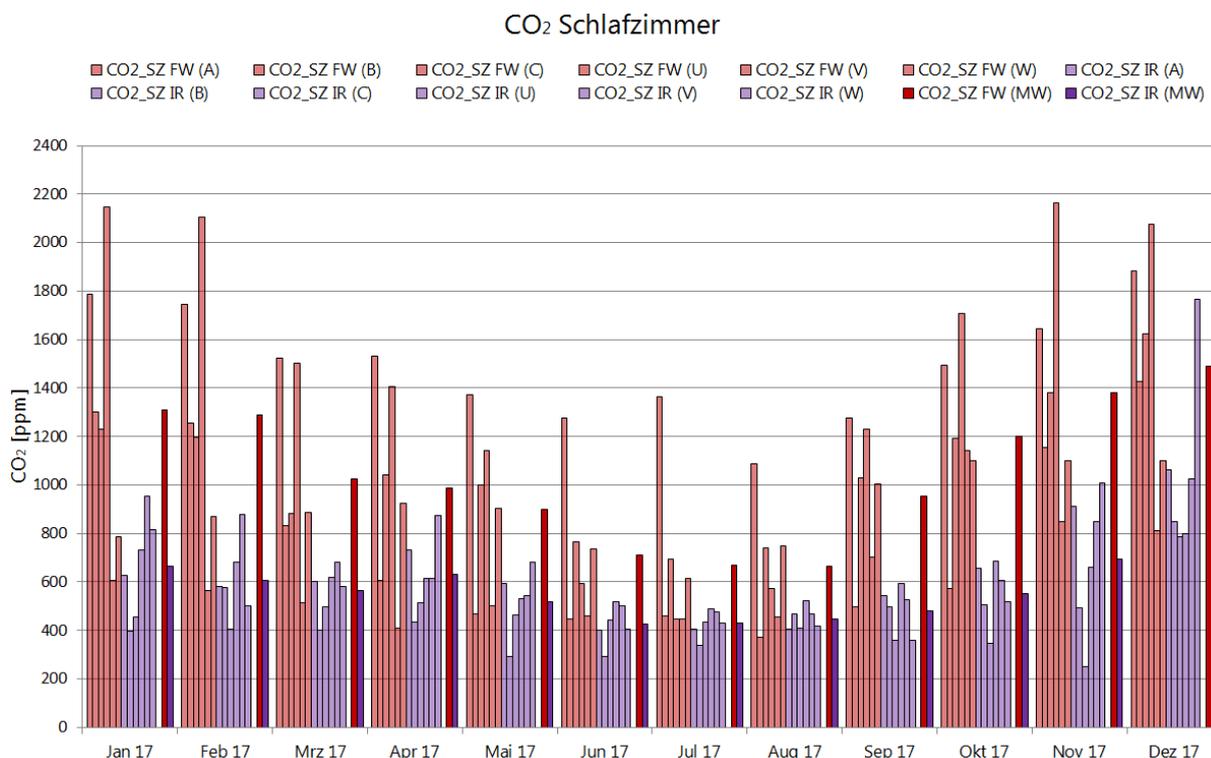


Abb. 20 CO₂ Konzentration im Schlafzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen

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 Aufenthaltsraum genutzt wird.

3.2.2 Fensterkontakte

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

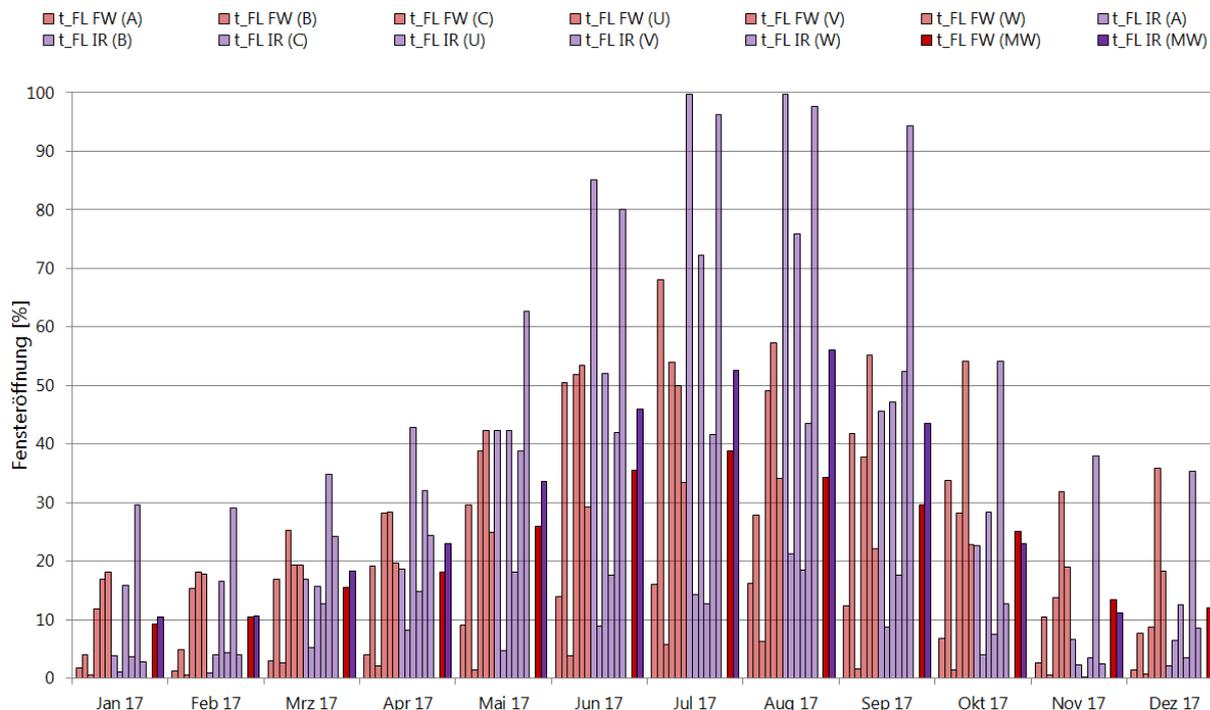


Abb. 21 Fensteröffnungen - Monatsmittelwert für alle Wohnungen

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.

In den Sommermonaten weichen die Fensteröffnungen auf Grund unterschiedlichen Nutzerverhaltens bei einigen Wohnungen erheblich ab. Dies hat aber wenig Einfluss auf den Vergleich des Heizenergieverbrauchs.

3.2.3 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 nicht dem direkten Einfluss der 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.

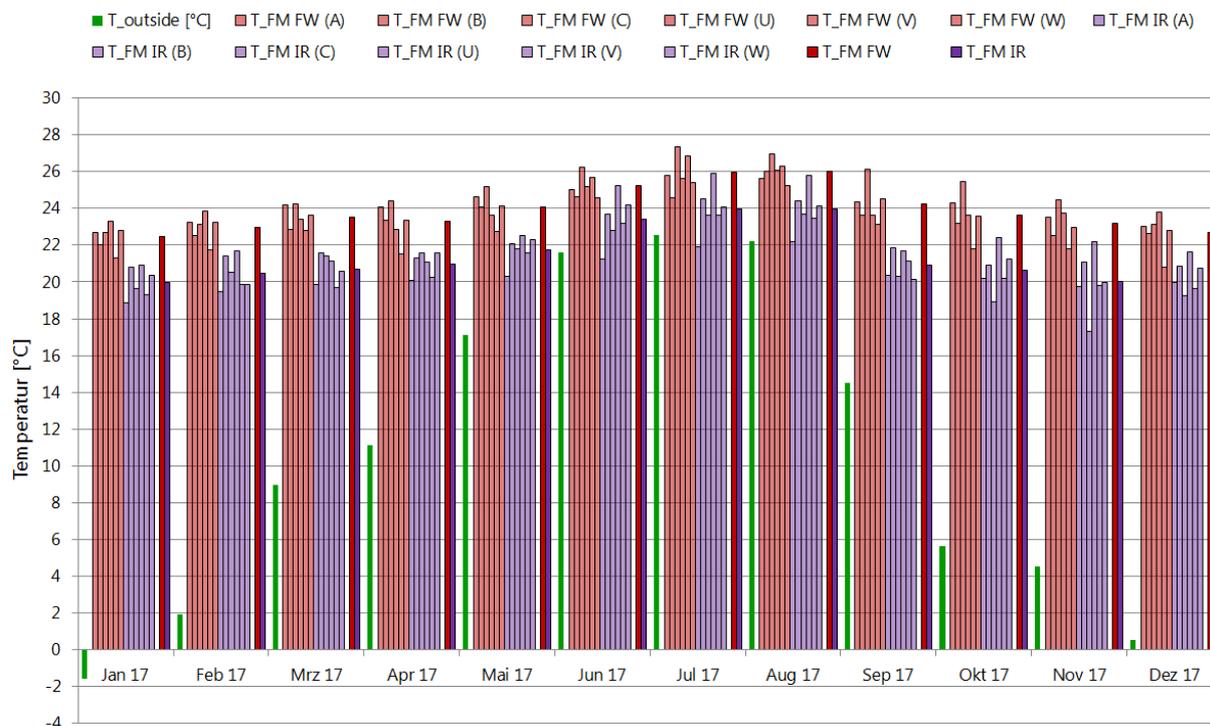


Abb. 22 Raumlufthtemperaturen für alle Wohnungen
Flächengemittelte Monatsmittelwerte

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.

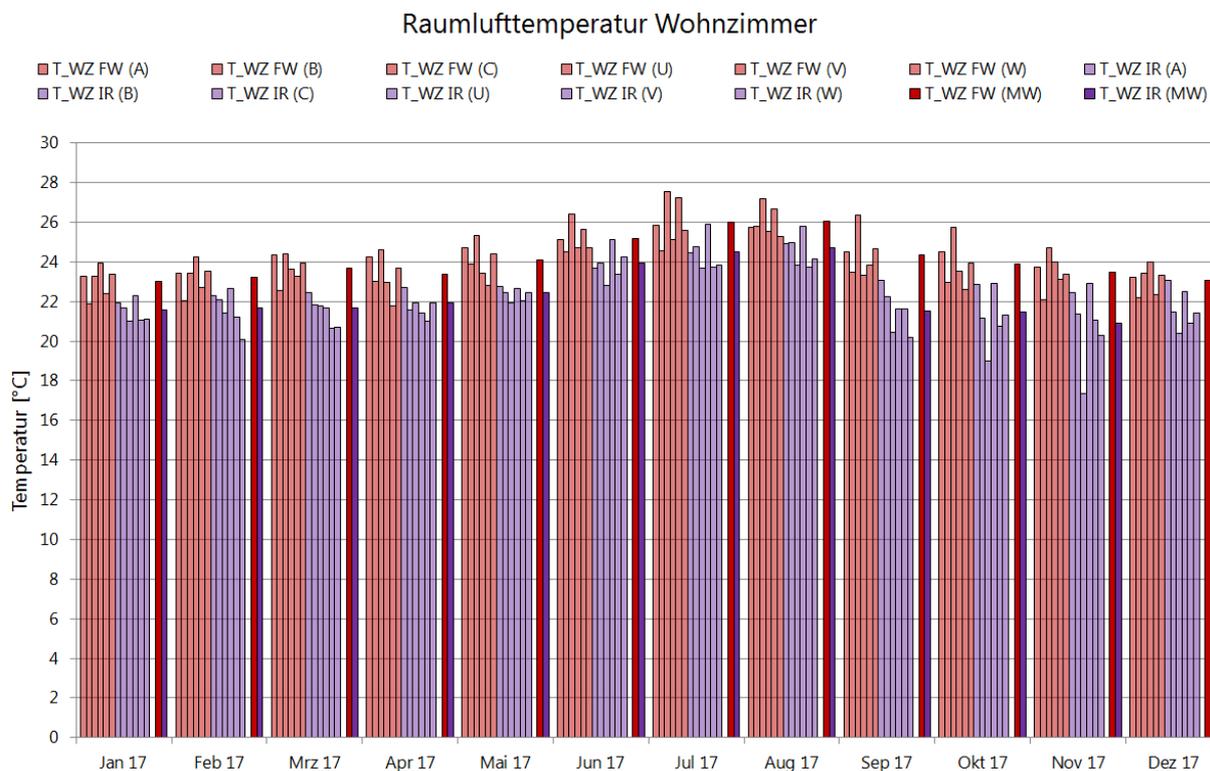


Abb. 23 Raumlufttemperaturen im Wohnzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen

Werden explizit nur die Raumlufttemperaturen der Wohnzimmer untersucht, so ist immer noch erkennbar, dass diese in den Infrarot-Wohnungen geringer sind als in den Fernwärme-Wohnungen. Die Unterschiede fallen im Wohnzimmer jedoch geringer aus. Dies deutet darauf hin, dass die insgesamt höheren Unterschiede in der Abbildung zuvor auch auf die geringere Belegungsdichte zurückzuführen ist. Es ist anzunehmen, dass diese wenig oder nicht genutzten Räume in den Infrarot-Wohnungen auch entsprechend geringer beheizt wurden.

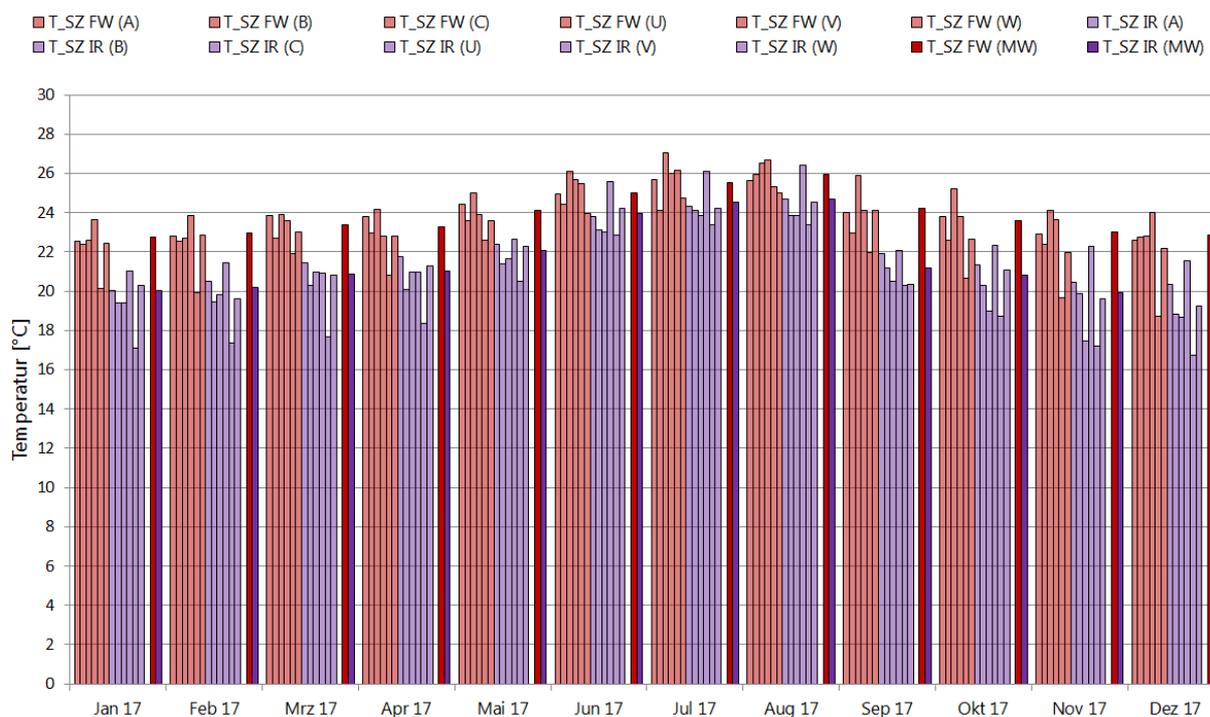
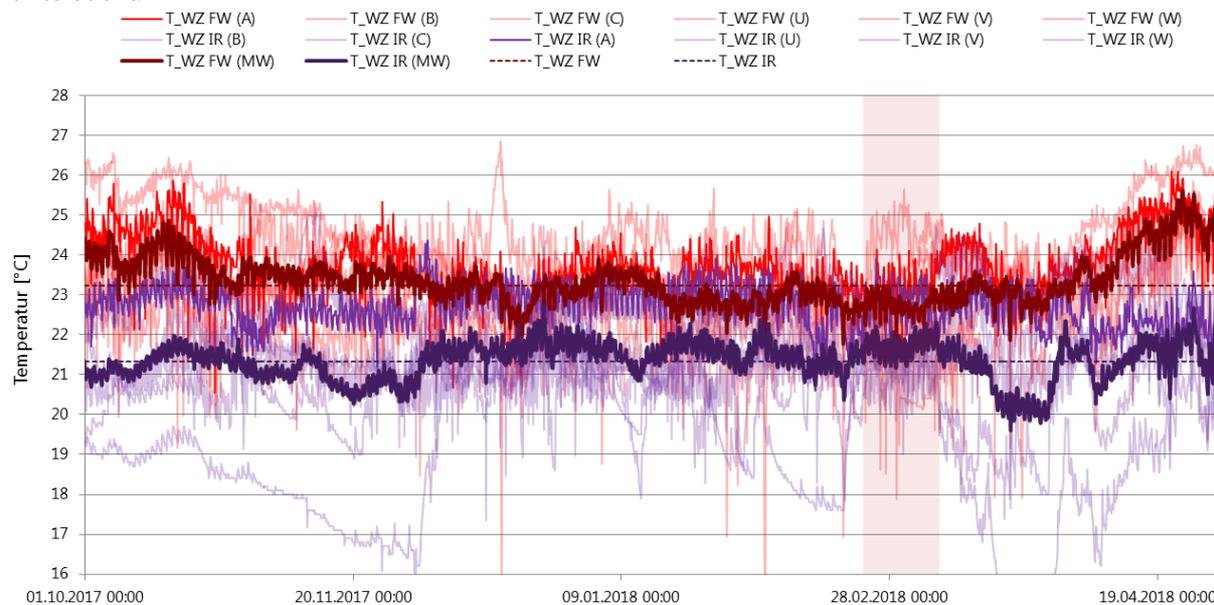


Abb. 24 Raumlufttemperaturen im Schlafzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen

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. Die geänderte Raumnutzung ist auch bei den Messwerten der CO₂-Konzentration deutlich erkennbar.

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. 25 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 lagen. 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).

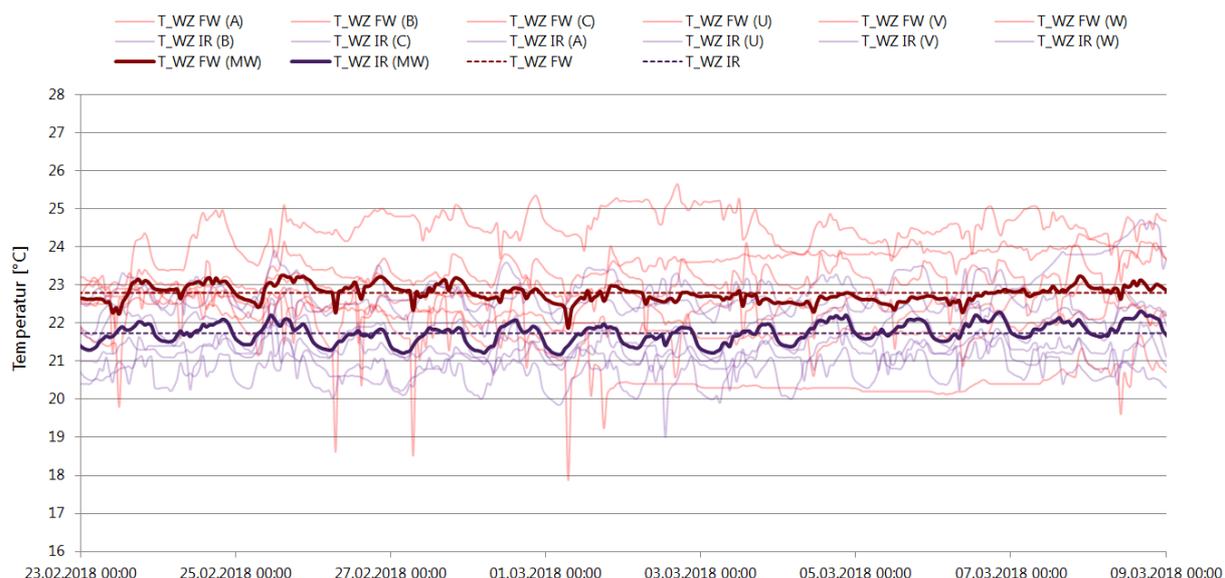


Abb. 26 Raumlufttemperaturen im Schlafzimmer. Verlauf für alle Wohnungen.

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. 30).

3.2.4 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.

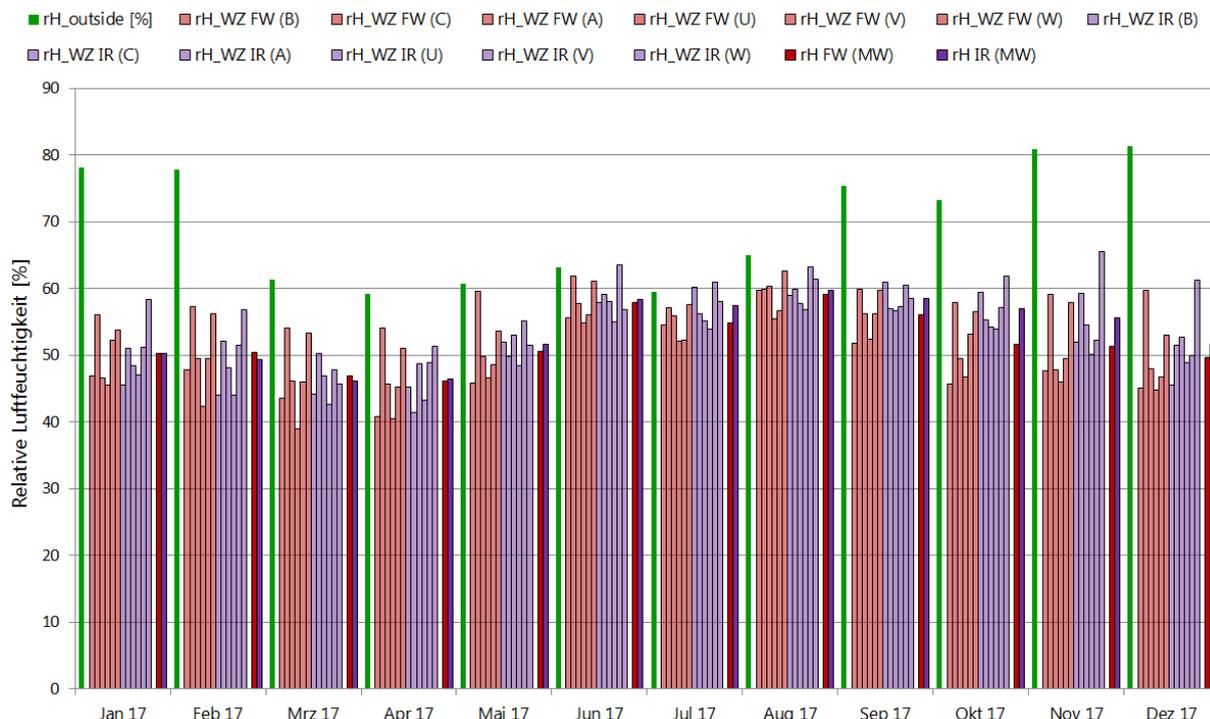


Abb. 27 Relative Luftfeuchte im Wohnzimmer. Monatsmittelwerte für alle Wohnungen

3.3 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.

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

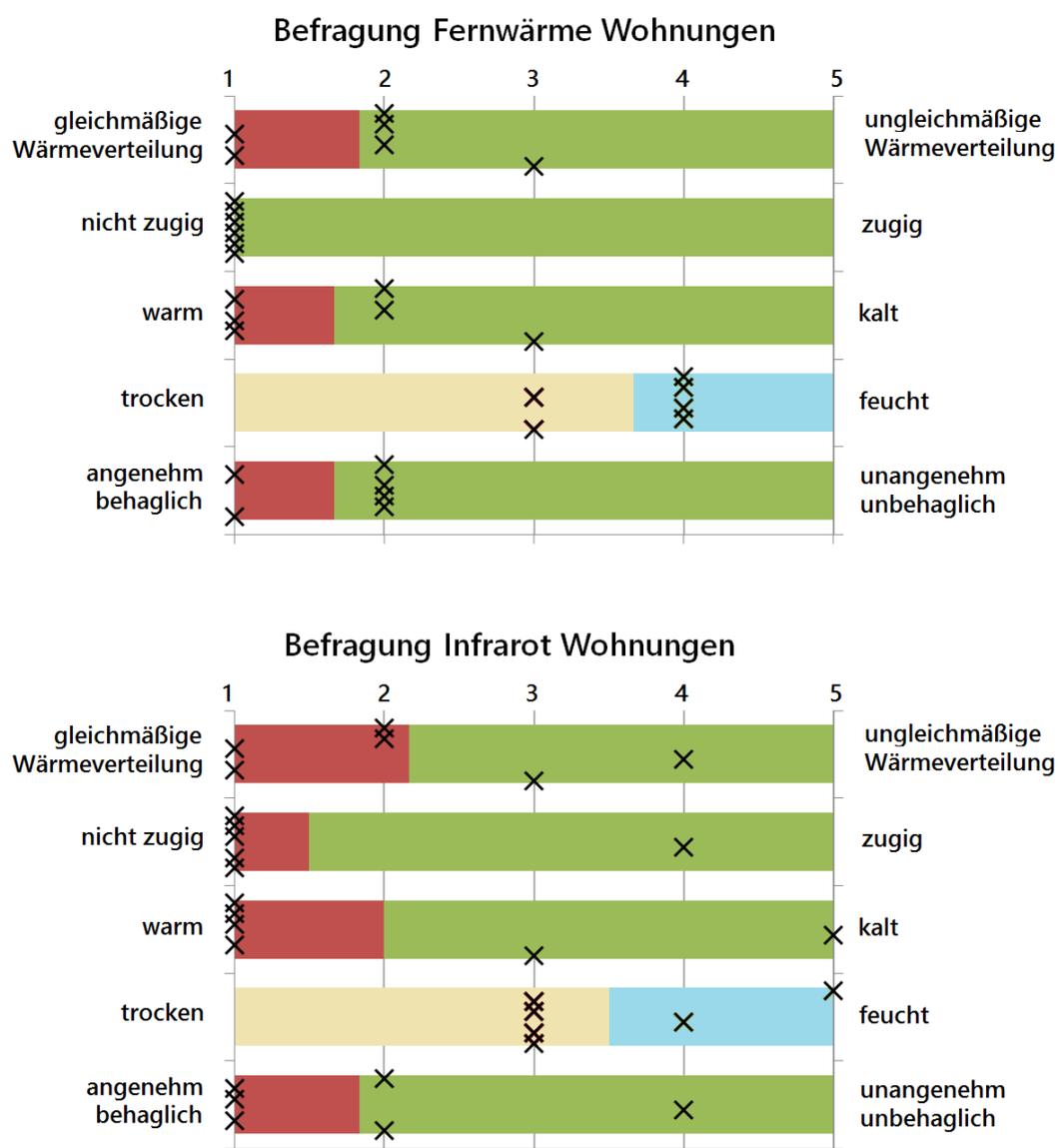


Abb. 28 Ergebnisse der ersten Befragung wenige Monate nach Bezug

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.

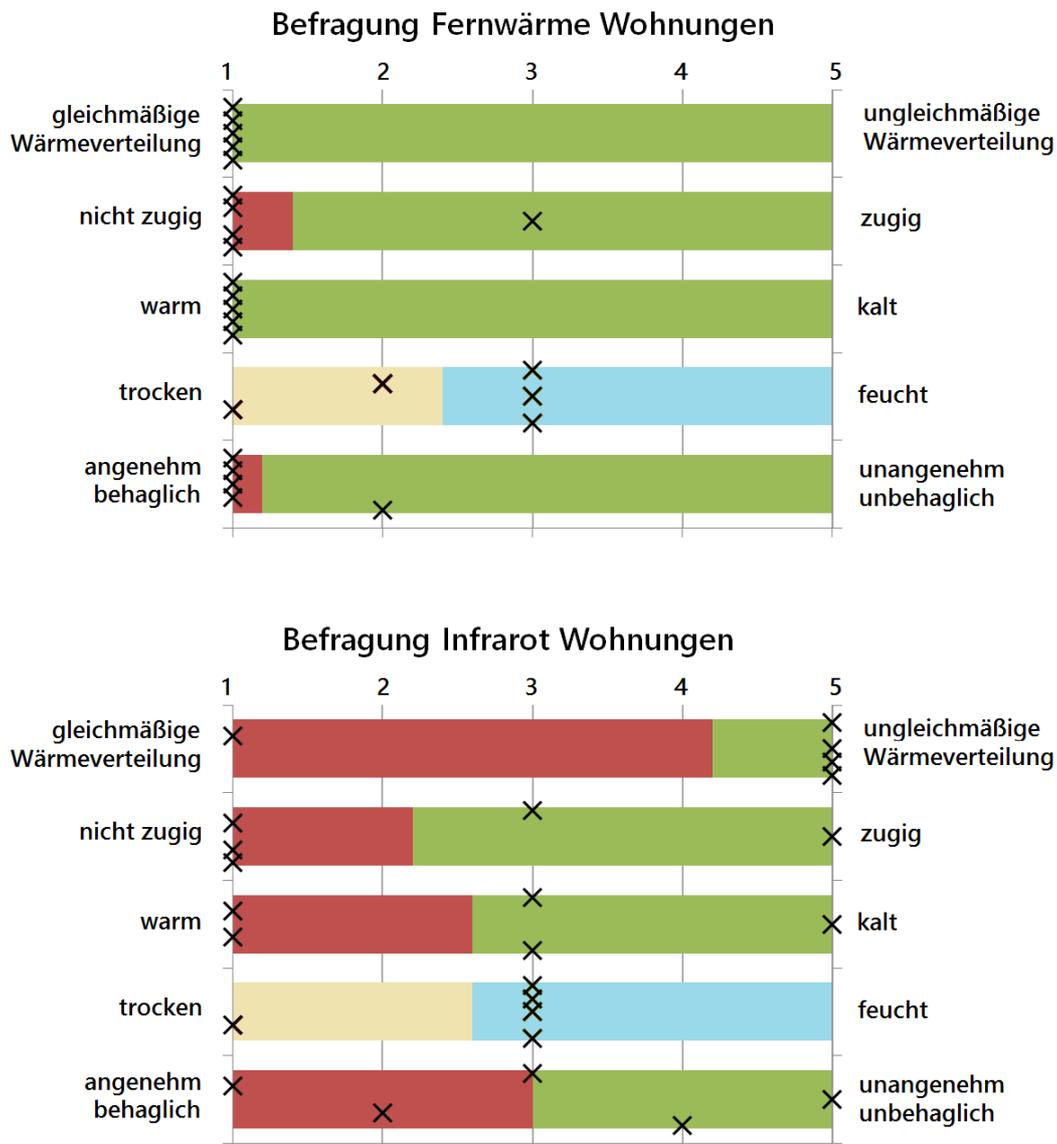


Abb. 29 Ergebnisse der zweiten Befragung im März 2018

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.

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

Ergänzte Kommentare auf Fragebogen der Nutzer des Haus 4 – Infrarot:

Bewohner Whg. K

- 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

- Wenn kalt/unangenehm in welchen Räumen: *überall*
- *Schaaß mit Quastel. Stromkosten waren Explosion 120€.*

Bewohner Whg. N

- *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

- 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?*

Ergänzte Kommentare auf Fragebogen der Nutzer des 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 Behaglichkeitsmessung

3.4.1 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 beider Wohnungen Spot-Messungen mit speziellen Behaglichkeitsmessbäumen über einen Zeitraum von drei 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.

3.4.2 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)

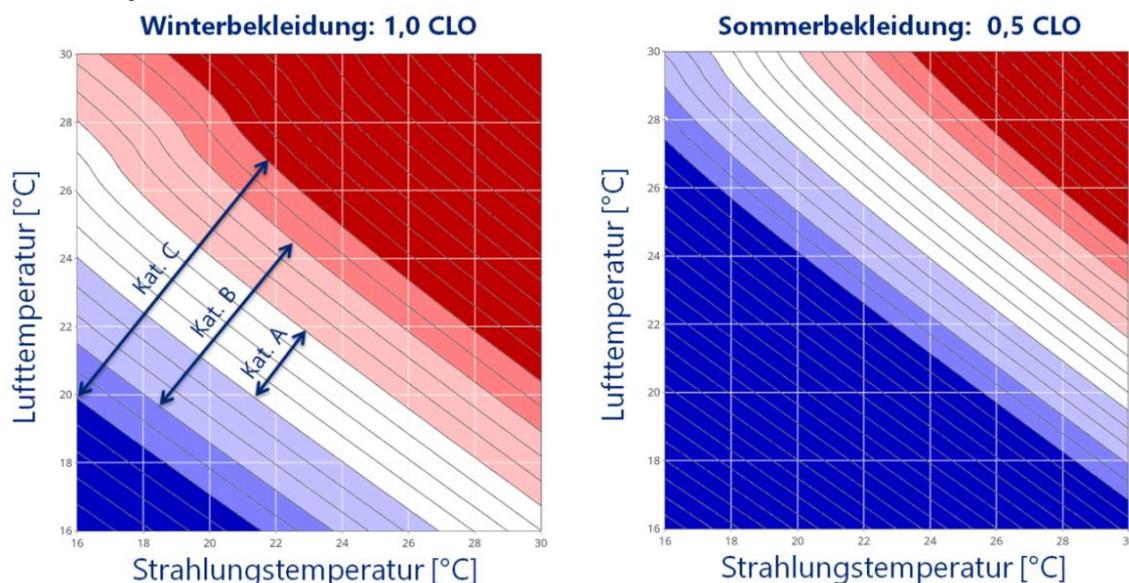


Abb. 30 Beispiel PMV-Indizes bei unterschiedlichen Strahlungs-/Lufttemperaturen und unterschiedlicher Bekleidung

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. 30 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.

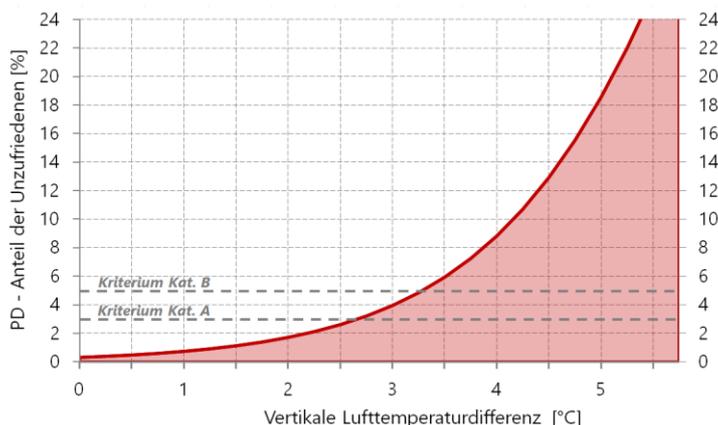


Abb. 31 Anteil der Unzufriedenen (PD) durch Temperaturgradient
bezogen auf Differenz in Fußgelenk- und Kopfhöhe

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.

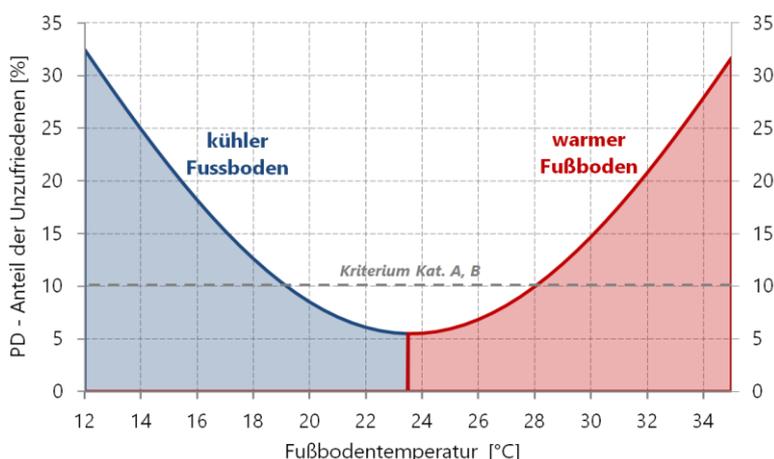


Abb. 32 Anteil der Unzufriedenen (PD) bei unterschiedlichen Fußbodentemperaturen

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.

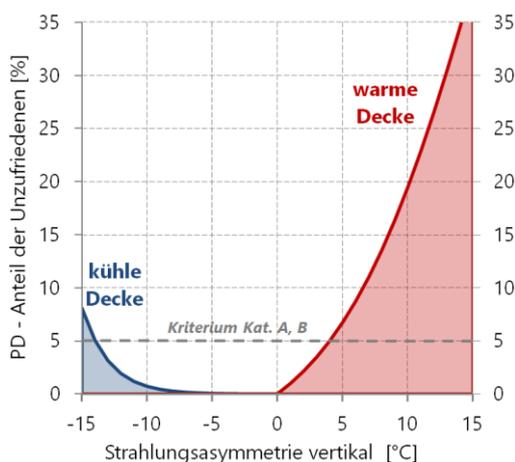


Abb. 33 Anteil der Unzufriedenen (PD) auf Grund vertikaler Strahlungsasymmetrie

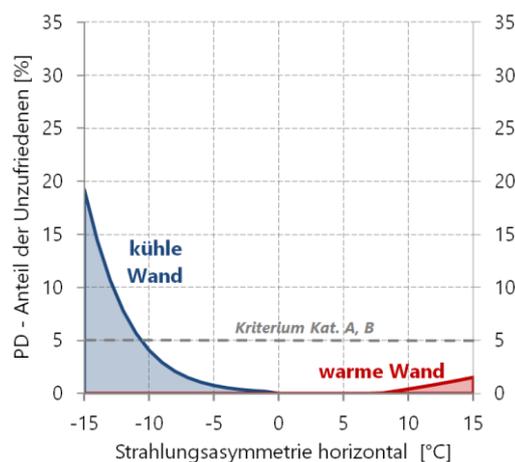


Abb. 34 Anteil der Unzufriedenen (PD) auf Grund horizontaler Strahlungsasymmetrie

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. 5 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	$\Delta T < 2 \text{ }^\circ\text{C}$	$19 \text{ }^\circ\text{C} < T < 29 \text{ }^\circ\text{C}$	$-10 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T < 23 \text{ }^\circ\text{C}$	$-14 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T < 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Kat. B	-0,5 < PMV < 0,5	$\Delta T < 3 \text{ }^\circ\text{C}$	$19 \text{ }^\circ\text{C} < T < 29 \text{ }^\circ\text{C}$	$-10 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T < 23 \text{ }^\circ\text{C}$	$-14 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T < 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Kat. C	-0,7 < PMV < 0,7	$\Delta T < 4 \text{ }^\circ\text{C}$	$17 \text{ }^\circ\text{C} < T < 31 \text{ }^\circ\text{C}$	$-13 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T < 35 \text{ }^\circ\text{C}$	$-18 \text{ }^\circ\text{C} < \Delta T < 7 \text{ }^\circ\text{C}$

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.

3.4.3 Spot Messung - Beschreibung

Für die Spot-Messung wurde über einen Zeitraum von drei Tagen in den Wohnzimmern von zwei ausgewählten Wohnungen zeitgleich jeweils ein Messbaum zur Erfassung der behaglichkeitsrelevanten Messgrößen installiert. Eine Untersuchung von mehreren Standorten in mehreren Wohnungen und über ausgedehnten Zeiträume wäre wünschenswert gewesen, war jedoch auf Grund des Aufwands und der Beeinträchtigung der Nutzer nicht möglich und nicht vorgesehen.

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: zentrale Lage im Erdgeschoß. Es gilt zu berücksichtigen, dass das Nutzerverhalten in beiden Wohnungen zu spezifischen Charakteristika führt. In der untersuchten Fernwärme-Wohnung, wird laut Angaben des Nutzers „sehr selten“ geheizt. Bei der Installation der Messtechnik wurde auch festgestellt, dass alle Radiatoren zurückgeregelt waren.

Bei der nachträglich durchgeführten Analyse der Raumlufttemperaturen (siehe Abb. 26) stellte sich heraus, dass die untersuchte Infrarot-Wohnung im Vergleich mit den anderen Infrarot-Wohnungen die höchsten Raumlufttemperaturen aufwies, was vermutlich auf die entsprechende Einstellung der Thermostaten zurückzuführen war.

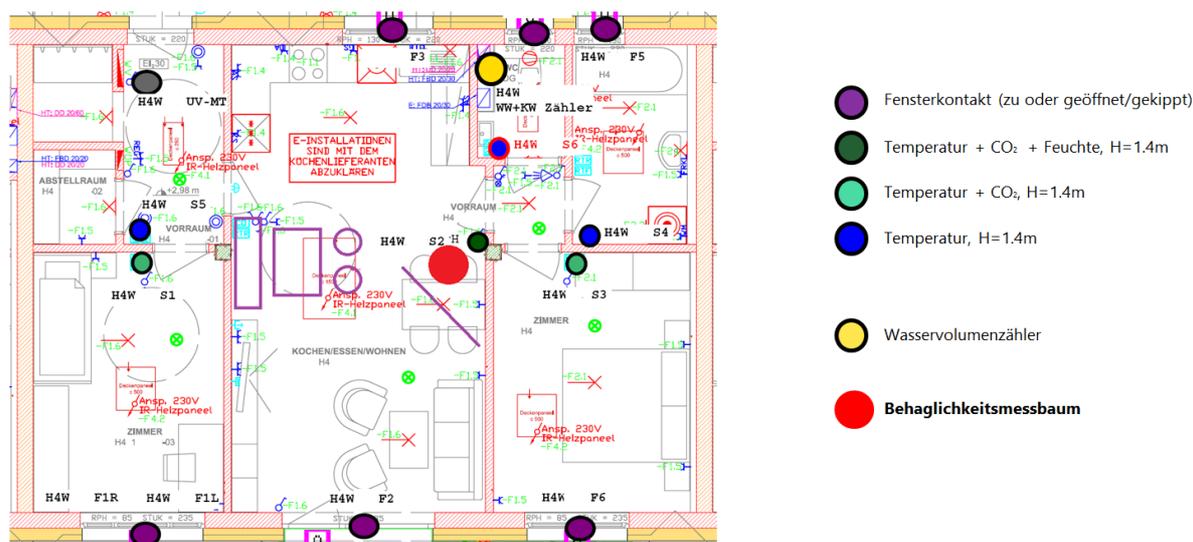
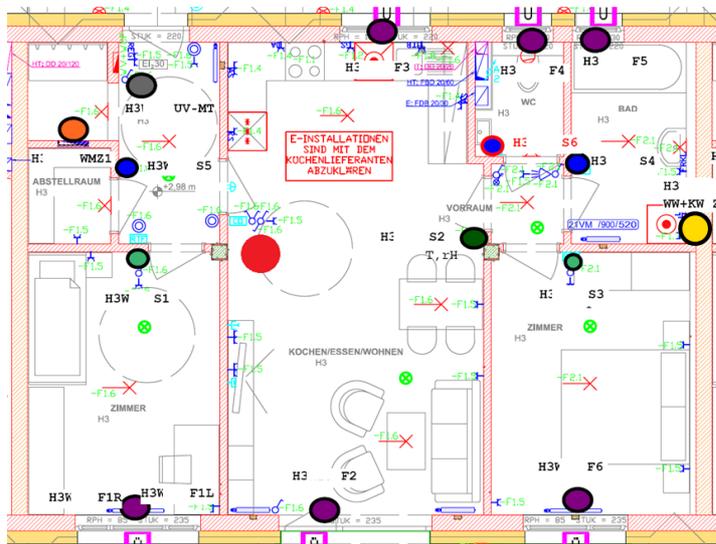


Abb. 35 Ort der Behaglichkeits-Spotmessung, IR-Wohnung
 (roter Kreis: Aufstellungsort des Messbaums, tatsächlicher Ort des Esstisch in Magenta angedeutet)

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



Abb. 36 Behaglichkeitsmessbaum während der Messung, IR-Wohnung



-  Fensterkontakt (zu oder geöffnet/gekippt)
-  Temperatur + CO₂ + Feuchte, H=1.4m
-  Temperatur + CO₂, H=1.4m
-  Temperatur, H=1.4m
-  Wärmemengenzähler
-  Wasservolumenzähler
-  Behaglichkeitsmessbaum

Abb. 37 Ort der Behaglichkeits-Spotmessung, Fernwärme-Wohnung
roter Kreis: Aufstellungsort des Messbaums



Abb. 38 Behaglichkeitsmessbaum während der Messung, Fernwärme-Wohnung

Es gilt zu berücksichtigen, dass zum Zeitpunkt der vor-Ort Untersuchung überaus kalte Bedingungen, mit Außenlufttemperaturen im Bereich von $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, vorherrschten. Da die Untersuchungen aber zeitgleich in beiden Wohnungen durchgeführt wurden, können diese herausfordernden Bedingungen im Sinne der Aussagekraft der Messungen als vorteilhaft eingestuft werden.

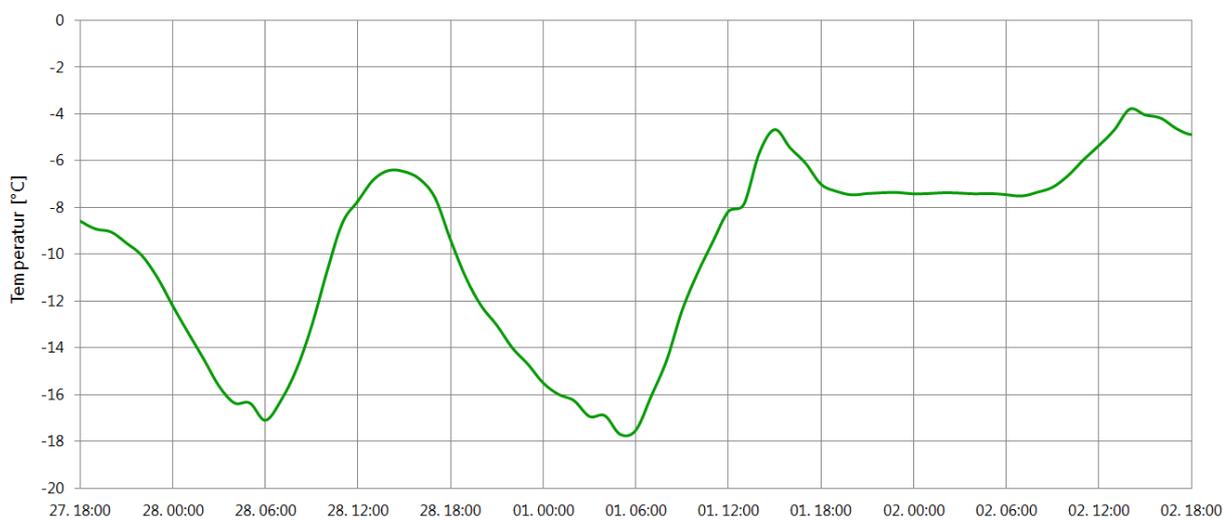


Abb. 39 Verlauf der Außenlufttemperatur während der Spot-Messung

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

Tab. 6 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
Relative Luftfeuchte	50%	mittlerer gemessener Wert (geringer Einfluss auf Berechnungsergebnisse)
Luft Strömungsgeschwindigkeit	<5 cm/s	typischer Wert (geringer Einfluss auf Berechnungsergebnisse, Annahme aufgrund eines Messdatenausfalls notwendig)

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. Da das Niveau der relativen Luftfeuchte stark vom Nutzerverhalten abhängig ist, wurde für beide Wohnungen ein konstanter Wert von 50% vorgegeben. Dieser Wert deckt sich mit den mittleren Messwerten der Raumluftfeuchten in den Wohnzimmern. Der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Behaglichkeitsmessung ist im vorliegenden Parameterbereich zudem gering. Bei der Messung der Strömungsgeschwindigkeit der Luft kam es zu einem Datenausfall. Die vorhandenen Daten zeigen aber in beiden Wohnungen keine markanten Zuglufteffekte. Die Auswertung wurde deshalb mit der Annahme einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit <5 cm/s durchgeführt. Die sich hierdurch ergebenden Abweichungen sind ebenfalls nur gering.

3.4.4 Spotmessung – Ergebnisse und Interpretation

PMV-Auswertung – Bekleidungsfaktor 0,8

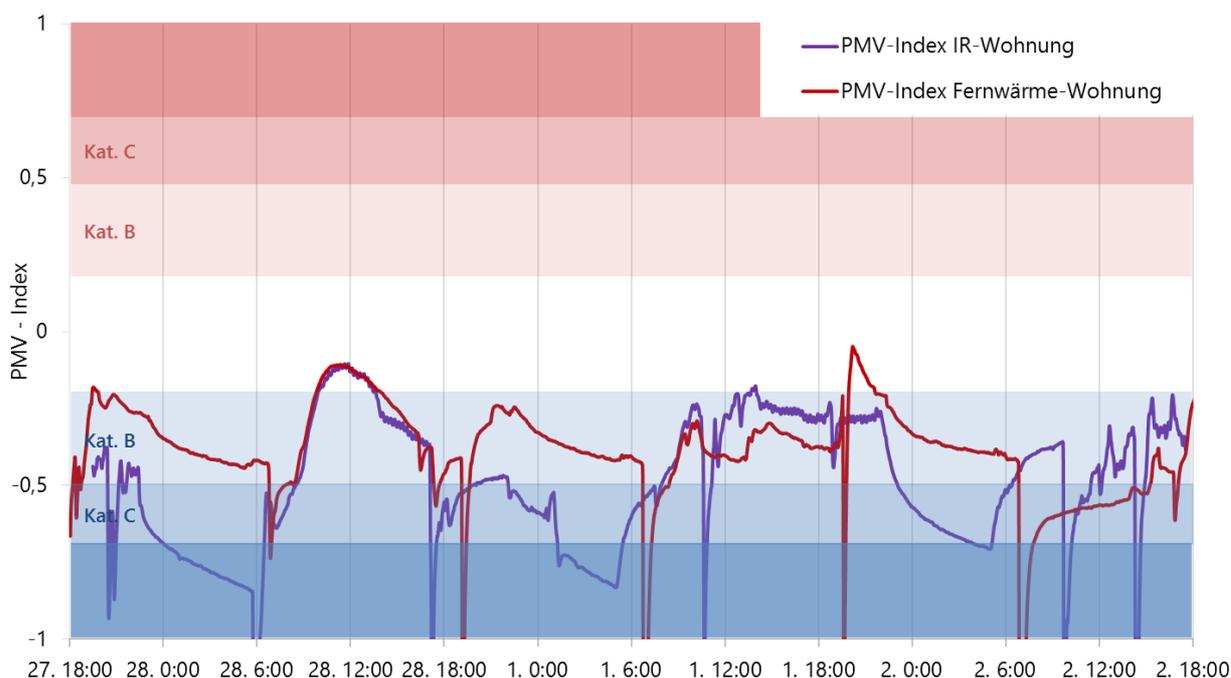
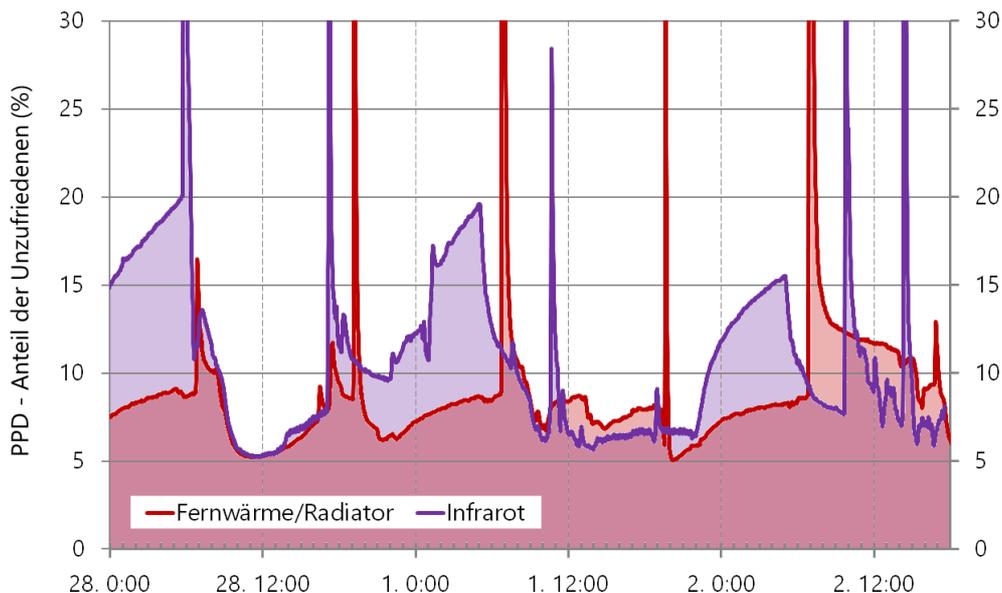


Abb. 40 PMV-Index zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen bei Bekleidungsfaktor CLO=0,8



**Abb. 41 Vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen (PPD)
zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen bei Bekleidungsfaktor 0,8 CLO**

Interpretation: Beim Bekleidungsfaktor 0,8 CLO (leichte Winterbekleidung), liegen die ermittelten PMV-Indexwerte tagsüber in einem Bereich zwischen ca. -0.5 und -0.1 - siehe Abb. 40. Die gemessene Behaglichkeit erfüllt damit tagsüber die Kategorie B (± 0.5), das enge Band der Behaglichkeitskategorie A (± 0.2) wird nicht eingehalten. Die empfundenen Temperaturen liegen durchwegs unter dem Optimalwert (0) und werden daher eher als zu kühl empfunden. Die spitzen Ausreißer sind jeweils die Folge von Stoßlüftungen in den Wohnungen.

Tagesüber zeigen sich am Messort nur geringe Abweichungen zwischen den Heizsystemen. Nachtsüber führt die vorhandene Nachtabschaltung in der mit Infrarot-Heizung ausgestatteten Wohnung zu einem deutlich ausgeprägteren Rückgang der empfundenen Temperaturen. Bei vorhersehbarer Abwesenheit der Nutzer im entsprechenden Raum ist diese jedoch irrelevant bzw. geplant.

PMV-Auswertung – Bekleidungsfaktor 1,0

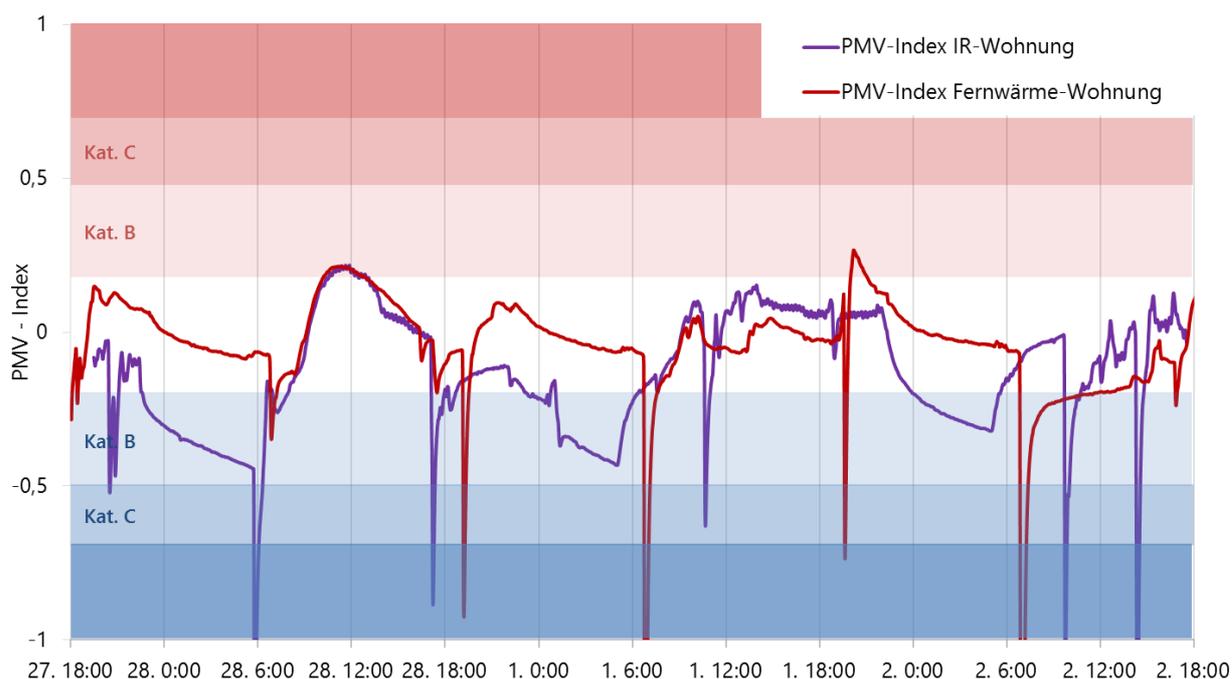


Abb. 42 PMV-Index zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen bei Bekleidungsfaktor 1,0 CLO

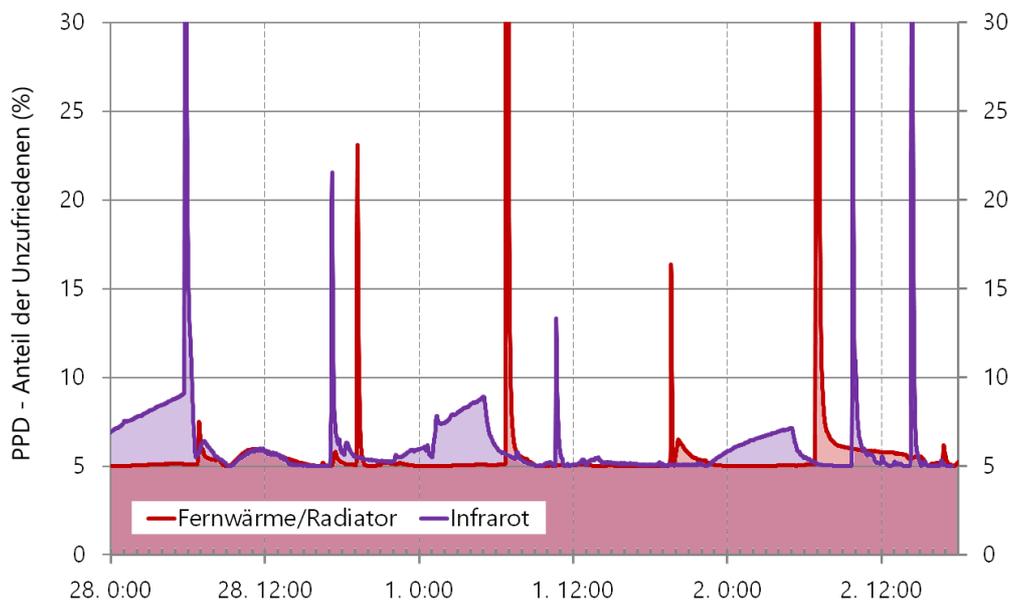


Abb. 43 Vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen (PPD) zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen bei Bekleidungsfaktor 1,0 CLO

Interpretation: Bei Wiederholung der Auswertung mit einem angenommenen Bekleidungsfaktor von 1,0 CLO (wärmere Winterbekleidung) zeigen sich relativ gesehen praktisch dieselben Ergebnisse. Absolut gesehen wandern die Ergebnisse nun jedoch, durch die besser wärmedämmende Kleidung, in den Optimalbereich. Tagsüber wird die Kategorie A meist eingehalten. Dementsprechend liegt auch der vorhergesagte Anteil der Unzufriedenen meist im Bereich des geringsten möglichen Werts von 5%.

Auswertung vertikale Lufttemperaturdifferenz

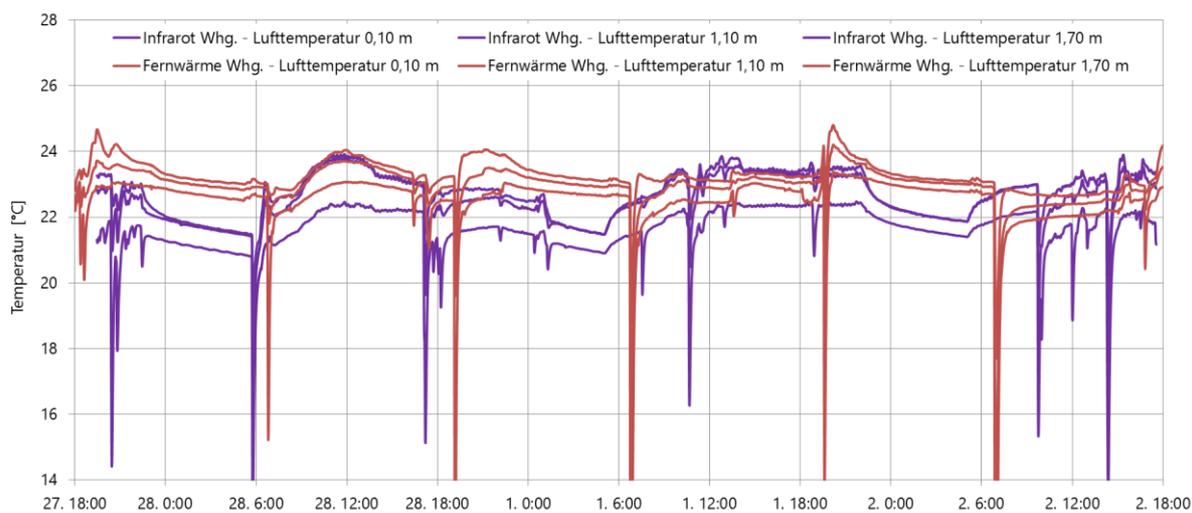


Abb. 44 Verlauf der Lufttemperaturen in unterschiedlichen Höhen bei der Spotmessung

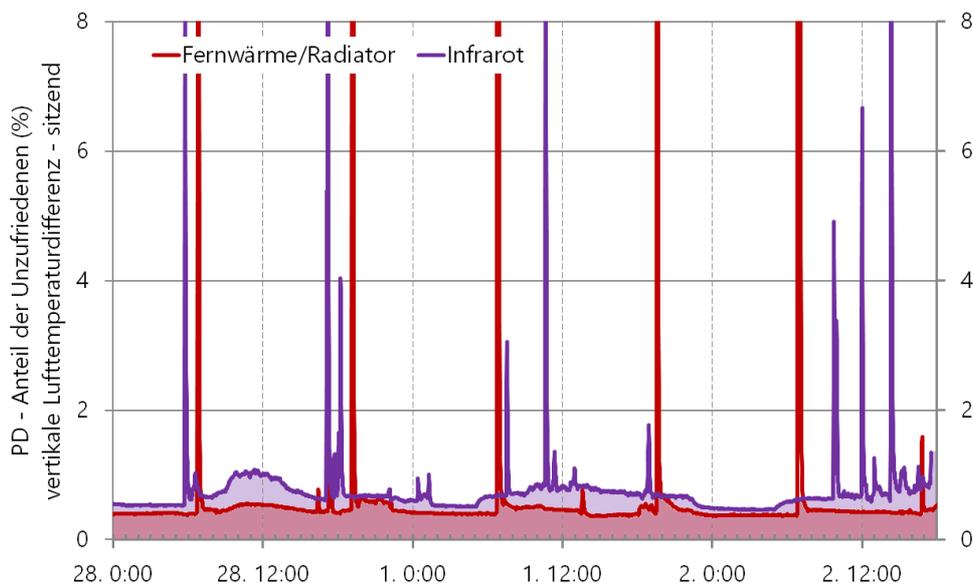


Abb. 45 Vertikaler Lufttemperaturunterschied – SITZEND: vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen, zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen

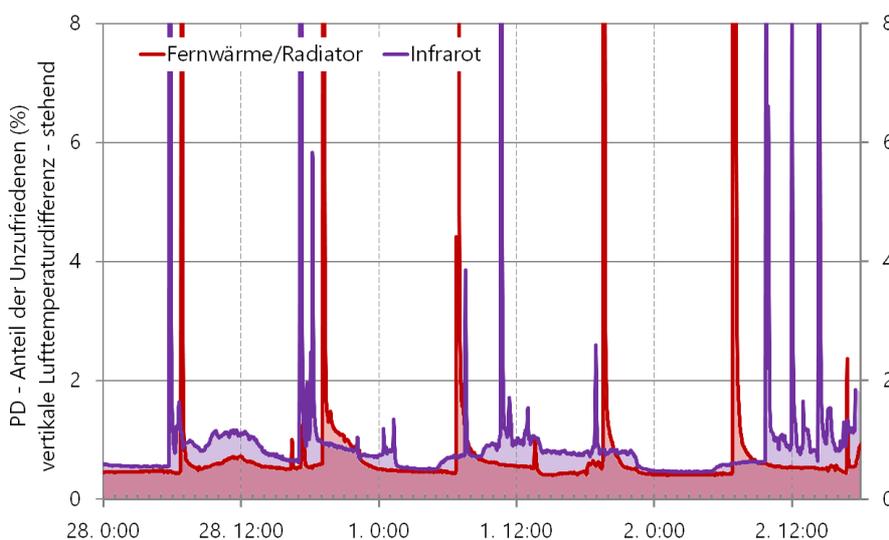


Abb. 46 Vertikaler Lufttemperaturunterschied – STEHEND: vorhergesagter Anteil der Unzufriedenen, zeitlicher Verlauf für beide Wohnungen

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-Paneele beheizten Wohnung ein leicht höherer Temperaturgradient festgestellt. (Über den gesamten Messzeitraum lag dieser für eine stehende Person in der Wohnung mit Infrarot-Heizung bei 1,15 °C, bei der Wohnung mit Radiator-Heizung bei 0,81 °C).

3.4.5 Verlauf der operativen Temperatur - informativ

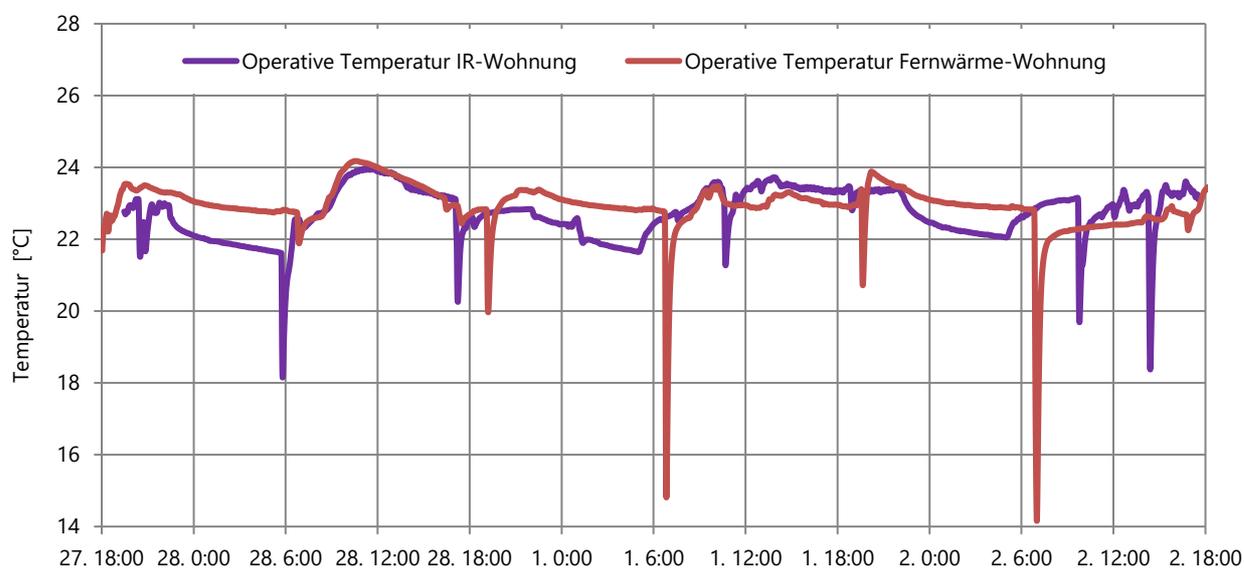


Abb. 47 Verlauf der operativen Temperaturen bei der Spotmessung

Interpretation: Die operative Temperatur reflektiert die empfundene Temperatur als Mittelwert aus der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur. Analog zum PMV-Index zeigen sich hier nur geringe Abweichungen zwischen den beiden Wohnungen. 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.

3.4.6 Strömungsgeschwindigkeit der Luft - informativ

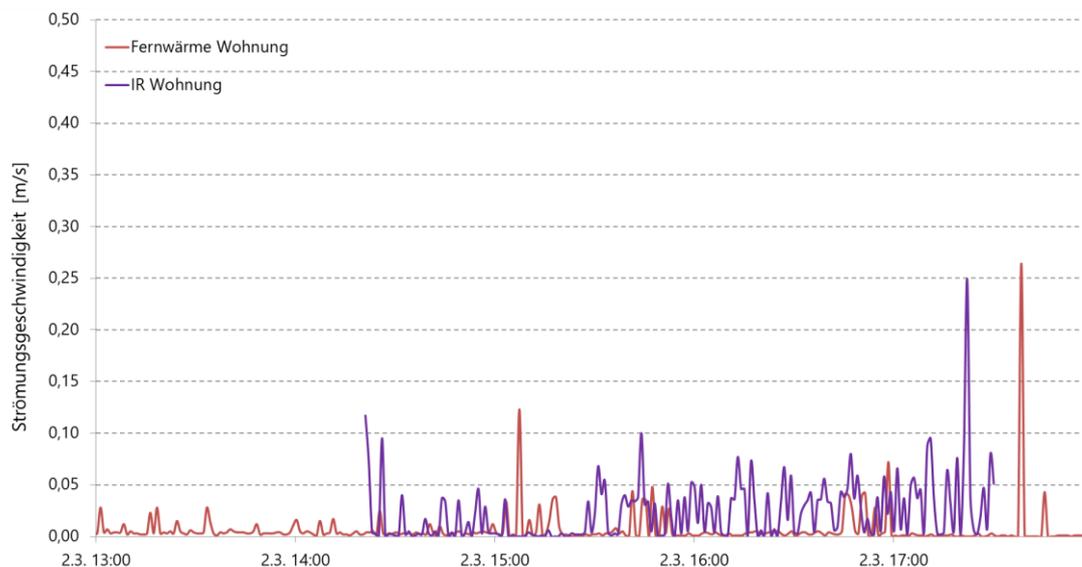


Abb. 48 Bei den Spotmessungen gemessene Strömungsgeschwindigkeiten der Luft

Anmerkung: Im Zuge der messtechnischen Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten der Luft kam es bedauerlicherweise zu einem Datenausfall. Die vorhandenen Daten lassen aber darauf schließen, dass in beiden Wohnungen keine markanten Zuglufteffekte auftreten. Die PMV-Auswertung wurde für beide Wohnungen mit der Annahme einer konstanten, geringen Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt. Dies führt bei der Behaglichkeitsauswertung nur zu geringen Abweichungen.

3.5 Dreidimensionale Behaglichkeitsanalyse – IR-Wohnung

3.5.1 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 stationär, für einen Punkt im Wohnzimmer durchgeführt werden musste, konnte die Spot-Messung diesen Umstand nicht abbilden.

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. Die Untersuchung konnte aus Ressourcengründen nur für die Infrarot-Wohnung durchgeführt werden. Da bei der thermografischen Begehung der Fernwärme-Wohnung keine ausgeprägten Temperaturgradienten detektiert wurden, ist hier davon auszugehen, dass die Werte der Spotmessung auch für den Rest des Raums weitgehend repräsentativ sind.

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):

$$\dot{q} = \sum_i \varphi_i \dot{q}_i = \sum_i \varphi_i \sigma \varepsilon_i T_i^4 \quad \sum_i \varphi_i = 1 \quad \begin{array}{l} \varphi_i \dots \text{Einstrahlzahl der Fläche } i \\ \dot{q}_i \dots \text{Wärmestrom der Fläche } i \end{array}$$

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

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 zudem die Emissionskoeffizienten für die betrachteten Oberflächen in einem ähnlichen Bereich liegen (ca. 0,85-0,95), kann als zusätzliche - wenig einschränkende - Vereinfachung angenommen werden, dass alle Emissionskoeffizienten den gleichen Wert aufweisen ($\varepsilon_r = \varepsilon_i = \text{const.}$). Dies ist insbesondere auch deshalb zulässig, da die thermographische Bestimmung der Oberflächentemperaturen unter der Annahme konstanter Emissionskoeffizienten durchgeführt wurde. Somit wurden messtechnisch direkt die für dieses Modell relevanten Temperaturen ermittelt.

Schließlich kann als Folge dieser – nur wenig einschränkenden - Vereinfachungen die Strahlungstemperatur für jeden Ort im Raum in guter Näherung als Summation über die vierte Potenz der Oberflächentemperaturen gewichtet mit den korrespondierenden Einstrahlzahlen ermittelt werden:

$$T_{r,P} = \sqrt[4]{\sum_i \varphi_{i,P} T_i^4} \quad \begin{array}{l} \varphi_{i,P} \dots \text{Einstrahlzahl der Fläche } i \text{ auf den Punkt } P \\ T_{r,P} \dots \text{Strahlungstemperatur am Punkt } P \\ T_i \dots \text{wirksame Oberflächentemperatur der Fläche } i \end{array}$$

3.5.2 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.

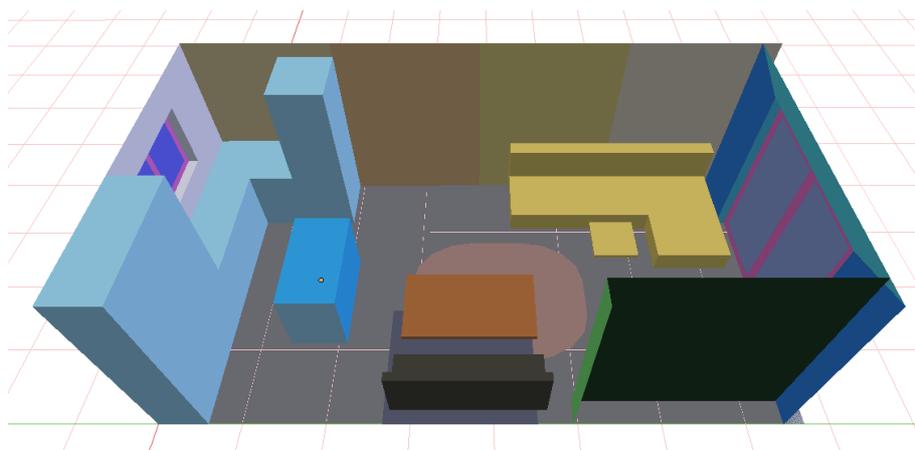


Abb. 49 Ansicht 1 des geometrischen Modells zur räumlichen Ermittlung der Strahlungstemperaturen



Abb. 50 Ansicht 2 des geometrischen Modells zu räumlichen Ermittlung der Strahlungstemperaturen

Die für die Simulation notwendigen Oberflächentemperaturen wurden vor Ort mittels Thermographie ermittelt. Für den Einsatz wurde bei AEE INTEC eine zusätzliche interne Kalibrierung der Infrarot-Kamera durchgeführt.

Tab. 7 Oberflächentemperaturen der Flächen im Simulationsmodell

Fläche	Oberflächen-temp. [°C]	Fläche	Oberflächen-temp. [°C]
Decke ungestört	21,5	Küche Zone 1	22,0
Decke Zone 1	24,0	Küche Zone 2	23,0
Decke Zone 2	27,0	Fensterrahmen	16,0
Decke Zone 3	40,0	Fenster Süd	19,0
IRPaneel - Unterseite	80,0	Fenster Nord	19,0
IRPaneel - Seitenflächen	60,0	Couch & Couchtisch	23,0
Innenwand A Zone 1	22,0	Couchtisch Unterseite	21,5
Innenwand A Zone 2	22,5	Tisch Unterseite	23,0
Innenwand A Zone 3	22,0	Tisch Oberseite	24,0
Innenwand A Zone 4	22,0	Sitzbank	24,0
Außenwand Sturz und Lichten	20,0	Fußboden abgeschattet	21,0
Außenwand seitlich	22,0	Fußboden Std.	22,0
Wohnwand	23,0	Fußboden zentral	23,5
Innenwand B Zone 1	23,0		
Innenwand B Zone 2	21,0		

3.5.3 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. Die Sichtbarkeit der einzelnen Flächen wurde zusätzlich jeweils in Oktanten aufgelöst erfasst (siehe Abb. 51). 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 10x10x10 cm durchgeführt.

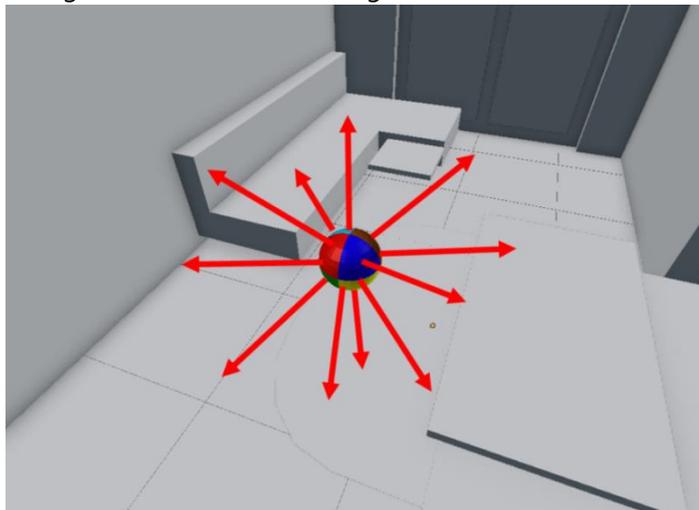


Abb. 51 Oktantenweise Ermittlung der View-Factors mittels Monte-Carlo Raytracing

3.5.4 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 10 cm Raster eine aussagekräftige Veranschaulichung der maßgeblichen Zusammenhänge.

3.5.5 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 drei unterschiedlichen Höhen gemessenen Lufttemperatur mit Hilfe eines Polynoms zweiter Ordnung angenähert. Als Stützpunkte für den Fit wurden die gemittelten Messwerte des ungestörten Abendbereichs (28.2. 19:00-22:00) herangezogen. Die insitu-Messungen der Oberflächentemperaturen erfolgten zu einem vergleichbaren Zeitpunkt am Vortag. Durch die Begehung wurden die Lufttemperaturen jedoch beeinflusst, weshalb die Lufttemperaturen des vergleichbaren, ungestörten Zeitraums gewählt wurden.

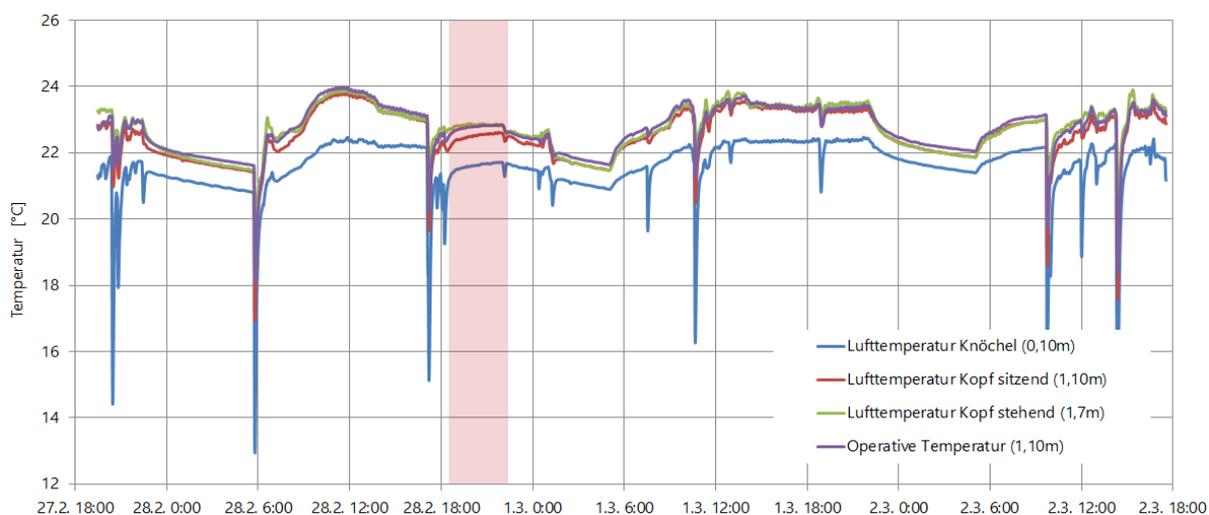


Abb. 52 zeitlicher Verlauf der gemessenen Lufttemperaturen
(Auswertzeitraum für die 3d-Berechnung markiert)

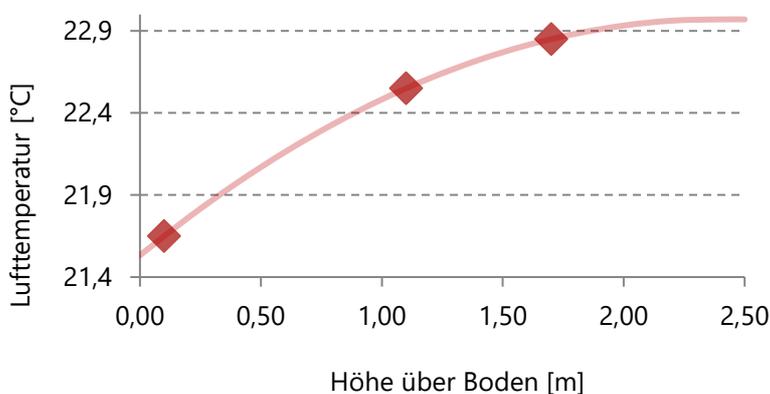


Abb. 53 vertikaler Lufttemperaturschichtung – gemessene Mittelwerte und Polynom-Fit

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

Tab. 8 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)

3.5.6 3d-Behaglichkeit: Omnidirektionale Strahlungstemperaturen

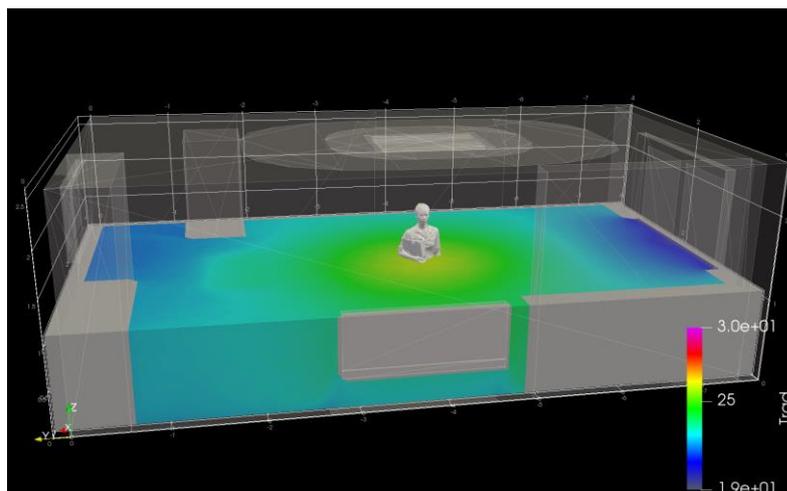


Abb. 54 Omnidirektionale Strahlungstemperaturen (°C) - Horizontalschnitt 1,1m über Fußboden

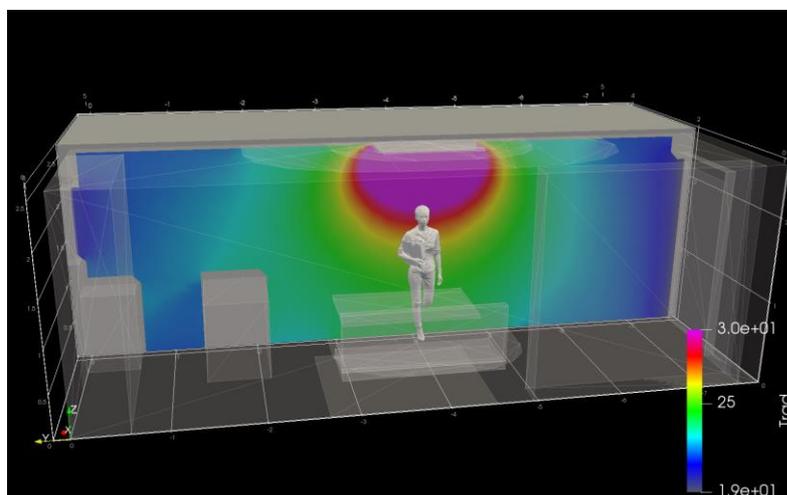


Abb. 55 Omnidirektionale Strahlungstemperaturen (°C) – Vertikalschnitt zentral

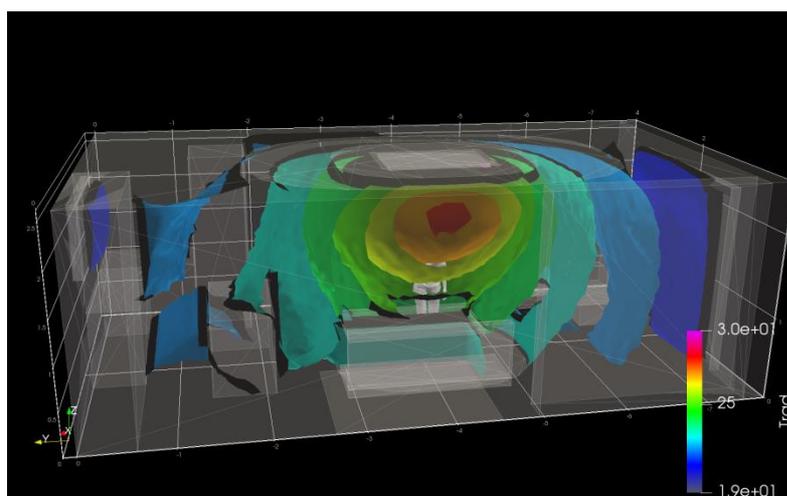


Abb. 56 Omnidirektionale Strahlungstemperaturen (°C) - Isoflächen mit Intervall 1°C

Interpretation:

Gemäß dem Entfernungsgesetz nimmt die Wärmestrahlungsleistung des IR-Panels auf Grund der nahezu isotropen Abstrahlung quadratisch proportional zum Abstand ab, d.h. eine Verdoppelung der Entfernung resultiert in einer auf ein Viertel reduzierte Strahlungsintensität. Dementsprechend sinken die omnidirektionalen Strahlungstemperaturen in vergleichbarer Weise ab. In den obigen Darstellungen ist gut erkennbar, wie direkt unter dem IR-Panel hohe Strahlungstemperaturen erreicht werden, während die niedrigsten Werte im Bereich der kühlen Fensterflächen auftreten.

Die inhomogene Verteilung der Strahlungstemperaturen bewirkt natürlich Inhomogenitäten bei den Behaglichkeitskenngrößen (siehe unten).

(Körpergröße der abgebildeten Person: 1,7 m)

3.5.7 3d-Auswertung Behaglichkeit: PMV-Index

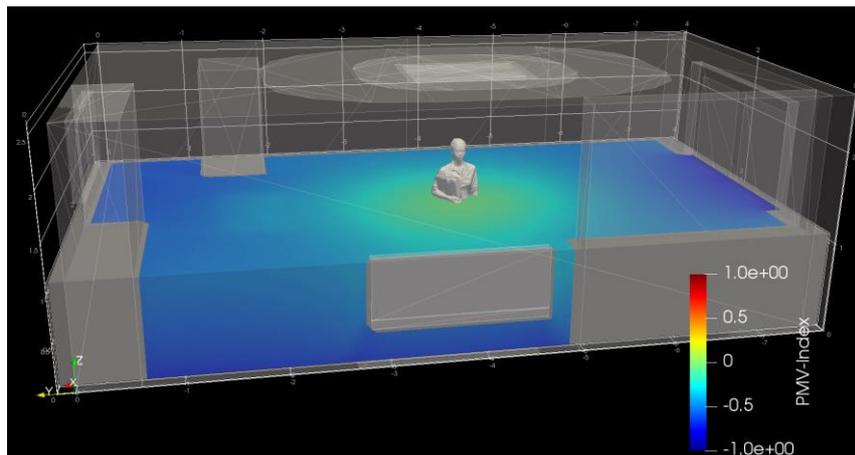


Abb. 57 PMV-Index - Horizontalschnitt 1,1m über Fußboden (Kopfhöhe sitzend)

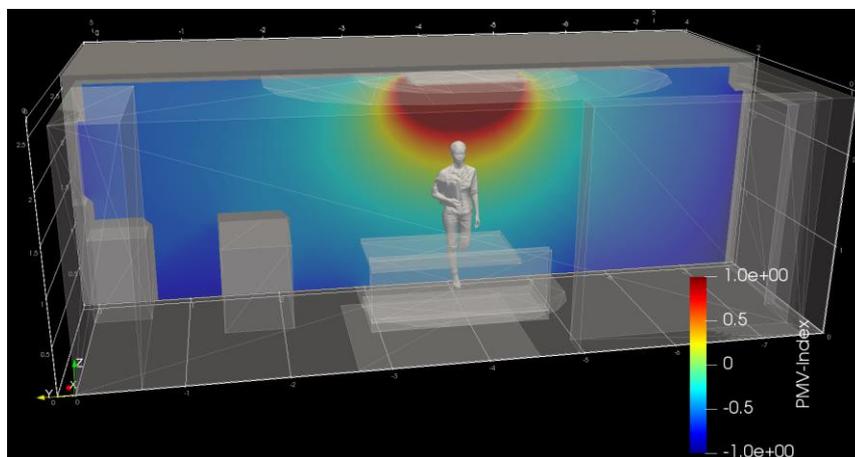


Abb. 58 PMV-Index – Vertikalschnitt zentral

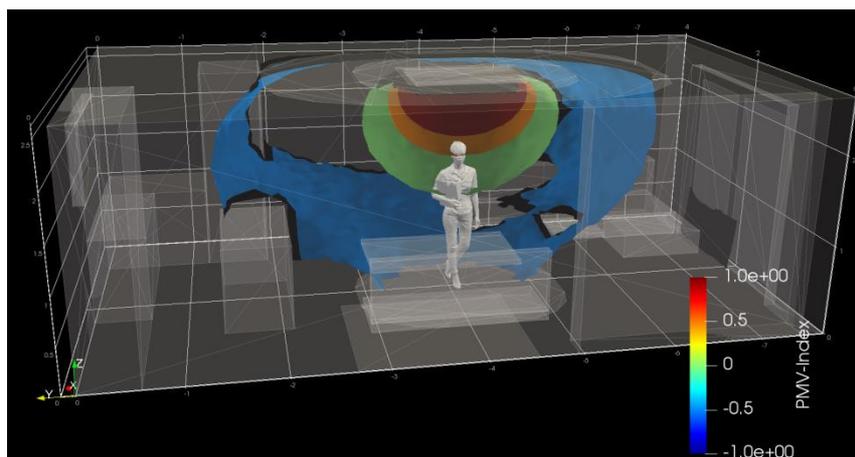


Abb. 59 PMV-Index Isoflächen mit PMV-Intervall 0,5
 Isofläche grün: PMV=0 Optimalbereich
 Isofläche blau bzw. orange: Grenzfläche der Kategorie B

Interpretation:

Wie zu sehen ist, zeigt die dreidimensionale Berechnung des PMV-Index eine stark asymmetrische Verteilung im untersuchten Raum auf. Der optimale, neutrale Bereich (PMV=0) befindet sich annähernd auf einer Kugelschale, welche direkt unter dem Paneel bis zur Brusthöhe reicht. Innerhalb dieser Kugelschale folgen in Richtung Paneel die Bereiche „leicht warm“ bis „warm“ bzw. „heiß“.

Im außerhalb liegenden Bereich, einerseits begrenzt durch die Kochinsel und andererseits durch die Couch folgt der Bereich PMV 0 bis -0,5 („leicht kühl“). Daran anschließend, bis zu den Außenwänden folgt der PMV-Bereich -0,5 bis -1,0 „leicht-kühl“ bis „kühl“. Zur Erreichung der Behaglichkeitsklasse A bzw. B muss der PMV Index in einem Wertebereich von $\pm 0,2$ bzw. $\pm 0,5$ liegen. Diese Anforderung wird nur im zentralen Bereich des Wohnraums erfüllt.

(Körpergröße der abgebildeten Person: 1,7 m)

3.5.8 3d-Behaglichkeit: Vorhergesagter Prozentsatz Unzufriedener (PPD)

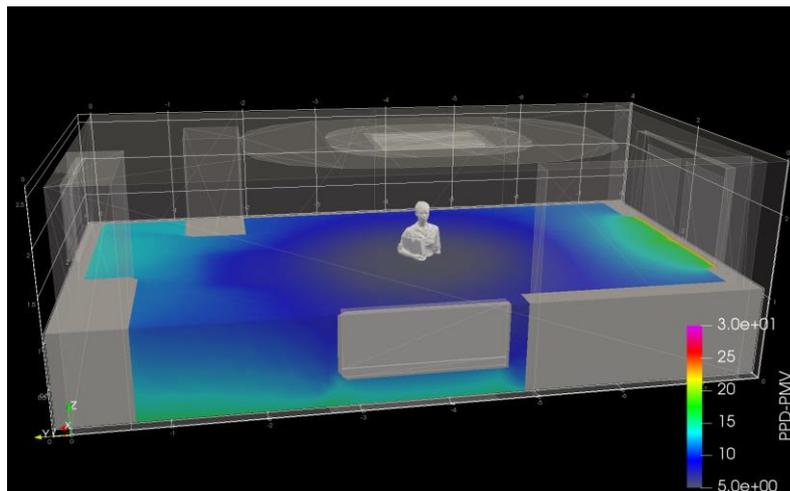


Abb. 60 Vorhergesagter Prozentsatz Unzufriedener (PPD) - Horizontalschnitt 1,1m über Fußboden

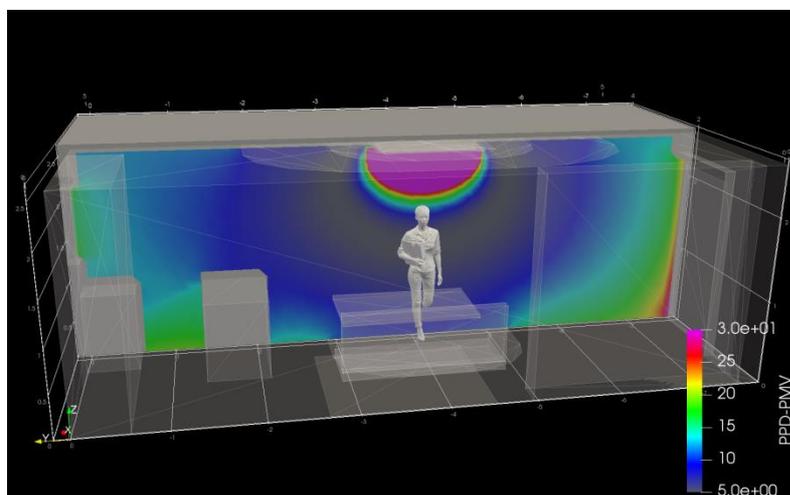


Abb. 61 Vorhergesagter Prozentsatz Unzufriedener – Vertikalschnitt zentral

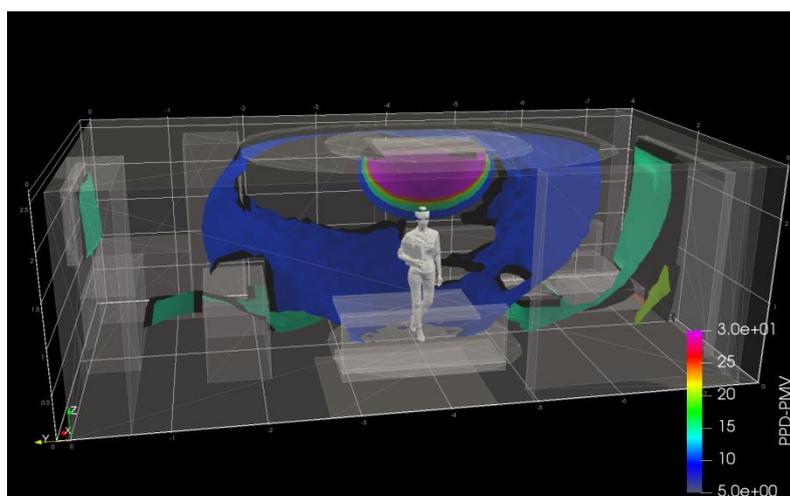


Abb. 62 PMV-Index Vorhergesagter Prozentsatz Unzufriedener- Isoflächen mit Intervallschritt 5%

Interpretation:

Aus dem oben dargestellten PMV-Index lässt sich gemäß der Fanger-Berechnungsmethodik der vorhergesagte prozentuelle Anteil an unzufriedenen Personen ableiten. Im zentralen Bereich des Raums ist dieser Werte minimal. Weiter entfernt vom Infrarot-Paneel nimmt der Wert zu und erreicht im kühlen Bereich vor den Fenstern und im Abschattungsbereich der Kochinsel Werte über 15%.

Die Berechnungen bestätigen die bei den Befragungen sehr negativ bewertete ungleichmäßig empfundene Verteilung der Wärme im Raum.

3.5.9 3d-Behaglichkeit: Vertikale Strahlungsasymmetrie

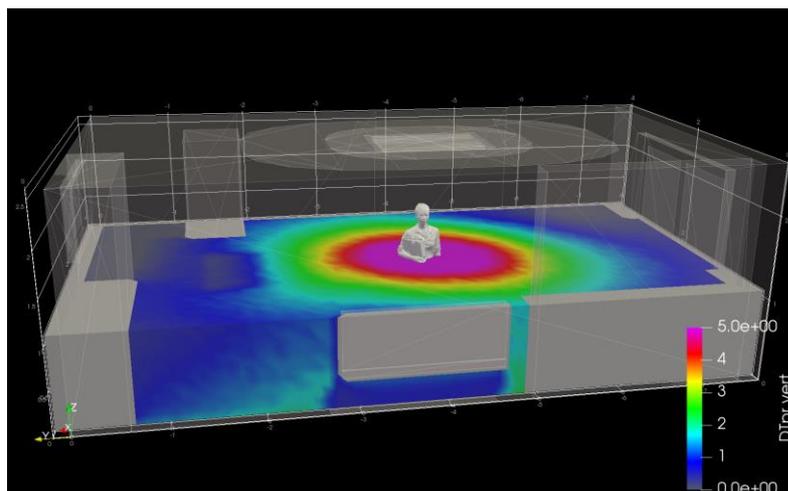


Abb. 63 Vertikale Strahlungsasymmetrie Differenztemperaturen (°C) - Horizontalschnitt 1,1m über Fußboden

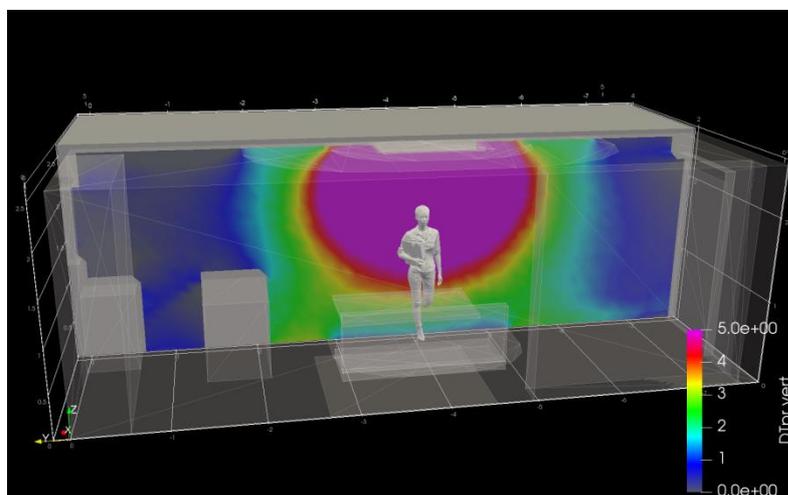


Abb. 64 Vertikale Strahlungsasymmetrie Differenztemperaturen (°C) – Vertikalschnitt zentral

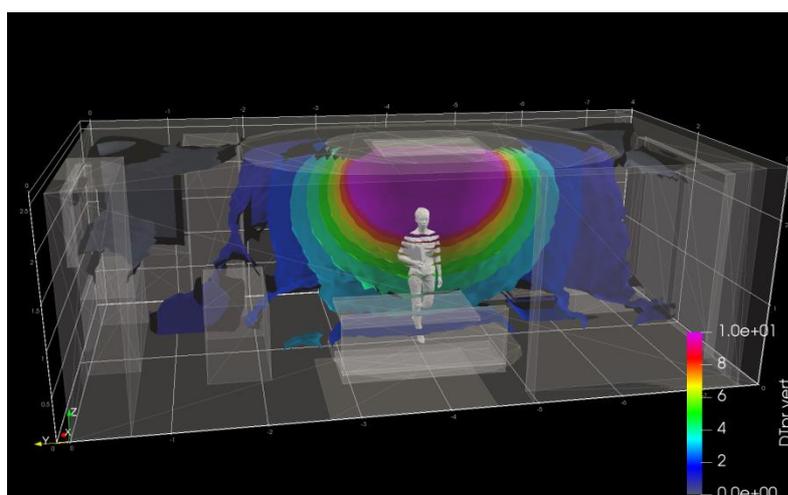


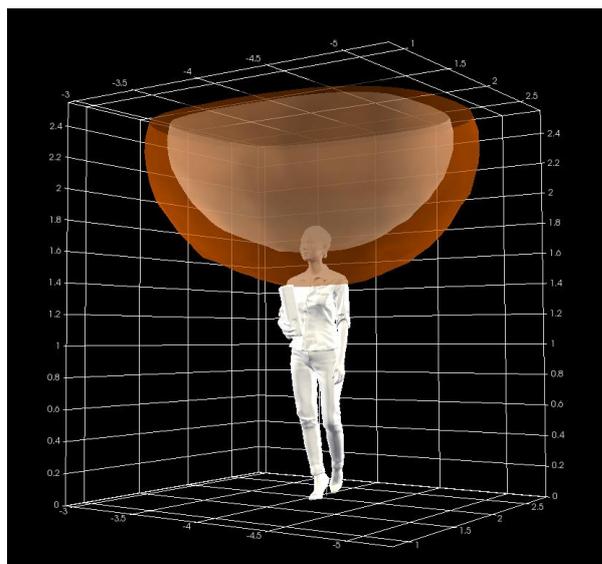
Abb. 65 Vertikale Strahlungsasymmetrie Differenztemperaturen (°C) - Isoflächen mit Intervall 1°C

Interpretation:

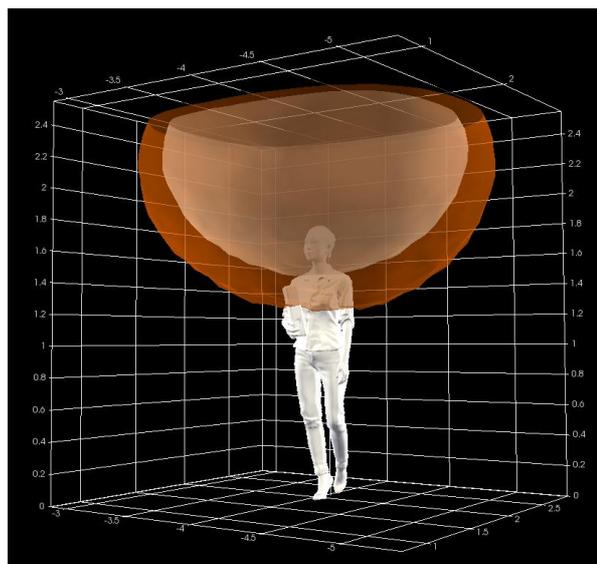
Wie im Abschnitt 3.4.2 dargelegt, sind für die Behaglichkeit neben dem PMV-Index auch weitere Kriterien maßgeblich. In Bezug auf die Infrarot-Heizung ist hier besonders das Kriterium der Strahlungsasymmetrie als kritisch einzustufen. Wie oben dargelegt, darf zur Erreichung der Behaglichkeitskategorie A oder B die vertikale Strahlungsasymmetrie den Grenzwert von +5 °C nicht überschreiten. Wie in den Darstellungen zu sehen, wird dieser Grenzwert in einem relativ ausgedehnten „wespennestförmigen“ Bereich mit Radius von ca. 2 m überschritten.

Neben der Verteilung der Strahlungstemperaturen dürfte auch die ausgeprägte vertikale Asymmetrie derselben für die negative Bewertung der Komfortsituation verantwortlich sein.

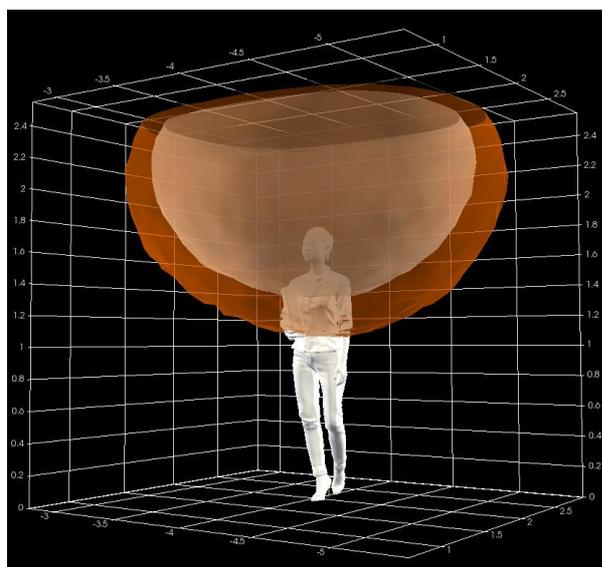
3.5.10 3d-Behaglichkeit: Vertikale Strahlungsasymmetrie im Bereich des IR-Panels



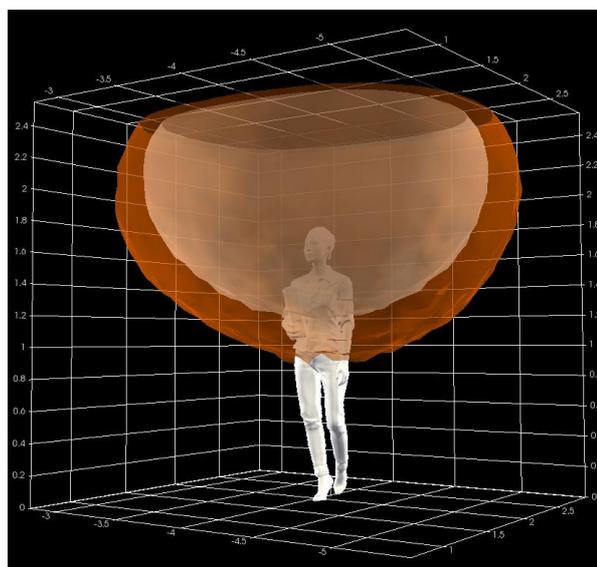
Paneel-Temperatur 60°C



Paneel-Temperatur 70°C



Paneel-Temperatur 80°C



Paneel-Temperatur 90°C

**Abb. 66 Überschreitungsbereiche des Behaglichkeitskriteriums „vertikale Strahlungsasymmetrie“
rot: >5 K (Klasse A und B), weiß: > 7 K (Klasse C)**

Interpretation: In der Abbildung oben wurden im Vergleich zu den oben gezeigten Ansichten lediglich die Paneel-Temperaturen variiert. Die Temperaturen der übrigen Oberflächen des Raums werden gleich wie beim Ausgangsfall angenommen. 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. 33) 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.

3.5.11 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 Strahlungstemperaturen zu gering sind, und somit auch der hieraus berechnete PMV-Index. Die lokale Umgebung wird deshalb unter den vorliegenden Annahmen in circa zwei Drittel des Raums als zu kühl empfunden (siehe z.B. Abb. 59 bzw. Abb. 62). Zweitens führt die inhomogene Verteilung dazu, dass die Strahlungsabgabe in einem Nahbereich zum Paneel zu hohen PMV-Indizes führt. Da bei der Deckenmontage dieser als heiß empfundene Bereich i.d.R. nicht zugänglich ist spielt dies 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. 33), das heißt, die vertikal ungleiche Verteilung der Wärmestrahlung wird in einem „wespennestförmigen“ Bereich unter dem IR-Paneel als unbehaglich empfunden (siehe Abb. 66).

Tab. 9 Übersicht Einhaltung der Behaglichkeits-Kategorien bei der Untersuchung der IR-Wohnung

	PMV Index	Vert. Differenz Lufttemperatur	wärmer/kalter Fußboden	Strahlungsasymmetrie	
				Wand	Decke
Kat. A,B	nur zentral im Raum erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt	unter IR-Paneel lokal nicht erfüllt

3.6 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. 3.5.10). Die sich zyklisch ändernden Strahlungstemperaturen wurden vom Nutzer der untersuchten Wohnung wahrgenommen und bei der Installation der Messtechnik 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 Nachtabschaltung, 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.

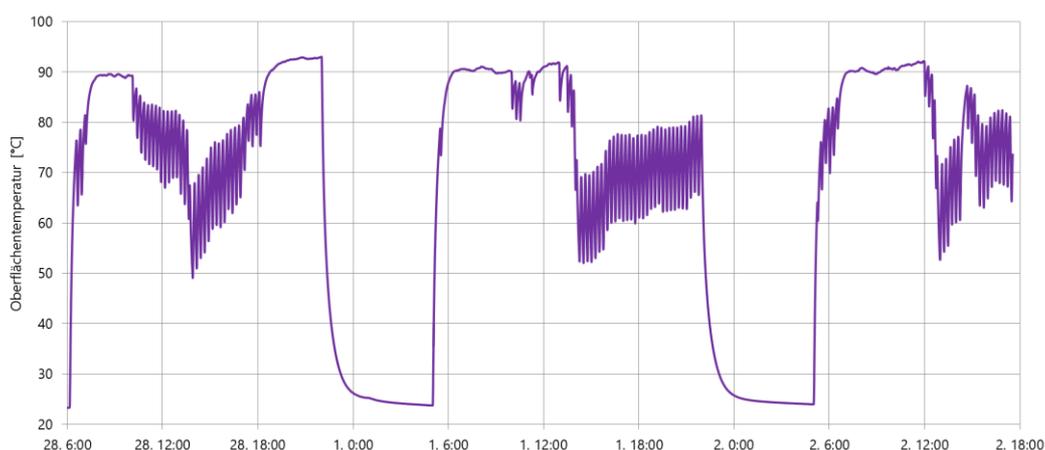


Abb. 67 gemessene Oberflächentemperaturen am IR-Paneel – 3 Tage

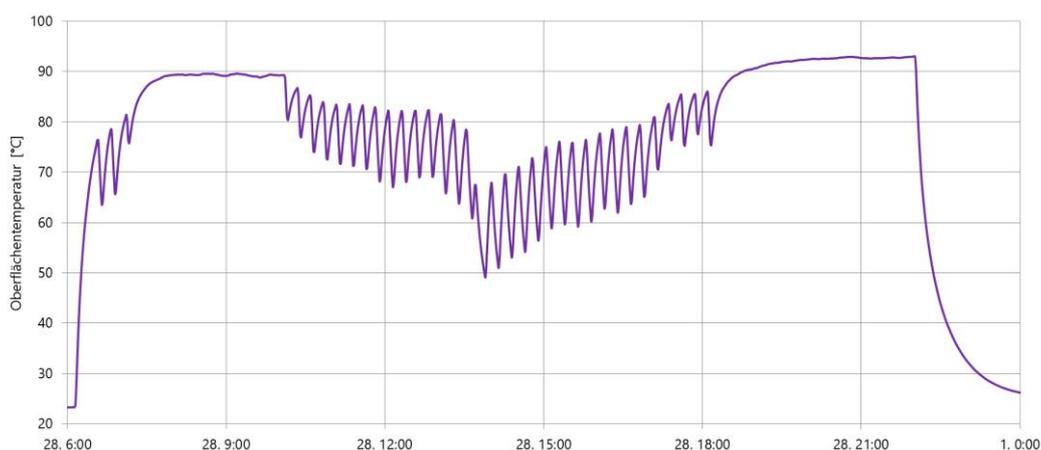


Abb. 68 gemessene Oberflächentemperaturen am IR-Paneel – 1 Tag

3.7 Verteilungsverluste Fernwärme – Wohnung

3.7.1 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.

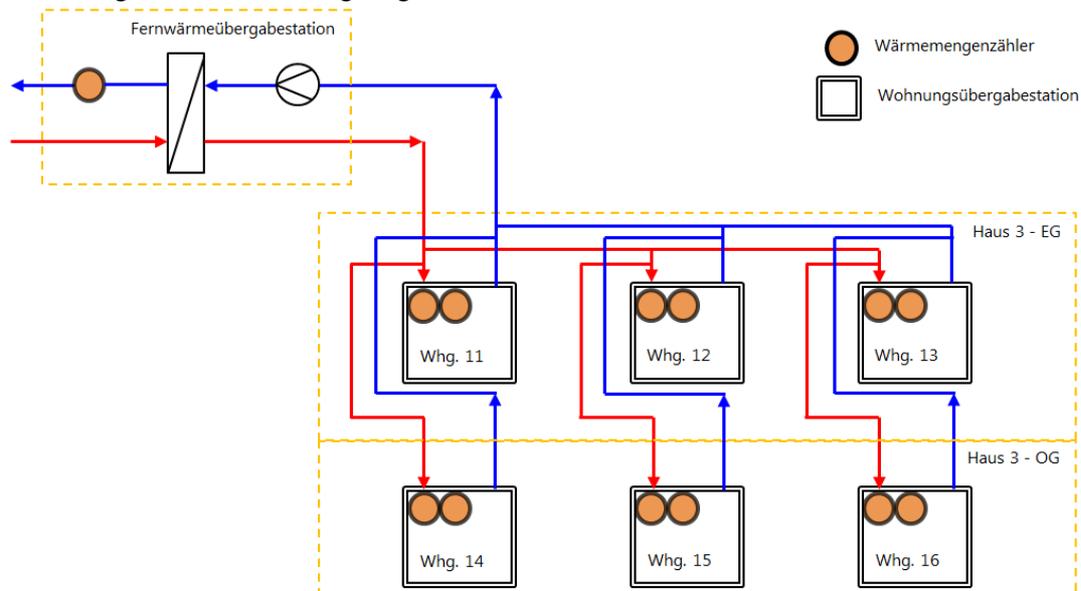


Abb. 69 Verteilungen von der Fernwärmeübergabestation zu den Wohnungsübergabestationen.

3.7.2 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.

3.7.3 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.

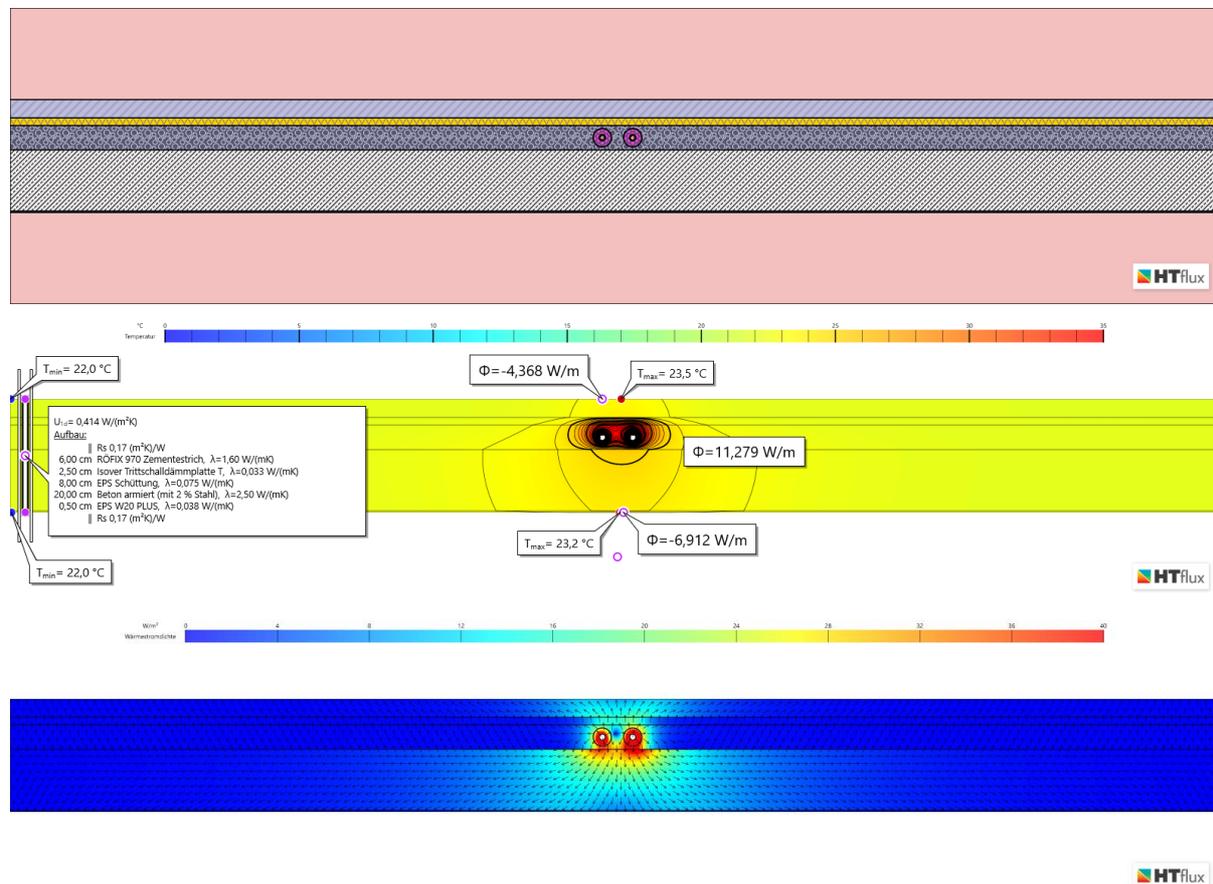
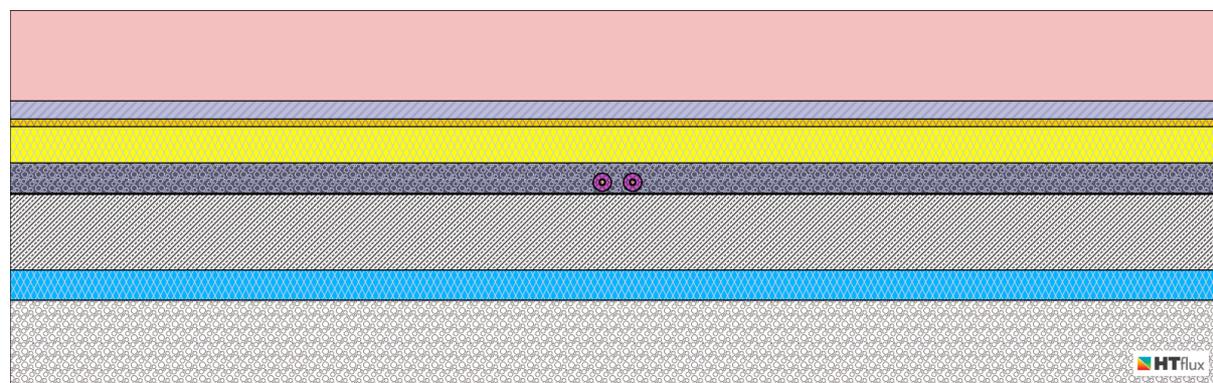


Abb. 70 Thermische Simulation Verteilungsverlust Decke EG, Vorlauf-/Rücklaufftemp. 65/66 °C



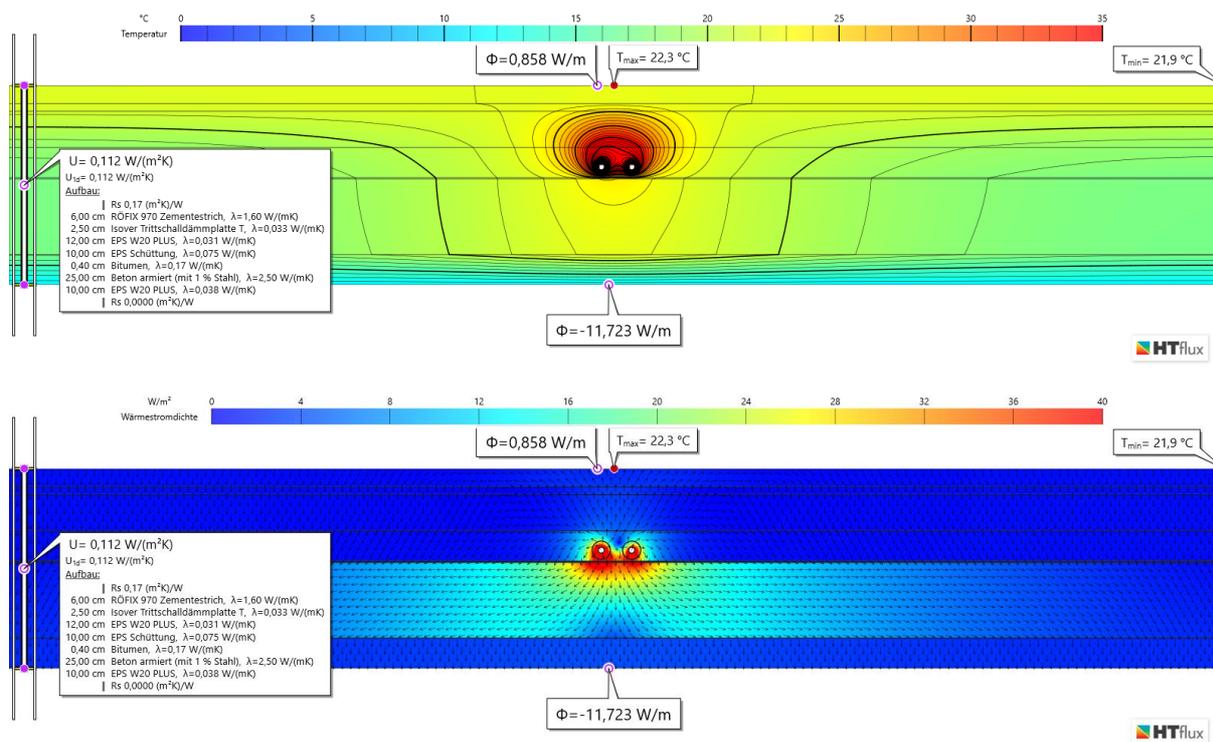


Abb. 71 Thermische Simulation Verteilungsverlust Fußboden EG, Vorlauf-/Rücklauf temp. 65/66 °C

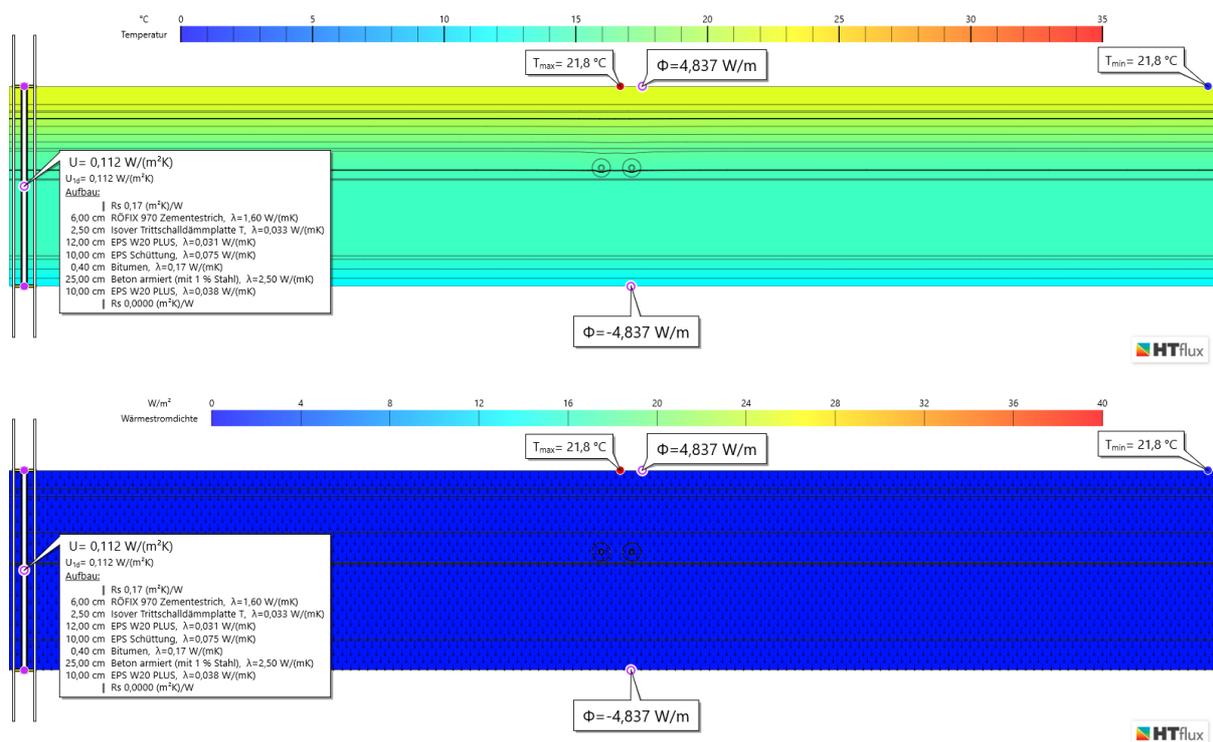


Abb. 72 Thermische Simulation Verteilungsverlust Fußboden EG, Heizung inaktiv

3.7.4 Bilanzierung der Verteilungsverluste

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

Tab. 10 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. 11 Rechnerische Ermittlung der gesamten Verteilverluste

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. 12 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

3.7.5 Gegenüberstellung von Simulation und Messung

Rechnet man die im Kapitel 3.7.2 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.

3.7.6 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.

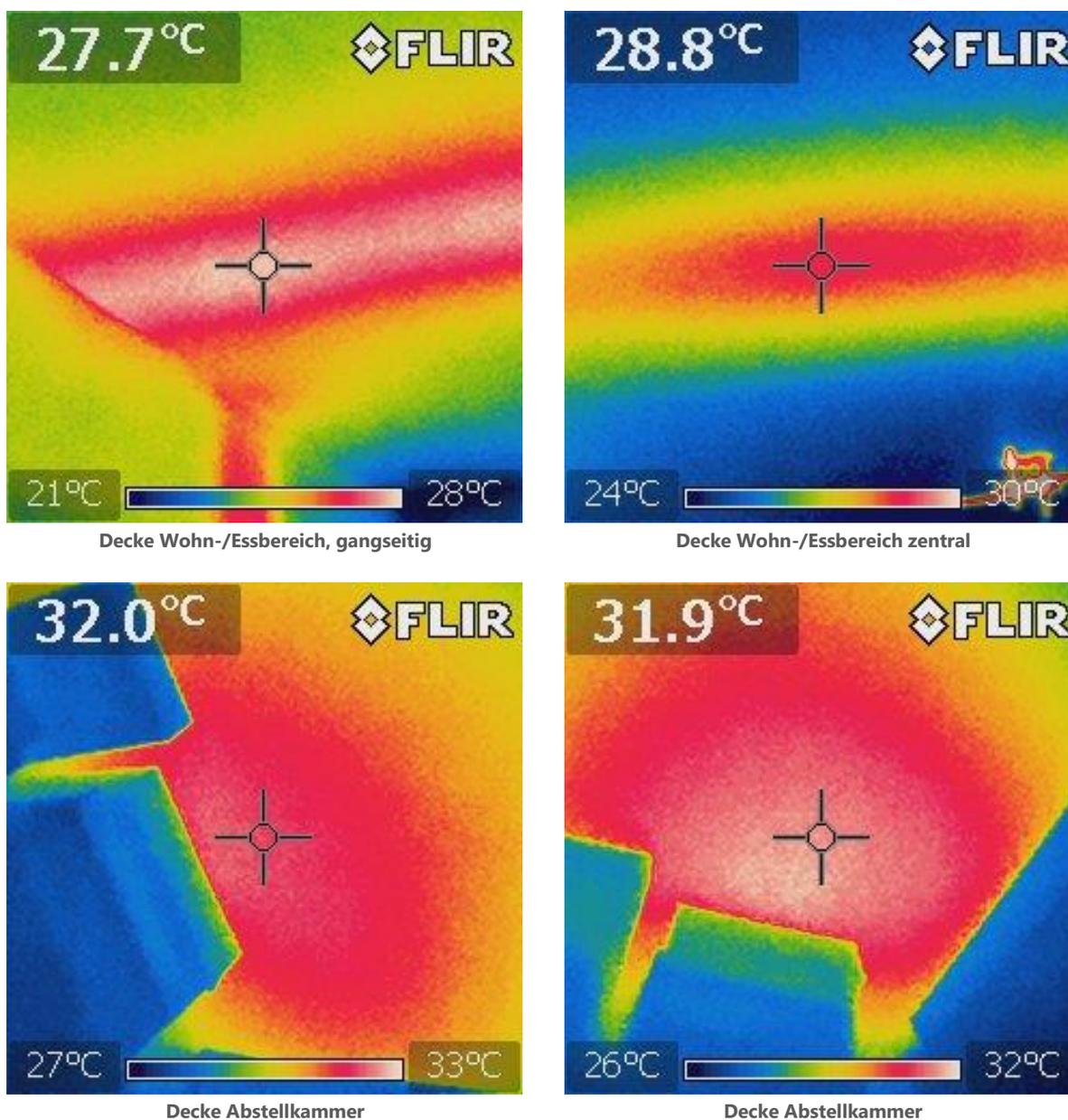


Abb. 73 Detektierte, signifikante Verteilungsverluste in der untersuchten Fernwärme-Wohnung

3.7.7 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 Verteilungsverluste 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.

3.8 Wirtschaftlichkeitsvergleich (Herstellkosten-Betriebs- und Wartungskosten)

3.8.1 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.

3.8.2 Herstellungskosten

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

3.8.2.1 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. 13 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 €

3.8.2.2 Haus 4 – Infrarotheizung ohne Berücksichtigung PV

In der nachfolgenden Tabelle werden die Herstellungskosten für das Haus 4 mit Infrarotheizung aufgelistet. Haus 4 wurde mit einer Photovoltaik-Anlage errichtet. Zur Erweiterung der Vergleichsmöglichkeiten wird bei dieser Variante jeweils die Photovoltaik-Anlage nicht berücksichtigt, also quasi ein fiktives zusätzliches Haus mit Infrarot-Heizsystem, jedoch ohne Photovoltaikanlage geschaffen. 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. 14 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 €
Gesamtkosten (netto)	104.471,76 €	17.411,96 €	238,44 €

3.8.2.3 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. 15 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 €
PV-Anlage	26.662,50 €	4.443,75 €	60,85 €
Gesamtkosten (netto)	131.134,26 €	21.855,71 €	299,30 €

3.8.2.4 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 28,6€ je Quadratmeter Wohnnutzfläche unter der Fernwärme-Wohnung.

Berücksichtigt man die Errichtung der PV-Anlage so liegen die Errichtungskosten für die betrachteten Gewerke um 32,2€/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.

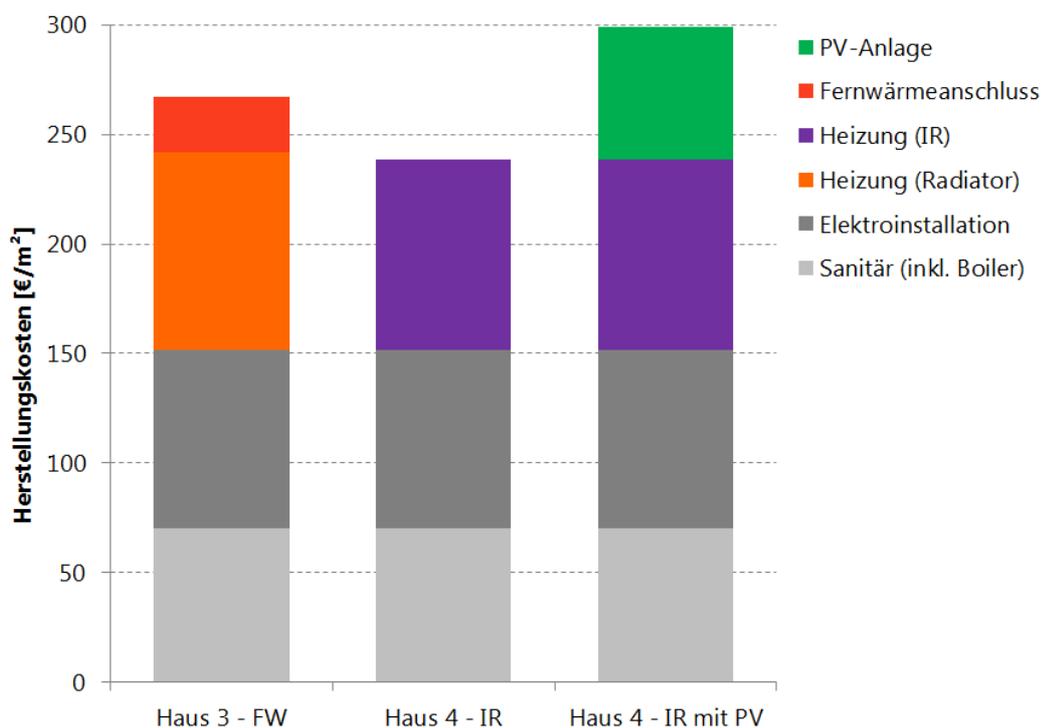


Abb. 74 Vergleich der Herstellungskosten je Quadratmeter Wohnnutzfläche

3.8.3 Betriebs- und Wartungskosten

Für das Kalenderjahr 2017 wurden die Betriebs- und die Wartungskosten miteinander verglichen. 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 Gesamtwarmwasserverbrauch für das Gebäude mit Infrarotheizung lag im untersuchten Jahr 2017 bei 65,61 m³, im Gebäude mit der Fernwärmeheizung lag der Gesamtwarmwasserverbrauch bei 120,75 m³. Der Warmwasserverbrauch wurde deshalb für beide Wohngebäude auf 93,18 m³ normiert. Die Skalierung der Warmwassermengen erfolgte linear, also unter der 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“).

3.8.3.1 Haus 3 (Fernwärme/Radiator):

In der nachfolgenden Tabelle 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.

Tab. 16 Übersicht Betriebskosten Haus 3 „Fernwärme“

Haus 3:	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatliche Kosten je m ² _{WNF} [€]
Fernwärme Arbeitspreis (01.01.2017 – 31.12.2017)	2.375,64	395,94	0,45
Fernwärme Leistungspreis (01.01.2017 – 31.12.2017)	516,00	86,00	0,10
Fernwärme Messpreis (01.01.2017 – 31.12.2017)	180,85	30,14	0,03
Hilfsstrom Heizung: (12 Monate inkl. Sommer mit Warmwasserbereitung) (01.01.2017 – 31.12.2017)	209,52	34,92	0,04
Abrechnung Messeinrichtung: (01.01.2017 – 31.12.2017)	179,01	29,84	0,03
Zählermiete: (01.01.2017 – 31.12.2017)	113,25	18,88	0,02
Wartung: (01.01.2017 – 31.12.2017)	189,00	31,50	0,04
Wartung AWT (Heizungswasseranalyse): (01.01.2017 – 31.12.2017)	65,00	10,83	0,01
Heizkosten (netto)	1.751,07	291,84	0,33
Warmwasserkosten (netto)	2.077,20	346,20	0,40
Gesamtkosten (netto)	3.828,27	638,05	0,73

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

Tab. 17 Übersicht Betriebskosten Haus 3 „Fernwärme“. (normierter Warmwasserverbrauch)

Haus 3:	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatliche Kosten je m ² _{WNF} [€]
Heizkosten (netto)	1.751,07	291,84	0,33
Warmwasserkosten (netto)	1.782,89	297,15	0,34
Gesamtkosten (netto)	3.533,95	588,99	0,67

3.8.3.2 Haus 4 (Infrartheizung ohne PV-Anlage)

In der nachfolgenden Tabelle wird die Zusammenstellung der Betriebskosten für Heizung- und Warmwasserbereitung im Haus 4 mit Infrartheizung gezeigt. Es fallen bei der Infrartheizung 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.

Tab. 18 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – ohne PV-Anlage

Haus 4:	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatliche Kosten je m ² _{WNF} [€]
Energieentgelte (6,2c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	885,10	147,52	0,17
Netzentgelte (5,1c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	730,92	121,82	0,14
Steuern und Abg. (2,87c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	409,71	68,29	0,08
Heizkosten (netto)	2.025,73	337,62	0,39
Energieentgelte (6,2c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	437,62	72,94	0,08
Netzentgelte (5,1c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	361,39	60,23	0,07
Steuern und Abg. (2,87c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	202,57	33,76	0,04
Warmwasserkosten (netto)	1.001,58	166,93	0,19
Gesamtkosten (netto)	3.027,31	504,55	0,58

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

Tab. 19 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – ohne PV-Anlage. (normierter Warmwasserverbrauch)

Haus 4:	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatliche Kosten je m ² _{WNF} [€]
Energieentgelte (6,2c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	885,10	147,52	0,17
Netzentgelte (5,1c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	730,92	121,82	0,14
Steuern und Abg. (2,87c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	409,71	68,29	0,08
Heizkosten (netto)	2.025,73	337,62	0,39
Energieentgelte (6,2c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	621,51	103,59	0,12
Netzentgelte (5,1c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	513,25	85,54	0,10
Steuern und Abg. (2,87c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	287,70	47,95	0,05
Warmwasserkosten (netto)	1.422,46	237,08	0,27
Gesamtkosten (netto)	3.448,19	574,70	0,66

3.8.3.3 Haus 4 (Infrarotheizung mit PV-Anlage)

In der nachfolgenden Tabelle wird die Zusammenstellung der Betriebskosten für Heizung- und Warmwasserbereitung im Haus 4 mit Infrarotheizung und unter Berücksichtigung der PV-Anlage dargestellt. Die von der PV-Anlage in das Netz eingespeiste Energiemenge wird hier nicht berücksichtigt. Es wurde also nur der PV-Eigenverbrauch berücksichtigt.

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

Tab. 20 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – mit PV-Anlage

Haus 4:	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m ² Whg [€]	monatliche Kosten je m ² _{WNF} [€]
Energieentgelte (6,2c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	698,80	116,47	0,13
Netzentgelte (5,1c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	577,08	96,18	0,11
Steuern und Abg. (2,87c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	323,48	53,91	0,06
SUMME Heizkosten (netto)	1.599,36	266,56	0,30
Energieentgelte (6,2c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	393,26	65,54	0,07
Netzentgelte (5,1c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	324,76	54,13	0,06
Steuern und Abg. (2,87c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	182,04	30,34	0,03
Warmwasserkosten (netto)	900,06	150,01	0,17
Gesamtkosten (netto)	2.499,42	416,57	0,48

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

Tab. 21 Übersicht Betriebskosten Haus 4 „Infrarot“ – mit PV-Anlage. (normierter Warmwasserverbrauch).

Haus 4:	jährl. Kosten Haus [€]	jährl. Kosten 73m² Whg [€]	monatliche Kosten je m²_{WNF} [€]
Energieentgelte (6,2c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	698,80	116,47	0,13
Netzentgelte (5,1c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	577,08	96,18	0,11
Steuern und Abg. (2,87c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	323,48	53,91	0,06
SUMME Heizkosten (netto)	1.599,36	266,56	0,30
Energieentgelte (6,2c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	558,52	93,09	0,11
Netzentgelte (5,1c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	461,23	76,87	0,09
Steuern und Abg. (2,87c) (01.01.2017 – 31.12.2017)	258,54	43,09	0,05
Warmwasserkosten (netto)	1.278,29	213,05	0,24
Gesamtkosten (netto)	2.877,64	479,61	0,55

Vergleichsdarstellung Heizkosten

Die Heizkosten sind bei den mit Fernwärme beheizten Wohnungen geringer, als bei der fiktiven Variante ohne Photovoltaik-Anlage. Unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung ist jedoch diese Variante die günstigste. 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.

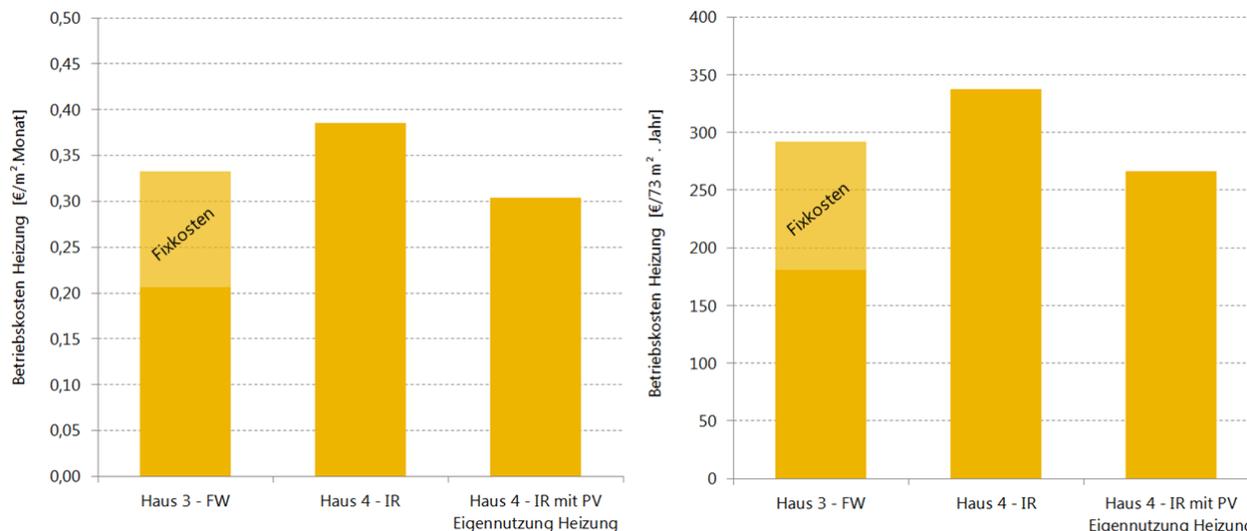


Abb. 75 Vergleich der Heizkosten.

linkes Diagramm: spezifische Kosten je m² und Monat gezeigt,
 rechtes Diagramm: jährliche Kosten für eine durchschnittliche Wohnung (73m²).

Warmwasserbereitung

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

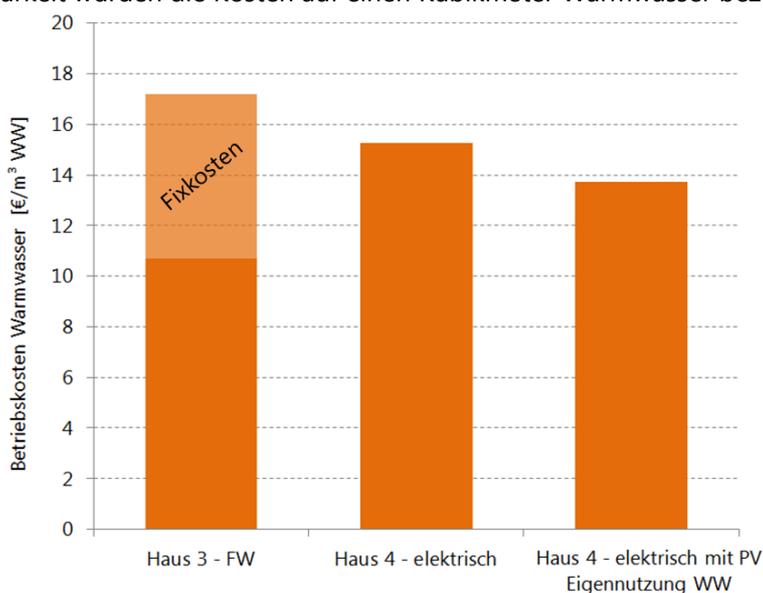


Abb. 76 Vergleich der spezifischen Warmwasserkosten

Heizung und Warmwasserbereitung

Die Wohnungen mit Fernwärmeanschluss haben in etwa dieselben Betriebskosten für Warmwasser und Heizung wie die Wohnungen mit Infrarotheizung und elektrischer Warmwasserbereitung (-2,4%). Bei Berücksichtigung der PV-Anlage und Infrarotheizung sind die Betriebskosten geringer als bei den beiden anderen Varianten (-18,6%).

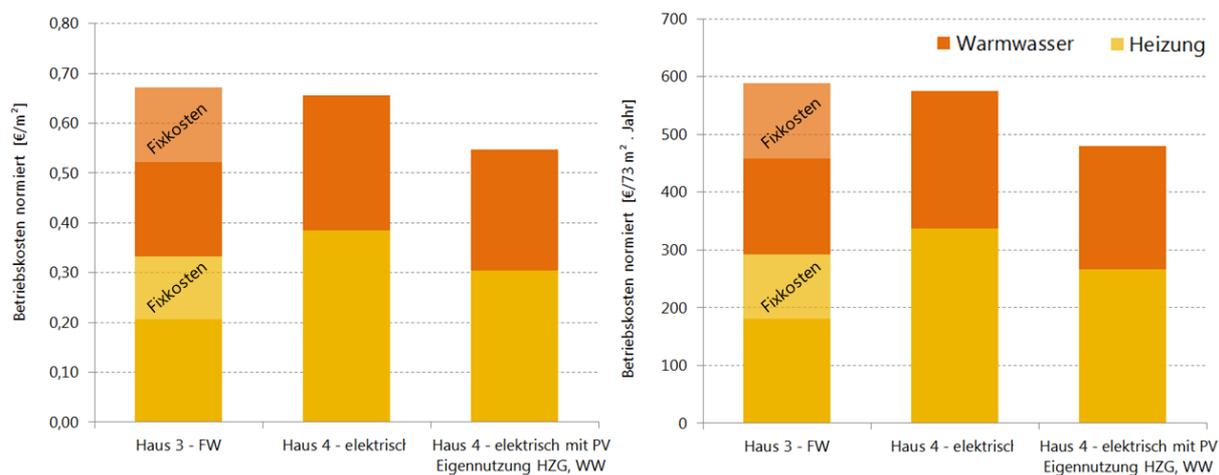


Abb. 77 Vergleich der Betriebskosten für Heizung und Warmwasser

links: je m^2_{WNF} ; rechts: mittlere Wohnung mit $73m^2$
 Warmwasserverbrauch normiert

3.8.4 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. 22 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	6.341,87	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. 23 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. Auf gleiche Weise wurden der Photovoltaik-Eigenverbrauch und die PV-Einspeisung ermittelt.

Da der Warmwasserverbrauch in beiden Objekten sehr unterschiedlich war (120,8m³ vs. 65,6m³), wurde der Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung auf eine mittlere Bezugsmenge (93,2m³) skaliert - unter der Annahme gleichbleibender relativer Verluste.

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:

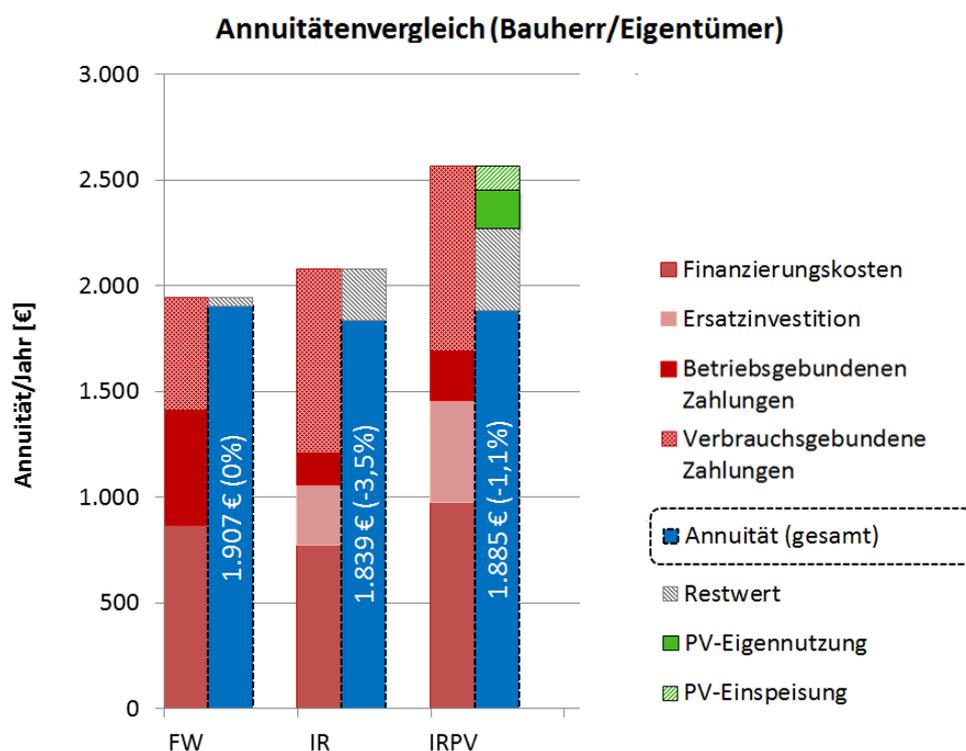


Abb. 78 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Wie zu sehen ist, ergeben sich unter den obigen Annahmen über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren nur sehr geringe Unterschiede. Die geringsten Annuitäten fallen bei der mit Infrarot beheizten Wohnung ohne Berücksichtigung der PV-Anlage an. Hier liegen die jährlichen Zahlungen um 3,5% unter jenen der Fernwärme-Wohnung. Berücksichtigt man die PV-Anlage, so liegen die jährlichen Zahlungen um 1,1% 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.

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.

3.9 Vergleich Primärenergieverbrauch und CO₂ Äquivalente Emissionen

3.9.1 Methodik und Analyse Strommix Österreich

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

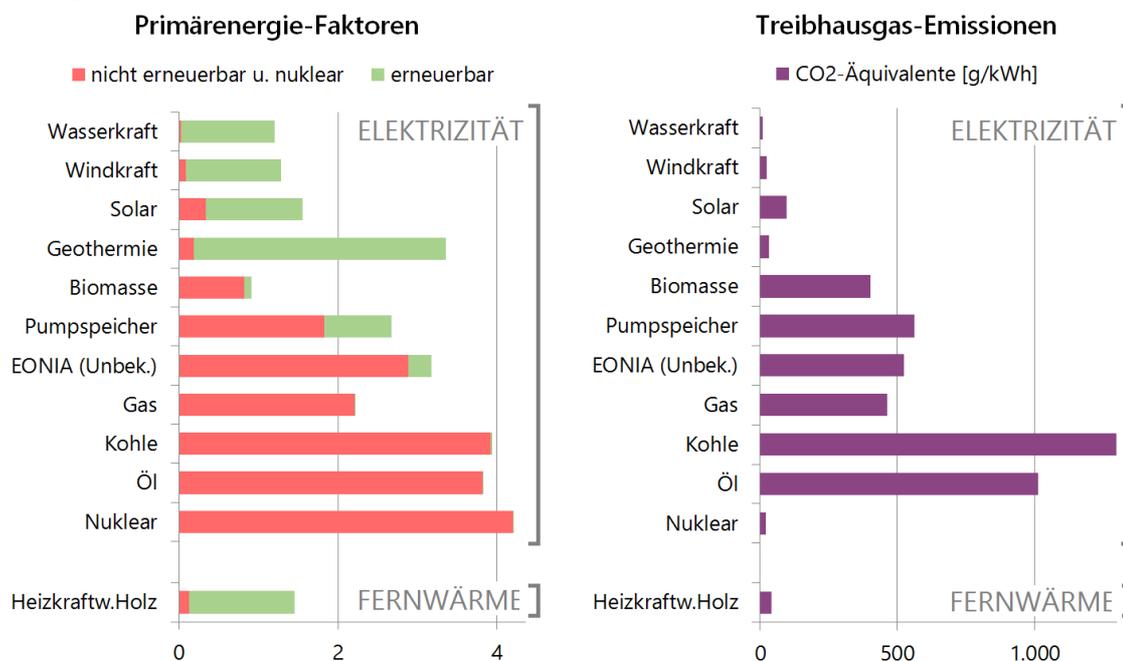


Abb. 79 Angewendete Umweltfaktoren gemäß KBOB-Ökobilanzdatenbestand (CH)

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

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

erneuerbare Energiequellen zugeordnet werden sind für die eine Berechnung der 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.

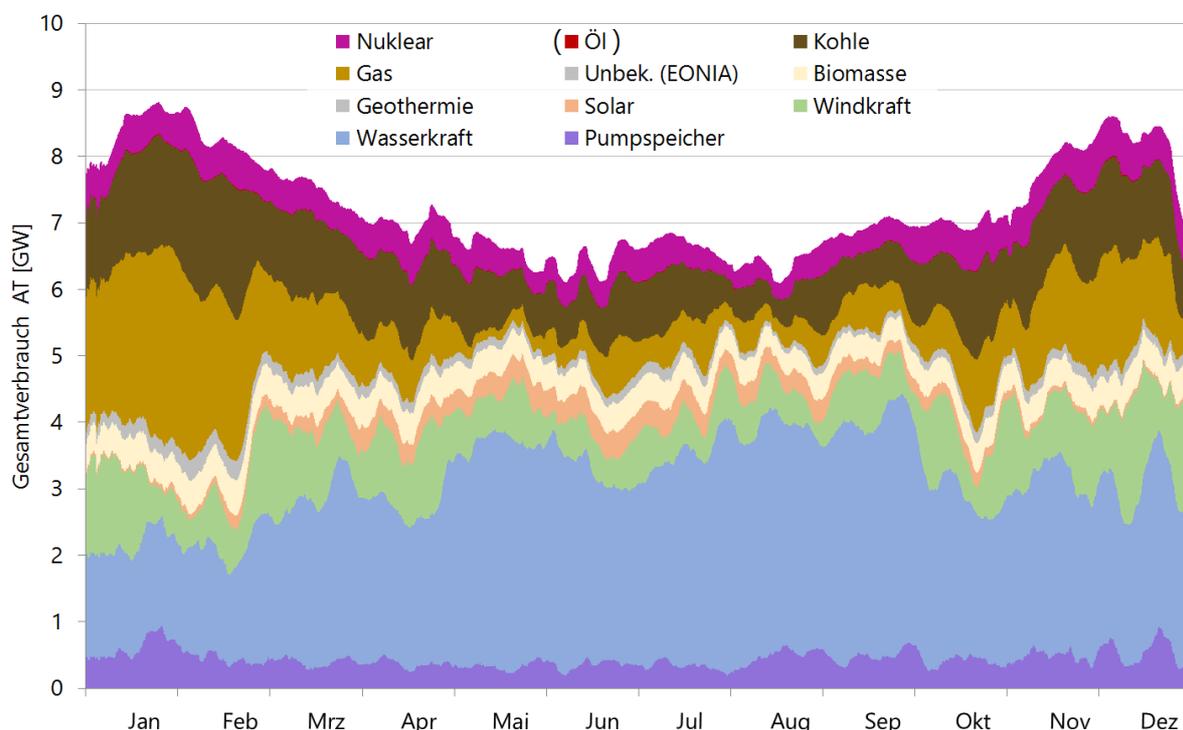


Abb. 80 Zusammensetzung des österreichischen Strommix im Jahr 2017 (168h-Mittelung)

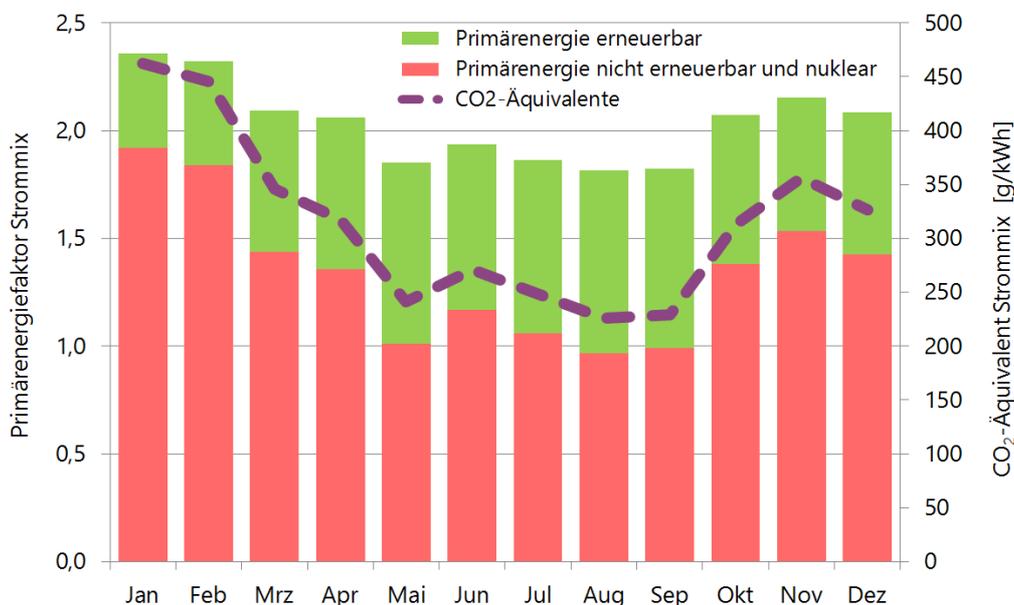


Abb. 81 Monatliche Mittelwerte (2017) für den Primärenergie-Aufwand, die PE-Zusammensetzung und die CO₂-Äquivalenten Treibhausgasemissionen für den österr. Netzstrom

Wie in Abb. 81 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 charakterischen Heiztag generiert. Hierfür wurden 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. 82) und ein im Vergleich zum Jahresmittelwert deutlich höherer Emissionswert für die CO₂-Äquivalente.

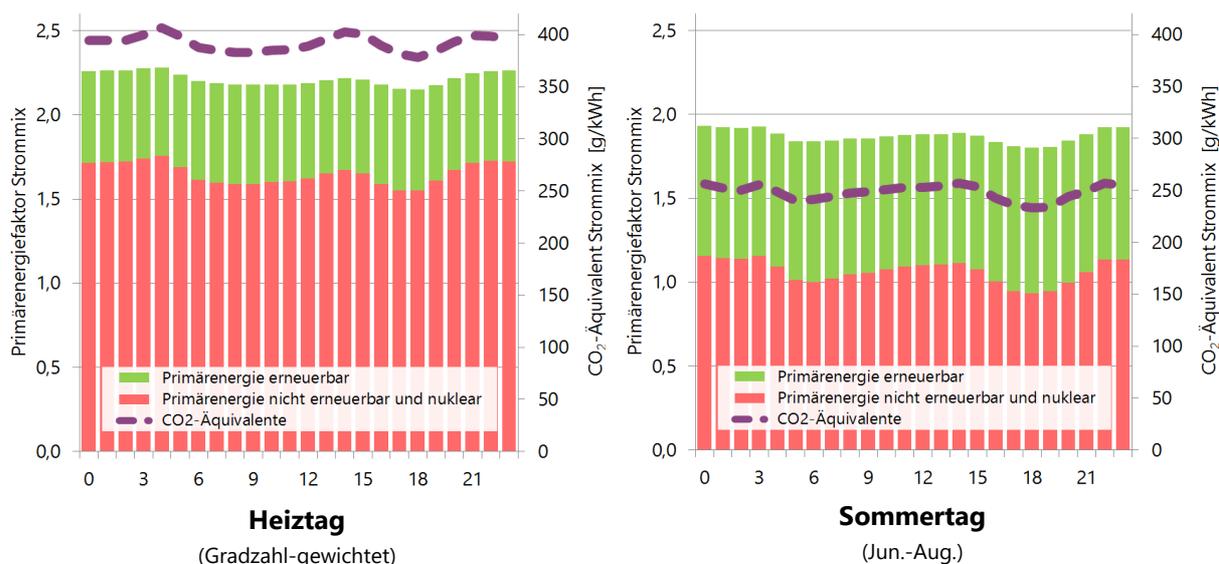


Abb. 82 Tageszeitliche Verteilung des Primärenergie-Aufwands, der PE-Zusammensetzung und Emissionen der CO₂-Äquivalente für den österr. Netzstrom an einem mittleren Heiztag (Heizgradtag-Gewichtung) bzw. Sommertag

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

3.9.2 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Heizsystem

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

Tab. 24 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Jahressummen bezogen auf den Quadratmeter Nutzfläche- Heizsystem

	Primärenergie erneuerbar [kWh/m ² _{WNF}]	Primärenergie nicht erneuerbar und nuklear [kWh/m ² _{WNF}]	Primärenergie gesamt [kWh/m ² _{WNF}]	CO ₂ -Äquivalente gesamt [kg/m ² _{WNF}]
Haus 3 FW	55,90	5,46	61,37	1,82
Haus 4 IR	18,89	52,58	71,47	12,56
Haus 4 IR mit PV-Eigennutzung	14,58	42,35	56,92	10,12

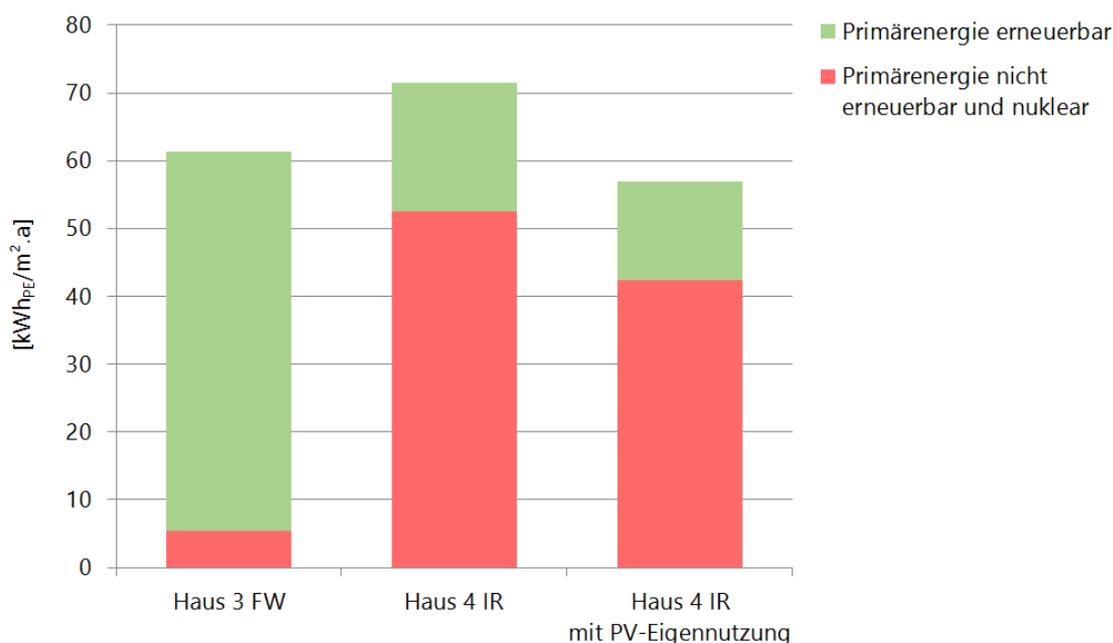


Abb. 83 Primärenergieverbrauch Heizung gesamt je Quadratmeter Wohnnutzfläche und Jahr

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. 25 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	1,63	0,16	1,78	52,8
Haus 4 IR	0,58	1,61	2,19	384,9
Haus 4 IR mit PV-Eigennutzung	0,45	1,30	1,74	310,1

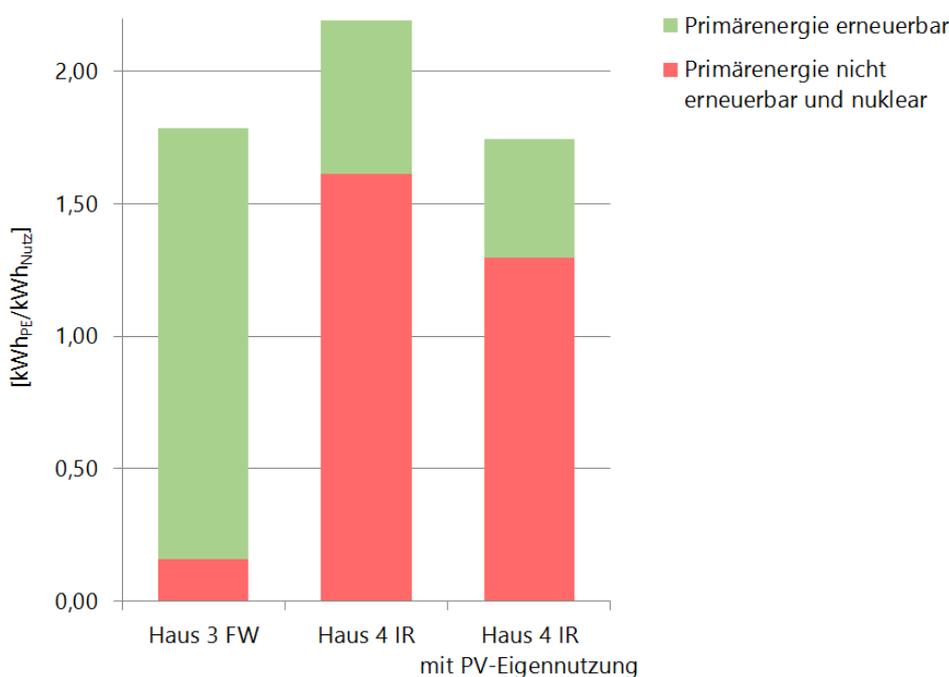


Abb. 84 Ermittelte effektive Primärenergie-Faktoren - Heizsystem

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, gibt es hinsichtlich des wesentlichen Anteils an nicht-erneuerbaren und nuklearen Energiequellen markante Unterschiede. Während die Kilowattstunde Heiznutzenergie bei der Beheizung mit Fernwärme einen nicht-erneuerbaren Anteil von 0,16 kWh benötigt, sind bei der Beheizung mit Strom 1,61 kWh notwendig (Faktor 10). Bei Berücksichtigung der PV-Eigennutzung sinkt der Anteil auf 1,30 kWh (Faktor 8,1).

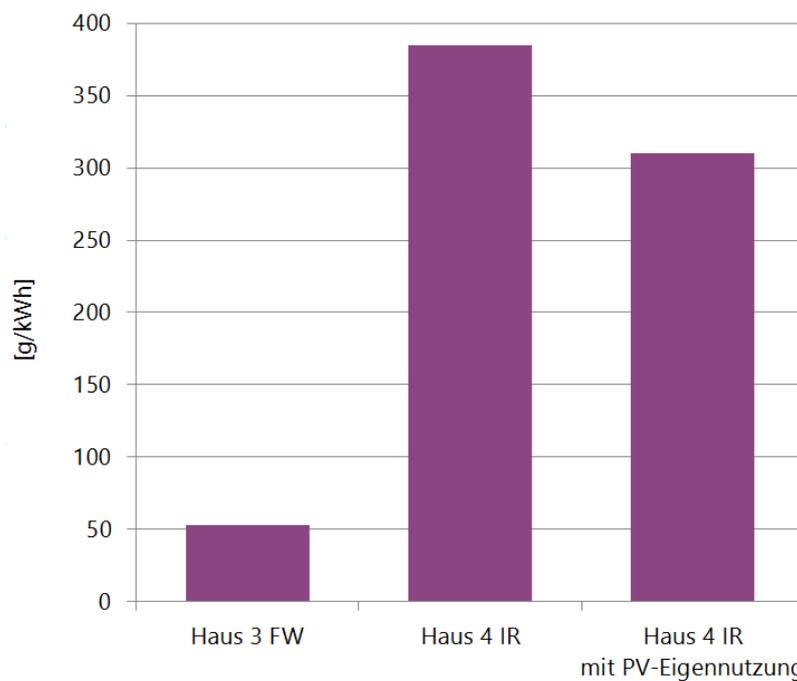


Abb. 85 Ermittelte Treibhausgasemissionsfaktoren (CO₂-Äquivalente) - Heizsystem

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 52,8 g Emissionen an CO₂-Äquivalenten verursacht, sind dies im elektrisch beheizten Haus, selbst unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung, noch 310,1 g. Die Treibhausgas-Emissionen liegen also um 487% höher (Faktor 5,9).

3.9.3 Primärenergie und CO₂-Äquivalente Warmwasserbereitung

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 sehr unterschiedlich war. Im Haus 3 (FW) lag der Warmwasserverbrauch im Jahr 2017 bei 120,7 m³, im Haus 4 (IR) nur bei 65,6 m³.

Tab. 26 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	240,63	23,52	264,15	7,82
Haus 4 elektrisch	74,46	145,62	220,08	34,26
Haus 4 elektr. mit PV-Eigenn.	66,20	132,71	198,90	31,23

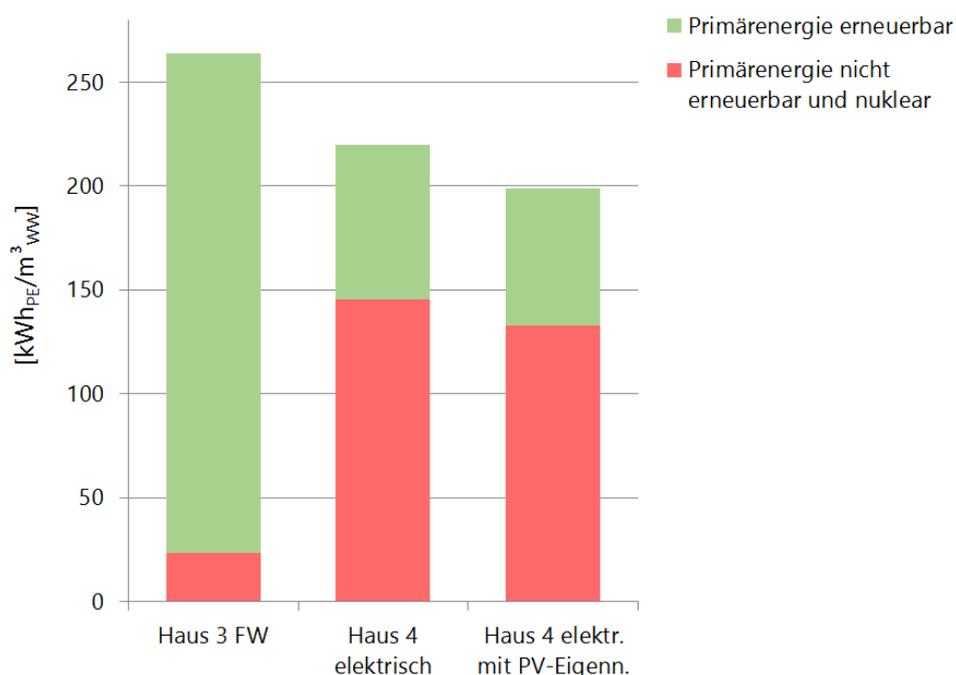


Abb. 86 Ermittelte effektiver Primärenergieverbrauch – Warmwasserbereitung bezogen auf einen Kubikmeter

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 um 25% geringer.

Vergleicht man wiederum den wichtigen Anteil an nicht erneuerbarer und nuklearer Primärenergie, so liegt die elektrische Warmwasserbereitung jedoch sehr deutlich über der fernwärmebasierten. Mit Berücksichtigung der PV-Anlage ergibt sich ein Mehrverbrauch von 460%. 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

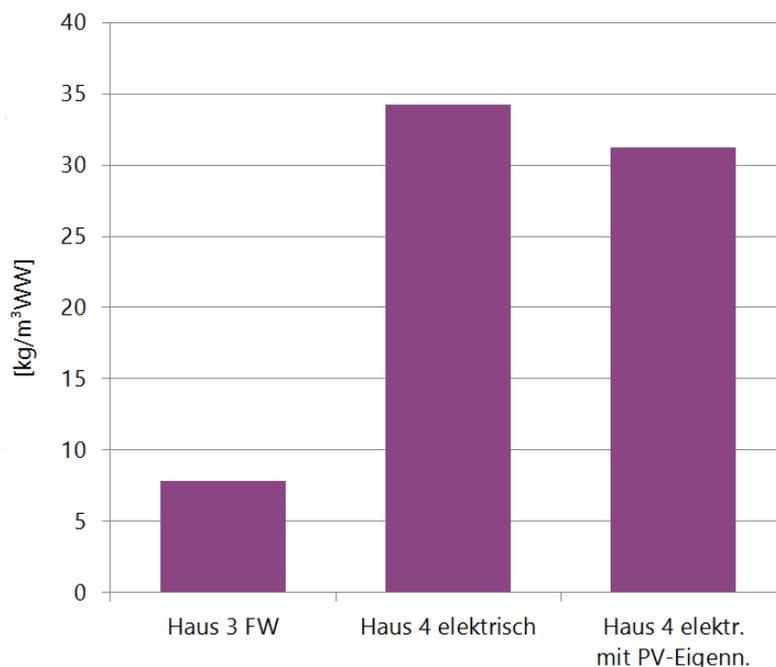


Abb. 87 Ermittelte Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) – Warmwasserbereitung bezogen auf einen Kubikmeter Warmwasser

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 um 299% höher. Im Vergleich zum Faktor 6 bei den durch die Heizung verursachten Emissionen sinken die Unterschiede bei der Warmwasserbereitung auf einen Faktor von circa 4. Dies liegt an den geringeren Verlusten der elektrischen Warmwasserbereitung und der günstigeren Stromzusammensetzung außerhalb der Heizperiode.

3.9.4 Vergleich der Treibhausgas-Emissionen

Auf Basis des im Jahr 2017 tatsächlich gemessenen Heizenergieverbrauchs und eines für beide Wohnungen gleich angenommenen Warmwasserverbrauchs verursacht die Beheizung und Warmwasserbereitung einer Wohnung mittlerer Größe (73 m³_{WNF}) im Fernwärme-Objekt eine jährliche Treibhausgas-Emission von 208 kg. Beim elektrisch beheizten Objekt ergibt sich eine jährliche Gesamtemission von 1224 kg an CO₂-Äquivalenten (+489%). Somit werden bei der Beheizung und Warmwasserbereitung einer Wohnung im elektrisch beheizten Objekt annähernd gleichviel Treibhausgase emittiert, wie beim gesamten mit Fernwärme gespeisten Objekt mit sechs Wohneinheiten.

Die jahreszeitliche Verteilung der Treibhausgasemissionen ist in der Abbildung unten ersichtlich.

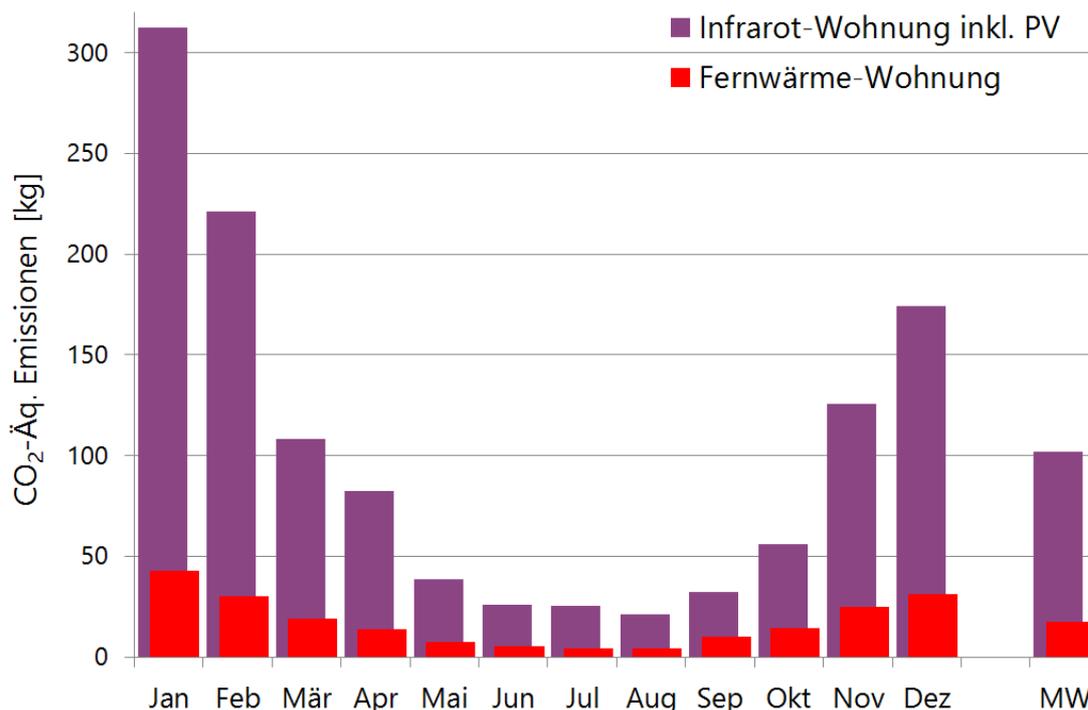


Abb. 88 Vergleich der monatlichen Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) verursacht durch Beheizung und Warmwasserbereitung
(Warmwasserbezug normiert)

3.10 PV Eigenverbrauch

3.10.1 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 der 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.

3.10.2 Eigennutzung

Der Stromverbrauch beim Wohngebäude mit Infrarotheizung teilt sich auf die Komponenten Heizung, Warmwasser und Haushaltsstrom auf. Der spezifische Stromverbrauch lag im Jahr 2017 für die Infrarotheizung bei 32,6 kWh/m², für die Warmwasserbereitung bei 16,4 kWh/m² und für den Haushaltsstrom bei 13,2 kWh/m² (jeweils auf die Wohnnutzflächen bezogen). Die PV Anlagen haben insgesamt 34,7 kWh/m² generiert, davon wurden 6,7 kWh/m² der Infrarotheizung, 1,6 kWh/m² der Warmwasserbereitung und 2,93 kWh/m² dem Haushaltsstrom zugeordnet.

Damit wurden 32,3 % des generierten PV-Stroms in den Wohnungen verbraucht, 19,3 % von der Infrarotheizung, 4,6 % von der Warmwasserbereitung und 8,5 % von weiteren Geräten des Haushalts.

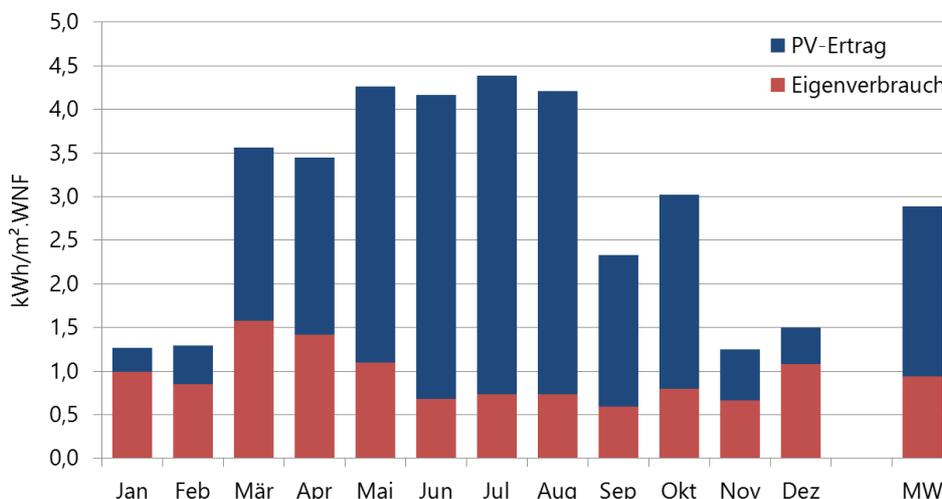


Abb. 89 spezifischer PV-Ertrag und Eigennutzung 2017

Im Diagramm ist gut erkennbar, dass im Sommer tagsüber wesentlich mehr Strom produziert wird, als abnehmbar ist. Die höchsten Eigenverbrauchswerte wurden im März und April erreicht, da dort witterungsbedingt ein maßgeblicher Teil vom Infrarot-Heizsystem bezogen werden konnte (Sonnenschein bei niedrigen Außentemperaturen).

Berechnet man den monatlichen Eigennutzungsgrad so ergibt sich das folgende Bild.

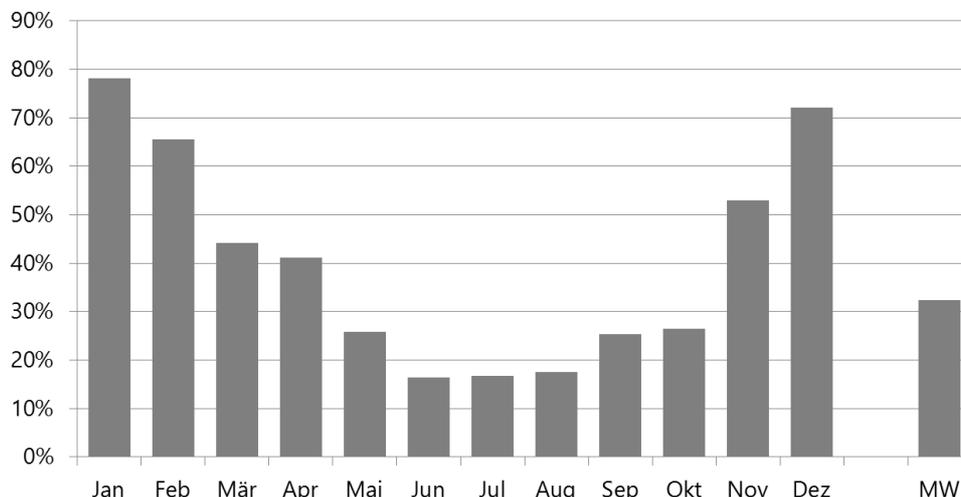


Abb. 90 Eigennutzungsgrad der PV-Anlage 2017

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

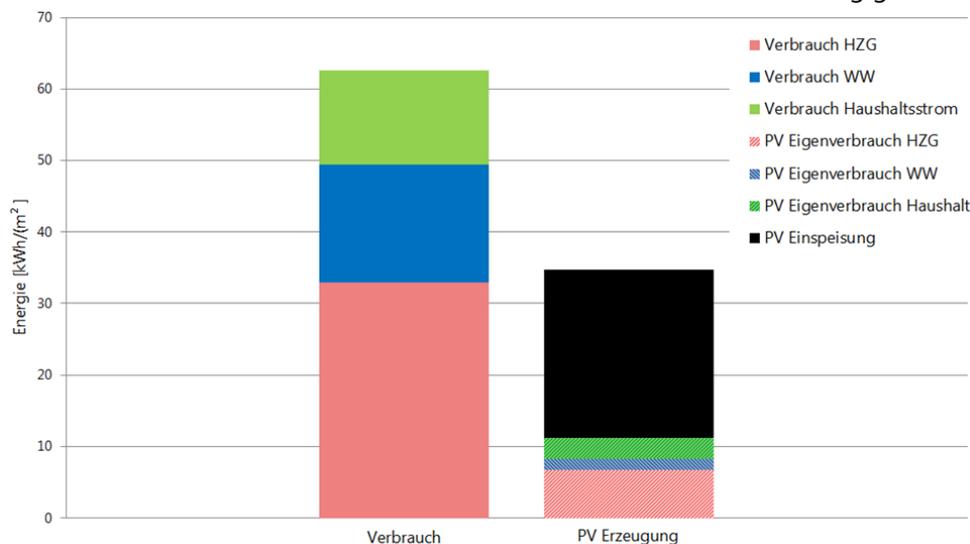


Abb. 91 Jahresstrombilanz für das Wohngebäude mit IR-Heizung, elektrischer Warmwasserbereitung und PV-Anlage

3.10.3 Eigendeckung des Heizstroms

Auf das Jahr bezogen konnten nur 20% 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.

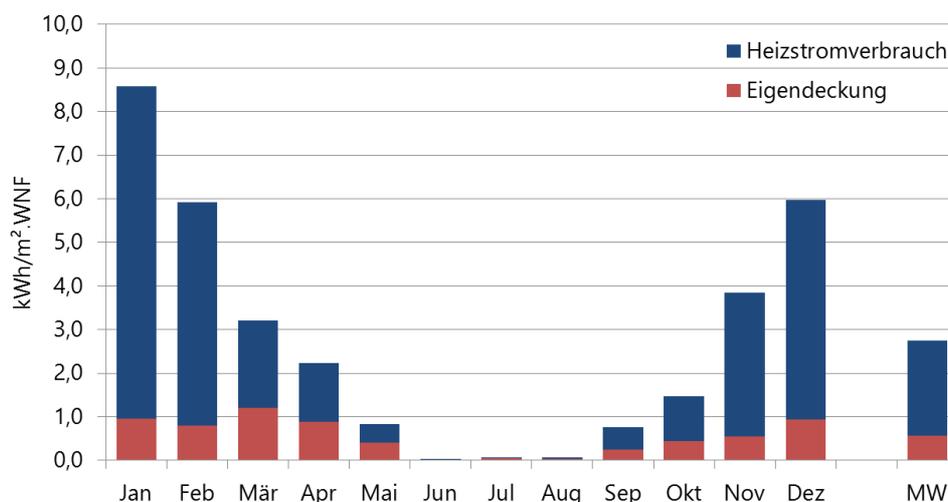


Abb. 92 spezifischer Heizstromverbrauch und Eigendeckung 2017

Der obigen Argumentation entsprechend liegt der ermittelte Eigendeckungsgrad des Heizstroms in den heizintensivsten Monaten November bis Februar im Mittel nur bei 13,3%. In den Monaten der Übergangsjahreszeit zeigten sich höhere Eigendeckungen bis 30% und darüber, jedoch bei absolut gesehen geringem Heizenergieverbrauch.

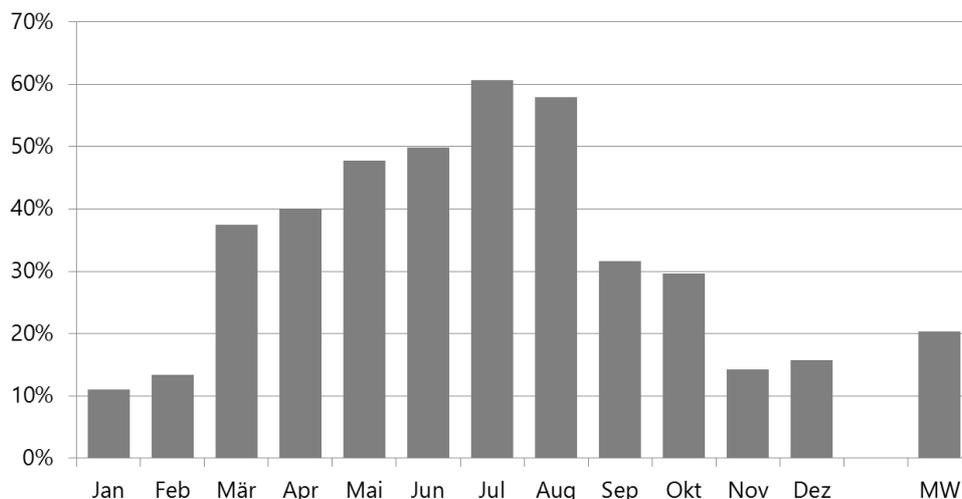


Abb. 93 Eigendeckungsgrad des Heizstroms 2017

3.10.4 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.

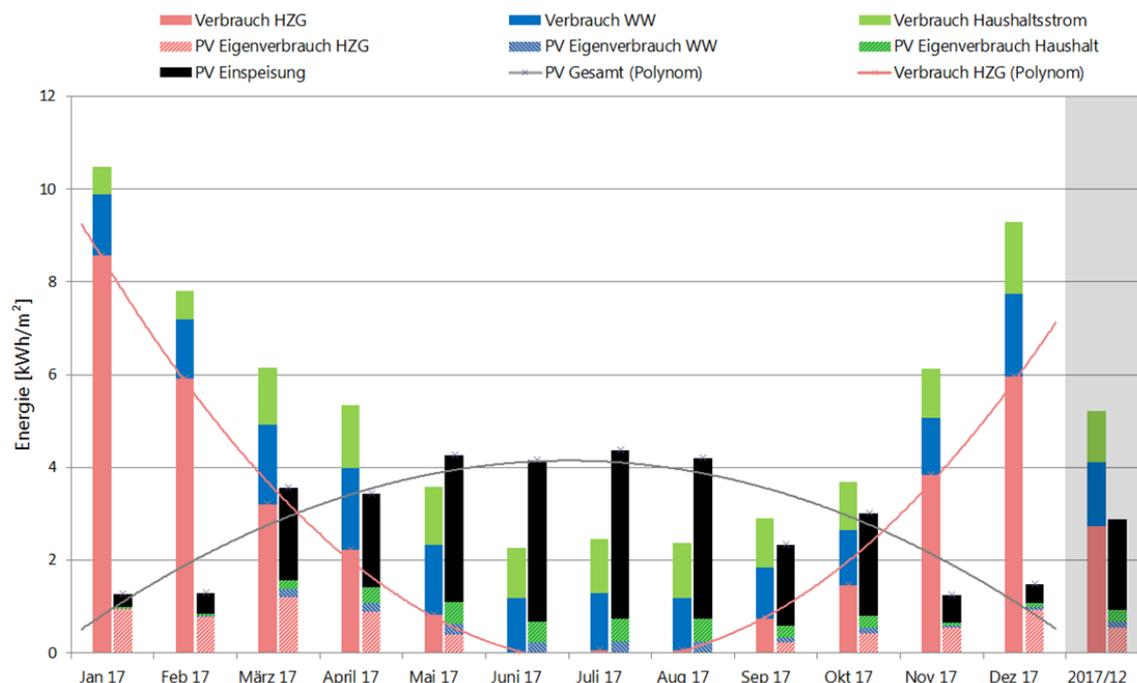


Abb. 94 Monatsstrombilanz für das Wohngebäude mit IR-Heizung, elektrischer Warmwasserbereitung und PV-Anlage

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

Tab. 27 Monatswerte des PV-Eigenverbrauchs

	PV-Energie kWh/m ²	Eigenverbrauch Gesamt	Eigenverbrauch Heizung	Eigenverbrauch Warmwasser	Eigenverbrauch Haushalt
Jan. 17	1,27	78,2%	74,9%	1,3%	1,9%
Feb. 17	1,29	65,6%	61,1%	2,2%	2,3%
Mrz. 17	3,57	44,2%	33,8%	5,3%	5,2%
Apr. 17	3,45	41,2%	25,8%	5,6%	9,7%
Mai. 17	4,26	25,8%	9,3%	5,9%	10,6%
Jun. 17	4,16	16,3%	0,4%	5,2%	10,8%
Jul. 17	4,38	16,8%	1,0%	5,0%	10,8%
Aug. 17	4,21	17,5%	0,9%	5,0%	11,6%
Sep. 17	2,33	25,3%	10,2%	4,5%	10,6%
Okt. 17	3,02	26,4%	14,4%	4,2%	7,8%
Nov. 17	1,25	52,9%	43,7%	3,3%	5,9%
Dez. 17	1,49	72,2%	63,0%	4,2%	4,9%
GESAMT 2017	34,69	32,3%	19,3%	4,6%	8,5%

3.10.5 Eigenverbrauch-Optimierung

Eine Erhöhung des Eigenverbrauchs kann primär bei der Warmwasserbereitung erzielt werden. Hier gilt es soweit möglich den Bezug an die Verfügbarkeit des PV-Stroms anzupassen. Dies erfolgt idealerweise mit einer intelligenten, leistungsgeregelten Steuerung. Eine einfachere, aber dennoch effektive Maßnahme stellt die Steuerung per Zeitschaltuhr dar. Im Februar 2018 wurden diese in den Wohnungen nachgerüstet. Die Warmwasserbereitung wird jetzt am Tag aktiviert, dadurch konnte eine deutlich höhere Deckung von Verbrauch und Erzeugung erzielt werden.

Der höhere Eigenverbrauch der Warmwasserbereitung ist im nachfolgenden Diagramm mit den Monatswerten von 2018 erkennbar (vergleiche Abb. 94).

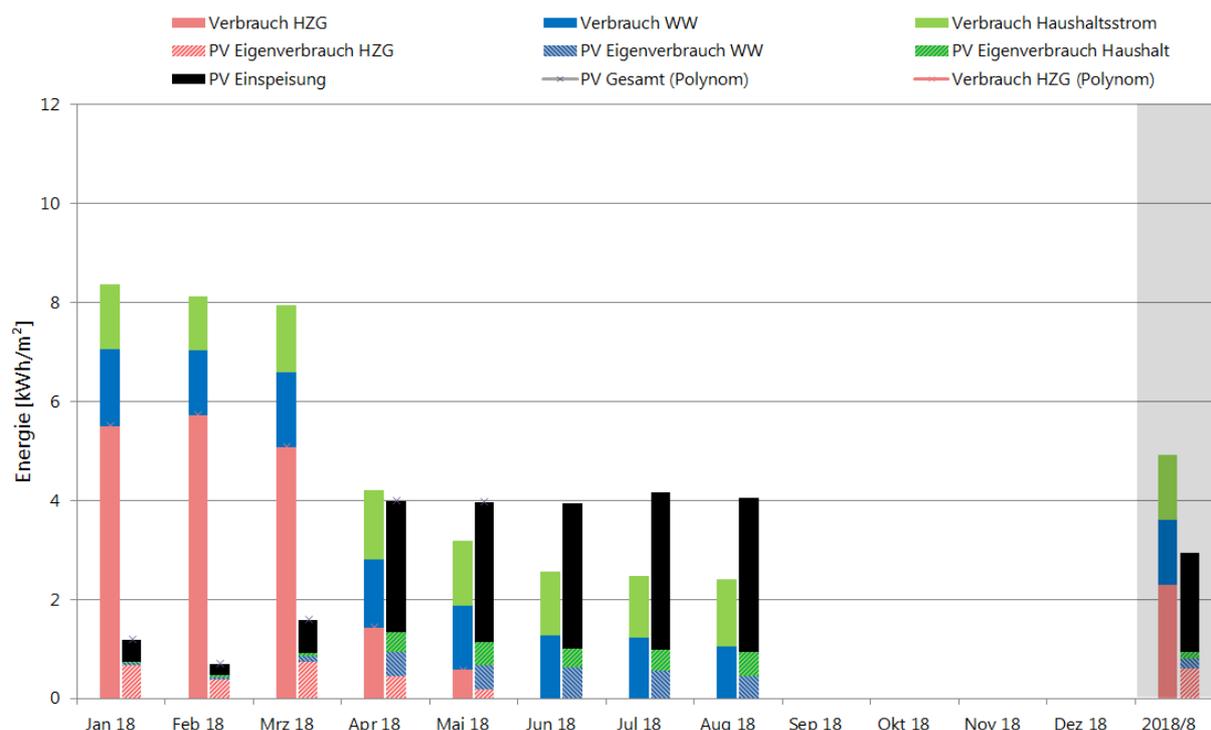


Abb. 95 Monatsstrombilanz 2018 für das Wohngebäude mit IR-Heizung, elektrischer Warmwasserbereitung und PV-Anlage

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, 238€/m²_{WNF} (-11%) bei den Infrarot-Wohnungen ohne Berücksichtigung der PV-Anlage und 299€/m²_{WNF} (+12%) 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 86,9€/m²_{WNF} (-4%). 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

Für den Vergleich der Betriebskosten musste eine Normierung des Warmwasserbezugs durchgeführt werden. Auf Grund der geringeren Belegung des Infrarot-Hauses war dort der Warmwasserbezug um circa die Hälfte geringer. Der Vergleich der Betriebskosten für die Heizung und die normierte Warmwasserbereitung ergab nur 2% Differenz zwischen der Fernwärme-Wohnung (0,67€/m²_{WNF}) und der Infrarot-Wohnung (0,66€/m²_{WNF}). Bei Berücksichtigung der PV-Anlage, liegen die Betriebskosten der Infrarot-Wohnung um 19% tiefer (0,55€/m²_{WNF}). Zu beachten gilt, dass die Zusammensetzung der Kosten sehr unterschiedlich ist. Bei der Fernwärme spielen die Fixkosten (Wartung, Zählermiete, Ablesung etc.) eine signifikante Rolle. Berücksichtigt man nur die verbrauchsgebundenen Kosten so wären diese geringer. Bei Objekten mit höherem Heizwärmebedarf ist davon auszugehen, dass der Betrieb mit Fernwärmenutzung günstiger ist. Bei Objekten mit noch geringerem Heizwärmebedarf spielen die Fixkosten eine signifikante 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. Hierbei ergab sich eine jährliche Zahlungsleistung von 1907€ für die Fernwärme-Wohnung, für die Infrarot-Wohnung lag diese um 3,5% niedriger bei 1839€. Berücksichtigt man allerdings die Photovoltaik-Anlage so steigen die Annuitäten auf 1885€ und liegen damit nur mehr

1,1% 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 Energiepreisteigerungen, 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 ausgewerteten Jahr 2017 lag der flächenspezifische, gemessene Endenergieverbrauch für die Heizung beim mit Fernwärme beheizten Objekt bei $42,0 \text{ kWh/m}^2_{\text{WNF.a}}$ und bei $32,6 \text{ kWh/m}^2_{\text{WNF.a}}$ beim elektrisch beheizten Objekt (-22%). Bezogen auf die Bruttogrundfläche sind das $32,9 \text{ kWh/m}^2_{\text{BGF.a}}$ bzw. $25,5 \text{ kWh/m}^2_{\text{BGF.a}}$. Bei der Energieausweisberechnung ergab sich ein nomineller Bedarfswert von $28,4 \text{ kWh/m}^2_{\text{BGF.a}}$.

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 deutlich geringer war.

Infolge der abweichenden Belegung, und des daraus resultierenden stark unterschiedlichen Warmwasserbezugs wurde der Energieverbrauch auf einen Kubikmeter Warmwasser bezogen. Hierbei ergab sich ein spezifischer Energieverbrauch von $180,9 \text{ kWh/m}^3$ beim Fernwärme-Haus, beim elektrisch betriebenen Warmwasserspeicher waren es nur $107,6 \text{ kWh/m}^3$ (-41%). Die Unterschiede erklären sich systematisch aus den Verteilverlusten, welche bei der Warmwasserbereitung per Fernwärme erheblich sind.

4.5 Primärenergieverbrauch Heizung und Warmwasser

Der flächenspezifische Gesamtprimärenergieverbrauch für die Heizung lag beim Fernwärme-Objekt bei 61,4 Kilowattstunden pro Jahr und Quadratmeter Wohnnutzfläche, beim Infrarot-Objekt bei $71,5 \text{ kWh/m}^2_{\text{WNF.a}}$ (+16%), und unter Berücksichtigung der Photovoltaik-Eigennutzung bei $56,9 \text{ kWh/m}^2_{\text{WNF.a}}$ (-7%). 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 $5,5 \text{ kWh/m}^2_{\text{WNF.a}}$ an nicht-erneuerbare oder nukleare Primärenergie benötigt, sind dies beim elektrisch beheizten $52,6 \text{ kWh/m}^2_{\text{WNF.a}}$ (+836%), bzw. bei Berücksichtigung der PV-Eigennutzung $42,4 \text{ kWh/m}^2_{\text{WNF.a}}$ (+676%).

Bei der Warmwasserbereitung per Fernwärme ergab sich ein Primärenergieverbrauch von 264 kWh je Kubikmeter Warmwasser. Die elektrische Warmwasserbereitung liegt auf Grund der geringeren Verluste um 17% bzw. 25% (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 +519% bzw. +464% erheblich über dem Wert der Fernwärme.

4.6 Treibhausgas-Emissionen

Der hohe Verbrauch von Energie aus nicht-erneuerbaren Energiequellen äußert sich auch bei den Emissionen der CO₂-Äquivalente. Während für eine Kilowattstunde Heiznutzenergie im Fernwärme-Objekt nur 52,8 g an Treibhausgasen emittiert werden, sind dies bei der elektrischen Beheizung 385 g (+629%) bzw. unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung 487 g (+487%).

Für die Warmwasserbereitung werden beim Fernwärmeobjekt 7,8 kg an Treibhausgase je Kubikmeter Warmwasser emittiert, bei der elektrischen sind dies 34,3 kg (+338%) bzw. unter Berücksichtigung der PV-Eigennutzung 31,2 kg (+299%).

Auf Basis des im Jahr 2017 messtechnisch ermittelten Heizenergieverbrauchs und eines für beide Wohnungen gleich angenommenen Warmwasserbezug verursacht die Beheizung und Warmwasserbereitung einer Wohnung mittlerer Größe ($73 \text{ m}^3_{\text{WNF}}$) im Fernwärme-Objekt eine jährliche Treibhausgas-Emission von 208 kg. Beim elektrisch beheizten Objekt ergibt sich eine jährliche Gesamtemission von 1224 kg an CO_2 -Äquivalenten (+489%). Somit werden für die Beheizung und Warmwasserbereitung einer Wohnung im elektrisch beheizten Objekt annähernd gleichviel Treibhausgase emittiert, wie für das gesamte mit Fernwärme gespeiste Objekt mit sechs Wohneinheiten. Der Grund hierfür ist, dass bei der aktuell für Österreich relevanten Stromerzeugung nicht-erneuerbare bzw. fossile Energieträger immer noch einen erheblichen Anteil haben, bzw. in der Heizperiode sogar den überwiegenden.

4.7 Behaglichkeit

Sowohl bei den Befragungen der Bewohner, als auch bei den Begehungen wurden signifikante Beeinträchtigungen der Behaglichkeitssituation bei den mit Infrarotpaneelen beheizten Wohnungen festgestellt. Beinahe alle Bewohner bemängelten die ungleichmäßige Verteilung der Wärme im Raum. Insbesondere im Wohn-/Essbereich scheint die Beheizung mit nur einem Infrarot-Deckenpaneel ungünstig zu sein. 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.

Die gleichmäßige Verteilung der Strahlungswärme im Raum stellt insbesondere bei Paneelen mit geringen Flächen und hohen Oberflächentemperaturen auf Grund der physikalisch wirksamen Prinzipien eine maßgebliche Herausforderung dar. Insbesondere bei der Deckenmontage gilt es 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 in den heizintensivsten Monaten November bis Februar im Mittel nur bei 13,3%. In den Monaten der Übergangsjahreszeit ergeben sich höhere Eigendeckungen bis 30% und darüber. Insgesamt wurde für das untersuchte Jahr 2017 ein Eigendeckungsgrad des Heizstroms von 20% ermittelt.

Analysiert man den Eigennutzungsgrad der Photovoltaikanlage im Jahr 2017 so ergeben sich umgekehrt, in den Wintermonaten Werte von 53% bis 78%, während im Juni auf Grund des Überangebots nur 16% im Haushalt genutzt werden können. Für das gesamte Jahr gesehen lag der gesamte Eigennutzungsgrad bei 32%. Auf Basis der Untersuchung wurden zur Erhöhung der Eigennutzung Zeitschaltuhrregelungen für die Warmwasserbereitung nachgerüstet. Erste Analysen des Folgejahres zeigen als Folge bereits eine Erhöhung der Eigennutzung.

