

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

IBP-Bericht Nr. EER-013/2024/720

Messtechnischer Vergleich des Heizungsenergieverbrauchs eines konventionell beheizten Einfamilienhauses mit einem Gebäude mit Infrarotheizung

Durchgeführt im Auftrag
IG Infrarot Deutschland e.V.
Kramergasse 32
82054 Sauerlach

Der Bericht umfasst
55 Seiten Text
11 Tabellen
42 Abbildungen

Matthias Kersken
Herbert Sinnesbichler
Cosima Wörle

Holzkirchen, 12. August 2024

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

Abteilungsleiter

Dr.
Harald Will

Gruppenleiter

Dipl.-Ing. (FH)
Herbert Sinnesbichler

Bearbeiter

Dr.-Ing.
Matthias Kersken

Die vorliegende Studie zum messtechnischen Vergleich des Heizungsenergieverbrauchs eines konventionell beheizten Einfamilienhauses mit einem Gebäude mit Infrarotheizung wurde von der IG Infrarot Deutschland e.V. mit Unterstützung der folgenden Firmen beauftragt.



Inhalt

1	Aufgabenstellung	5
2	Methode	5
3	Beschreibung des Versuchssetups	6
3.1	Beschreibung der Zwillingshäuser	6
3.1.1	Energetischer Standard	8
3.1.2	Mechanische Lüftungsanlage	10
3.2	Nachweis der energetischen Vergleichbarkeit der Zwillingshäuser	11
3.2.1	Luftdichtheit	11
3.2.2	Energetischer Vergleich	12
3.3	Heizsysteme und Regelung	14
3.3.1	Infrarotheizungen	15
3.3.2	Referenz Gasheizung	16
3.4	Nutzungsprofile	18
3.4.1	Anwesenheit	18
3.4.2	Solltemperaturen	19
3.4.3	Interne Wärmequellen	21
3.4.4	Luftwechselprofil und raumweiser Luftvolumenstrom	24
3.5	Messkonzept	26
3.5.1	Energie	26
3.5.2	Temperatur und thermischer Komfort	27
3.5.3	Außenklima – Wetterstation	31
3.5.4	Qualitätssicherung der Messtechnik und Abschätzung der Messunsicherheit	32
4	Ergebnisse	35
4.1	Beispielhaftes Verhalten beider Heizsysteme	36
4.2	Thermischer Komfort	38
4.3	Vergleich der Lufttemperaturen in beiden Häusern	42
4.4	Lokaler thermischer Komfort	43
4.4.1	Strahlungsasymmetrie	44
4.4.2	Temperaturschichtung im Raum	45
4.5	Energetischer Vergleich	47
5	Zusammenfassung	51
6	Ausblick	53

1 Aufgabenstellung

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP wurde von der IG Infrarot Deutschland e.V. beauftragt, den Unterschied im Heizenergieverbrauch zwischen zwei identischen typischen Einfamilienhäusern (Zwillingshäuser) messtechnisch zu untersuchen, wobei ein Haus mit elektrischen Infrarotheizungen ausgestattet ist, während das Referenzhaus über eine konventionelle Gas-Brennwerttherme und Flachheizkörper beheizt wird. Eine Bewertung der Energieaufwendungen für die Trinkwarmwasserbereitung war nicht Gegenstand der aktuellen Untersuchungen. Im Rahmen der hier beschriebenen Messungen werden die Energieverbräuche der Zwillingshäuser auf dem Freiland-Versuchsgelände des Fraunhofer IBP in Holzkirchen, südlich von München, während der Heizperiode 2023/24 messtechnisch erfasst. In beiden Gebäuden wird eine identische, realistische Nutzung nachgebildet. Basierend auf den so gewonnenen Messdaten wird die Fragestellung beantwortet, ob und inwieweit sich eine Beheizung mit elektrischen Infrarotheizungen energetisch günstiger darstellt als das gasbasierte Referenz-Heizsystem. Bei einem mit Infrarotheizungen beheizten Gebäude fallen lokal keine Erzeugungs- und Verteilverluste an. Des Weiteren wird vermutet, dass die Infrarotheizungen einerseits dadurch einen energetischen Vorteil haben, dass die Lufttemperaturen bei gleichbleibendem thermischen Komfort im Gebäude abgesenkt werden können und andererseits wegen ihrer kürzeren Reaktionszeiten keine Vorheizzeiten nach Absenkerperioden der Raumtemperatur zur Sicherstellung der Komfortanforderungen notwendig sind.

2 Methode

Zunächst wird im Rahmen einer Nullmessung sichergestellt, dass die thermisch bilanzierte Zone beider Gebäude, bei deaktivierter mechanischer Lüftung und geschlossenen Fenstern und Türen, identische Wärmeverluste aufweist. Anschließend wird die mechanische Lüftungsanlage in Betrieb genommen und die Zu- und Abluftvolumenströme in beiden Gebäuden identisch raumweise eingestellt. Die Vergleichbarkeit der Luftdichtheit beider Zwillingshäuser wird durch ein Differenzdruckmessverfahren nachgewiesen.

Anschließend werden das Infrarot- und das Gas-Brennwertsystem in Betrieb genommen. Hierbei wird ein stündliches Nutzungsprofil, welches auf den verursachten internen Wärmequellen durch die Anwesenheit der Bewohner, der Luftwechselrate der mechanischen Lüftung und der Solltemperaturprofile der Heizung basiert, angesetzt. Die Regelung wird derart ausgebildet, dass in allen Räumen des Test- und des Referenzhauses ein möglichst identischer thermischer Innenraumkomfort herrscht. Unter diesen vergleichbaren Komfortbedingungen wird der gemessene Heizenergieverbrauch beider Häuser bzw. beider Systeme messtechnisch erfasst und verglichen.

3 Beschreibung des Versuchssetups

Das Anwendungsszenario hinter dem gewählten Versuchssetup sind Gebäude mit einer sanierten thermischen Gebäudehülle bzw. thermischen Hüllfläche. Anlagentechnisch stellt sich die Frage, wie sich der Heizenergieverbrauch eines gewöhnlichen, bestehenden Heizsystems mit Gas-Brennwerttherme im Vergleich zu einem Heizsystem basierend auf raumweisen Infrartheizungen darstellt. Die Gebäude verfügen über ein Wärmedämmverbundsystem und sollen mit Fensterlüftung belüftet werden. Da sich die Luftvolumenströme und somit die damit verbundenen Energieströme bei offenen Fenstern weder messtechnisch bilanzieren noch auf den vorgegebenen Volumenstrom regeln lassen, wird der Luftwechsel über eine balancierte, massenstromgeregelt mechanische Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung bereitgestellt. Das Nutzungsprofil der Bewohner entspricht einer vierköpfigen Familie mit zwei Erwachsenen und zwei Kindern.

3.1 Beschreibung der Zwillingshäuser

Auf dem Freiland-Versuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Holzkirchen, südlich von München, befinden sich zwei baugleiche Einfamilienhäuser, die als Zwillingshäuser bezeichnet werden (s. Bild 1). Die Gebäude wurden ca. 1980 errichtet und werden laufend ertüchtigt, um die aktuellen wärmetechnischen Anforderungen zu erfüllen. Bei den vergleichenden Untersuchungen dient das nordöstliche Zwillingshaus als Referenzgebäude, welches mit einer Gas-Brennwerttherme mit Flachheizkörpern ausgestattet ist, und das südwestliche Zwillingshaus als Infrarothaus (IR-Haus), welches mit elektrischen Niedertemperatur-Infrartheizungen ausgestattet wird (s. Abschnitt 3.3.1). Die unterkellerten Gebäude sind gleich orientiert und nahezu verschattungsfrei. Der Keller ist nicht Teil der Untersuchungen.



Bild 1:
Ostansicht der Zwillingshäuser auf dem Fraunhofer-IBP-Freiland-Versuchsgelände in Holzkirchen (© Fraunhofer IBP).

Die Zwillingshäuser weisen jeweils eine Nutzfläche von ca. 140 m² auf. Das Erdgeschoss hat eine Grundfläche von rund 81 m² und ist in fünf beheizte Aufenthaltsräume sowie einen Eingang und Flur unterteilt. Im Obergeschoss befinden sich zwei Aufenthaltsräume, die Kinderzimmer sowie ein unbeheizter Treppenraum (s. Bild 2). Eine Innenansicht des Zwillingshaus-Wohnzimmers im Erdgeschoss und des zweiten Kinderzimmers im Dachgeschoss findet sich in Bild 3.

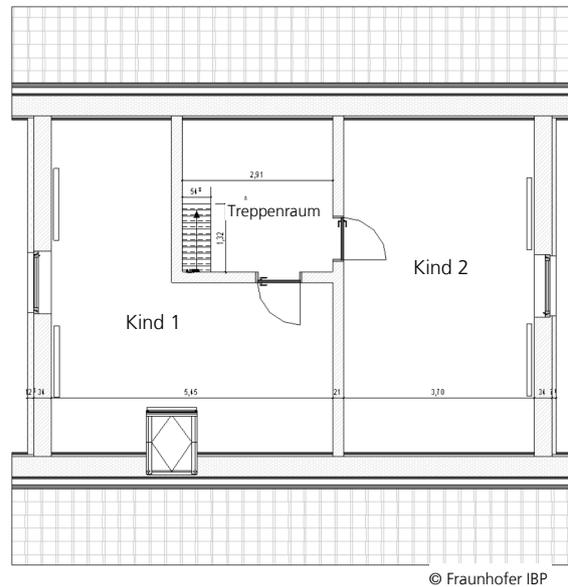
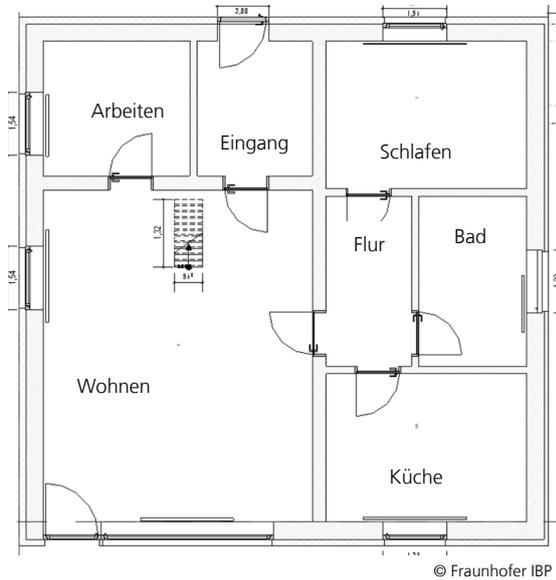


Bild 2:
Grundrisse des Erd- und Dachgeschosses.



Bild 3:
Innenansicht des Zwillingshaus-Wohnzimmers im Erdgeschoss (oben) und des zweiten Kinderzimmers im Dachgeschoss (unten) (© Fraunhofer IBP).

3.1.1 Energetischer Standard

Die Gebäudehülle hat einen spezifischen Wärmetransferkoeffizienten von $0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$. In Tabelle 1 sind die U-Werte der einzelnen Bauteile aufgelistet. Die resultierenden absoluten Wärmetransferkoeffizienten für die gesamten Zwillingshäuser sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 1:
U-Werte Gebäudehülle der Zwillingshäuser.

Bauteile	U-Wert [$\text{W/m}^2\text{K}$]
Außenwände	0,24
Fenster (inkl. PVC-Rahmen)	0,84
Dachfläche (30 ° Neigung)	0,22
Dachfenster (30 ° Neigung)	1,20
Kellerdecke	0,29
Spezifischer Wärmetransferkoeffizient HT'	0,32

Tabelle 2:
Zusammenstellung der Wärmetransferkoeffizienten der Zwillingshäuser nach DIN V 18599.

Bauteile	Wärmetransferkoeffizient [W/K]
$H_{v,inf}$ Wärmetransferkoeffizient für Infiltration	2,4
$H_{v,win}$ Wärmetransferkoeffizient für die Fensterlüftung	61,6
HT Wärmetransferkoeffizient für Transmission	126,1
H Wärmetransferkoeffizient Gesamtgebäude	190,1

Die Dächer sind mit einer Zwischensparrendämmung ausgestattet und an den Ziegelwänden ist außenseitig ein Wärmedämmverbundsystem angebracht. Die Fenster sind als 3-fach-Wärmeschutzverglasung ausgeführt. Mit diesen Bauteilaufbauten unterschreiten die Zwillingshäuser die Anforderungen an den spezifischen Wärmetransferkoeffizienten (HT') von Bestandsgebäuden um 43 % gemäß GEG 2024. Darüber hinaus erzielen die Zwillingshäuser den Neubaustandard des HT' nach GEG 2024.

Bild 4 zeigt den Verlauf des für die energetische Bewertung betrachteten Gebäudebereichs im Schnitt. Das Kellergeschoss ist außerhalb der thermisch bilanzierten Zone. Um identische Randbedingungen in beiden Gebäuden für den Versuch zu gewährleisten, wird die Kellertemperatur in beiden Zwillingshäusern mit Hilfe von zusätzlichen elektrischen Heizkörpern konstant auf 18 °C temperiert. Die hierfür benötigte elektrische Energie wird nicht im Rahmen der Auswertungen berücksichtigt. Die Kellerdecke hat folgenden Aufbau: Stahlbetondecke, Ausgleichsschüttung, Ausgleichsdämmung, Trittschalldämmung und Estrich (von unten nach oben).

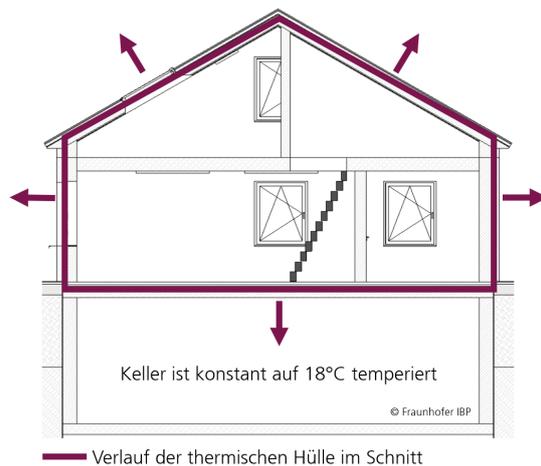


Bild 4:
Verlauf der thermisch bilanzierten Zone des für die energetische Bilanzierung betrachteten Gebäudebereichs im Schnitt.

3.1.2 Mechanische Lüftungsanlage

Zur Nachbildung einer Fensterlüftung wird in beiden Gebäuden der Luftwechsel über eine balancierte, massenstromgeregelte, mechanische Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung bereitgestellt. Wie in Bild 5 dargestellt, handelt es sich bei Arbeits-, Schlaf- und Wohnzimmer um Zulufräume, bei Bad und Küche um Ablufträume und bei den beiden Kinderzimmern im Obergeschoss um kombinierte Zu- und Ablufträume. Der Eingang, der Flur und der Treppenraum werden nicht explizit belüftet. Da das Bad, das Schlafzimmer und die Kinderzimmer über abweichende Anwesenheits- und Solltemperaturprofile verfügen (siehe Abschnitte 3.4.1 und 3.4.2), sind die Türen dieser Räume bzw. die Klapptür vom Erdgeschoss zu den Kinderzimmern im Dachgeschoss geschlossen. Bad und Schlafzimmertür verfügen über einen ca. 4 cm hohen Spalt an der Unterkante, um ein Überströmen der Lüftung zu gewährleisten.

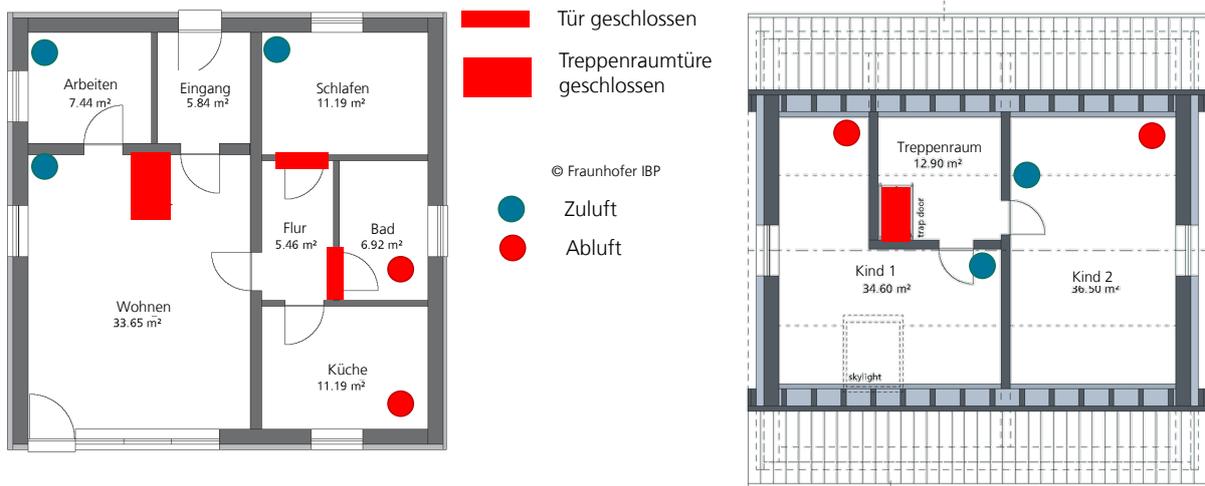


Bild 5:
Grundriss der Zwillingshäuser inklusive Lüftungskonzept mit Zu- und Ablufträumen und Kennzeichnung der offenen und geschlossenen Türen.

Die Frischluft-Ein- sowie die Fortluft-Auslässe befinden sich außerhalb des Kellers direkt am Gebäude. Unter der Decke des Kellers, der nicht Teil des thermischen Bilanzraumes ist, befindet sich die Luftverteilung in gedämmten Wickelfalzrohren mit jeweils einem Lüftermotor für die Zu- und Abluft. Daraus folgt, dass die Massenstromanteile der einzelnen Räume zwar über entsprechende Ventile im Verhältnis zueinander eingestellt werden können, eine Veränderung des Massenstroms der Lüftermotoren betrifft aber immer alle Räume gleichermaßen. Die angesetzten zeitlich variablen Luftwechselraten werden in Abschnitt 3.4.4 dokumentiert.

3.2 Nachweis der energetischen Vergleichbarkeit der Zwillingshäuser

Vor Beginn der Vergleichsmessungen wird eine Nullmessung durchgeführt, um sicherzustellen, dass die später zwischen dem Infrarot- und dem Referenzhaus gemessenen Unterschiede auf die Beheizungssysteme zurückzuführen sind und nicht auf Unterschiede in der baulichen Ausführung zwischen den beiden Zwillingshäusern. Zudem kann die verbleibende Rest-Differenz dazu herangezogen werden, die Messunsicherheit des Vergleichs beider Systeme abzuschätzen.

3.2.1 Luftdichtheit

Vor Beginn der energetischen Nullmessung wird die Luftdichtheit beider Gebäude unter Verwendung eines Differenzdruckmessverfahrens (Blower-Door-Test) gemessen. Es kommt ein System des Herstellers »Energy Conservatory« mit einem Modell-4-Gebläse und einem DG1000-Druckmessgerät zum Einsatz. Wie Tabelle 3 entnommen werden kann, beträgt der Unterschied des n_{50} -Mittelwertes (Mittel zwischen Über- und Unterdruckmessung) $0,08 \text{ h}^{-1}$ und liegt somit innerhalb der typischen Messunsicherheit für Differenzdruckmessungen, die nach DIN EN 13829 [1] von $\pm 5 \%$ bis $\pm 10 \%$ beträgt. Es ist daher zu erwarten, dass sich in beiden Gebäuden ein identischer Luftaustausch zwischen

innen und außen aufgrund von Gebäudeundichtheiten (Infiltrationsluftwechselrate) einstellt.

Tabelle 3:

Ergebnisse der Luftdichtheitsmessungen an den Zwillingshäusern vom 8. Dezember 2023.

	Haus n_{50} [h^{-1}]	
	Referenz	Infrarot
Überdruck	1,15	1,23
Unterdruck	1,03	1,12
Mittelwert	1,09	1,17

3.2.2 Energetischer Vergleich

Für die energetische Nullmessung werden beide Zwillingshäuser mit deaktivierter und abgeklebter Lüftungsanlage für mehrere Tage auf eine konstante Solltemperatur von 20 °C beheizt. Hierfür kommen elektrische Konvektoren (siehe Bild 6) zum Einsatz, welche durch einen PI-Regler über die zentrale Regelungstechnik (Versuchs-SPS) geregelt und leistungsvermessen werden. Als raumweise Ist-Temperatur wird jeweils die Lufttemperaturmessstelle auf einer Höhe von 110 cm in der Mitte des Raumes herangezogen.



Bild 6:
Elektrokonvektor für die energetische Nullmessung (© Fraunhofer IBP).

Sobald sich beide Gebäude in einem annähernd stationären Zustand befinden (thermische Speicherkapazität der Bauteile), kann der elektrische Heizenergieverbrauch beider Gebäude verglichen werden. Links in Bild 7 sind die Verläufe des Mittelwerts der flächengewichteten Ist-Temperaturen ($h = 110$ cm) aller beheizten Räume dargestellt. Rechts in Bild 7 sind die resultierenden Heizleistungen dargestellt, deren Unterschied im zeitlichen Verlauf ± 82 W nicht überschreitet und über den gesamten Zeitraum der Nullmessung einen Mittelwert von 11 W aufweist (rechte Y-Achse). Bild 8 zeigt die entsprechenden

kumulierten Heizenergien und deren relative Abweichung zwischen dem infrarotbeheizten Gebäude und dem Referenzgebäude, welche nach den drei Tagen der Nullmessung -0,54 % beträgt.

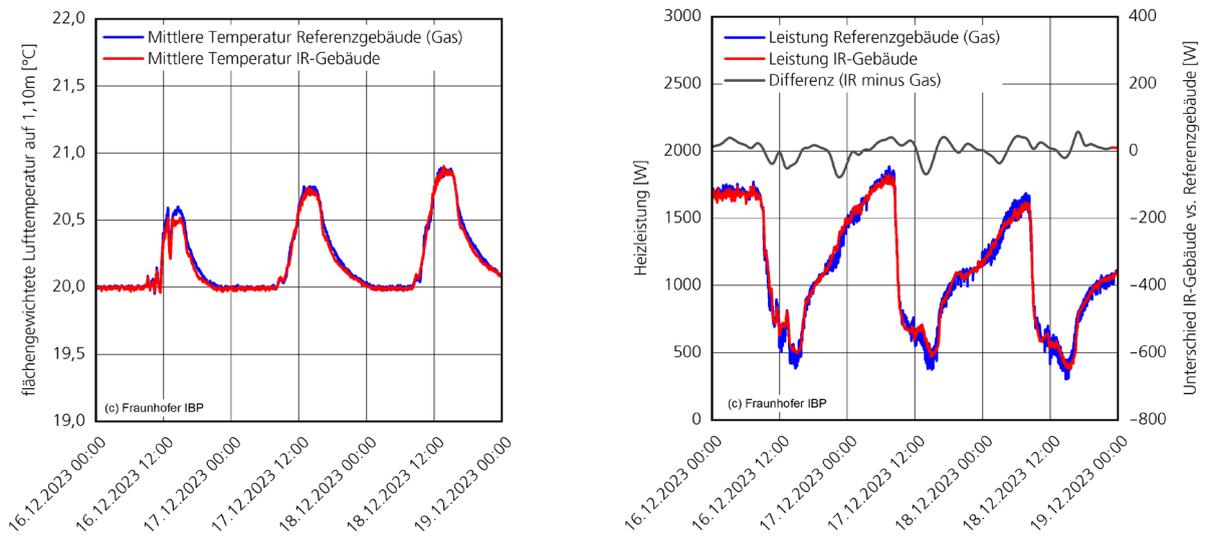


Bild 7:

Links: Verlauf der mittleren, raumweisen Lufttemperaturen 110 cm über Fußbodenoberkante (FOK) während der Nullmessung.

Rechts: Verlauf der elektrischen Gebäude-Heizleistungen und deren absoluter Differenz zwischen beiden Häusern (grau, rechte Achse) während der Nullmessung.

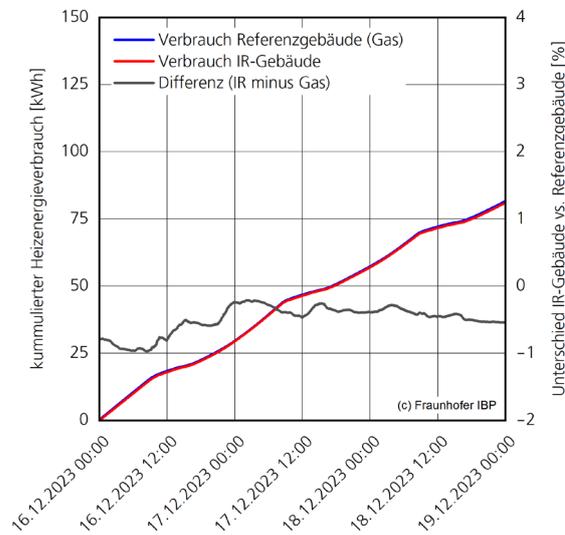


Bild 8:

Verlauf des kumulierten Energieverbrauchs beider Häuser und des relativen Unterschieds beider Verbräuche (grau, rechte Achse) während der Nullmessung.

3.3 Heizsysteme und Regelung

Der Unterschied der Heizsysteme zwischen den beiden Zwillingshäusern stellt das zentrale Untersuchungsziel dieser Untersuchung dar. Das Infrarothaus (IR-Haus) wird mit elektrischen Nieder temperatur-Infrartheizungen beheizt, das Referenzhaus über eine Gas-Brennwerttherme mit Flachheizkörpern. Im Rahmen dieser Untersuchung wird keine Trinkwarmwasserbereitung betrachtet. In realen Gebäuden würde das Trinkwarmwasser im Referenzhaus durch die Gastherme bereitgestellt, über einen Trinkwarmwasserspeicher oder im Durchlaufverfahren, im IR-Haus typischerweise durch eine Trinkwarmwasser-Wärmepumpe im Keller.

Als Ist-Temperatur der beheizten Räume beider Häuser wird die operative Raumtemperatur angesetzt, welche etwa in Raummitte auf 110 cm Höhe durch die in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen Komfortfühler erfasst wird. Die in beiden Zwillingshäusern identischen Messstellen sind in Bild 25 (Abschnitt 3.5.2) dargestellt. Die Heizsysteme beider Häuser sind entsprechend einer Heizlastberechnung ausgelegt. Die Solltemperaturprofile folgen, wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, der Anwesenheit der Bewohner. Um dies bei der Leistung der Heizflächen zu berücksichtigen, wird in Übereinstimmung mit DIN EN 12831 [2] ein Heizlast-Zuschlag von 16 W/m^2 für instationäres Aufheizen berücksichtigt. Dieser ergibt sich für die Wohnnutzung mit einer Abwesenheitszeit von acht Stunden und einer Wiederaufheizzeit von einer Stunde (Bauart schwer, Luftwechsel während Absenkung $0,5 \text{ h}^{-1}$). Die resultierenden Heizlasten sowie die raumweise Leistung der Flachheizkörper und Infrartheizungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Für die Dimensionierung der Flachheizkörper des Referenzhauses wird eine Auslegungstemperatur von $60/50 \text{ }^\circ\text{C}$ angesetzt.

Tabelle 4:
Heizlastberechnung und Auslegung des Referenz- und des IR-Hauses.

Raum	Heizlast [W]	Heizlast inkl. Aufheizzuschlag [W]	Auslegung Referenz [W]	Auslegung IR [W]
Wohnen	1.375	1.914	2.405	2.430
Arbeiten	540	658	802	550
Küche	477	656	710	710
Schlafen	607	786	813	800
Bad	513	623	850	780
Kind 1	1.501	2.053	2.007	1.800
Kind 2	1.436	2.022	2.007	2.050
Treppenhaus	40	248	0	0
Flur	0	88	0	0
Eingang	11	104	0	0
Summe	6.500	9.152	9.594	9.120

3.3.1 Infrartheizungen

Wie Bild 9 und Bild 10 entnommen werden kann, sind die beheizten Räume des IR-Hauses je nach Raumgröße bzw. Heizlast mit zwei bis vier Infrartheizungen ausgestattet, welche teils an den Wänden und teils an der Decke montiert sind. Die Infrartheizungen erreichen Oberflächentemperaturen zwischen 75 °C und 190 °C. Die Infrartheizungen werden basierend auf der Operativtemperatur in einer Höhe von 110 cm über ein Relais der Zwillingshaus-Steuerung an- und ausgeschaltet. Hierbei wird ein 2-Punkt-Regler mit einer Hysterese von $\pm 0,5$ K um die Solltemperatur verwendet. Die Infrartheizungen werden von der Regelung parallel leistungsvermessen (Messkonzept siehe Abschnitt 3.5.1).



Bild 9:
Leistung und Positionierung der Infrartheizungen im Erdgeschoss.

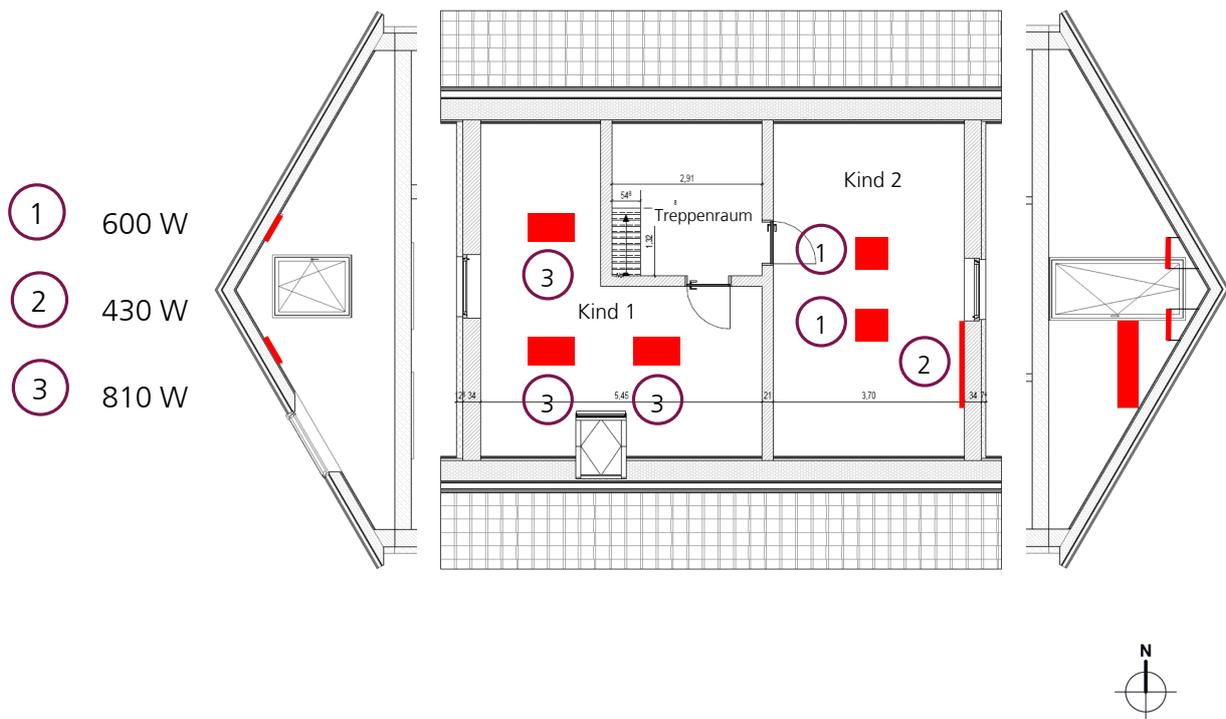


Bild 10:
Leistung und Positionierung der Infrarotheizungen im Obergeschoss
(© Fraunhofer IBP).

3.3.2 Referenz Gasheizung

Jeder beheizte Raum des Referenzhauses ist mit einem Flachheizkörper ausgestattet, das Wohnzimmer mit zwei Stück. Position und Leistung der Flachheizkörper können Bild 11 und Bild 12 entnommen werden. Die gedämmten Verteilungen der Erdgeschossheizkörper verlaufen ringförmig unter der Kellerdecke; mehr zur Leitungsführung und den Verteilverlusten im Keller folgt in Abschnitt 3.5.1 bei der Erläuterung des Messkonzepts.

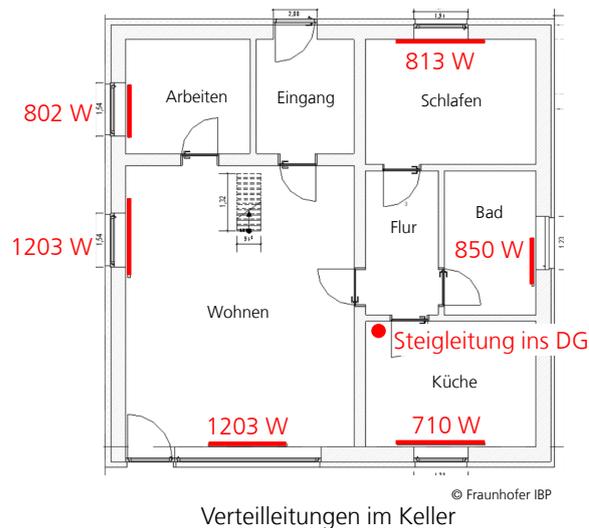


Bild 11:
Leistung und Positionierung der Flachheizkörper im Erdgeschoss des gasbeheizten Referenzhauses.

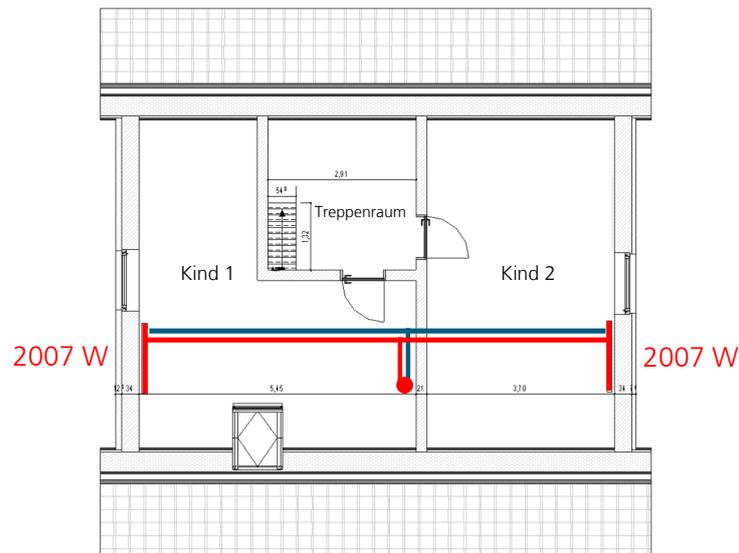


Bild 12:
Leistung und Positionierung der Flachheizkörper inkl. Verteilleitungen im Obergeschoss des gasbeheizten Referenzhauses (© Fraunhofer IBP).

Die Heizkennlinie der witterungsgeführten Gas-Brennwerttherme ist in Bild 13 dargestellt. Die minimale Vorlauftemperatur wird auf 50 °C eingestellt, da sonst die Heizleistung im Bad mit seinen erhöhten Lufttemperaturen (22–24 °C) nicht ausreichend ist. So wird die Vergleichbarkeit des thermischen Komforts in den Bädern beider Häuser sichergestellt. Die Maximalleistung des Kessels für die Heizung ist 20,4 kW. Der Modulationsbereich wurde auf 11 kW Maximalleistung begrenzt, um die Heizleistung, wie in der Praxis üblich, an die Auslegungslast des Gebäudes anzupassen. Der Wirkungsgrad der Therme wird im Datenblatt mit 98,5 % (Wirkungsgrad bei 30 % der Wärmenennleistung und

Niedertemperaturanwendung) angegeben. Die Gastherme wird mit Propan-Flaschengas betrieben, da die Verwendung von Gasflaschen das Wiegen der Flaschen als zusätzliche Qualitätskontrolle der Gasverbrauchsmessung erlaubt. Im Referenzgebäude verfügen die Flachheizkörper über elektronische Stellmotoren, welche von der Versuchsregelung stetig unter Verwendung eines PI-Reglers angesteuert werden. Typische thermomechanische Heizkörperthermostate entsprechen einem P-Regler. Die Charakteristik von P-Reglern führt jedoch zu einer leichten, aber dauerhaften Unterschreitung des Sollwerts, wodurch der thermische Komfort bzw. die Raumtemperaturen systematisch unterschiedliche Mittelwerte hätten, was die Vergleichbarkeit der Häuser bzw. Heizsysteme einschränken würde.

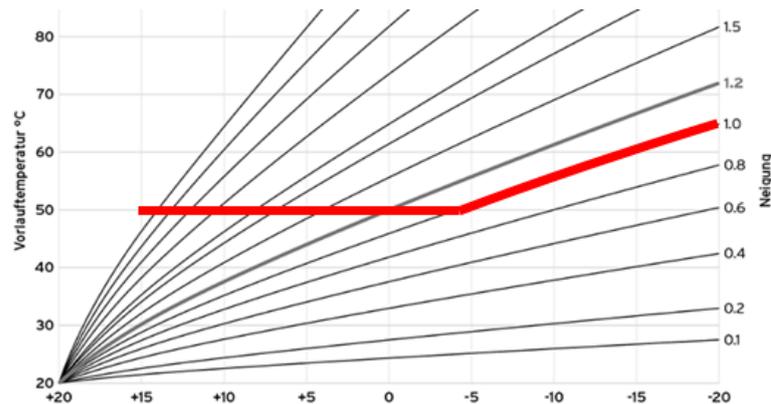


Bild 13:
Heizkennlinie der witterungsgeführten Gas-Brennwerttherme (© Fraunhofer IBP).

3.4 Nutzungsprofile

Die Nutzung beider Zwillingshäuser entspricht einer vierköpfigen Familie mit zwei Erwachsenen und zwei Kindern. Hierzu wird ein typisches Nutzungsprofil [3] auf Basis einer Vorgängerstudie der TU Dresden angesetzt und durch die Versuchssteuerung der Zwillingshäuser umgesetzt.

3.4.1 Anwesenheit

Grundlage jedes Nutzungsprofils sind die Anwesenheitszeiten der Nutzer bzw. Bewohner. Die dem Versuchsszenario zu Grunde liegenden raumweisen Anwesenheitszeiten nach [3] sind in Bild 14 dargestellt. Es wird nicht zwischen Werk- und Wochenendtagen unterschieden.

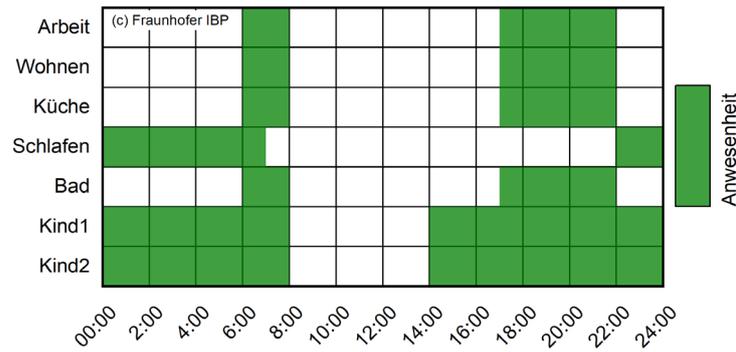


Bild 14: Raumweise Anwesenheiten des Versuchsszenarios nach [3].

3.4.2 Solltemperaturen

Für die normalen Aufenthaltsräume Wohnzimmer, Küche und Arbeitszimmer wird eine Solltemperatur (Operativtemperatur) von 20 °C mit einer Absenkung bei Abwesenheit auf 18 °C angesetzt. Für die beiden Kinderzimmer werden dieselben Solltemperaturen angesetzt, wobei nachts, trotz Anwesenheit der (schlafenden) Kinder, auch die Absenkttemperatur von 18 °C angesetzt wird. Im (Eltern-)Schlafzimmer wird während der nächtlichen Anwesenheit eine Solltemperatur von 18 °C angesetzt, welche tagsüber auf 17 °C abgesenkt wird. Für das Bad werden 24 °C mit einer Absenkung auf 22 °C angesetzt. Bild 15 zeigt die resultierenden Solltemperaturprofile. Entsprechend den Anwesenheitsprofilen wird auch hier nicht zwischen Werk- und Wochenendtagen unterschieden.

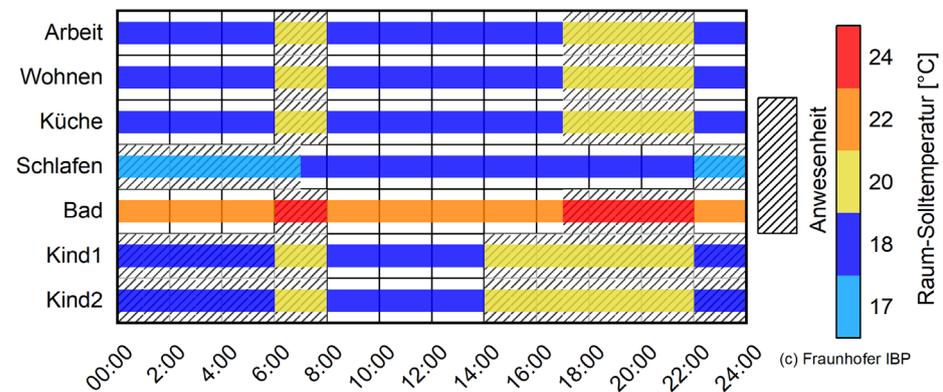


Bild 15: Raumweise Solltemperaturprofile mit den zugrundeliegenden Anwesenheitszeiten (grau schraffiert hinterlegt) aus Abschnitt 3.4.1, Bild 14.

Vorheizen der Räume

Im IR-Haus wird die Heizungsregelung genau zum Zeitpunkt des Anwesenheitsbeginns auf die erhöhte Solltemperatur gesetzt. Dem liegt die Annahme zu

Grunde, dass es bei den auf Strahlungswärme basierenden Infrartheizungen nicht notwendig ist, den Raum vorab aufzuheizen, um den thermischen Komfort im Raum während der Anwesenheitszeit sicherzustellen. Den Heizkörpern des Referenzhauses werden Vorheizzeiten zugeordnet, damit auch dieses trägere Heizsystem zu Beginn der Anwesenheit einen annähernd identischen thermischen Komfort bereitstellen kann wie das IR-Haus. Diese Vorheizzeiten werden raumweise und getrennt für den morgendlichen und den späteren Anwesenheitsblock am Nachmittag und Abend derart festgelegt, dass der jeweilige Raum die Solltemperatur etwa gleichzeitig mit demselben Raum im IR-Haus erreicht. Die resultierenden Vorheizzeiten des Referenzhauses können Tabelle 5 entnommen werden. Ein derart detailliertes Parametrieren der Vorheizzeiten mag zwar unter der Verwendung handelsüblicher elektronischer Heizkörperthermostate theoretisch möglich sein, wird aber in der Realität kaum anzutreffen sein. Die Wahl längerer, konservativerer Vorheizzeiten würde aber die durchschnittlichen Lufttemperaturen im Referenzhaus systematisch über das Niveau des IR-Hauses heben und somit den Heizwärmeverbrauch ebenfalls anheben, was dem auf vergleichbaren Temperaturen basierenden Versuchssetup widerspricht.

Bild 16 zeigt anhand eines beispielhaften Tages für das Wohnzimmer den Verlauf der Solltemperatur (grün hinterlegt), die im Referenzhaus angesetzten Vorheizzeiten (orange hinterlegt) und die Ist-Temperaturen des Referenzhauses (blau) und des IR-Hauses (rot). Da die Aufheizcharakteristik sich in Abhängigkeit von Außenlufttemperatur und solaren Wärmegewinnen jeden Tag anders verhält, ist ein perfektes Einstellen der Vorheizzeiten nicht möglich.

Tabelle 5:
Raumweise festgelegte Vorheizzeiten im Referenzhaus.

Raum	Vorheizzeit [Minuten]	
	Vormittags	Nachmittags
Wohnen	30	30
Arbeiten	30	30
Küche	-	-
Bad	60	30
Schlafen	-	-
Kind 1	45	20
Kind 2	45	20

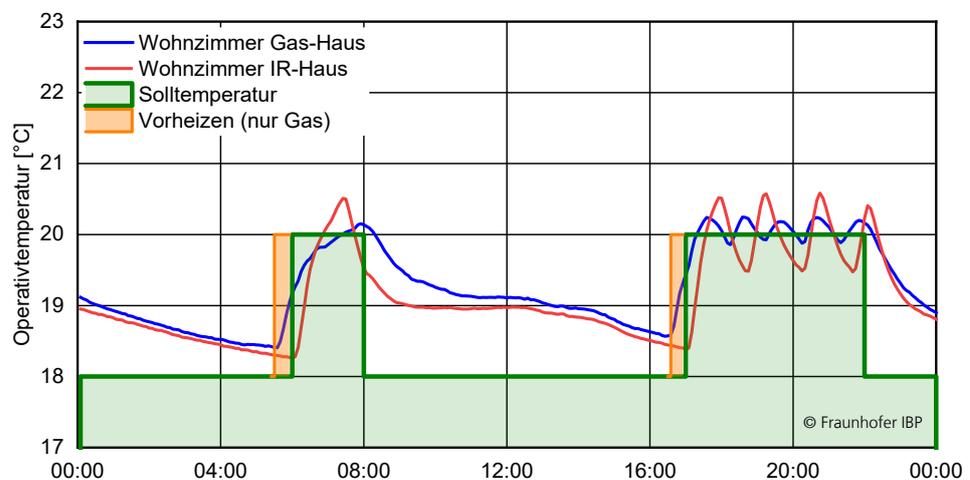


Bild 16:
Beispielhafter Tagesgang des Wohnzimmers für den Verlauf der Solltemperatur (grün hinterlegt), die im Referenzhaus angesetzten Vorheizzeiten (orange hinterlegt) und die Ist-Temperaturen des Referenzhauses (blau) und des IR-Hauses (rot).

3.4.3 Interne Wärmequellen

Sowohl die Nutzer eines Gebäudes selbst als auch die von ihnen genutzten Geräte (inkl. Beleuchtung) geben Wärme an den Raum ab, die folglich nicht mehr vom Heizsystem bereitgestellt werden muss. Diese Wärme, die als interne Wärmequellen (IWQ) bezeichnet wird, wird unter Verwendung der in Bild 17 dargestellten, leistungsgeregelten, elektrisch beheizten Kühllastsimulatoren in die Räume eingebracht. Um die zeitlich unterschiedliche Nutzung der einzelnen Räume widerzuspiegeln, verfügt jeder Raum über ein individuelles Profil. Zur Bildung dieser IWQ-Profile werden die entsprechenden Profile [3] der TU Dresden zu Grunde gelegt. Da das betrachtete Gebäude in der Untersuchung der TU Dresden andere Gebäudegeometrien und Raumaufteilungen aufweist, werden die Profile der einzelnen Räume zur Verwendung im Zwillingshaus so

skaliert, dass diese einer täglichen Energiemenge von $90 \text{ Wh/m}^2\text{d}$ entsprechen. Die DIN V 18599, welche die Grundlage für die Berechnung des Gebäudeenergiegesetzes GEG ist, legt in ihrem Teil 10 [4] $45 \text{ Wh/m}^2\text{d}$ für Einfamilienhäuser bzw. $90 \text{ Wh/m}^2\text{d}$ für Mehrparteienhäuser für die IWQ fest. Dieser Leistungsunterschied zwischen den beiden Hausformen repräsentiert die typischerweise unterschiedliche Belegungsdichte. In der vorliegenden Untersuchung wird dieser Unterschied genutzt, um unterschiedliche Belegungsprofile (z. B. 4-köpfige Familie vs. kinderloses Ehepaar) bezüglich der IWQ abzubilden. In dieser Untersuchung wird lediglich eine 4-köpfige Familie betrachtet. Die resultierenden raumweisen IWQ-Profile sind in Bild 18 dargestellt, in Bild 19 für das gesamte Haus.



Bild 17:
Abbildung eines Kühllastsimulators zur Simulation der nutzungsbedingten Wärmeabgabe durch Personen, Beleuchtung und Geräte (© Fraunhofer IBP).

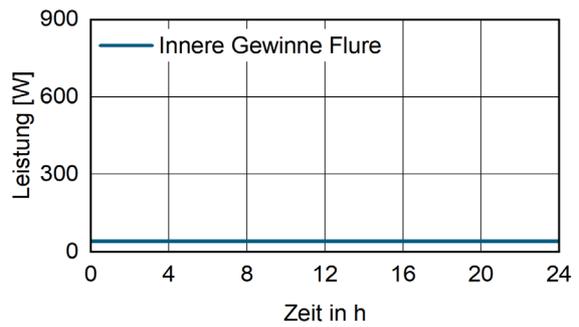
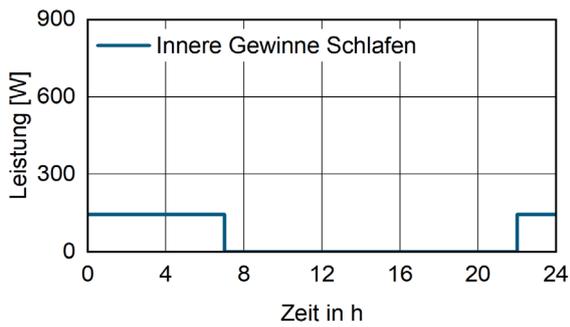
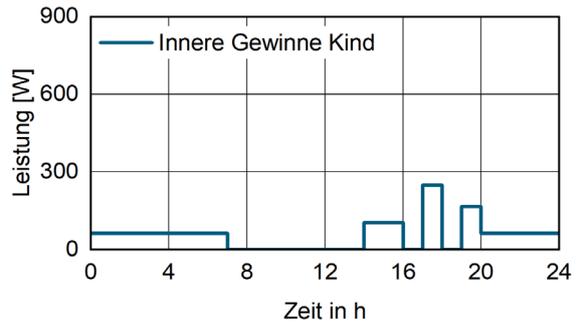
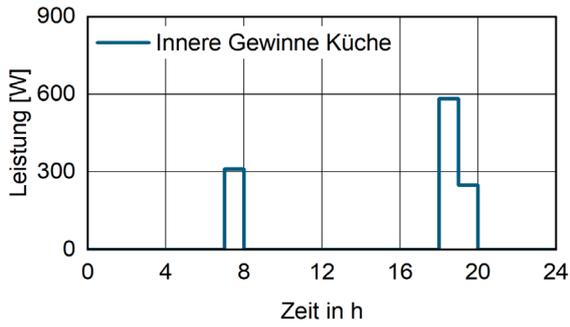
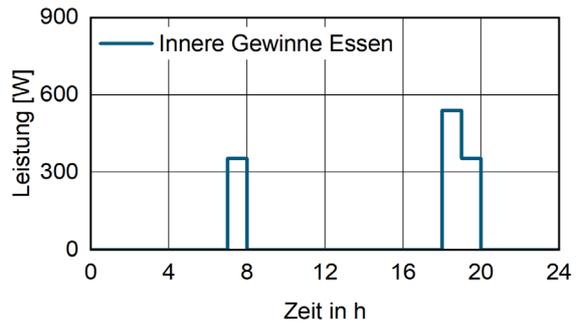
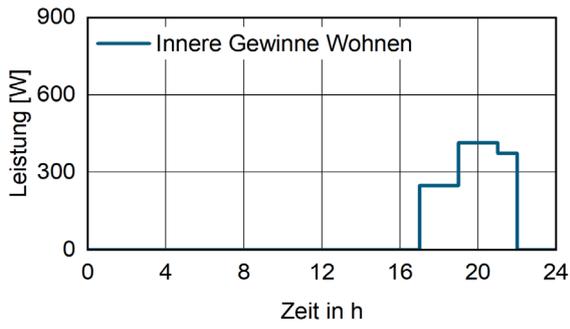


Bild 18:
Raumweise Leistungsprofile der internen Wärmequellen (IWQ) (© Fraunhofer IBP).

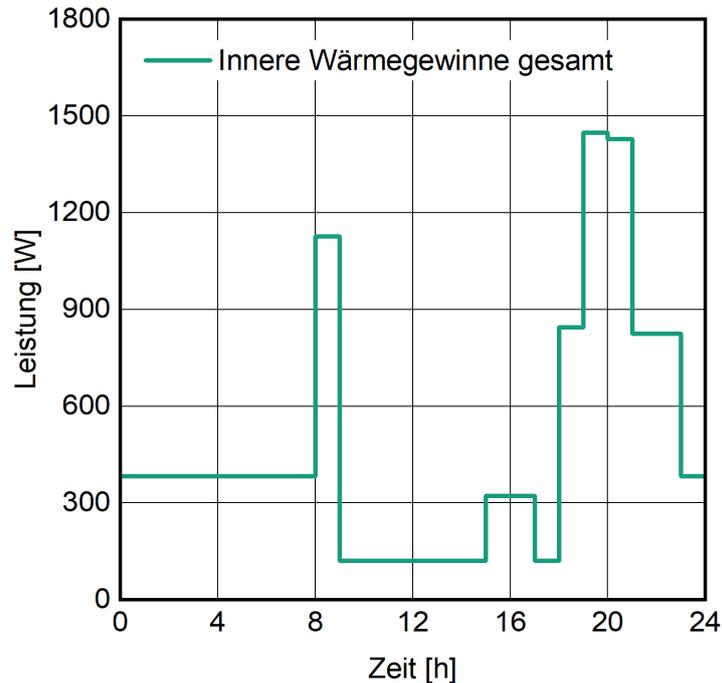


Bild 19:
Leistungsprofil der internen Wärmequellen (IWQ) im gesamten Haus (© Fraunhofer IBP).

3.4.4 Luftwechselprofil und raumweiser Luftvolumenstrom

Das Lüftungssystem der Zwillingshäuser verfügt über jeweils einen zentralen Zu- und Abluftventilator. Somit können keine raumweisen Lüftungsprofile gemäß einer raumweisen Fensterlüftung abgebildet werden. Die entsprechenden Profile [3] der TU Dresden werden entsprechend aufsummiert. Diese Luftwechselsumme wird über das Wohnungslüftungssystem regelungstechnisch nachgebildet. Die Lüftungsanlage wird balanciert betrieben, das bedeutet, dass der Zu- und der Abluftvolumenstrom auf denselben Messwert geregelt werden, damit innerhalb der thermisch bilanzierten Zone weder Über- noch Unterdruck entsteht. Da das in dieser Untersuchung verwendete Gebäude andere Geometrien und Raumaufteilungen verwendet als das Gebäude in der Untersuchung der TU Dresden, wird das Luftwechselprofil derart skaliert, dass sich im Tagesdurchschnitt ein Luftwechsel von $0,43 \text{ h}^{-1}$ ergibt. Aus dem Messwert der Luftdichtheit (Abschnitt 3.2.1) wird ein Infiltrationsluftwechsel von $0,07 \text{ h}^{-1}$ abgeschätzt. In Summe ergeben die mechanische Lüftung und die Infiltration eine Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$, was dem Ansatz nach DIN V 18599 Teil 10 [4] entspricht. In Zeiten mit tiefen Außenlufttemperaturen wird angenommen, dass die Nutzer die Fenster etwas kürzer öffnen. In diesen Zeiten wird der Luftwechsel temporär auf $0,3 \text{ h}^{-1}$ reduziert. Die resultierenden Profile der Luftwechselraten können Bild 20 entnommen werden, die Aufteilung auf die einzelnen Räume Tabelle 6.

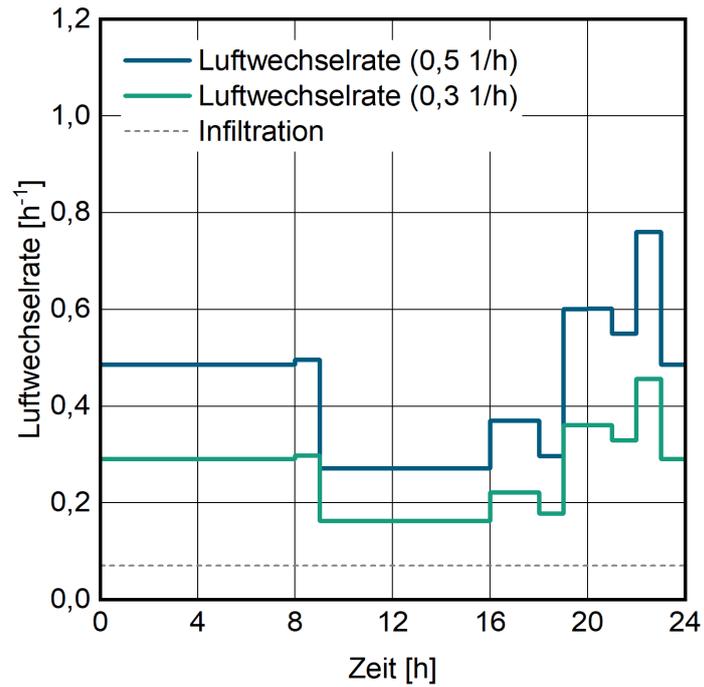


Bild 20:
Luftwechselprofil der Zwillingshäuser (© Fraunhofer IBP).

Tabelle 6:
Aufteilung der Zu- und Abluftvolumenströme auf die einzelnen Räume.

Raum	Anteil [%]
Zuluft	
Arbeiten	14
Wohnen	32
Schlafen	17
Kind 1	18
Kind 2	18
Summe	100
Abluft	
Küche	29
Bad	30
Kind 1	21
Kind 2	21
Summe	100

3.5 Messkonzept

Die wesentlichen Messgrößen, die den Auswertungen dieser Untersuchung zu Grunde liegen, sind der Energieverbrauch beider Zwillingshäuser, das thermische Raumklima bzw. dessen Vergleichbarkeit sowie das vorherrschende Außenklima.

3.5.1 Energie

Die elektrische Leistung, die die Infrarotheizungen in den einzelnen Räumen anfordern, wird von der Versuchssteuerung im Keller der Zwillingshäuser, welche die Heizungen entsprechend der operativen Raumtemperatur freigibt, messtechnisch erfasst. Die Elektroleitungen zwischen den Leistungsmessern und den Räumen haben einen Querschnitt von 2,5 mm². Die resultierenden elektrischen Widerstände bzw. daraus resultierenden Leitungsverluste betragen somit wenige Watt. Entsprechend können die Verteilverluste der Infrarotheizungen im Keller vernachlässigt werden und die im IR-Haus gemessene bzw. darin eingebrachte Leistung entspricht der Nutzenergie innerhalb der energetischen Bilanzzone. In Bild 21 ist das elektrische Leistungsmesskonzept dargestellt. Die elektrische Leistungsmessung der internen Wärmegewinne in beiden Zwillingshäusern funktioniert analog.

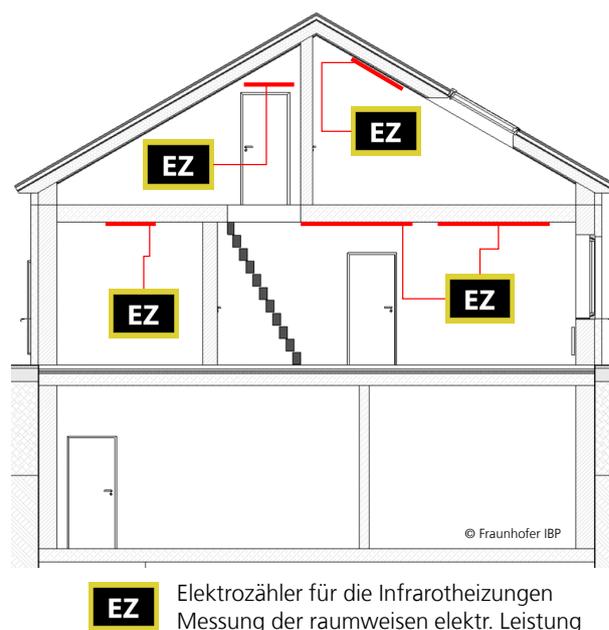


Bild 21:
Konzept der Leistungsmessung der elektrischen Infrarotheizungen.

Die Gastherme des Referenzhauses befindet sich im Keller, der entsprechend den Erläuterungen in Abschnitt 3.1.1 außerhalb der wärmetauschenden Hüllfläche bzw. der thermisch bilanzierten Zone liegt. Folglich fallen die Erzeugungsverluste und ein Teil der Verteilverluste im Keller an und müssen separat erfasst werden. Die Gastherme wird mit Flaschengas (Propan) versorgt. Die

entnommene Gasmenge wird kontinuierlich von einem Massenstromsensor erfasst. Parallel werden die Gasflaschen alle 2–3 Wochen unter Verwendung einer hochgenauen Waage gewogen, um sicherzustellen, dass der gemessene Gasmassenfluss keine signifikanten Abweichungen aufweist. Am hydraulischen Ausgang der Gastherme befinden sich Messstellen für die Vor- und Rücklauf-temperatur sowie ein Volumenstromsensor. Aus diesen Messgrößen wird die hydraulische Leistung im 1-Sekunden-Intervall ermittelt, um die dynamischen Betriebszustände des Wärmeerzeugers zuverlässig zu erfassen. Die Erzeugerverluste werden aus der Differenz zwischen dem Brennwert der zugeführten Propangasmenge und der hydraulischen Leistung am Thermenausgang ermittelt. Nach dem Wärmeerzeuger verlaufen ringförmig unter der Kellerdecke verlegte gedämmte Verteilleitungen, worüber das Dachgeschoss (über einen vertikalen Steigstrang) sowie die Erdgeschossheizkörper über vertikale Anbindeleitungen versorgt werden. An den Übergängen zu den Stichleitungen befinden sich Temperaturmessstellen zwischen der Kupferleitung und der Rohrdämmung. Somit ist die Temperatur der einzelnen Segmente der Verteilleitung mit hinreichender Genauigkeit bekannt. Aus diesen Leitungstemperaturen, den Längen der entsprechenden Leitungssegmente und den thermischen Eigenschaften der Dämmschale werden die Verteilverluste im Keller ermittelt. Die verbleibende Wärmemenge entspricht der Nutzenergie, die dem Referenzhaus zur Raumtemperierung zugeführt wird. In Bild 22 ist das Messkonzept des gasbeheizten Referenzhauses skizziert.

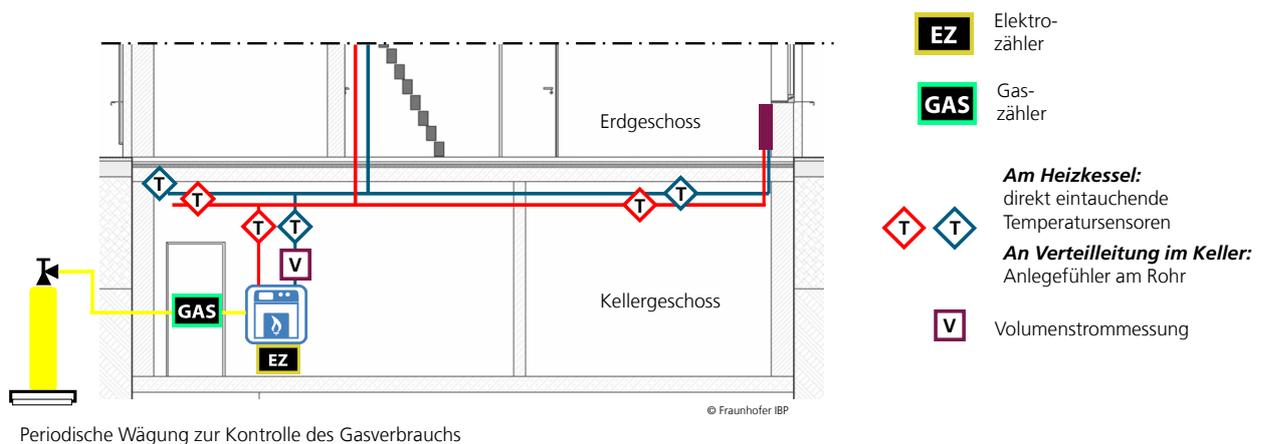


Bild 22:
Konzept der Leistungsmessung im Referenzhaus mit Gas-Brennwerttherme.

3.5.2 Temperatur und thermischer Komfort

Sowohl zur Bewertung des thermischen Raumklimas als auch als Führungsgröße für die Regelung der Heizflächen (Wärmeübergabe) wird die operative Raumtemperatur herangezogen. Bei üblichen Luftgeschwindigkeiten im Raum (unter 0,2 m/s) entspricht die Operativtemperatur dem Mittelwert zwischen der Lufttemperatur im Raum und der mittleren Temperatur aller Umschließungsflächen (inkl. Heizflächen), die durch langwelligen (IR-)Strahlungsaustausch mit einer Person im Raum interagieren [5]. Die zur Ermittlung der Operativtemperatur notwendige Lufttemperatur wird mithilfe von strahlungsgeschirmten

Temperaturfühlern ermittelt (siehe Bild 23). Für die Bestimmung der Strahlungstemperatur kommt in der Regel ein sogenanntes Globe-Thermometer zum Einsatz; eine schwarze Kupferkugel mit einem Durchmesser von 15 cm und einem Temperaturfühler in der Mitte. Um die Wirkung der nicht symmetrischen Wärmestrahlung durch die Heizflächen bewerten zu können, werden im Rahmen dieser Messstudie richtungsempfindliche direktionale Globethermometer verwendet, wie es in Bild 24 dargestellt ist. Hierbei handelt es sich um einen Quader aus Balsaholz mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit, der an allen sechs Seiten mit einer geschwärzten Metallhalbschale und innenliegenden Temperaturfühlern ausgestattet ist. Zur Ermittlung der für einen Nutzer relevanten Operativtemperatur wird der Mittelwert aller sechs Halbraum-Globethermometer gebildet. Zur Berücksichtigung des geringeren Sichtfaktors der menschlichen Körperform nach oben und unten werden die beiden vertikalen Messwerte nach DIN EN ISO 7726 [5] mit einem Faktor von 13 % gewichtet, während für die restlichen vier horizontalen Kardinalrichtungen 18,5 % angesetzt werden.



Bild 23:
Detailaufnahme eines passiv strahlungsgeschirmten Lufttemperatursensors (rechts). Links ein klassisches Globethermometer (© Fraunhofer IBP).

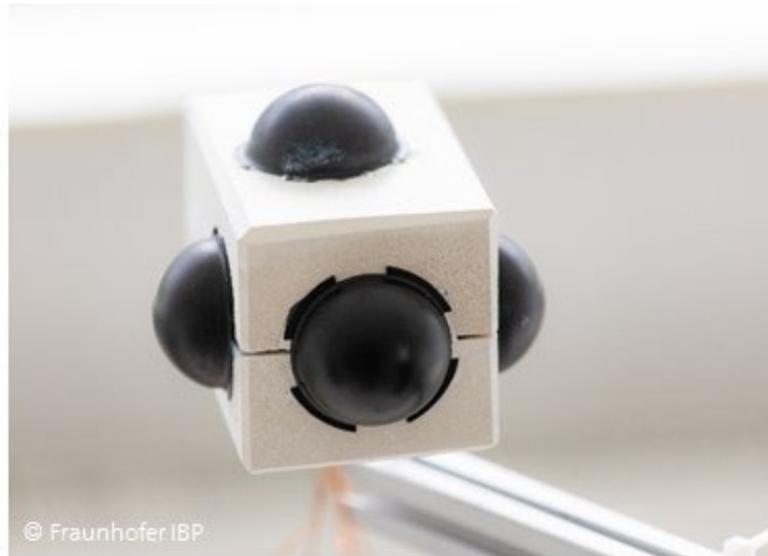
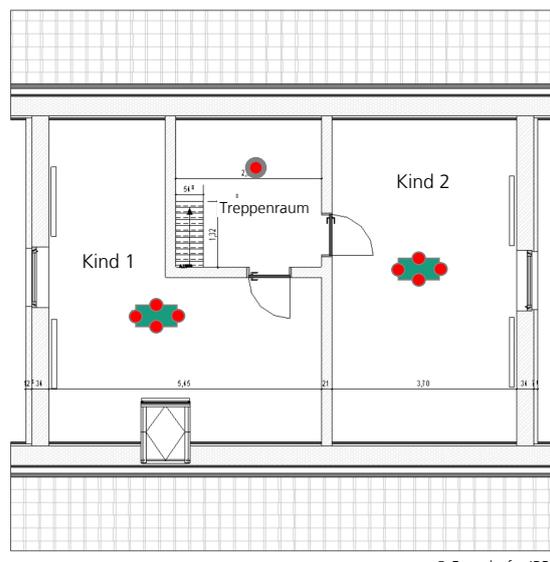
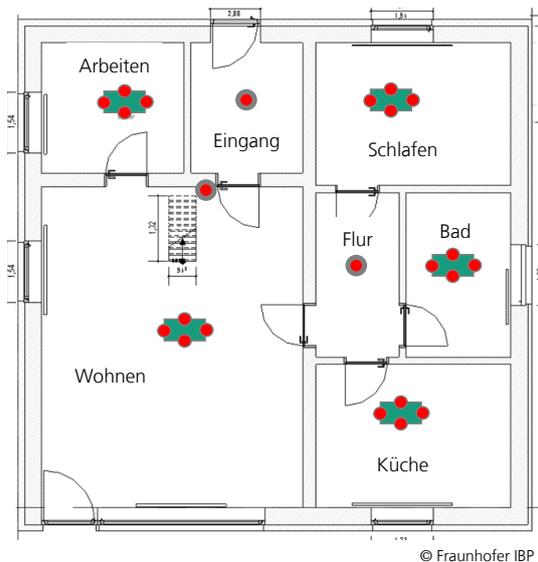


Bild 24:
Direktionales Globethermometer des Fraunhofer IBP.

In der Mitte jedes Aufenthaltsraumes beider Zwillingshäuser wird ein Komfort-Messbaum platziert. Diese Komfortmessstellen bestehen aus Lufttemperaturmessstellen auf 10 cm, 110 cm und 170 cm Höhe über der Oberkante des Fußbodens (OKFB) und 10 cm unterhalb der Decke sowie einem klassischen und einem direktionalen Globethermometer. Eingang, Flur und Treppenraum werden als Durchgangsräume mit nur einer Lufttemperaturmessstelle auf 110 cm Höhe über OKFB ausgestattet. Die Positionen der Messstellen in den einzelnen Räumen können Bild 25 entnommen werden. Bild 26 zeigt eine vollständige Komfortmessstelle.



Globetemperatur Höhe 1,1m

Komfort-Sensor Höhe 1,1m (6 Halbschalen, Globe-Thermometer)

Lufttemperatur Höhe 0,1m, 1,1m, 1,7m, 0,1m unter Decke



Lufttemperatur

Bild 25:
Positionen der Sensorik zur Bewertung des thermischen Komforts in beiden Zwillingshäusern.



Bild 26:
Vollständige Komfortmessstelle im Wohnzimmer.

3.5.3 Außenklima – Wetterstation

Ein wesentlicher Teil bei der Beurteilung von in situ-Messungen, wie sie am Freiland-Versuchsgelände des Fraunhofer IBP durchgeführt werden, ist das während der Messungen vorherrschende Außenklima. Um dieses zu erfassen, verfügt das Gelände über eine mit zahlreichen meteorologischen Instrumenten ausgestattete Wetterstation, die in Bild 27 abgebildet ist. Unter anderem werden hier die folgenden Größen erfasst: Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, Solar- und langwellige Gegenstrahlung, Bodentemperaturen, Niederschläge, Sichtweite, Schneehöhe, usw. Wie aus Bild 28 ersichtlich, ist diese Wetterstation ca. 100 m von den Zwillingshäusern entfernt.



Bild 27:
Wetterstation auf dem Freiland-Versuchsgelände des Fraunhofer IBP bei Holz-
kirchen (© Fraunhofer IBP).



Bild 28:
Standort der beiden Zwillingshäuser und der Wetterstation (links im Bild) auf dem Freiland-Versuchsgelände des Fraunhofer IBP bei Holzkirchen (© Fraunhofer IBP).

3.5.4 Qualitätssicherung der Messtechnik und Abschätzung der Messunsicherheit

Um zuverlässige und vertrauenswürdige Messergebnisse zu erhalten, muss vor Messbeginn sichergestellt werden, dass die verwendeten Sensoren ihren technischen Spezifikationen entsprechen.

Des Weiteren wird eine Fehlerabschätzung durchgeführt, um die ermittelten Differenzen beim Energieverbrauch einordnen zu können.

Messtellenkalibrierung

Hierzu werden alle Temperaturfühler im IBP-eigenen Labor kalibriert. Luft- und Gas-Massenstromsensoren werden zur Kalibrierung an zertifizierte externe Dienstleister verschickt. An den elektrischen Leistungsmessern werden Kontrollmessungen mit einem hochgenauen, kalibrierten Referenzgerät vorgenommen. Auch der hydraulische Durchflussmesser zur Bestimmung der Leistungsabgabe der Gastherme im Referenzhaus wird unter Verwendung einer kalibrierten, hochgenauen Waage überprüft. Die beobachtete maximale Abweichung beträgt 1 %. Dieser Abgleich wird während des Versuchs etwa monatlich wiederholt. Die Messstellen für die Vor- und Rücklauftemperaturen am Ausgang der Gastherme sind doppelt vorhanden, um einen Sensorschaden zuverlässig erkennen zu können. Zudem gibt es die Möglichkeit, direkt hinter diesen

Temperaturmessstellen einen temporär hydraulischen Kurzschluss zu erzeugen, so dass das Heizungswasser von der Vorlauf-temperaturmessstelle direkt zur Messstelle der Rücklauf-temperatur geführt wird. Somit kann die Unsicherheit bei der Messung der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ΔT direkt gemessen werden. Die maximale Abweichung zwischen beiden Messstellen $\delta \Delta T$ betrug 0,04 K.

Unsicherheit der Temperaturmessung

In den direktionalen Globethermometern werden PT100-Platin-Schichtwiderstände der Genauigkeitsklasse 1/3 B nach DIN EN IEC 60751 [6] verwendet, deren Grenzabweichung nach Gleichung (1) ermittelt wird.

$$\delta_{Grenz,PT100} = \pm(0,3 + 0,005 * |t|) * 1/3 \quad [K] \quad (1)$$

t Sensortemperatur [°C]

Für eine typische Raumtemperatur von 20 °C ergibt sich somit $\delta_{PT100} = 0,13$ K.

Nach DIN V ENV 13005 [7] (Methode B) werden diese Grenzabweichungen unter Verwendung von Gleichung (2) in einen Standardfehler umgerechnet. Gleichung (2) gilt analog für alle diskutierten Sensor-Fehlergrenzen. An dieser Stelle wird deutlich, dass die Messunsicherheit bei der Temperatur deutlich kleiner ist als der in Abschnitt 4.3 diskutierte Unterschied der Raumlufttemperaturen zwischen beiden Häusern von 0,4 K.

$$\delta_{PT100} = \frac{\delta_{Grenz,PT100}}{\sqrt{3}} = \frac{0,13}{\sqrt{3}} = 0,075 \quad [K] \quad (2)$$

Die Position der Komfortmessstelle im Raum hat auf Grund der veränderten Sichtfaktoren auf die jeweiligen Heizflächen und die nicht ganz homogene Lufttemperatur im Raum einen wesentlichen Einfluss auf die Komfortmessung. Die Ergebnisse der Messunsicherheitsabschätzung sind daher genau genommen nur für die Positionen der Komfortmessstellen gültig.

Unsicherheit der elektrischen Leistungsmessung (IR)

Als Messwandler für die elektrische Leistung kommen Leistungsmessklemmen der Versuchsregelung des Herstellers Beckhoff (Typ EL3433) ohne zusätzliche Stromwandler zum Einsatz, welche mit einer Messunsicherheit von 1 % des Messbereichsendwertes von 2.300 W spezifiziert sind. Hieraus ergibt sich eine absolute Unsicherheit von $\delta_{el,einzel} = 23$ W bzw. 13 W unter Verwendung von Gleichung (2). Da es keinen Hinweis darauf gibt, dass die Unsicherheiten der einzelnen $n = 7$ Messstellen im IR-Haus systematisch sind, bleibt die Unabhängigkeitsannahme intakt und die Fehler addieren sich gemäß Gleichung (3).

$$\delta_{el} = \sqrt{n * \varepsilon_{el,einzel}^2} = \sqrt{7 * (13 W)^2} = 34 W \quad (3)$$

Unsicherheit der hydraulischen Leistungsmessung (Referenz)

Die hydraulische Leistung berechnet sich aus der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf, der Durchflussmenge und der Wärmekapazität c des Heizungswassers als Wärmeträger nach Gleichung (4). Die beobachteten Abweichungen bei der Temperaturdifferenzmessung und der Durchflussmessung werden unter Verwendung von Gleichung (2) reduziert. Unter Bewahrung der Unabhängigkeitsannahme sowie der Annahme, dass die Wärmekapazität c keiner Unsicherheit unterliegt, lässt sich die Unsicherheit der hydraulischen Leistungsmessung nach Gleichung (5) aus der quadratischen Summe der partiellen Ableitungen zu ± 20 W abschätzen.

$$P_{hyd} = \Delta T * q * c \quad (4)$$

$$\delta P_{hydp} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{hyd}}{\partial \Delta T} * \delta \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{hyd}}{\partial q} * \delta q\right)^2} = \quad (5)$$

$$= \sqrt{\left((q * c) * \delta \Delta T\right)^2 + \left((\Delta T * c) * \delta q\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\left(224 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kgK}}\right) * 0,023 \text{ K}\right)^2 + \left(\left(10,9 \text{ K} * 1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kgK}}\right) * 1,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{6^2 + 19^2} = 20 \text{ W}$$

ΔT	Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf der Gas-therme. Mittelwert bei Betrieb 10,9 K.	[K]
$\delta \Delta T$	Unsicherheit der Messung der Temperaturspreizung: 0,023 K.	[K]
q	Typischer Durchfluss bei Betrieb: 224 kg/h.	[kg/h]
δq	Unsicherheit der Durchflussmessung: 0,65 %; aus Gleichung (2) mit dem Grenzwert von 1 %. 0,56 % * 224 kg/h = 1,5 kg/h.	[kg/h]
c	Wärmekapazität des Wassers: 4,18 kJ/kgK -> 1,163 Wh/kgK.	[Wh/kgK]

Messunsicherheit der Heizenergien

Zusätzlich zu den Unsicherheiten der Leistungsmessung in beiden Gebäuden δP_{el} und δP_{hyd} sollte der in Abschnitt 4.2 diskutierte, ungewollte, regelungsbedingte Unterschied bezüglich der operativen Raumtemperatur zwischen beiden Gebäuden von 0,2 K beachtet werden. Es wird angenommen, dass diese Abweichung zur Hälfte jedem der beiden Gebäude zugeordnet wird. Unter Verwendung des Wärmetransferkoeffizienten der Zwillingshäuser von 190,1 W/K (Tabelle 2 in Abschnitt 3.1.1) kann die aus diesem Temperaturunterschied resultierende Unsicherheit für die gemessene Heizleistung nach Gleichung (6) mit ± 19 W abgeschätzt werden.

$$\delta P_{temp} = 190,1 \text{ W/k} * \frac{0,2}{2} \text{ K} = 19 \text{ W} \quad (6)$$

Zudem wird im Rahmen der Nullmessung in Abschnitt 3.2.2 eine maximale Leistungsdifferenz von $\delta P_{\text{null}} = \pm 82 \text{ W}$ identifiziert. Da die Periode der Nullmessung im Vergleich mit der eigentlichen Messperiode verhältnismäßig kurz ist, wird nicht angenommen, dass δP_{null} niemals größer als 82 W sein könnte und Gleichung (2) wird nicht angewendet. Auch für die Nullmessung wird angenommen, dass sich diese Unsicherheit gleichmäßig auf beide Gebäude aufteilt, woraus sich δ_{null} zu $\pm 41 \text{ W}$ ergibt.

Da eine systematische Abhängigkeit zwischen diesen vier Unsicherheiten nicht wahrscheinlich ist, kann die Gesamtunsicherheit der Leitungsmessung für das IR-Haus nach Gleichung (7) zu $\pm 57 \text{ W}$ abgeschätzt werden und nach Gleichung (8) für das Referenzhaus zu $\pm 49 \text{ W}$. Bezogen auf eine durchschnittliche Heizleistung von 2.860 W ergibt sich für die IR-Haus-Leistung eine Unsicherheit von $\pm 2,0 \%$ und $\pm 1,7 \%$ für das Referenzhaus. Auf dem 95-%-Konfidenzniveau beträgt der Messfehler des Referenzhauses somit $\pm 3,4 \%$ und $4,0 \%$ für das IR-Haus.

$$\begin{aligned} \delta P_{\text{ref}} &= \sqrt{\delta P_{\text{null}}^2 + \delta P_{\text{hyd}}^2 + \delta P_{\text{temp}}^2} = \\ &= \sqrt{(41 \text{ W})^2 + (20 \text{ W})^2 + (19 \text{ W})^2} = 49 \text{ W} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \delta P_{\text{ir}} &= \sqrt{\delta P_{\text{null}}^2 + \delta P_{\text{el}}^2 + \delta P_{\text{temp}}^2} = \\ &= \sqrt{(41 \text{ W})^2 + (34 \text{ W})^2 + (19 \text{ W})^2} = 57 \text{ W} \end{aligned} \quad (8)$$

4 Ergebnisse

Bei der Bewertung der Messergebnisse der Untersuchung wird der Messzeitraum vom 24. Januar 2024 bis zum 31. März 2024 herangezogen. Ab dem 23. Januar 2024 war die Qualitätssicherung und die Inbetriebnahme des Versuchs abgeschlossen. Ab dem 1. April 2024 war die Witterung so warm, dass kein signifikanter Heizwärmeverbrauch mehr anfiel. Bild 29 zeigt die Außenlufttemperatur als Tagesmittelwert und die Globalstrahlungsleistung (Tagessumme) während dieser Messperiode. Zur einfacheren Einordnung der Außenlufttemperaturen während des Messzeitraums werden die Monatsmittelwerte des nach GEG bzw. DIN V 18599-10 anzusetzenden Testreferenzjahres für Potsdam grau gestrichelt dargestellt.

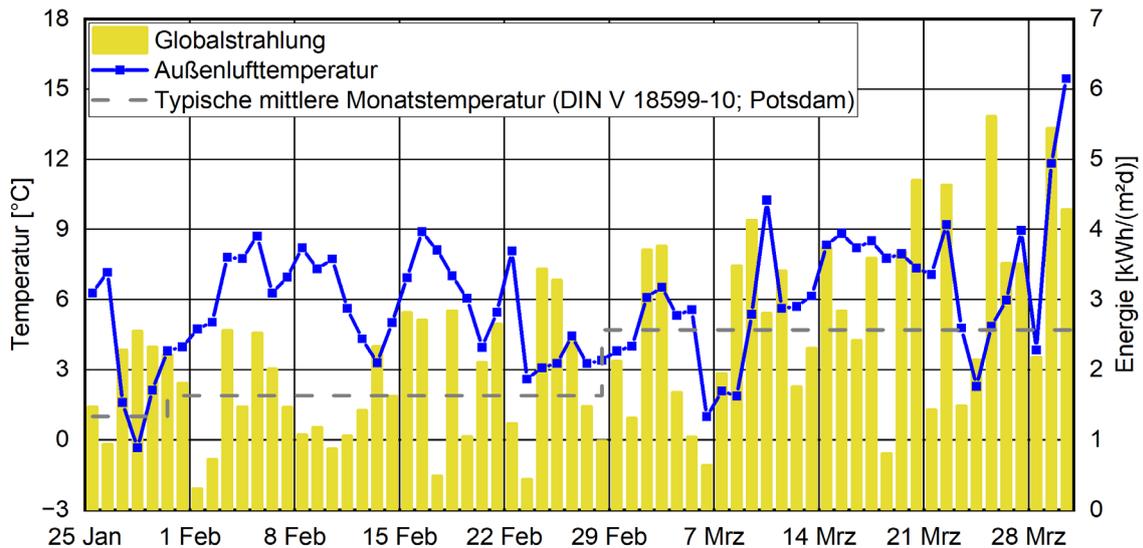


Bild 29:
Witterung während der Messperiode und die typische Außenlufttemperatur nach GEG bzw. DIN V 18599-10 (© Fraunhofer IBP).

4.1 Beispielhaftes Verhalten beider Heizsysteme

Zunächst wird zum besseren Verständnis der Dynamiken in beiden Gebäuden das Verhalten des Wohnzimmers im IR- und im Referenzhaus an einem typischen Tag dargestellt. Hierfür wird der 7. März 2024 gewählt. Wie in Bild 29 erkannt werden kann, ist dies einer der kältesten Tage im Untersuchungszeitraum. In Bild 30 sind die Verläufe der Minutenmittelwerte der Außenlufttemperatur und der Globalstrahlungsleistung abgebildet.

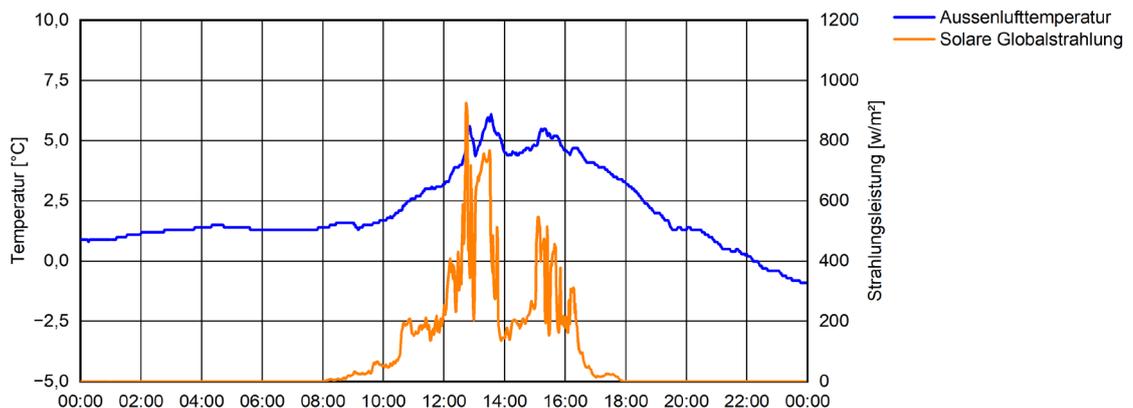


Bild 30:
Verlauf der Außenlufttemperatur und der solaren Globalstrahlung am 7. März 2024 (© Fraunhofer IBP).

In Bild 31 ist für diesen Zeitraum das Verhalten des IR-Wohnzimmers dargestellt. Man kann erkennen, dass die Raumtemperaturen während der nächtlichen Absenkung bis kurz vor die Absenkttemperatur von 18 °C fallen. Bei

Nutzungsbeginn um 6:00 Uhr sieht man, dass die Heizleistung (lila) schlagartig ansteigt. Der anschließende Rückgang der Leistung ist in der Eigenschaft der Regelung der verwendeten Infrarotheizung begründet. Während dieser Heizphase steigt die Oberflächentemperatur der Infrarotheizung (orange) an und stabilisiert sich bei ca. 110 °C. Als Folge der eingebrachten Heizleistung steigen sowohl die operative Raumtemperatur (grün) als auch die Lufttemperatur auf den unterschiedlichen Höhen (blau/cyan) an. Etwa eine Stunde nach Beginn der Nutzung, gegen 7:00 Uhr, hat die operative Raumtemperatur, welche die Ist-Temperatur für die Heizungsregelung darstellt, den Sollwert von 20 °C erreicht. Eine weitere halbe Stunde später, gegen 7:30 Uhr, ist die obere Grenze der Hysterese des 2-Punkt-Reglers von 20,5 °C erreicht und die Heizfläche bleibt bis zum Ende der morgendlichen Nutzung um 8:00 Uhr deaktiviert. Aufgrund der höheren Außenlufttemperaturen und der Solarstrahlung fällt die Raumtemperatur während der mittäglichen Absenkung nicht so stark ab wie nachts. Entsprechend schneller wird die obere Grenze der Raumtemperatur zu Beginn der erneuten Nutzung am Nachmittag erreicht. Im Verlauf dieses längeren Nutzungsblocks fällt die operative Raumtemperatur zweimal wieder unter die untere Hysteresegegrenze von 19,5 °C, so dass die Heizflächen insgesamt dreimal an- und ausschalten. Die internen Wärmequellen (lila, gestrichelt) sind nur während des zweiten Nutzungsblocks aktiv.

In Bild 32 ist derselbe Zeitraum für das Referenzwohnzimmer dargestellt. Im Referenzhaus sind entsprechend dem in Abschnitt 3.5.1 erläuterten energetischen Messkonzept keine raumweisen Heizleistungen verfügbar, da diese nur für das Gesamtgebäude erfasst werden. Man kann erkennen, dass im Referenzwohnzimmer die Beheizung ca. 30 Minuten früher, also bereits ab 5:30 Uhr, beginnt, da im Referenzhaus Vorheizzeiten angesetzt werden (siehe Abschnitt 3.4.2). Ebenso beginnt die Beheizung nachmittags bereits gegen 16:30 Uhr. Man kann erkennen, dass morgens die gewünschte operative Raumtemperatur zwischen 6:30 und 7:30 Uhr erreicht wird. Anders als im Referenzhaus wird hier nicht die volle Heizleistung bis 20,5 °C aufrecht erhalten, sondern das Heizkörperventil wird stetig weiter geschlossen, um eine Ist-Temperatur von 20,0 °C zu erreichen. Die maximalen Oberflächentemperaturen des Flachheizkörpers liegen mit 55 °C etwa 55 K unterhalb der Maximaltemperatur der Infrarotheizung. Die internen Wärmequellen weisen einen zum IR-Haus identischen Verlauf auf.

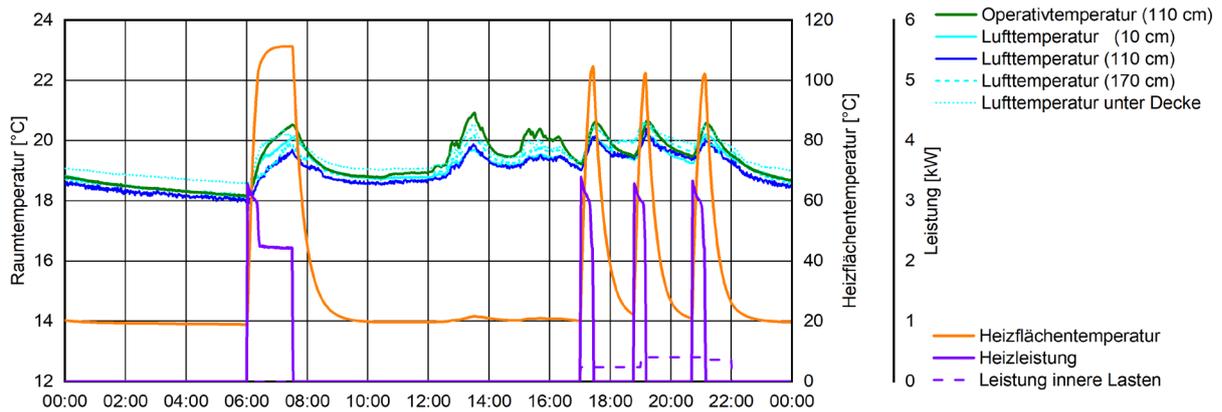


Bild 31:
Typisches Verhalten einer Infrarotheizung im IR-Haus am 7. März 2024 (© Fraunhofer IBP).

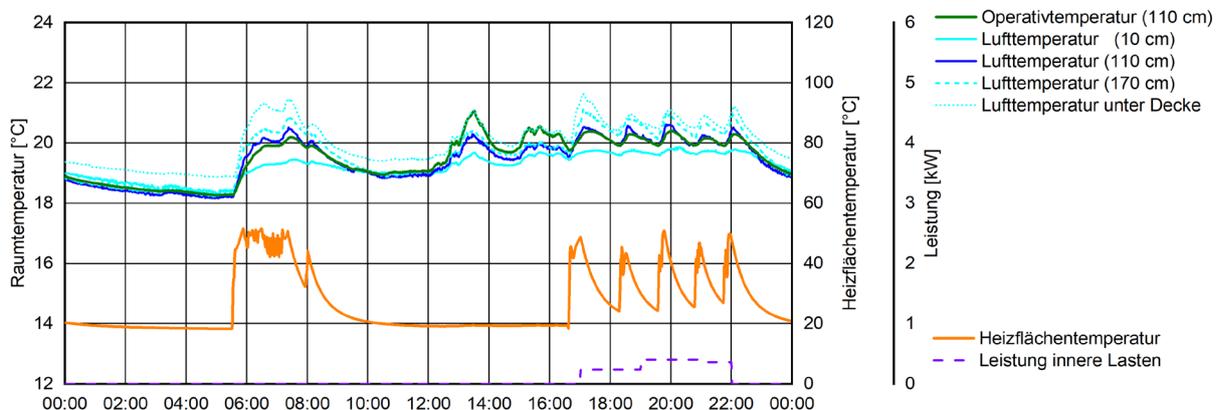


Bild 32:
Typisches Verhalten desselben Raumes im Referenzhaus am 7. März 2024 (© Fraunhofer IBP).

4.2 Thermischer Komfort

Der Vergleich der Heizenergieverbräuche beider Häuser, als primäres Ziel dieser Untersuchungen, ist nur dann aussagekräftig, wenn der thermische Komfort während der Nutzungszeiten in beiden Häusern vergleichbar ist. Als Messgröße für den thermischen Komfort wird in dieser Untersuchung die operative Raumtemperatur bzw. der Mittelwert von allen Operativtemperaturen der sieben Aufenthaltsräume festgesetzt. Bild 33 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Unterschieds der Ist-Operativtemperaturen zwischen den jeweiligen Räumen des Referenz- und des IR-Hauses während der definierten Nutzungszeit im Untersuchungszeitraum vom 24. Januar bis zum 31. März 2024. Man kann erkennen, dass der Temperaturunterschied zwischen dem Referenzhaus und dem infrarotbeheizten Gebäude in den einzelnen Räumen im Mittel bei etwa +0,5 K bis -0,1 K liegt. Im Mittel ist das gesamte Referenzhaus 0,2 K wärmer. Dieser geringfügige Unterschied entspricht etwa dem zweifachen der

Messunsicherheit einzelner Temperaturfühler. Der verbleibende minimale Unterschied liegt daran, dass die Räume im IR-Haus nicht vorgeheizt werden.

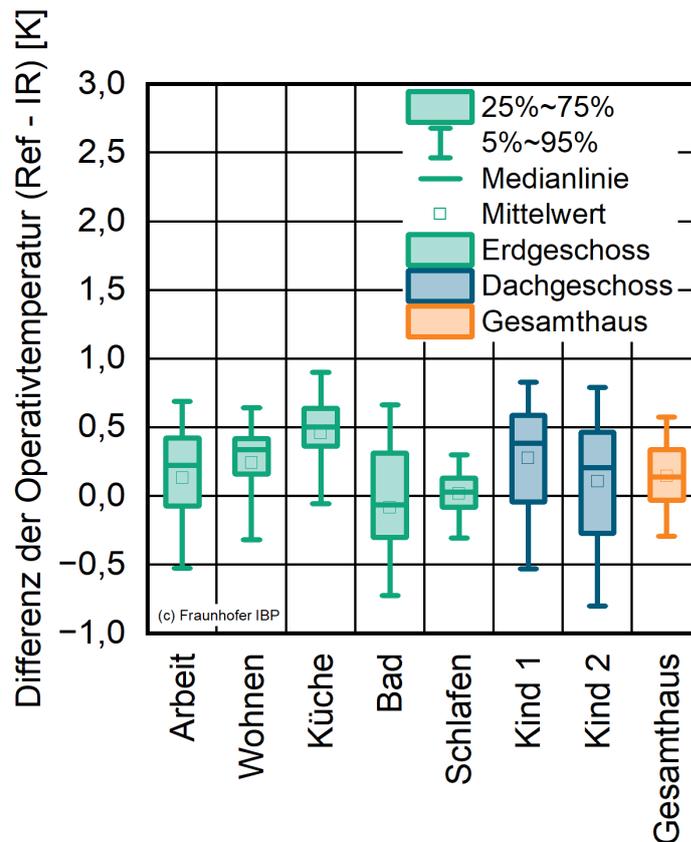


Bild 33: Unterschied der operativen Raumtemperaturen zwischen dem Referenz- und dem IR-Haus; raumweise und im Mittel zwischen den Häusern während der Nutzungszeit.

Komfort-Kategorien

Zur Bewertung des thermischen Langzeit-Komforts legt DIN EN 16798-1 [8] vier Komfort-Kategorien fest, die durch bestimmte Temperaturbereiche bzw. Abweichungen von der Solltemperatur definiert sind. Es wird ermittelt, wie häufig die operative Raumtemperatur in einer bestimmten Kategorie liegt. Zur Bewertung des Raumklimas ist die schlechteste vorkommende Kategorie maßgebend. Nach DIN EN 16798-1 wird eine Komfort-Kategorie dann nicht gewertet, wenn sie nur maximal 1 % der Nutzungszeit erreicht wird. 1 % eines Tages entspricht 14,4 Minuten. Dieser Wert ist in Gebäuden mit Fensterlüftung vor dem Hintergrund des nutzungsbedingten Luftwechsels nicht einzuhalten. Es wird daher vorgeschlagen, auf die 5%-Grenze nach der zurückgezogenen Vorgängernorm DIN EN 15251 [9] auszuweichen.

Die Komfort-Kategorie I gilt nur für Räume mit Personen mit besonderen Anforderungen wie z. B. Krankenhäuser. Kat II gilt für Neubauten und sanierte Gebäude; somit ist Kat II für die in der Untersuchung verwendeten

Zwillingshäuser maßgebend. Daher werden im Weiteren Kat I und Kat II zusammengefasst. Kat III kann für Bestandsgebäude akzeptiert werden, während Kat IV nicht dauerhaft akzeptiert werden kann. Die untere Grenze der Raumtemperatur für Kat I ist 21 °C, für Kat II 20 °C und 18 °C für Kat III. In Anlehnung an DIN V 18599-10 ist der Sollwert der Raumlufthtemperatur bei Anwesenheit auf 20 °C festgelegt, also an der Untergrenze der maßgebenden Kat II. Dies würde bedeuten, dass beide Zwillingshäuser bestenfalls gerade so Kat II erreichen können. Da die Nutzer ihre als optimal empfundene Temperatur in Realität über die Raumsolltemperatur einstellen können, werden die Komfort-Kategorien dahingehend interpretiert, dass bei einer operativen Raumtemperatur, die mindestens dem Sollwert entspricht, also ohne Temperaturunterschreitung, Kat I gerade noch eingehalten ist. Für die Untergrenzen von Kat II und Kat III werden entsprechend die Temperaturabweichungen bzw. -unterschreitungen nach Tabelle 7 angesetzt. Da in dieser Untersuchung keine Kühlung oder sommerliches Temperaturverhalten untersucht wird, werden nur Unterschreitungen der Solltemperatur, aber keine Überschreitungen bewertet.

Tabelle 7:

Definition der Komfort-Kategorien entsprechend der angesetzten Unterschreitung der operativen Raumtemperatur.

Kategorie	Solltemperaturunterschreitung
Kat I	< 0 K
Kat II	< 1 K
Kat III	< 3 K
Kat IV	>= 3 K

Bild 34 erläutert die Zuordnung von gemessenen operativen Raumtemperaturen für einen Raum mit einer Solltemperatur bei Anwesenheit (Nutzungszeit) von 20 °C. Da die Nutzung des Raumes um 14:00 Uhr beginnt, findet im Zeitraum davor keine Bewertung des Komforts statt. Um 14:00 Uhr liegt die Ist-Temperatur noch unterhalb von 19 °C, somit wird dieser Zeitschritt der Kat III (Unterschreitung 1–3 K) zugeordnet. Die folgenden drei Viertelstunden liegen zwischen 19 °C und 20 °C und fallen damit in die Kat II (Unterschreitung 0–1 K), in den nächsten zwei Zeitschritten liegt die Temperatur etwas über 20 °C. Da in diesem Zeitraum keine Unterschreitung der Solltemperatur stattfindet, resultiert hieraus Kat I. Im Folgenden schwingt die operative Raumtemperatur wieder geringfügig unter die 20-°C-Grenze, wodurch die Bewertung zwischen Kat I und II wechselt.

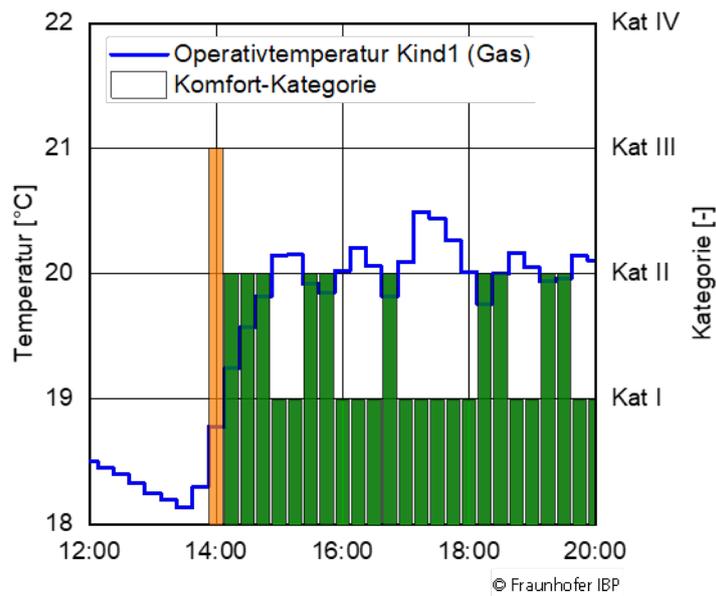


Bild 34:
 Beispielhafter Verlauf der operativen Raumtemperatur als Viertelstunden-Mittelwerte und resultierende Einordnung in die Komfort-Kategorien für eine Anwesenheits-Solltemperatur von 20 °C.

In Bild 35 ist die Häufigkeit der einzelnen Komfort-Kategorien während der Messperiode für die einzelnen Räume beider Zwillingshäuser dargestellt. Man kann erkennen, dass es bezüglich des thermischen Komforts in den Räumen kaum Probleme gibt und dass es vor allem zwischen den beiden untersuchten Beheizungssystemen keine signifikanten Unterschiede gibt.

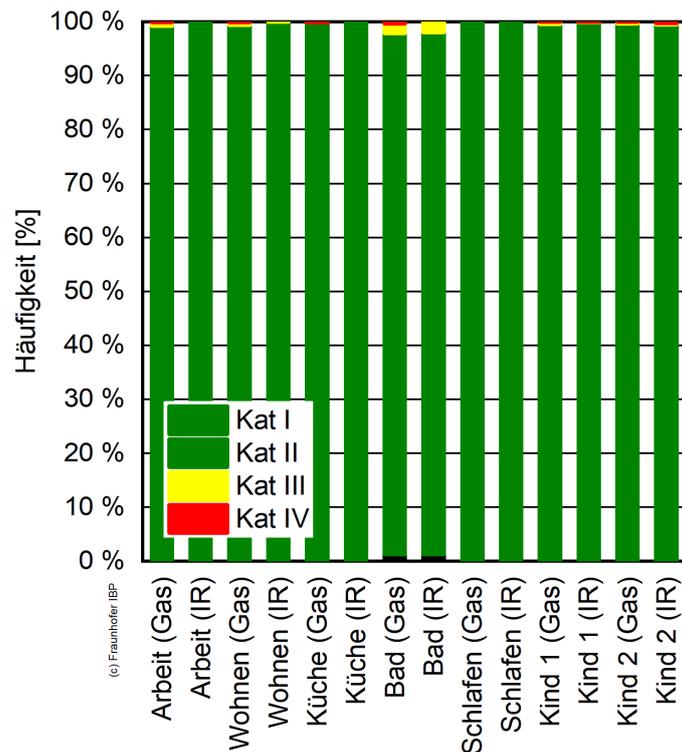


Bild 35:
Häufigkeit des Auftretens der Komfort-Kategorien in den einzelnen Räumen während der Nutzungszeit (Messperiode 24. Januar bis 31. März 2024).

4.3 Vergleich der Lufttemperaturen in beiden Häusern

In Bild 36 ist dargestellt, wie sich die Lufttemperaturen in den einzelnen Räumen beider Häuser und im Mittel über alle Aufenthaltsräume unterscheiden. Im Mittel zeigt sich, dass das Wohnzimmer, die Küche und die Kinderzimmer im Referenzhaus ca. 0,5 K wärmer sind. Das Referenz-Arbeitszimmer ist ca. 0,2 K wärmer, im Elternschlafzimmer sind die Lufttemperaturen annähernd identisch. Das Bad ist im Mittel 0,75 K wärmer. Im Mittel sind die Lufttemperaturen im gasbeheizten Referenzhaus um ca. 0,4 K höher als im IR-Haus. Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, ist das Referenzhaus bezüglich der operativen Raumtemperatur im Mittel nur 0,2 K wärmer. In Tabelle 8 findet sich eine detaillierte Übersicht über die Mittelwerte der Operativ- und Lufttemperaturen bei Anwesenheit in der Messperiode.

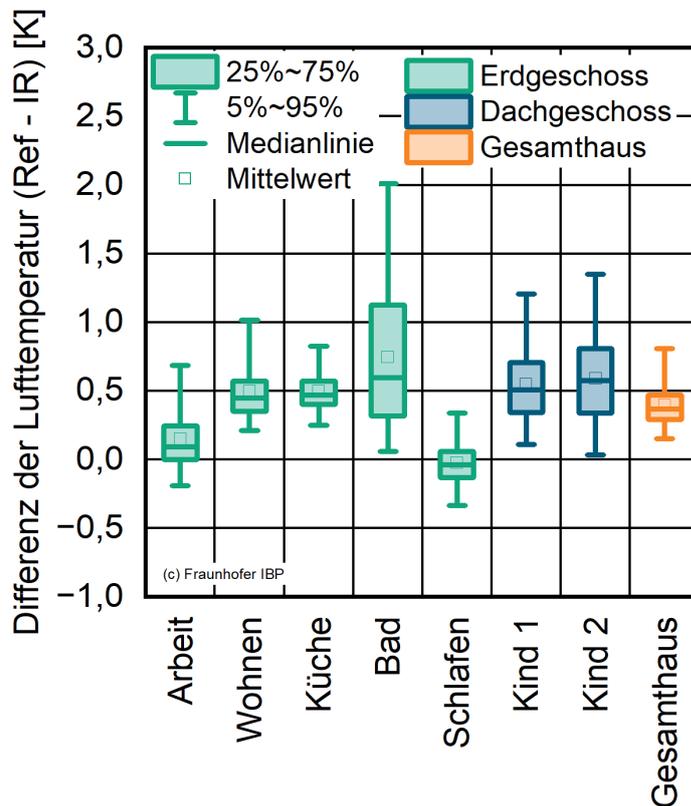


Bild 36:
Unterschied der Raumlufttemperaturen zwischen dem Referenz- und dem IR-Haus; raumweise und im Mittel zwischen den Häusern während der gesamten Messperiode 24. Januar bis 31. März 2024.

Tabelle 8:
Zusammenstellung der Raumtemperaturen in beiden Zwillingshäusern (Mittelwerte Messzeitraum 25. Januar bis 31. März 2024). Operativtemperatur während Nutzungszeit, Lufttemperatur während Nutzungszeit und Lufttemperatur über den Gesamtzeitraum.

Operativtemperatur (Anwesenheit) [°C]			Lufttemperatur (110 cm, Anwesenheit) [°C]			Lufttemperatur (110 cm, Gesamt) [°C]		
	Referenz	IR		Referenz	IR		Referenz	IR
Arbeit	20,2	20,1	Arbeit	20,2	19,9	Arbeit	19,5	19,4
Wohnen	20,4	20,1	Wohnen	20,5	19,9	Wohnen	20,2	19,7
Küche	20,8	20,3	Küche	20,9	20,3	Küche	20,5	20,0
Bad	24,1	24,2	Bad	24,3	23,4	Bad	23,0	22,2
Schlafen	18,7	18,7	Schlafen	18,8	18,8	Schlafen	18,6	18,6
Kind1	20,3	20,1	Kind1	20,1	19,6	Kind1	19,5	19,0
Kind2	20,2	20,1	Kind2	20,1	19,5	Kind2	19,5	18,9
Gesamtgebäude	20,7	20,5	Gesamtgebäude	20,7	20,2	Gesamtgebäude	20,1	19,7

4.4 Lokaler thermischer Komfort

Auch wenn der auf Basis der Operativtemperatur ermittelte »globale« Komfort im Raum akzeptabel ist, kann der Komfort für spezifische Körperteile lokal eingeschränkt sein. Ursachen hierfür sind typischerweise Zugluft, eine starke

Temperaturschichtung im Raum oder ein thermischer Strahlungsaustausch mit sehr kalten oder sehr heißen Flächen. Die beiden in dieser Untersuchung vermessenen Heizsysteme unterscheiden sich vor allem bezüglich der Temperaturschichtung im Raum und bezüglich der Oberflächentemperaturen der Wärmeübergabesysteme. Entsprechend werden diese beiden Parameter bezüglich der lokalen thermischen Behaglichkeit untersucht.

4.4.1 Strahlungsasymmetrie

Wenn von einer heißen Fläche, z. B. einer Heizfläche, deutlich mehr langwellige Wärmestrahlung auf eine Person trifft als von anderen Teilen eines Raums, kann dies den thermischen Komfort einschränken. DIN EN 16798-1 [8] erlaubt es, diesen Effekt zu quantifizieren und einer Komfort-Kategorie zuzuordnen. Hierbei wird zwischen einer horizontalen und einer vertikalen Temperaturstrahlungsasymmetrie unterschieden. Es wird nicht zwischen Kat I und Kat II unterschieden. Die Grenzwerte der einzelnen lokalen Komfort-Kategorien sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Es wird deutlich, dass DIN EN 16798-1 warme horizontale Deckenflächen deutlich kritischer bewertet als vertikale Flächen. Basierend auf den Messwerten des direktionalen Komfortsensors wird die Strahlungsasymmetrie für die Nord-Süd- und die Ost-West-Richtung sowie für den oberen und unteren Halbraum ermittelt und bezüglich des lokalen Komforts bewertet. Für die Darstellung der relevanten lokalen Komfort-Kategorie in Bild 37 wird die kritischste aller drei Richtungen ausgewählt. Man kann erkennen, dass drei der fünf mit Decken-Infrartheizungen beheizten Räume, das Arbeitszimmer und die beiden Kinderzimmer, zu 6–15 % der Anwesenheitszeit nicht im optimalen Bereich der Kategorie I und II liegen.

Tabelle 9:
Grenzwerte der lokalen Komfort-Kategorien bei asymmetrischer Strahlungstemperatur für warme Wände und Decken.

Kategorie	Strahlungstemperatur-Asymmetrie	
	vertikal	horizontal
Kat I	< 5 K	< 3 K
Kat II		
Kat III	< 7 K	< 35 K
Kat IV	≥ 7 K	> 35 K

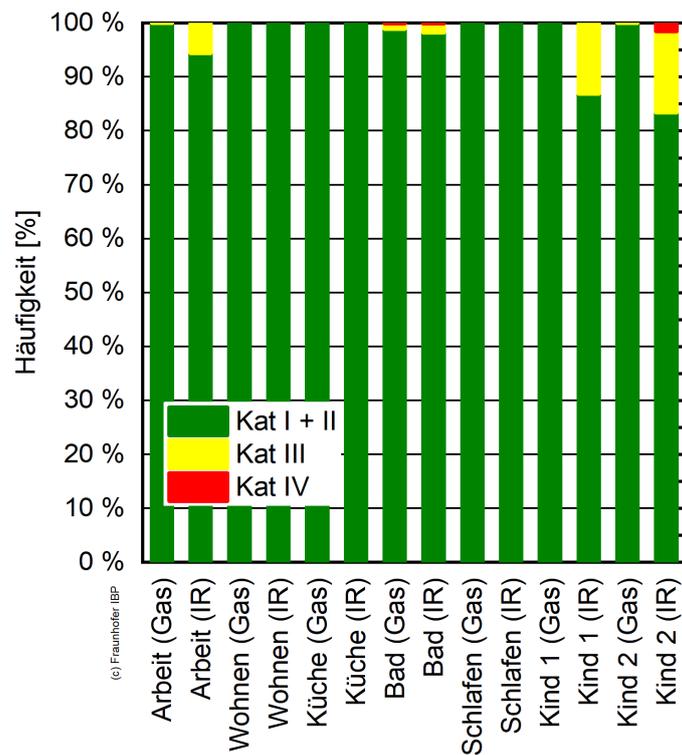


Bild 37: Darstellung der relevantesten, lokalen Komfort-Kategorien für asymmetrische Temperaturstrahlung für warme Wände und Decken. Dargestellt ist die kritischste aller drei Richtungen (N/S, O/W, oben/unten).

4.4.2 Temperaturschichtung im Raum

Der Nutzer empfindet nur einen begrenzten Temperaturunterschied zwischen dem unteren und dem oberen Körperteil als komfortabel. Die für die entsprechenden lokalen Komfort-Kategorien nach DIN EN 16798-1 [8] geltenden Grenzwerte finden sich in Tabelle 10. Zur Bewertung der vertikalen Temperaturschichtung werden während der Nutzungszeiten die Lufttemperaturdifferenzen zwischen dem Knöchel (10 cm über FOK) und dem wärmeren der beiden Lufttemperaturfühler auf sitzender Kopfhöhe (110 cm über FOK) und stehender Kopfhöhe (170 cm über FOK) ermittelt. Die Häufigkeitsverteilung der raumweisen Lufttemperaturschichtungen ist in Bild 38 dargestellt, wobei die Grenzen der lokalen Komfort-Kategorien farblich hinterlegt sind. Bild 39 zeigt die Häufigkeit der lokalen Komfort-Kategorien für den jeweiligen Raum. Hierbei fallen, unabhängig vom Heizsystem, insbesondere die Räume Bad und Kinderzimmer mit einer erhöhten Temperaturschichtung auf. Generell zeigt sich, dass die Schichtung in den Räumen mit hoher Heizlast nicht ideal ist. Räume mit hoher Heizlast sind das Bad, aufgrund der höheren Solltemperaturen von 24 °C, und die beiden Kinderzimmer, aufgrund der höheren Wärmeverluste über die Dachflächen. Ob eine breite Nutzerschicht eines Wohnhauses mit Vollwärmeschutz und gewöhnlicher Heizkörper-Heizung diese bauliche Situation tatsächlich als unbehaglich empfindet, soll an dieser Stelle nicht diskutiert werden.

Tabelle 10:
Grenzwerte der lokalen Komfort-Kategorien bei asymmetrischer Strahlungstemperatur für warme Wände und Decken.

Kategorie	Temperaturschichtung im Raum
Kat I	< 2 K
Kat II	< 3 K
Kat III	< 4 K
Kat IV	≥ 4 K

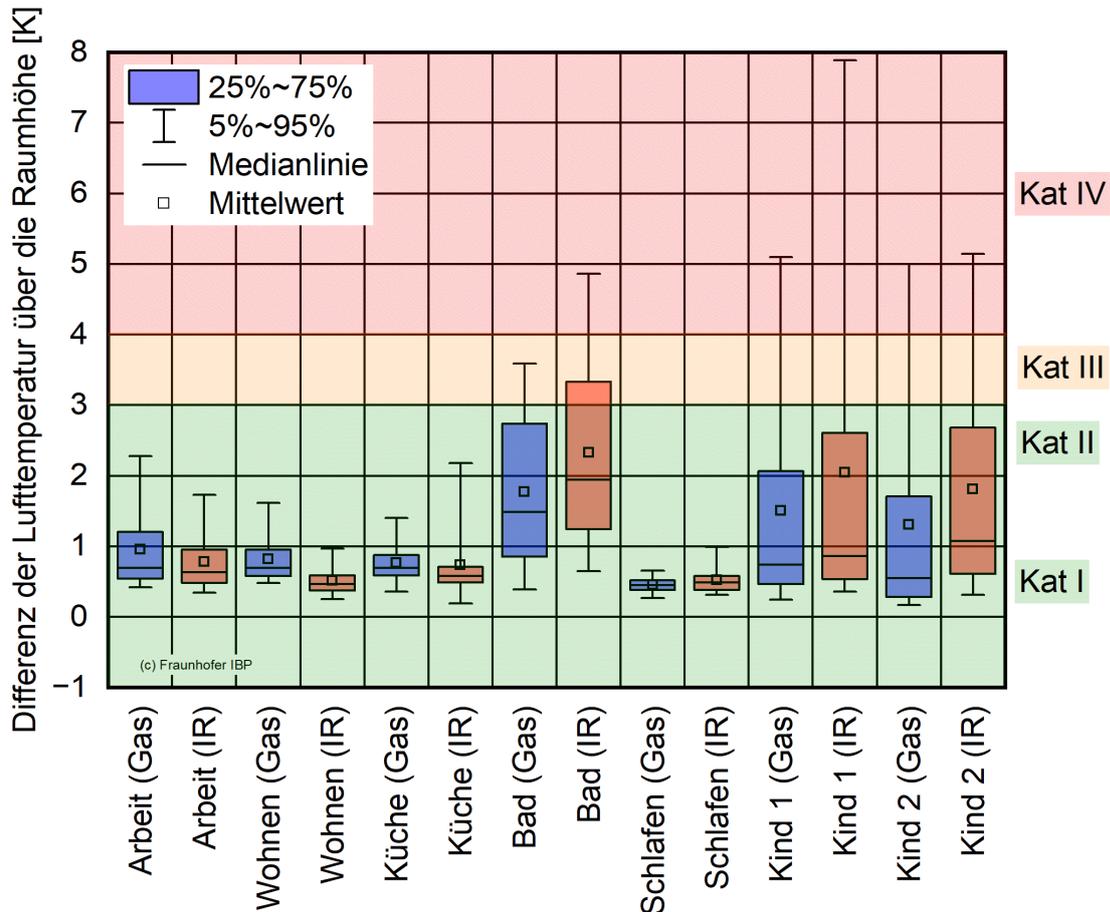


Bild 38:
Box-Plot-Diagramm-Darstellung der in den einzelnen Räumen auftretenden Temperaturschichtungen zwischen den Lufttemperaturmessstellen auf 10 cm, 110 cm, 170 cm über FOK während der Nutzungszeiten und die Bereiche der lokalen Komfort-Kategorien.

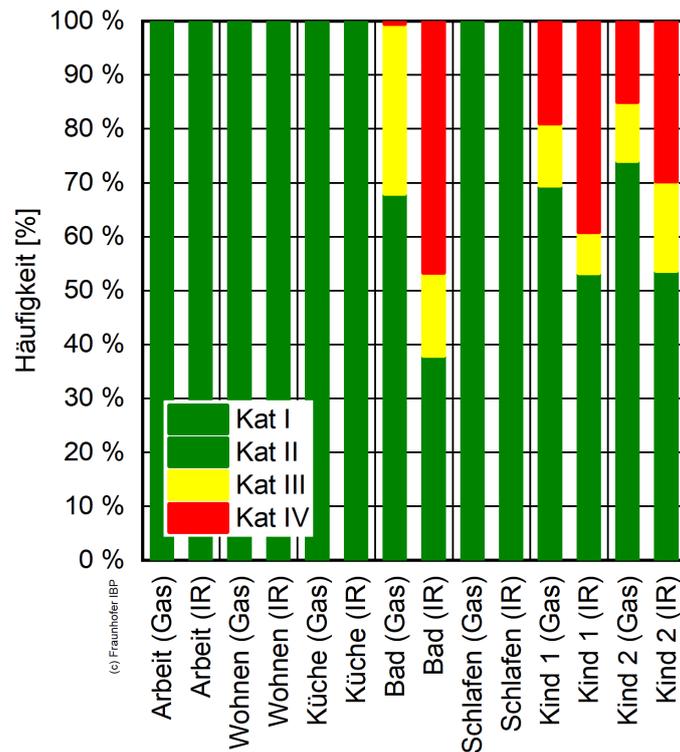


Bild 39: Darstellung der relevantesten, lokalen Komfort-Kategorien für die Temperaturschichtung im Raum.

4.5 Energetischer Vergleich

Der Vergleich des gemessenen Energieverbrauchs zwischen dem Referenz- und dem IR-Zwillingshaus bei vergleichbarem thermischen Nutzerkomfort ist das zentrale Auswertungsziel dieser Untersuchung. In Bild 40 sind die kumulierten, gemessenen Energiemengen sowie deren kumulierte Differenzen dargestellt. Man kann erkennen, dass die eingebrachte Wärmemenge (Nutzenergie, hellblaue Linie) in die beheizte Zone des Referenzhauses sehr gut mit der in das IR-Haus eingebrachten Wärmemenge (rote Linie) übereinstimmt. Aufgrund der im Untersuchungszeitraum annähernd identischen Raumtemperaturen in beiden Gebäuden ist dies erwartungsgemäß. Entsprechend bewegt sich auch die kumulierte Differenz der Nutzenergien (cyan, gestrichelt) um die Nulllinie. Vergleicht man die von der Gastherme aufgenommene Endenergiemenge, welche auch die Erzeugungs- und Verteilverluste enthält (blaue Linie), die überwiegend im Zwillingshauskeller und damit außerhalb des bilanzierten beheizten Bereiches anfallen, zeigt sich ein Mehrverbrauch zum IR-Haus (rote Linie), bei dem es keine entsprechenden Verluste gibt. Der Verbrauch von elektrischer Hilfsenergie der Gasheizung im Referenzhaus (schwarz gepunktet) stellt lediglich einen minimalen Beitrag am Gesamtverbrauch dar.

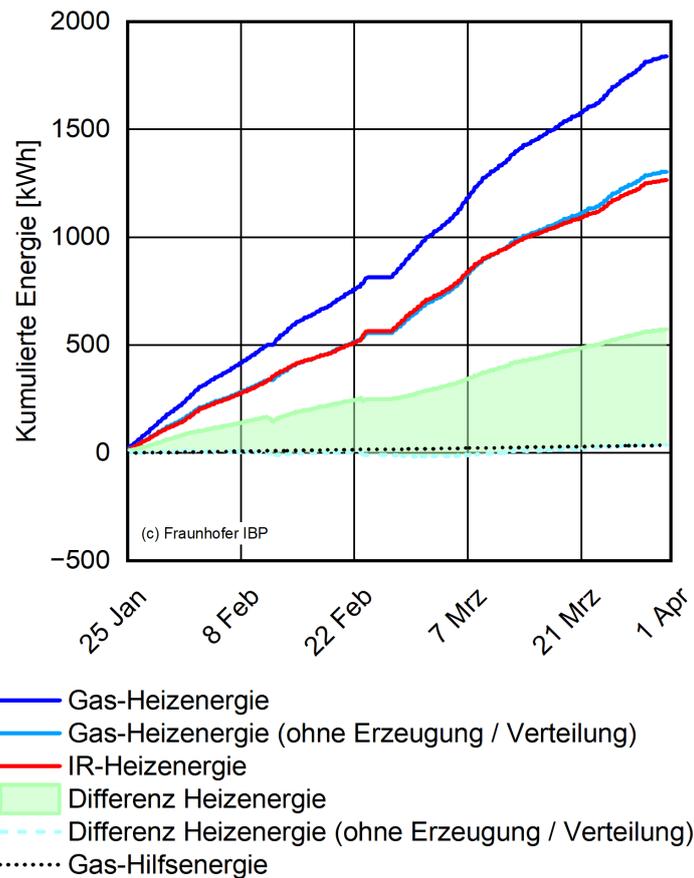


Bild 40:
Kumulierte gemessene Energieverbräuche und deren kumulierte Differenzen.

Der zeitliche Verlauf der Heizleistung in der Messperiode ist für beide Zwillingshäuser in den Carpet-Plots in Bild 41 dargestellt. Hier liegen die Tage der Messperiode auf der X-Achse und die Uhrzeit auf der Y-Achse, während die Heizleistung durch die Farbe in der Fläche dargestellt wird; je heller die Farbe, desto höher die Heizleistung zum jeweiligen Zeitpunkt. Man kann erkennen, dass sich die Heizleistungen generell auf die Nutzungszeiten mit höheren Solltemperaturen von 6:00 – 8:00 Uhr und von 14:00 – 22:00 Uhr verteilen. Die Spitzenleistungen treten zu Beginn der morgendlichen Nutzung gegen 6:00 Uhr, den nachmittäglichen Anwesenheiten gegen 14:00 Uhr (Erdgeschoss) und gegen 17:00 Uhr (Kinderzimmer, Dachgeschoss) auf.

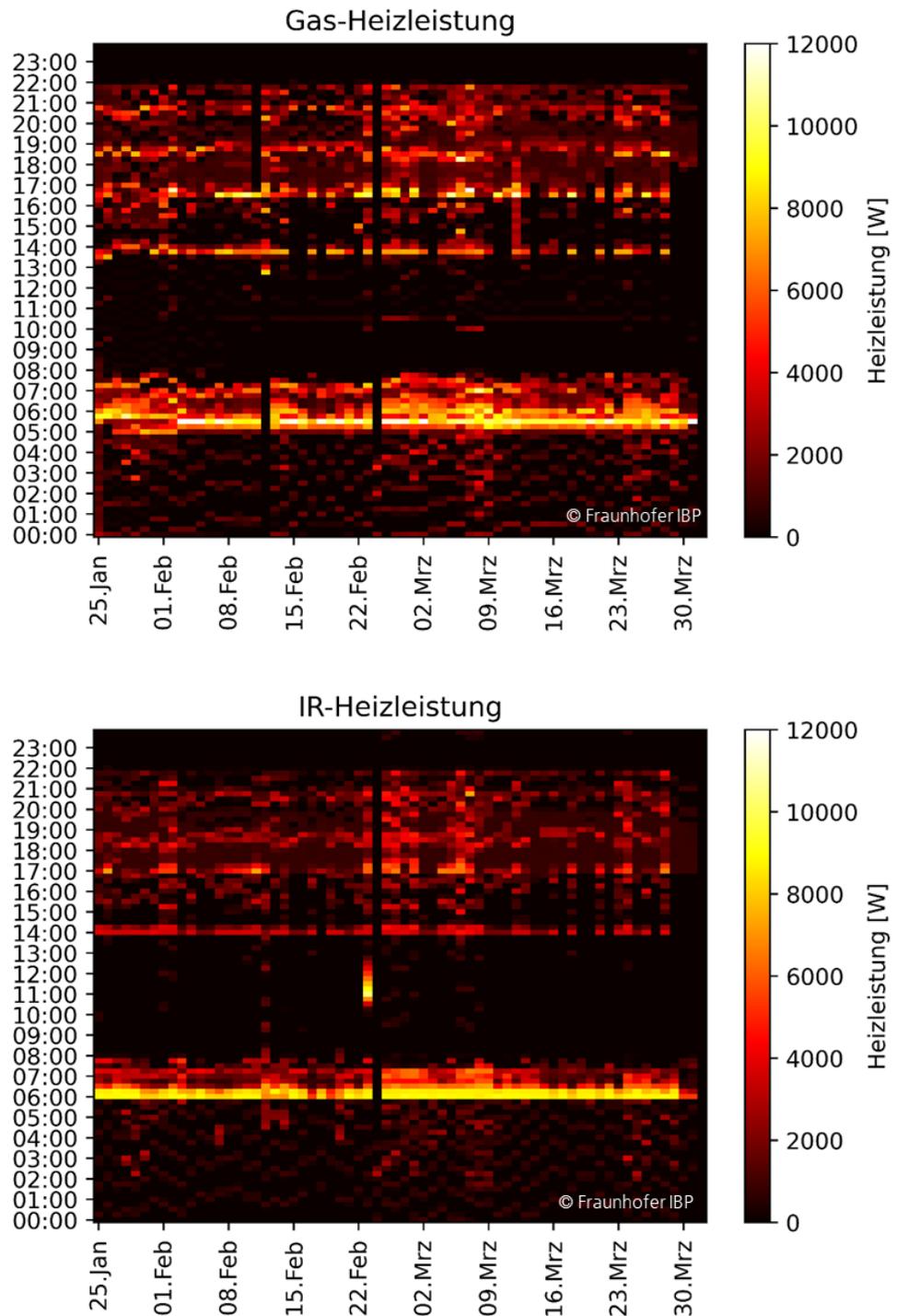


Bild 41:

Carpet- bzw. Heatmap-Plot der Heizleistung des Referenzhauses (oben) und des IR-Hauses (unten) während der gesamten Messperiode.

Hier liegen die Tage der Messperiode auf der X-Achse, die Uhrzeit auf der Y-Achse, während die Heizleistung durch die Farbe in der Fläche dargestellt wird; je heller die Farbe, desto höher die Heizleistung zum jeweiligen Zeitpunkt.

Tabelle 11 zeigt die gemessenen Verbräuche über die gesamte Messperiode mit Brennwertbezug und hinterlegt diese mit für den jeweiligen Energieträger typischen CO₂-Äquivalent-Lasten. Man kann erkennen, dass der Nutzenergieverbrauch des Referenzhauses 1.305±44 kWh beträgt und der des IR-Hauses 1.267±51 kWh (Messunsicherheitsangabe auf 95-%-Konfidenz-Niveau). Bezüglich der Nutzenergie sind die Gebäude bzw. Heizsysteme innerhalb der Messunsicherheit also vergleichbar.

Werden die Erzeugungs- und Verteilverluste beim Referenzhaus mit berücksichtigt, beträgt der gemessene Verbrauch (Brennwertbezug) 1.840±63 kWh, da Erzeugung und Verteilung sich außerhalb der thermisch bilanzierten Zone befinden (Szenario: unbeheizter Keller). Unter Berücksichtigung der elektrischen Hilfsenergie der Gas-Brennwerttherme erhöht sich der Endenergieverbrauch des Referenzhauses geringfügig auf 1.876±64 kWh, für den vorliegenden Fall, dass Erzeugung und Verteilung außerhalb der thermisch bilanzierten Zone liegen. Wenn sich die Erzeugung und Verteilung vollständig innerhalb der bilanzierten Zone befinden, würde sich die Nutzenergie um den nutzbaren Anteil der Erzeugungs- und Verteilverluste reduzieren, typischerweise jedoch nicht um den gesamten Verlustbetrag.

Die verhältnismäßig warme Witterung in der Messperiode dürfte dazu geführt haben, dass die Abgasverluste, An- und Abfahrverluste sowie Betriebs- und Bereitschaftsverluste im Verhältnis zur Nutzenergie einen anderen Anteil einnehmen als in einem typischen Winter.

Im unteren Teil von Tabelle 11 werden die gemessenen Endenergiebedarfs- werte mit entsprechenden CO₂-Faktoren hinterlegt, um Aussagen bezüglich des Treibhauspotentials zu erlauben. Für den elektrischen Strom werden 0,402 kg_{CO₂eq}/kWh angesetzt, für das Referenzhaus der erdgasbasierte Wert von 0,244 kg_{CO₂eq}/kWh. Künftige Veränderungen in der Zusammensetzung der Energieträger, wie Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung oder höhere H₂-, Biogas- oder LNG-Anteile im Gasnetz, sind in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Zur besseren Einordnung ist die historische Entwicklung der CO₂-Emissionen des Deutschen Strommix seit 1990 in Bild 42 dargestellt.

Tabelle 11:
Über die gesamte Messperiode summierte, gemessene Energieverbräuche (mit Brennwertbezug) und CO₂-Emissionen.

	Referenzgebäude (gasbeheizt)		IR-beheiztes Gebäude	
Nutzenergieverbrauch (innerhalb der bilanzierten Zone)	1.305	kWh	1.267	kWh
Verteilverluste (außerhalb der bilanzierten Zone)	239	kWh		
Erzeugungsverluste ¹	296	kWh		
Summe Wärmeverbrauch ²	1.840	kWh	1.267	kWh
Gasverbrauch	131,4	kg		
elektr. Hilfsenergie (Gastherme)	35,6	kWh		
Summe Endenergieverbrauch	1.876	kWh	1.267	kWh
Globales Erwärmungspotenzial – total (Erdgas; D) ³	0,244	$\frac{kg_{(CO2eq.)}}{kWh}$		
Globales Erwärmungspotenzial – total (Strom für Gebäudebetrieb; D) ⁴	0,402	$\frac{kg_{(CO2eq.)}}{kWh}$	0,402	$\frac{kg_{(CO2eq.)}}{kWh}$
Summe CO_{2eq.}-Ausstoß	463	kg_(CO2eq.)	510	kg_(CO2eq.)

¹: Abgasverluste, An- und Abfahrverluste sowie Betriebs- und Bereitschaftsverluste
²: Referenzgebäude: gemessener Gasverbrauch x Brennwert (14,0 kWh/kg)
³: ÖKOBAUDAT (EN 15804 + A2, Nutzung – Gas Brennwert < 20 kW)
⁴: ÖKOBAUDAT (EN 15804 + A2, Strom für Gebäudebetrieb 2021)

Entwicklung der spezifischen Emissionen des deutschen Strommix 1990-2022 und erste Schätzungen 2023 im Vergleich zu Emissionen der Stromerzeugung

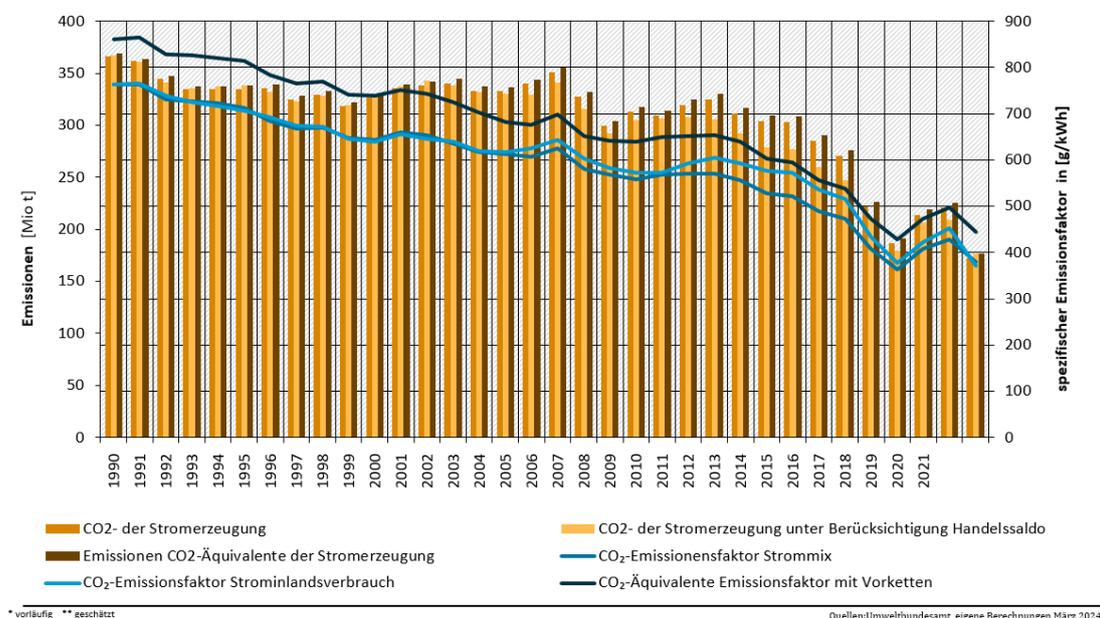


Bild 42:
Entwicklung der spezifischen Emissionen im deutschen Strommix 1990–2023
(Quelle: Deutsches Umweltbundesamt [10]).

5 Zusammenfassung

In den identischen Zwillingshäusern (Einfamilienhäuser) auf dem Freiland-Versuchsgelände des Fraunhofer IBP bei Holzkirchen wurden Messungen durchgeführt, um den Heizenergieverbrauch eines Gebäudes mit elektrischer Infrarotheizung (IR) und einem Referenzgebäude mit Gas-Brennwerttherme und Flachheizkörpern zu vergleichen. Hierfür wird in beiden Häusern das Nutzungsprofil einer Familie mit zwei Kindern angenommen. Eine Trinkwarmwasserbereitung war nicht Gegenstand der aktuellen Untersuchung. Die Räume beider Häuser werden derart geregelt, dass während der Nutzungszeiten der individuellen Räume der thermische Komfort, der anhand der Summengröße der operativen Raumtemperatur bewertet wird, möglichst identisch ist. Diese Messungen werden im Zeitraum vom 24. Januar bis 1. April 2024 durchgeführt. In diesem verhältnismäßig milden Winter beträgt der durchschnittliche Unterschied der operativen Raumtemperaturen während der Nutzungszeit (gemäß Anwesenheitsprofil) 0,2 Kelvin.

Es zeigt sich, dass der Wärmeverbrauch innerhalb der thermisch bilanzierten Zone bei beiden Einfamilienhäusern bzw. Heizsystemen im Rahmen der Messunsicherheit nahezu identisch ist (Nutzenergie-Niveau für Heizung ohne Trinkwarmwasserbereitung). So lag der Nutzenergieverbrauch des Referenzhauses bei 1.305 ± 44 kWh und der des IR-Hauses bei 1.267 ± 51 kWh (Messunsicherheitsangabe auf 95-%-Konfidenz-Niveau).

Beim IR-Haus gibt es keinen Unterschied zwischen dem Endenergie- und Nutzenergieverbrauch (1.267 ± 51 kWh), da vor Ort am Gebäude keine Erzeugungs- und Verteilverluste auftreten. Beim Referenzhaus hingegen, bei dem sich die Erzeugung und Verteilung im Keller (Szenario: unbeheizter Keller) befindet und somit außerhalb der thermisch bilanzierten Zone, entsteht eine Differenz zwischen dem Endenergie- und Nutzenergieverbrauch. Unter Berücksichtigung der Erzeugungs- und Verteilverluste im Keller sowie der elektrischen Hilfsenergie der Gastherme beträgt der Endenergieverbrauch für das Referenzhaus 1.876 ± 64 kWh (Messunsicherheitsangabe auf 95-%-Konfidenz-Niveau). Wenn sich die Erzeugung und Verteilung vollständig innerhalb der bilanzierten Zone befinden, würde sich die Nutzenergie um den nutzbaren Anteil der Erzeugungs- und Verteilverluste reduzieren, typischerweise jedoch nicht um den gesamten Verlustbetrag. Der Endenergieverbrauch würde sich in diesem Fall anteilig reduzieren.

Werden die gemessenen Endenergiemengen mit den $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Emissionen des jeweiligen Energieträgers multipliziert, betragen die Emissionen des Referenzhauses 462 ± 16 $\text{kg}_{\text{CO}_{2\text{eq}}}$, die des IR-Hauses 510 ± 20 $\text{kg}_{\text{CO}_{2\text{eq}}}$. Somit weist das IR-Haus aktuell etwas höhere Treibhausgasemissionen auf als das Referenzgebäude. Bei der $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Betrachtung sind keine künftigen Veränderungen bei der Zusammensetzung der verwendeten Energieträger oder eine anteilige lokale PV-Nutzung berücksichtigt. Die verhältnismäßig warme Witterung in der Messperiode dürfte dazu geführt haben, dass die Abgasverluste, An- und Abfahrverluste

sowie Betriebs- und Bereitschaftsverluste im Referenzgebäude im Verhältnis zur Nutzenergie einen anderen Anteil einnehmen als in einem typischen Winter.

6 Ausblick

In der vorliegenden Untersuchung wird der Heizenergieverbrauch identischer Gebäude verglichen, welche ausschließlich mit elektrischen Infrarotheizungen bzw. ausschließlich mit einer Gas-Brennwertheizung beheizt werden. Die vorliegende Untersuchung berücksichtigt keine Bereitstellung von Trinkwarmwasser (TWW), welche in allen Wohngebäuden typischerweise benötigt wird. Die beobachteten energetischen Verhältnisse werden sich verändern, wenn das Referenzsystem die TWW-Bereitung auch über die Gastherme realisiert, während die TWW-Bereitung im IR-Haus über einen Elektroboiler oder, wie vom Branchenverband IG Infrarot i.d.R. vorgeschlagen, über eine TWW-Wärmepumpe geschieht.

Unabhängig von der TWW-Bereitung gibt es aktuell eine Diskussion, Infrarotheizungen zur Spitzenlastabdeckung bzw. zur Unterstützung des Aufheizens bei Anwesenheitsbeginn in Gebäuden zu verwenden, welche über (Bestands-)Heizkörper beheizt und über eine Grundlast-Wärmepumpe versorgt werden. In einem derartigen Szenario kann eine kleiner dimensionierte, günstigere Wärmepumpe eine Grundtemperierung zur Verfügung stellen, während die Infrarotheizungen die verbleibende Spitzenheizlast tragen, wodurch ggf. keine oder weniger Heizkörper ausgetauscht bzw. ertüchtigt werden müssen.

Der Verzicht auf eine Wochenplanregelung und die Nutzung einer auf Präsenzmeldern basierenden anwesenheitsorientierten Regelung ist mit Infrarotheizungen möglich. Dadurch ergeben sich zusätzliche Einsparungen im Heizwärmebedarf.

Aus der schnellen Reaktionszeit von Infrarotheizungen können sich ggf. energetische Einsparpotentiale in Zusammenhang mit einer Fensteröffnungserkennung ergeben, welche jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung war.

Zur Einschätzung der Potentiale von elektrischen Infrarotheizungen zur Beheizung von Gebäuden wäre ergänzend zur energetischen und raumklimatischen Bewertung eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Vergleich zu konventionellen Heizungssystemen (insbesondere Wärmepumpen) nötig, welche sowohl die Investitionskosten als auch den laufenden Betrieb inkl. Wartung über die Lebensdauer der Systeme berücksichtigt.

Generell ist sowohl der Stand der Technik als auch der Stand der Wissenschaft bezüglich des thermischen Komforts bei instationärer Beheizung aktuell noch lückenhaft, insbesondere hinsichtlich Strahlungseinflüssen und lokaler Faktoren. Hierzu wären weitere Forschungsarbeiten wünschenswert. Zur Bewertung der Nutzerakzeptanz der in dieser Untersuchung diskutierten Systeme oder Systemkombinationen wäre es sinnvoll, ergänzende Messungen in real genutzten

Gebäuden oder detaillierte Probandenstudien in einer Klimakammer durchzuführen. Neben den realen Probanden können die Erkenntnisse durch temporäre Messungen mit dem DressMAN-Komfortmesssystem [11] weiter detailliert werden. Anhand der Messergebnisse sowie anhand des Nutzerfeedbacks wäre gleichzeitig ein Abgleich bzw. eine Überprüfung der im Rahmen der aktuell durchgeführten Vergleichsstudie zugrunde gelegten Annahmen zur messtechnischen Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Verbindung mit Infrarotheizungen möglich.

Die Entwicklung und Erprobung kostengünstiger und trägheitsarmer Komfortsensoren zur Anwendung in der Regelung, statt einer Lufttemperaturführung, könnte eine exaktere Einhaltung der Komforttemperatur ermöglichen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] m. DIN EN 13829:2001-09: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996).
- [2] DIN EN 12831 Beiblatt 1:2008-07: Heizsysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Nationaler Anhang NA.
- [3] M. Knorr, A. Meinenbach, L. Schinke, J. Seifert und A. Perschk: »Potentialbewertung von Infrarotheizungen als Spitzenlastabdeckung« TU Dresden, Dresden, 2023.
- [4] DIN V 18599 Teil 10: 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.
- [5] DIN EN ISO 7726:2021-03: Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen.
- [6] DIN EN IEC 60751:2023-06: Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren.
- [7] DIN V ENV 13005:1999-06: Leitfaden zur Angabe von Unsicherheiten beim Messen.
- [8] DIN EN 16798-1:2022-03: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [9] DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.

- [10] Umweltbundesamt: »Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen – Umweltbundesamt« 2024 [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Strommix>. [Zugriff am 29.07.2024].
- [11] »DressMAN Produktbeschreibung« [Online]. Available: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder-produkte/produktentwicklungen/dressman.html>.