

# Forschungsprojekt „IR-Bau 2“

## Ergänzende Untersuchungen zum Potenzial von IR-Heizsystemen

BBSR-  
Online-Publikation  
68/2024

von

Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark  
Dr.-Ing. Jan Heider  
Nicole Conrad  
Niklas Bachmann



# Forschungsprojekt „IR-Bau 2“

Ergänzende Untersuchungen zum Potenzial von IR-Heizsystemen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.46

Projektlaufzeit: 11.2020 bis 04.2023

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
Daniel Wöffen  
daniel.woeffen@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Hochschule für Technik Wirtschaft und Gestaltung (HTWG), Konstanz  
Fakultät Architektur und Gestaltung, Fachgebiet Energieeffizientes Bauen  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark (Projektleitung)  
Dr.-Ing. Jan Heider  
Dipl.-Ing. Nicole Conrad  
Niklas Bachmann

### Redaktion

Hochschule für Technik Wirtschaft und Gestaltung (HTWG), Konstanz

### Stand

März 2024

### Gestaltung

Hochschule für Technik Wirtschaft und Gestaltung (HTWG), Konstanz

### Bildnachweis

Titelbild: Dr.-Ing. Jan Heider  
Alle Fotos ohne Quellenangabe: Dr.-Ing. Jan Heider und Niklas Bachmann

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Stark, Thomas; Heider, Jan; Conrad, Nicole; Bachmann, Niklas, 2024: Forschungsprojekt „IR-Bau 2“: Ergänzende Untersuchungen zum Potenzial von IR-Heizsystemen. BBSR-Online-Publikation 68/2024, Bonn.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract in English	8
1. Einleitung	8
1.1 Projektthese	10
1.2 Forschungsfragen	10
1.3 Untersuchungsmethodik	11
2. Wissenschaftliche Begleitforschung Pilotprojekte	13
2.1 Beschreibung Pilotgebäude und Messkonzept	13
2.2 Messergebnisse der Pilotprojekte	28
2.2.1 MFH K76 Darmstadt	28
2.2.2 Mehrfamilienhaus Lauerz (CH)	31
2.2.3 Mikrohaus Singen	34
2.2.4 Bürogebäude Teningen	37
2.2.5 Betriebsgebäude Auerbach	40
2.2.6 Zusammenfassung Pilotprojekte	43
2.3 Nutzerbefragung	44
3. Strategien zur Optimierung des Lastprofils	57
3.1 Elektrische Lastprofile	57
3.2 Eigennutzungsgrad und solarer Deckungsgrad	58
3.3 Optimierung der Lastprofile	59
3.4 Optimierung des Lastprofils am Beispiel des Mikrohauses	63
3.5 Optimierung des Lastprofils am Beispiel von Wohnung 6 im Gebäude MFH K76	69
3.6 Optimierung des Lastprofils der Warmwassererzeugung am Beispiel von Gebäude MFH K76 und Mikrohaus	70
4. Laborraummessungen	72
4.1 Beschreibung des Laborraums	72
4.2 Beschreibung der eingesetzten Wärmeerzeuger	75
4.3 Beschreibung der eingesetzten Messtechnik & Regelungstechnik	78
4.4 Grundsysteme im Vergleich	81
4.4.1 IR-Heizung Decke zentral	84
4.4.2 IR-Heizung Decke dezentral	87
4.4.3 IR-Heizung Wand	90
4.4.4 Elektrische FBH	93
4.4.5 Stelen	96
4.4.6 Radiator	99
4.4.7 Konvektor	102
4.5 Zusammenfassung Grundsysteme	105

4.6 Ergänzende Vergleichsmessungen	107
5. Ergänzende Betrachtungen	120
5.1 Einfluss von gebäudeintegrierter Photovoltaik auf die Jahresbilanzen bei Stromdirektheizungen	120
5.2 Welche Auswirkungen hätte ein vermehrter Einsatz von Elektrodirektheizungen auf den Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung in Deutschland?	131
6. Zusammenfassung	138
Mitwirkende	144
Kurzbiographien	145
Verzeichnisse	146
Quellenverzeichnis	146
Abbildungsverzeichnis	147
Tabellenverzeichnis	153

## Kurzfassung

Im Vorgängerprojekt IR-Bau (SWD-10.08.18.7-17.11) wurde das Mehrfamilienhaus K76 messtechnisch und sozialwissenschaftlich begleitet. Es konnte gezeigt werden, dass IR-Heizungssysteme vollwertige, zuverlässige und einfach handhabbare Lösungen für die Wärmeversorgung von Gebäuden sind. Sie weisen zudem eine hohe Attraktivität auf, da sie die technisch einfachste Form der Wärmeversorgung darstellen und keiner typische Wärmeverteilsysteme mit allen dadurch verbundenen Komponenten und Maßnahmen bedürfen (Hydraulik, Pumpen, Ventile, Wärmemengenzähler, Meßdatenerfassung und –abrechnung etc.). Dies führt neben dem stark reduzierten Bedarf an Fachkräften insbesondere zu deutlich geringeren Investitionskosten und unterstützt damit in idealer Weise die Ziele eines einfachen und kostengünstigen Bauens sowie der Elektrifizierung der Wärmeversorgung.

Der große Nachteil gegenüber Wärmepumpensystemen liegt jedoch darin, dass keine lokalen Energiequellen genutzt werden und damit sowohl der Strombedarf als auch die Lastspitzen in der Heizperiode ungefähr dreimal so hoch sind (regenerativer Anergie-Anteil bei WP üblicherweise > 65%). Um diesen Nachteil auszugleichen wurde im Vorläuferprojekt bereits der Ansatz betrachtet, das durch den geringeren Investitionsbedarf „frei werdende“ Kapital ergänzend in die lokale Erzeugung von regenerativem Strom über Photovoltaikanlagen zu investieren. Dadurch ist es möglich, mit vergleichbarem oder sogar geringerem Gesamtinvest den gleichen oder sogar höheren Anteil an lokaler regenerativer Energie zu nutzen, und damit sowohl in ökologischer als auch ökonomischer Hinsicht Vorteile zu bewirken. Ergänzende Parameterstudien haben die These unterstützt, dass die Vorteile bei kleineren Wohngebäuden und auch bei Nichtwohngebäuden weiter zunehmen könnten.

Im Rahmen dieses Projektes konnten hierzu ergänzend zum MFH K76 vier weitere realisierte Gebäude mit Stromdirektheizungs-Systemen und Photovoltaikanlagen messtechnisch detailliert untersucht werden. Diese wurden über zwei Heizperioden einheitlich analysiert und insbesondere im Hinblick auf das Zusammenspiel von Stromdirektheizung mit photovoltaischer Stromerzeugung ausgewertet. Es liegen somit erstmals entsprechend belastbare Daten aus der Praxis vor, die eine Konkretisierung der Thesen ermöglichen. Aus den Messergebnissen der Pilotprojekte geht hervor, dass die Anpassung des Stromverbrauchs an die Stromerzeugung von hoher Relevanz für den solaren Deckungsgrad ist und damit auch Einfluss auf die ökologische und ökonomische Bilanz des Gesamtsystems hat. Maßnahmen zur Optimierung bestehen zum einen in der Planung der lokalen Stromerzeugung durch Photovoltaik, zum weiteren spielt das Potenzial zur Lastverschiebung eine große Rolle. Dies kann sowohl auf der elektrischen als auch auf der thermischen Seite erfolgen. Interessant ist die Variante, bei der am Beispiel des Mikrohauses über die thermische Aktivierung der Bodenplatte nahezu über die gesamte Heizperiode ein Wärmebedarf außerhalb der Sonnenstunden vermieden werden konnte. Dieser Ansatz verringert allerdings die Flinkheit einer typischen Infrarotheizung und erfordert eine teilweise Übertemperierung, die zu einer Reduktion der Behaglichkeit führen kann. Entscheidend für die effektive Nutzung der Speicherpotenziale ist eine entsprechend optimierte Regelung. In Kombination mit einer hohen spezifischen PV-Leistung konnte im Projekt Mikrohaus ein Autarkiegrad in der Wärmeversorgung von bis zu 66 % erreicht werden.

Die sozialwissenschaftliche Befragung der Teilnehmenden hat ergeben, dass die Nutzenden das IR-Heizsystem als thermisch „eher behaglich“ bis „behaglich“ empfinden und als „gut“ bis „sehr gut“ bedienbar bewerten. Weiterhin wurde als relevante Fragestellung postuliert, welche für die thermische Behaglichkeit im Raum relevanten Effekte durch unterschiedliche Arten der Wärmeerzeugung mit verschiedenen Strahlungsanteilen entstehen. Hierzu waren entsprechende Laboruntersuchungen erforderlich. Für das Projekt IR-Bau 2 bestand die Möglichkeit, das Forschungsgebäude ECOLAR auf dem Campus der HTWG um einen neuen Laborraum für Untersuchungen zum thermischen Verhalten unterschiedlicher Wärmeabgabesysteme zu erweitern. Dies bot erstmals die Gelegenheit, spezifische

Fragestellungen zur thermischen Behaglichkeit im Raum oder der thermischen Speicherfähigkeit verschiedener direktelektrischer Wärmeerzeuger bzw. Wärmeübergabesysteme vergleichend zu untersuchen. Hierfür wurden sieben unterschiedliche Wärmeerzeuger installiert, alle Systeme wurden unter vergleichbaren Randbedingungen vermessen und die Daten in einheitlichen Grafiken aufbereitet. Im Ergebnis liegen nun jeweils die zeitlich aufgelösten Lufttemperaturen in drei Ebenen sowie die operativen Temperaturen über Globesonden für 27 Punkte im Raum vor. Aus den Daten wurden die Aufheiz- und Abkühlphasen sowie die vertikalen und horizontalen Temperaturschichtungen analysiert, so dass erstmals eine detaillierte zeitliche und räumliche Wärmeverteilung für verschiedene Arten der Wärmeabgabe dokumentiert werden konnte.

In der vergleichenden Betrachtung ist zu erkennen, dass alle Systeme die Solltemperatur der Luft in Raummitte mit nur sehr geringen Abweichungen erreichen. Überraschend ist, dass sich dies im Mittel auch bei der operativen Temperatur über die Globesonden mit einer Bandbreite von 19,7 bis 20,2 °C abbildet, obwohl sich die Systeme in der Art der Wärmeabgabe stark voneinander unterscheiden. Einen nennenswerten generellen Unterschied in der zu erwartenden Behaglichkeit durch eine strahlungsoptimierte Wärmeabgabe lässt sich daher aus den Durchschnittswerten nicht ableiten, ebenso wenig ein Nachteil. Deutliche Unterschiede sind jedoch in der räumlichen Homogenität zu erkennen, hier weisen die strahlungsdominierten Systeme in den Histogrammen bessere Werte auf. Auf Basis der Untersuchungen der Grundsysteme wurden weitere Vergleichsmessungen durchgeführt, aus denen Erkenntnisse zu Fragen der Regelung, der räumlichen Anordnung von Heizelementen im Raum, zum Einfluss der Betriebstemperatur auf das Wärmeempfinden, zum Aufheizverhalten sowie zur Auswirkung von „Strahlungsschatten“ abgeleitet werden konnten.

Ergänzend wurden die Fragestellungen untersucht, inwieweit durch die Kombination mit Photovoltaik die Netzbelastung von Stromdirektheizungen optimiert werden und nach welchen Kriterien die Dimensionierung der Photovoltaikleistung sinnvoll erfolgen kann. Hierzu wurden am Beispiel eines gut gedämmten Einfamilienhauses unterschiedliche Szenarien berechnet und miteinander verglichen. Aus der Betrachtung konnte abgeleitet werden, dass eine Kombination von Stromdirektheizungen mit Photovoltaik sinnvoll ist und in der Jahresbilanz hohe solare Deckungsraten erreicht werden können. Das Ziel einer identischen Netzbelastung analog einer Wärmepumpe führt jedoch ohne lokale Langzeitspeicherung zu keinem realistischen oder sinnvollen Ergebnis, insbesondere mit dem Fokus auf die Kernmonate Dezember und Januar in der Heizperiode.

Abschließend wurde untersucht, welche Auswirkungen ein großmaßstäblicher Ausbau von Stromdirektheizungen auf den zukünftigen Ausbau an Erzeugungskapazität haben kann. Eine alternative Betrachtung bestand hierbei in dem Ansatz, dass der für Stromdirektheizungen erforderliche zusätzliche Ausbau an Erzeugungskapazitäten nicht lokal am Gebäude, sondern überregional an einer beliebigen Stelle des Stromnetzes erfolgen kann. In diesem Fall können auch andere regenerative Stromerzeugungsarten – wie insbesondere die Windkraft – als Ergänzungsmaßnahme in die Bilanz eingebunden werden. Als Grundlage diente eine Studie der zu erwartenden Stromentwicklung sowie eine Abschätzung mit beispielhaften Annahmen der Substitution von Wärmepumpen durch Stromdirektheizungen. Das Ergebnis zeigt, dass ein großmaßstäblicher Ausbau von Stromdirektheizungen anstelle von Wärmepumpensystemen für das zukünftige Stromnetz eine deutliche Mehrbelastung darstellen würde. Als Konsequenz kann daher zum aktuellen Zeitpunkt abgeleitet werden, dass der Einsatz von Stromdirektheizungen im Sinne der Energiewende nur in Situationen sinnvoll ist, in denen die Alternative dezentrale Wärmepumpe oder über Nahwärme aus technischer Sicht oder unter ökonomischen Aspekten nicht umgesetzt werden kann. Dies ist in der Regel bei Neubauprojekten selten der Fall und beschränkt sich im Wesentlichen auf kleinere Gebäude mit hohem baulichen Wärmeschutz, bei temporärer Nutzung oder in Hybridsystemen. Im Bestand liegt das Potenzial ergänzend bei Gebäuden ohne hydraulischem Wärmeverteilssystem.

## Abstract in English

In the predecessor project IR-Bau (SWD-10.08.18:7-17.11), the apartment building K76 was monitored both with measurements and social science research. It was demonstrated that infrared heating systems are fully functional, reliable, and easy-to-use solutions for building heating. They are highly attractive because they represent the simplest form of heating technology and do not require typical heat distribution systems with associated components and measures (hydraulics, pumps, valves, heat meters, data collection, and billing, etc.). This results in significantly reduced labor requirements and notably lower investment costs, thereby supporting the goals of simple and cost-effective construction and the electrification of heating. However, a major drawback compared to heat pump systems is the lack of utilizing local energy sources, resulting in approximately three times higher electricity demand and peak loads during the heating season (typically >65% renewable energy share with heat pumps). To offset this disadvantage, the predecessor project explored investing the capital freed up by lower investment costs into local renewable electricity generation through photovoltaic systems. This approach allows achieving a comparable or even higher share of local renewable energy with similar or lower overall investment, thereby delivering ecological and economic benefits. Additional parameter studies supported the thesis that these benefits could further increase for smaller residential buildings and non-residential buildings.

In this project, four additional buildings with electricity-based heating systems and photovoltaic installations were extensively monitored alongside the multi-family-house "K76" over two heating seasons. They were uniformly analyzed, focusing particularly on the interaction between electric heating and photovoltaic electricity generation. Consequently, there are now robust practical data available to refine these hypotheses. The results from the pilot projects emphasize the importance of matching electricity consumption with electricity generation for achieving a high solar coverage rate, which significantly impacts the ecological and economic performance of the entire system. Optimization measures include planning local electricity generation through photovoltaics and exploring potential for load shifting, both electrically and thermally. One interesting strategy involved in the "Microhouse" was avoiding the need for heat outside of sunny hours by using thermal activation of the floor slab throughout the heating season. However, this approach may reduce the responsiveness of typical infrared heating and require partial overheating, potentially reducing comfort. Effective utilization of storage potentials relies on optimized controls, combined with high specific PV output, achieving up to 66% self-sufficiency in heating in the Microhouse project.

The social science survey revealed that users perceive the IR heating system as "rather comfortable" to "comfortable" thermally and rate it as "good" to "very good" in terms of usability. Relevant questions posed included the thermal comfort effects of different heating methods with varying radiation levels, necessitating corresponding lab studies. For Project IR-Bau 2, the ECOLAR research building on the HTWG campus was expanded with a new laboratory space to study the thermal behavior of various heat distribution systems, offering specific insights into thermal comfort and storage capacity.

Seven different heat generators were installed under comparable conditions, documenting detailed temporal and spatial heat distribution patterns for different heat emission types.

As a result, detailed temporal and spatial heat distribution for various types of heat emission could be documented for the first time by analyzing the data, which includes time-resolved air temperatures in three levels and operational temperatures via globe sensors at 27 points in the room. The data enabled analysis of heating and cooling phases, as well as vertical and horizontal temperature stratifications.

Comparative analysis showed that all systems achieve the desired air temperature in the room center with minimal deviation. Surprisingly, this is reflected in the average operative temperature over the globes, ranging from 19.7 to 20.2 °C, despite significant differences in heat emission methods. Therefore,

a significant general difference in expected comfort due to radiation-optimized heat emission cannot be deduced from the average values, nor is there any disadvantage evident. However, notable differences in spatial homogeneity were observed, with radiation-dominant systems demonstrating better performance. Based on the investigations of the basic systems, further comparative measurements were conducted, yielding insights into questions of control, spatial arrangement of heating elements in the room, the influence of operating temperature on thermal perception, heating behavior, and the impact of "radiation shadows. Further investigations explored optimizing grid load through photovoltaic integration with electric heating systems and determining appropriate PV capacity sizing criteria. Calculations for various scenarios in a well-insulated single-family house indicated that optimizing electric heating with photovoltaics to match the grid load like a heat pump is not realistic or beneficial, especially during core heating months.

Finally, a study examined the potential impacts of large-scale electric heating expansion on future generation capacity, proposing that the additional capacity required for electric heating could be supplied regionally rather than locally. In this scenario, other renewable electricity generation methods, such as wind power, could also be integrated into the balance as complementary measures. This analysis was based on a study of expected electricity demand and an estimation using exemplary assumptions of substituting heat pumps with electric direct heating systems. The outcome indicated that a large-scale expansion of electric direct heating systems instead of heat pump systems would significantly burden the future electricity grid. Consequently, it can be concluded at the present time that the deployment of electric direct heating systems in line with the energy transition should only occur in situations where the alternative of decentralized heat pumps or district heating is not feasible from a technical or economic perspective. Since this is rarely the case in new construction projects, the potential primarily lies in existing buildings, particularly those lacking hydraulic heat distribution systems.

# 1. Einleitung

## 1.1 Projektthese

Im Vorläuferprojekt IR-Bau (SWD-10.08.18.7-17.11) wurden erstmals auf wissenschaftlicher Basis systematische Untersuchungen zur Effizienz und ein direkter Vergleich zu einem Wärmepumpensystem sowie einer elektrischen Fußbodenheizung durchgeführt. Ergänzend konnte ein hocheffizienter Geschosswohnungsbau messtechnisch und sozialwissenschaftlich begleitet werden. Im Ergebnis zeigte sich, dass der Strombedarf der IR-Heizung im Realbetrieb gegenüber dem Wärmepumpensystem deutlich geringer ist, als die üblich kommunizierten Jahresarbeitszahlen erwarten lassen. Über die gesamte Heizperiode ergab sich ca. der Faktor 2,9. Auch die Ergebnisse des Pilotprojektes waren positiv: Die gemessenen Verbrauchswerte lagen unter den Erwartungen und weisen noch Optimierungspotenzial auf. Die sozialwissenschaftliche Begleitung konnte ein hohes Maß an Nutzerzufriedenheit nachweisen.

Das Vorläuferprojekt IR-Bau hat aufgezeigt, dass Infrarot-Heizsysteme im hocheffizienten Geschosswohnungsbau ökologische und wirtschaftliche Vorteile gegenüber üblichen strombasierten Heizanlagen (Wärmepumpensysteme) aufweisen können. Es bestand die begründete Annahme, dass sich die Vorteile des IR-Systems bei kleinen Wohngebäuden und Gebäuden mit Büronutzung noch wesentlich stärker auswirken können. Entsprechende Untersuchungen waren daher erforderlich, um das Potenzial von IR-Heizsystemen umfassender einschätzen und praxisorientierte Planungsempfehlungen ableiten zu können. Die zweite These resultiert aus der Erkenntnis, dass Planer unter den aktuellen Randbedingungen über unzureichende Informationen zu Fragen der Systemauswahl, Dimensionierung und Montagekonzept im Raum verfügen. Zur Behebung sind systematische Laboruntersuchungen erforderlich, aus denen neue Erkenntnisse für IR-Heizsysteme und Planungshinweise abgeleitet werden können.

## 1.2 Forschungsfragen

Im Projekt wurden mehrere Forschungsfragen behandelt, die wesentlichen Themenfelder sind:

### Wie wirken sich verschiedene Gebäudetypologien auf die Effizienz eines IR-Heizungssystems aus?

Im Projekt IR-Bau wurde das Gebäude K76 messtechnisch begleitet. Die Erkenntnisse aus dem IR-Bau Projekt führen zu der Annahme, dass andere Gebäudetypologien deutlich größere Vorteile für IR-Heizsysteme bieten, insbesondere bei Bürogebäuden. Das Anwesenheitsprofil der Angestellten und damit das Wärmebedarfsprofil deckt sich im Tagesverlauf mit den Zeiten möglicher solarer Wärmegevinne und Stromerzeugung. In der Nacht und am Wochenende kann die Raumtemperatur durch die geringe Trägheit des IR-Systems sehr flexibel abgesenkt werden. Diese Aspekte können zu einer weiteren Reduzierung der Betriebskosten und zu einem höheren Eigendeckungsgrad mit regenerativ erzeugtem Strom führen. Gibt es in einem Bürogebäude fest definierte Arbeitsplätze / -Bereiche, kann mit IR-Heizungen eine lokale Behaglichkeit hergestellt werden ohne den gesamten Raum zu erwärmen.

Weiterhin ist in kleineren, gut gedämmten Ein- und Mehrfamilienhäusern der Unterschied in den Systemkosten zwischen WP-System und IR-System deutlich größer. Bei gleichen Investitionskosten kann so im Verhältnis zum Wärmeenergiebedarf eine größere PV Anlage mit Stromspeicher zugebaut werden als in einem großen Wohngebäude. Dies kann die ökologischen und ökonomischen Vorteile der IR-Heizung gegenüber der WP-Heizung deutlich erhöhen.

### Wie lässt sich die Netzdienlichkeit eines IR-Systems optimieren?

Um ein IR-System ökologisch und ökonomisch optimal betreiben zu können, ist ein hohes Maß an Verbrauch des lokal regenerativ erzeugten Stroms durch Photovoltaiksysteme vorteilhaft. Die Kombination von IR-Heizung, PV-Anlage, Warmwassererzeugung und Stromspeicher bieten zusammen mit einer sehr flexiblen Regelbarkeit der IR-Heizungen großes Optimierungspotential.

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

Das Projekt IR-Bau hat gezeigt, dass für einen effizienten Betrieb einer IR-Heizung eine Deckenmontage von Vorteil ist. Jedoch führt eine Deckenmontage bei IR-Heizungen mit hoher Oberflächentemperatur, aufgrund der sehr lokalen Wärmeabgabe zu Strahlungsasymmetrien im Raum. Es ist daher zu klären, wie sich unterschiedliche Arten der Wärmeübergabe auf die dreidimensionale Wärmeverteilung im Raum und damit auf die Behaglichkeit auswirken.

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

Für die Optimierung der Netzdienlichkeit (Eigenversorgung / Netzbezug in Menge und Zeitpunkt) müssen neben den Verbrauchskennwerten auch die Auswirkungen auf die gesamte Netzinfrastruktur Deutschlands berücksichtigt werden. Insbesondere die tendenziell höheren Strombedarfe in der Heizperiode und ggf. höhere Lastspitzen werden in ihrer Wirkung auf die Erzeugungskapazitäten betrachtet.

## 1.3 Untersuchungsmethodik

Für das Forschungsprojekt konnten vier weitere, sehr gut geeignete Pilotprojekte gefunden werden, die mit Infrarotsystemen ausgestattet sind und messtechnisch analysiert werden konnten. Weiterhin ergab sich die Möglichkeit, für das Projekt einen eigenen, spezifischen Laborraum auf dem Gelände der Hochschule zu erstellen und messtechnisch auszustatten. Die Bearbeitung der Forschungsfragen konnte daher einerseits durch die wissenschaftliche Begleitung der Pilotprojekte sowie über die Durchführung systematischer, vergleichender Messungen im Testraum unter Laborbedingungen erfolgen.

Im ersten Forschungsstrang erfolgte die wissenschaftliche Begleitung der Pilotprojekte mit messtechnischer Auswertung und Nutzerbefragung. Hierzu wurden zusätzlich zu dem im ersten IR-Bau-Projekt untersuchten großen Mehrfamilienhaus ein kleineres Mehrfamilienhaus und ein sehr kleines Einfamilienhaus (Mikrohaus) messtechnisch über zwei Heizperioden untersucht. Ergänzend konnten zwei unterschiedliche Bürogebäude mit verschiedenen Randbedingungen bezüglich Größe, PV-Leistung und Regelungssystemen wissenschaftlich begleitet werden (siehe Kapitel 2 Wissenschaftliche Begleitforschung Pilotprojekte). Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte eine messtechnische Begleitung und Auswertung über die beiden Heizperioden 2021/2022 und 2022/2023. Als Grundlage für das Monitoringkonzept diente der Leitfaden für das Monitoring der Demonstrationsbauten im Förderkonzept EnBau und EnSan. Ergänzt wurden diese Daten mit der Auswertung einer Nutzerbefragung, die nach den Prinzipien sozialwissenschaftlicher Methoden erfolgte und sich ebenfalls über beide Heizperioden erstreckten. In einer ergänzenden Detailbetrachtung wurden Auswirkungen von Regelstrategien auf das Lastprofil von Direktstromheizungen und die elektrische Trinkwassererwärmung (siehe Kapitel 3 Strategien zur Optimierung des Lastprofils).

Im zweiten Forschungsstrang wurden unter Laborbedingungen in einem speziellen Testraum vergleichende Messungen durchgeführt. Es wurden sämtliche Energieströme sowie alle relevanten Kennwerte zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit (Raumluftfeuchte, Raumlufttemperatur,

Operative Raumtemperatur, spezifische Oberflächentemperaturen, Strahlungsasymmetrie) gemessen und ausgewertet (siehe Kapitel 4 Laborraummessungen).

In einem dritten Forschungsstrang wurden ergänzende Berechnungen durchgeführt. Im Fokus standen hier Untersuchungen zum Einfluss der lokalen Stromerzeugung über Photovoltaik auf den Netzbezug von IR-Heizungen gegenüber Wärmepumpensystemen sowie Abschätzungen der Auswirkungen eines Ausbaus von Direktstromheizungen auf den zukünftigen Strombedarf in Deutschland (siehe Kapitel 5 Ergänzende Berechnungen).

## 2. Wissenschaftliche Begleitforschung Pilotprojekte

Im Vorgängerprojekt IR-Bau (SWD-10.08.18.7-17.11) wurde das Mehrfamilienhaus K76 messtechnisch und sozialwissenschaftlich begleitet. Durch die Untersuchungen und ergänzende Vergleichsrechnungen mit einem alternativen Wärmepumpensystem konnte gezeigt werden, dass IR-Heizungssysteme in Kombination mit Photovoltaikanlagen unter bestimmten Umständen ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber Wärmepumpensystemen aufweisen können. Anschließende Parameterstudien haben die These unterstützt, dass die Vorteile bei kleineren Wohngebäuden und auch bei Nichtwohngebäuden weiter zunehmen könnten. Im Rahmen dieses Projektes konnten zur Beantwortung dieser These ergänzend zum MFH K76 vier weitere realisierte Gebäude mit Stromdirektheizungssystemen messtechnisch detailliert untersucht werden. Insgesamt handelt es sich um folgende Typologien:

- Mehrfamilienhaus, 15 Wohneinheiten, ca. 1.360 m<sup>2</sup> beheizte Fläche
- Mehrfamilienhaus, 6 Wohneinheiten, ca. 515 m<sup>2</sup> beheizte Fläche
- Einfamilienhaus, 1 Wohneinheit, ca. 50 m<sup>2</sup> beheizte Fläche
- Bürogebäude, 1 Nutzungseinheit, ca. 400 m<sup>2</sup> beheizte Fläche
- Betriebsgebäude mit Büroeinheit, 1 Nutzungseinheit, ca. 100 m<sup>2</sup> beheizte Fläche

Im folgenden Kapitel 2.1 werden die Gebäude sowie das jeweilige Messkonzept beschrieben, die Ergebnisse der Messungen sind in Kapitel 2.2. dargestellt. In Abschnitt 2.3 erfolgen vertiefende Untersuchungen zur Optimierung der Lastprofile, abschließen werden die Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitung der Pilotprojekte in Kapitel 2.4 erläutert.

### 2.1 Beschreibung Pilotgebäude und Messkonzept

#### MFH in Darmstadt (K76)

##### Beschreibung Gebäude

Das Mehrfamilienhaus K76 befindet sich am südöstlichen Rand der Innenstadt von Darmstadt. Eigentümer ist eine private Baugenossenschaft. Die Planung und Umsetzung wurde von „werk.um Architekten“ aus Darmstadt übernommen, fertiggestellt wurde das Haus im Sommer 2017. Es ersetzt, im Sinne der Nachverdichtung, ein Wohnhaus mit zwei Wohneinheiten aus den 1960er Jahren. Das neue Gebäude hat vier Geschosse und ist teilweise unterkellert. Es bietet auf ca.1.360 m<sup>2</sup> Wohnfläche Platz für ca. 40 Bewohner in 15 Wohneinheiten zwischen 50 und 120 m<sup>2</sup>. Zusätzlich gibt es eine Gemeinschaftswohnung, die von allen Bewohnern des Hauses genutzt werden kann.



Abbildung 1: MFH in Darmstadt, Süd-West Ansicht

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

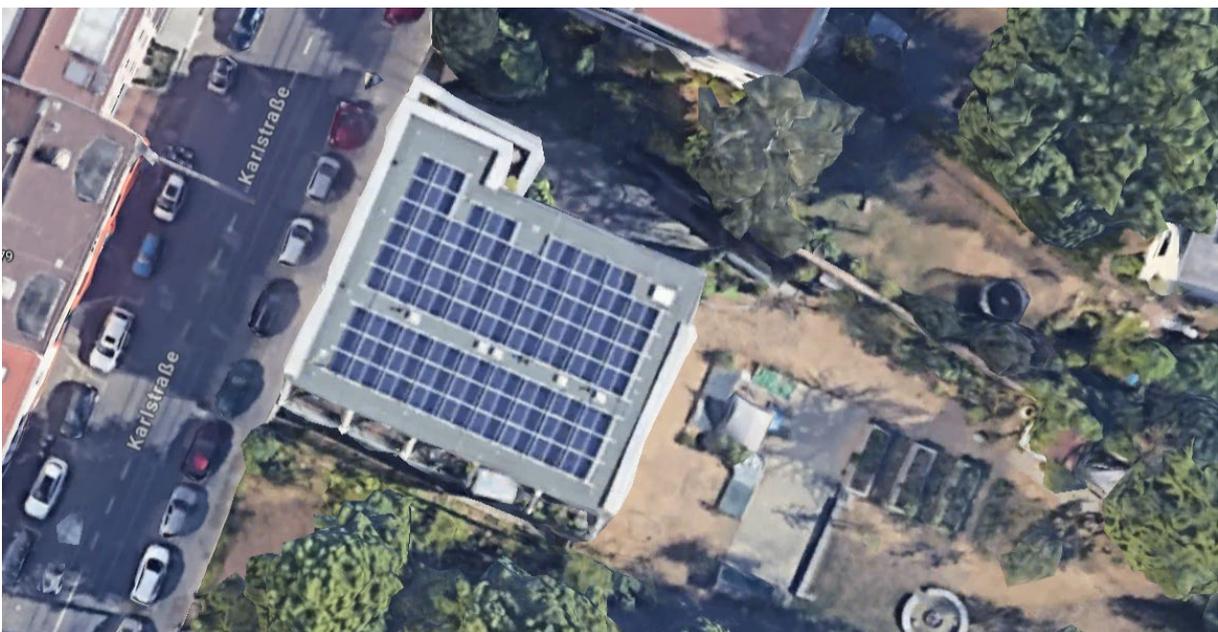


Abbildung 2: MFH in Darmstadt Luftbild mit PV-Anlage, Foto: Google, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies

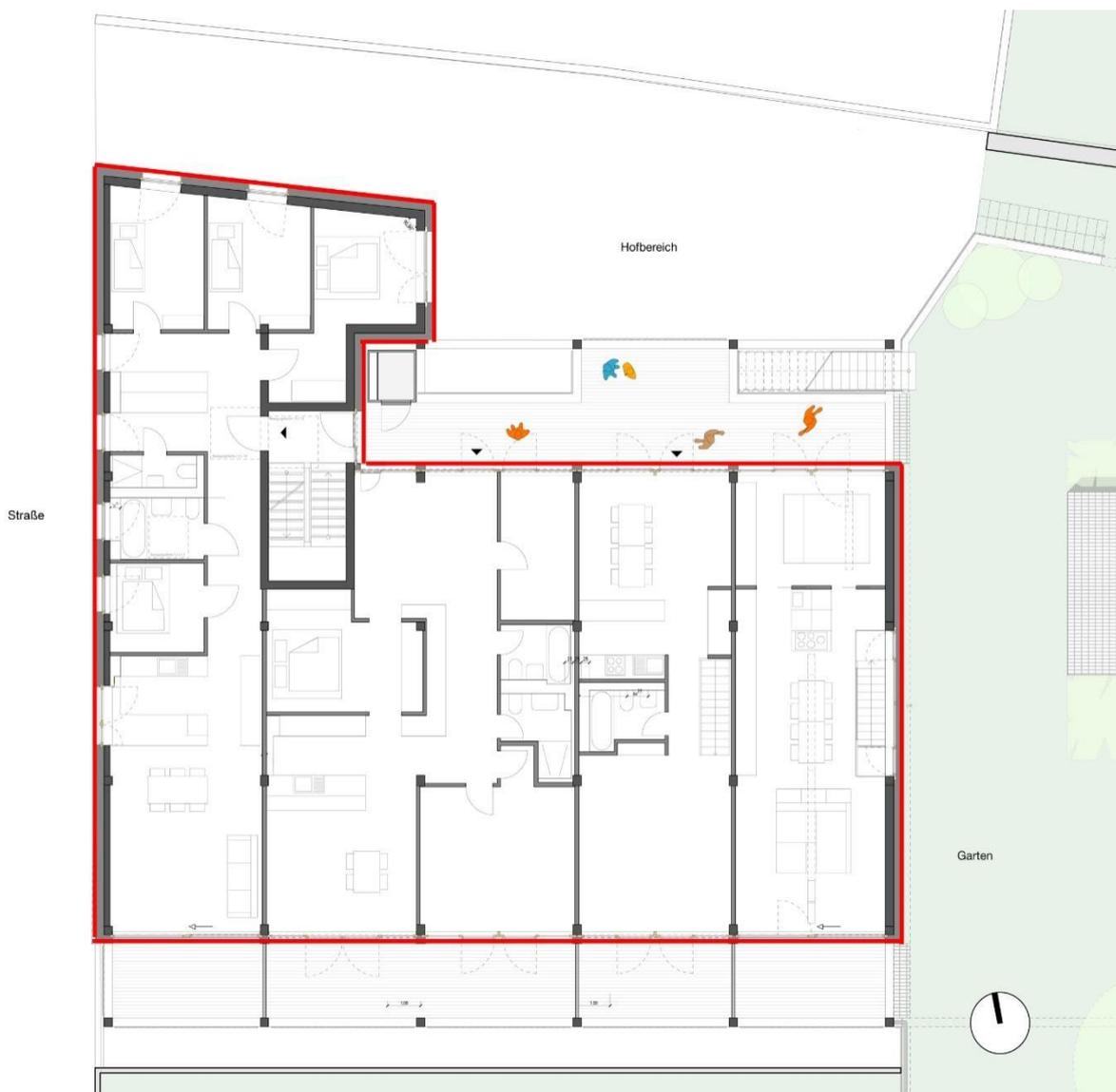


Abbildung 3: MFH in Darmstadt Grundriss & thermische Hülle, Zeichnung: werk.um architekten, Darmstadt

### Beschreibung Energiekonzept

Der Baugenossenschaft war es wichtig, ein Gebäude mit einem einfachen und resilienten Gebäudetechniksystem zu erstellen. Das System sollte einen geringen Materialaufwand und Platzbedarf haben, dezentral, wartungsarm, flexibel und langlebig sein und jedem Bewohner maximale Kontrolle über seine Verbräuche ermöglichen. Für die Wärmeversorgung fiel daher die Wahl auf ein Infrarotheizungssystem. Je nach Größe der Wohnung wurden IR-Module der Firma Vitramo mit insgesamt 2,2 – 3,7 kW Heizleistung installiert. Die einzelnen Module haben eine Leistung von 550 Watt und sind Aufputz an der Decke montiert. Sie erreichen eine Oberflächentemperatur von maximal 180 °C. Über ein raumweise angebrachtes Thermostat kann die Raumtemperatur flexibel geregelt werden. Neben dem Anschluss der Module an die Thermostate und das sowieso benötigte Wohnungsstromnetz war für den Betrieb der Heizungen keine weitere Infrastruktur nötig. Die Abrechnung erfolgt über den Wohnungsstromzähler im Keller. Die Investitionskosten sowie der Aufwand an grauer Energie für

Heizraum, zentraler Wärmeerzeuger, Wärmequellenerschließung, Pufferspeicher, Pumpen, Ventile, Leitungen samt Leitungsdämmung, Wärmemengenzähler und dessen Ablesung, Heizkreisverteiler, Fußbodenheizung und Heizestrich entfielen somit. Für große Wohnungen (ab 120 m<sup>2</sup> und Anschlussleistung > 16 A) brauchte es nach Vorgabe der Bundesnetzagentur ein Lastabwurfrelais. Um dies zu vermeiden, hätte eine separate Zuleitung für die IR-Heizung gelegt werden müssen. In künftigen Projekten wäre dieses Vorgehen zu bevorzugen. Unterstützt wird das somit rein elektrische System von einer 36,2 kWp Photovoltaikanlage auf dem Flachdach. Bezogen auf die beheizte Fläche ergeben sich ca. 27 Wp/m<sup>2</sup> PV-Leistung. Die Warmwasserbereitung erfolgt ebenso dezentral und wohnungsweise über Durchlauferhitzer mit 21 kW Leistung von Stiebel Eltron. In einzelnen Wohnungen werden diese durch 5 Liter fassende Warmwasserboiler in den Küchen unterstützt. Somit entfällt auch hier ein zentraler Warmwasserspeicher und alle Leitungen inklusive deren Dämmung sowie Verluste, die durch Speicherung, Verteilung und Zirkulationsleitungen entstehen würden. Der Stromverbrauch für die Warmwassererzeugung wird vom Wohnungsstromzähler erfasst und direkt über den Stromanbieter abgerechnet. Der Abrechnungsaufwand reduziert sich somit auf das Ablesen der Kaltwasserverbräuche. Maßnahmen gegen Legionellen, wie z.B. das regelmäßige Aufheizen von Speichern auf über 60 °C entfallen ebenso. Die hohen Einzelleistungen der Durchlauferhitzer erfordern jedoch eine sehr hohe Gesamtanschlussleistung (16 x 21 kW x 0,4 GF = 130 kW). Es musste daher zur Sicherstellung der Versorgung eine vergrößerte Anschlussleitung zum Haus verlegt werden. Durch Einsatz eines Stromspeichers mit entsprechend großer Leistungsabgabe hätte man auf die vergrößerte Anschlussleitung verzichten können. Dies wurde jedoch erst im fortgeschrittenen Planungsablauf erkannt. In künftigen Projekten wäre die Speichervariante, auch wegen der positiven Auswirkungen auf den Eigenverbrauch des von der Photovoltaikanlage erzeugten Stroms, zu bevorzugen. Ein geplanter Stromspeicher von BMW als „Second Life“ Speicher mit 30-60 kWh Speicherkapazität wurde aus Kostengründen zurückgestellt. Um den Energieverbrauch zu reduzieren, wurde neben einer gut gedämmten Hülle, pro Wohnung eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingebaut.

### Beschreibung Messkonzept

Für die separate Messung der Stromverbräuche von IR-Heizung, Durchlauferhitzer und Lüftung wurden für das Projekt pro Wohnung MID geeichte Stromzähler von Eltako in die jeweiligen Sicherungskästen der Wohnungen nachträglich eingebaut. Um den Zugriff auf die Daten zu vereinfachen, wurden alle 48 Zähler über die S0 Schnittstelle mit einem zentralen Datenlogger (Loxone Miniserver) im Keller verbunden. Hier werden die Verbräuche und die aktuelle Leistung im Minutenintervall aufgezeichnet. Der Zugriff auf die Daten kann Online erfolgen. Die wichtigsten Kennwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 1: Merkmale MFH K76

Bezeichnung	MFH K76 Darmstadt
Standort	Darmstadt HE
Gebäudetyp	MFH
Gebäudenutzfläche	1.360 m <sup>2</sup>
Spezifischer Verbrauch Heizwärme	17 kWh/m <sup>2</sup> a (2022)
Typ Heizung	IR Decke / 72,4 kW gesamt
spezifische installierte Heizleistung	53 W/m <sup>2</sup>
Leistung PV	36 kWp
spezifische Leistung PV	27 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung / Nachtabsenkung

## MFH in Lauerz (CH)

### Beschreibung Gebäude

Das Mehrfamilienhaus befindet sich in der Mitte des Ortes Lauerz in der Schweiz im Kanton Schwyz. Die kleine Ortschaft am Lauerzer See liegt auf einer Höhe von etwa 450 m ü.N.N und ist von Bergen umgeben. 2007 wurde das Gebäude von der Fink Architekten AG neu erbaut. Das Haus bietet auf 515 m<sup>2</sup> Wohnfläche Platz für 6 Wohneinheiten. Pro Geschoss sind jeweils eine kleinere Wohnung mit ca. 60 m<sup>2</sup> und eine größere mit ca. 100 m<sup>2</sup> angeordnet. Insgesamt verfügt das Gebäude über 3 Geschosse und ist vollständig unterkellert.

Das auf einem rechteckigen Grundriss basierende Gebäude mit einem 25° geneigten Satteldach wird im EG über einen Zugang im Westen erschlossen. Dieser führt in das zentrale Treppenhaus mit Aufzug über welches alle Wohnungen zugänglich sind. Die kleineren Wohnungen verfügen zusätzlich im Nordwesten über einen innenliegenden Balkon. Für die größeren Wohnungen wurde Nachträglich an der Südfassade jeweils ein Wintergarten angebracht.



Abbildung 4: MFH in Lauerz Ansicht Süd / West

### Beschreibung Energiekonzept

Da eine Erdwärmepumpe nicht bewilligt wurde und eine Luft-Wärmepumpe zum damaligen Zeitpunkt noch nicht für MFH-Gebäude tauglich waren, fiel die Wahl letztlich auf eine IR-Heizung der Firma Ökoswiss. In den größeren Wohnungen wurden jeweils 9, in den kleineren Wohnungen 7 Infraroheizkörper vom Typ „infraSWISS“ mit einer Leistung zwischen 400 und 900 Watt an der Decke verbaut. Die Warmwasserbereitung erfolgt ebenfalls direktelektrisch über dezentrale Durchlauferhitzer oder Elektroboiler. Seit 2019 versorgt eine Ost-West orientierte 38 kWp PV-Anlage das Gebäude mit

regenerativem Strom. Bezogen auf die beheizte Fläche ergeben sich ca. 74 Wp / m<sup>2</sup> PV-Leistung. Die PV-Anlage wird besonders in den Wintermonaten durch das im Süden weit aufragende Rigi-Massiv verschattet. Die Belüftung der Wohnungen erfolgt manuell über die Fenster. Im Sommer schützen die Fensterläden das Gebäude vor Überhitzung.

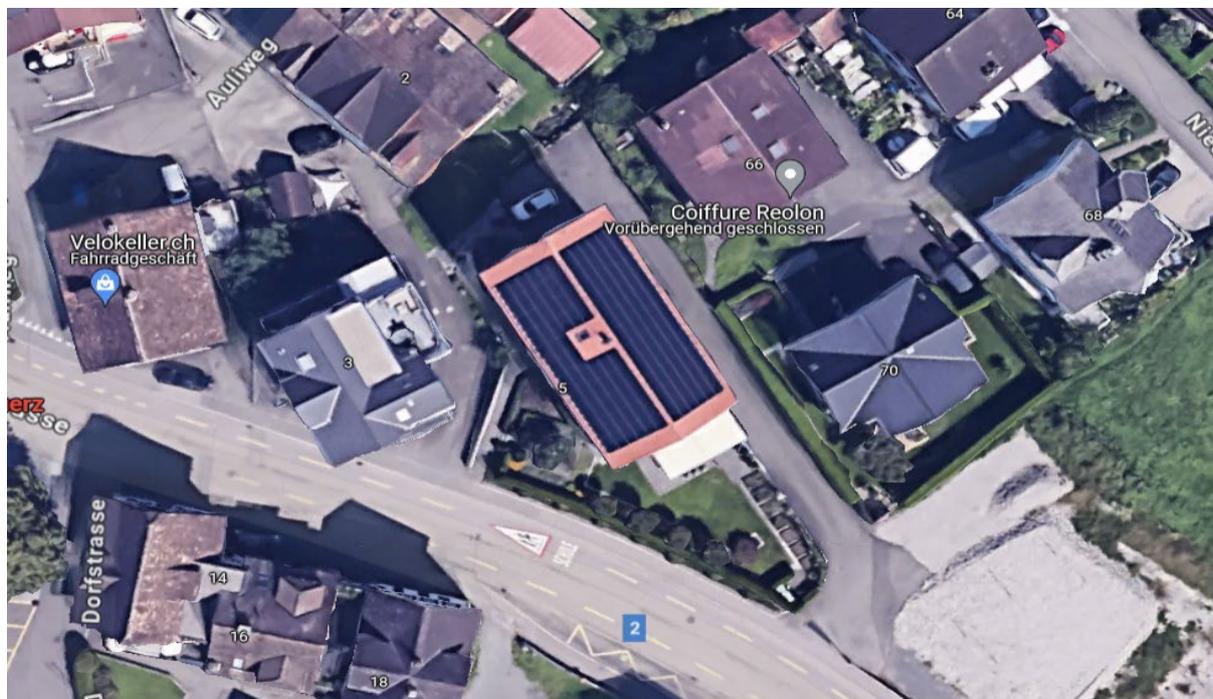


Abbildung 5: MFH in Lauerz, Dachaufsicht, Foto: Google CNES / Airbus, Maxar Technologies



Abbildung 6: MFH in Lauerz Grundriss

### Beschreibung Messkonzept

Der Stromverbrauch der IR-Heizungen wurde bereits seit Erstellung des Gebäudes separat mit Stromzählern erfasst. Im Zuge des Forschungsprojekts wurden die vorhandenen Stromzähler über Ihre S0 Schnittstelle an die digitale Extension von Loxone und diese an einen Loxone Miniserver Go angeschlossen. Damit war es möglich den Verbrauch und die Leistung der IR-Heizungen in geringer zeitlicher Auflösung aufzuzeichnen. Neben dem Verbrauch der IR-Heizungen wurden über Loxone Funktemperatursensoren auch die Temperaturen und die Luftfeuchtigkeit in den einzelnen Wohnungen, sowie die Außentemperatur aufgezeichnet. Über Modbus TCP wurden die beiden Wechselrichter von Fronius an den Loxone Miniserver Go angeschlossen, und so der Ertrag der PV-Anlage aufgezeichnet.

Die Bewohner des Hauses wurden einmal im Monat über einen Onlinefragebogen zur Behaglichkeit und Bedienbarkeit der IR-Heizungen befragt. Die wichtigsten Kennwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 2: Merkmale MFH in Lauerz

Bezeichnung	MFH Lauerz (CH)
Standort	Lauerz CH
Gebäudetyp	MFH
Gebäudenutzfläche	515 m <sup>2</sup>
spezifischer Verbrauch Heizwärme	32 kWh/m <sup>2</sup> a (2022)
Typ Heizung	IR, 27 kW gesamt
spezifische installierte Heizleistung	52 W/m <sup>2</sup>
Leistung PV	38 kWp
spezifische Leistung PV	74 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung / Nachtabenkung

## EFH in Singen (Mikrohaus)

### Beschreibung Gebäude

Das Wohngebäude „Mikrohaus“ in Singen wurde 2020 von „Kupprion nachhaltige Architektur“ geplant und auf einem Restgrundstück im Sinne der Nachverdichtung gebaut. Der eingeschossige Kubus bietet auf ca. 50 m<sup>2</sup> und drei Räumen Platz für zwei Bewohner. Das Gebäude ist in Holzrahmenbauweise mit einer Holzweichfaserdämmung errichtet und verfügt über eine innen sichtbare Massivholzdecke.

Das Gebäude wird über die Nordseite erschlossen und ist im inneren in 3 Bereiche gegliedert, den zentralen Wohnbereich und den seitlich angeordneten Privaträumen mit Schlafzimmer und Bad. Nach Süden hin ist das Gebäude großzügig verglast, während die restlichen Außenwandflächen fast vollständig geschlossen sind.



Abbildung 7: Mikrohaus in Singen, Ansicht Süd-West

### Beschreibung Energiekonzept

Zur Wärmeversorgung des Hauses wurde der Einsatz einer Wärmepumpe geprüft. Für das kleine Gebäude mit dem zu erwartenden geringen Wärmeumsatz war das Wärmepumpensystem jedoch vergleichsweise teuer in den Investitionskosten. Alternativ wurde ein auf Eigenverbrauch optimiertes, direktelektrisches Heizsystem eingebaut. Das System besteht aus vier Komponenten:

- Einer elektrischen Fußbodenheizung (5 kW von Devi Danvoss) mit zwei Heizkreisen, die direkt in die 22 cm starke Betonbodenplatte des Gebäudes eingegossen wurde. Die in der Bodenplatte verlegte Heizung ermöglicht es, den Beton als thermischen Speicher zu nutzen.
- Einem elektrischen Warmwasser-Flachboiler EKF-120 von Austriaemail mit 120 l, der in die Zwischenwand zwischen Küche und Bad eingebaut wurde.
- Einer 8,3 kWp PV-Anlage, die Ost/West ausgerichtet mit 5° Neigung auf dem Flachdach montiert ist. Verschattet wird die Anlage hauptsächlich durch höhere Bäume der benachbarten Grundstücke. Bezogen auf die beheizte Fläche ergeben sich ca. 166 Wp / m<sup>2</sup> PV-Leistung.

- Zur Verknüpfung der Verbraucher und Erzeuger kommt ein AC-Thor 3s der Firma MyPV zum Einsatz um den Eigenverbrauch des durch die PV-Anlage erzeugten Stroms zu maximieren. Die Lüftung im Badezimmer erfolgt automatisch über eine Anlage mit eingebauter Wärmerückgewinnung, die restlichen Räume werden manuell über die Fenster belüftet.

Das Gebäude wurde als Renditeobjekt entwickelt. Um dem Mieter Anreize für einen effizienten Umgang mit der Stromdirektheizung zu bieten, profitiert er direkt von den geringeren Stromkosten, wenn er durch sein Verhalten den solaren Deckungsgrad positiv beeinflusst. Zusätzlich bekommt er die Vergütung für den eingespeisten Strom gutgeschrieben.

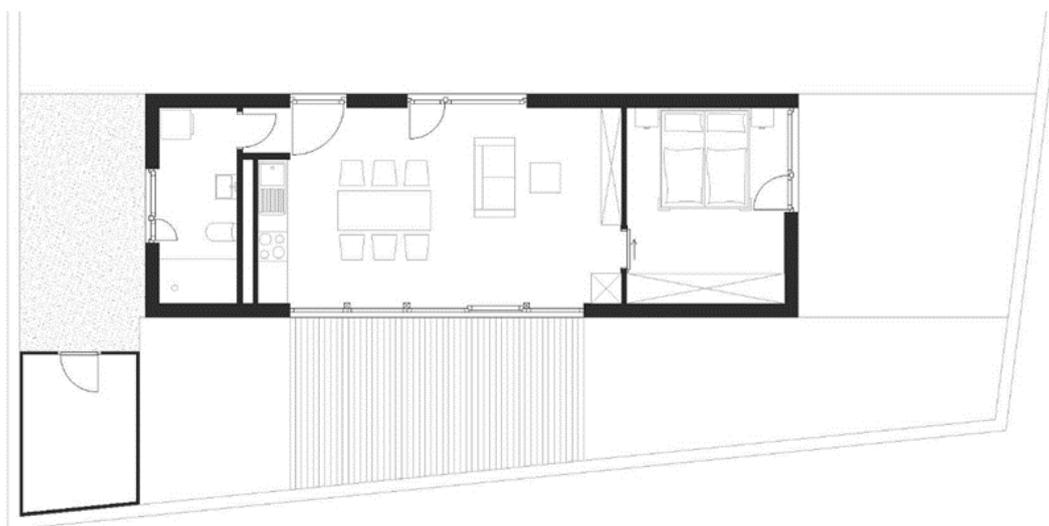


Abbildung 8: Mikrohaus in Singen Grundriss, Zeichnung: Philipp Kupprion

### Beschreibung Messkonzept

Es wurden der Stromverbrauch der elektrischen Fußbodenheizung, des Elektroboilers und der Lüftungsanlage separat gemessen, Verbrauch und Leistung wurden im Minutentakt aufgezeichnet. Über Modbus TCP wurde der Ertrag der PV Anlage aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgte über einen Miniserver GO. Die Stromzähler wurden über die S0 Schnittstelle und eine Digitalextension an den Miniserver angeschlossen. Zusätzlich wurde die Raumtemperatur, die Außentemperatur und die Temperaturen der Bodenplatte an vier Punkten und in drei Schichttiefen gemessen (siehe Abbildung 50 Seite 66). Die wichtigsten Kennwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:



Abbildung 9: Mikrohaus in Singen, Aufsicht Dach mit PV-Anlage, Foto: Philipp Kupprion

Tabelle 3: Merkmale Mikrohaus in Singen

Bezeichnung	Mikrohaus Singen
Standort	Singen BW
Gebäudetyp	EFH
Gebäudenutzfläche	50 m <sup>2</sup>
Spezifischer Verbrauch Heizwärme	37 kWh/m <sup>2</sup> a (2022)
Typ Heizung	el. FBH 4,3 kW
spezifische installierte Heizleistung	86 W/m <sup>2</sup>
Leistung PV	8,6 kWp
spezifische Leistung PV	164 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung / Nachtabenkung / PV-geführt

## Bürogebäude in Teningen

### Beschreibung Gebäude

Das eingeschossige Bürogebäude des Ingenieurbüros Knöllner im Gewerbegebiet von Teningen bei Freiburg wurde von Mohr–Weber Architekten geplant und im Oktober 2019 fertig gestellt. Teningen befindet sich ca. 340 m ü. N.N im Rheintal, welches zu den wärmsten Regionen in Deutschland zählt. Das Gebäude dient der Firma als Arbeitsstätte, wird darüber hinaus aber auch als Musterhaus für Besichtigungen potenzieller Kunden genutzt. Der auf einem rechteckigen Grundriss basierende Kubus mit rostbrauner Fassade und weißer, teilweise geschwungener Attika, hat ca. 400 m<sup>2</sup> beheizte Fläche für 8-10 Arbeitsplätze.



Abbildung 10: Bürogebäude in Teningen Ansicht Süd / West

Das Gebäude wird von der Westseite erschlossen und verfügt im Inneren über einen zentralen Funktionskern, in dem sich WC, Teeküche, Lagerräume und Gebäudetechnik befinden. Um den Kern herum bilden sich offene Räume, in welchen sich die Arbeitsplätze der Mitarbeiter und Räumlichkeiten für Besichtigungen und Besprechungen befinden.

#### Beschreibung Energiekonzept

Das Gebäude wird komplett mit IR-Heizungen beheizt, die größtenteils in die abgehängte Decke integriert sind. Die Heizungen werden nach Anwesenheit mithilfe eines Loxone Miniservers und entsprechender Sensoren gesteuert. Die Beheizung der Büroräume erfolgt zweistufig: Der Großraum wird durch die an der Decke montierten IR-Heizungen grundtemperiert. Durch ergänzende, lokale IR-Heizungen unter den Arbeitstischen kann die thermische Behaglichkeit durch die Mitarbeiter am Arbeitsplatz auf die individuellen Bedürfnisse angepasst werden. Die Heizung ist anwesenheitsgesteuert. Die Warmwasserbereitung wird von einer Trinkwarmwasserwärmepumpe übernommen. Auf dem vollflächig belegten Dach des Gebäudes erzeugt eine 63 kWp PV-Anlage regenerativen Strom. Zusätzlich ist eine Mini-Windkraft Anlage verbaut. Diese trägt jedoch nur untergeordnet zur Stromversorgung bei und wurde bei den Messungen nicht berücksichtigt. Bezogen auf die beheizte Fläche ergeben sich so ca. 158 Wp/m<sup>2</sup> PV-Leistung.

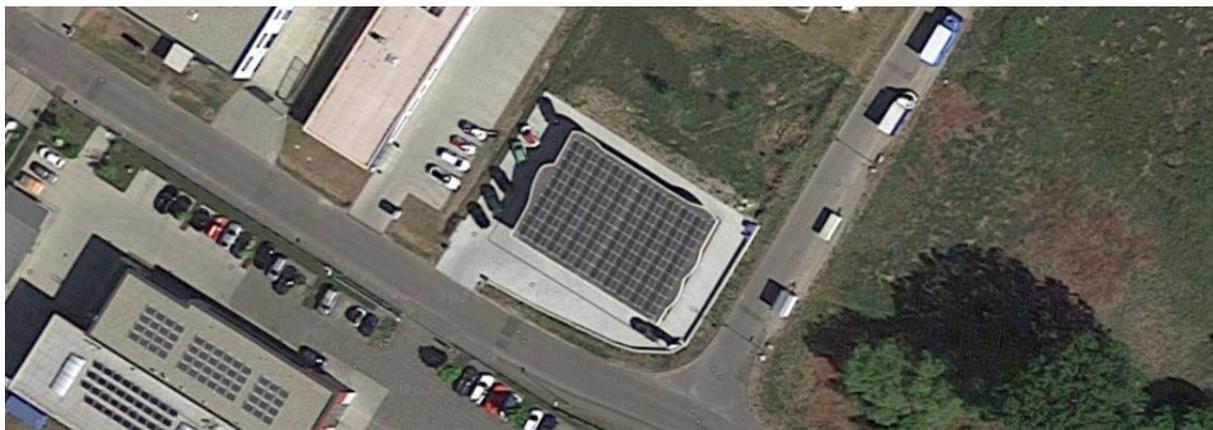


Foto: Google Maps

Abbildung 11: Bürogebäude in Teningen, Dachaufsicht, Foto: Google, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies

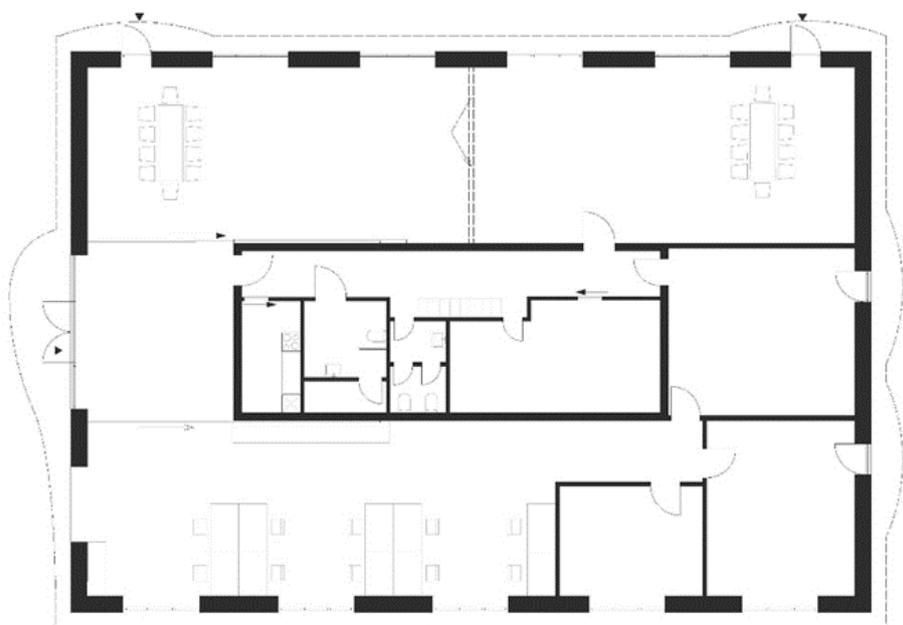


Abbildung 12: Bürogebäude in Teningen, Grundriss

### Beschreibung Messkonzept

Bauseits war bereits ein Loxone Miniserver und eine Vielzahl an Sensoren (Stromzähler, Temperatur-, Feuchte- und CO<sub>2</sub>-Sensoren) vorhanden. Diese konnten genutzt werden, um alle für die Messungen relevanten Parameter aufzuzeichnen. Die Mitarbeiter des Büros wurden einmal im Monat über einen Onlinefragebogen zu Behaglichkeit und Bedienbarkeit der IR-Heizungen befragt. Die wichtigsten Kennwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 4: Merkmale Bürogebäude in Teningen

Bezeichnung	Bürogebäude Teningen
Standort	Teningen BW
Gebäudetyp	Büro
Gebäudenutzfläche [m <sup>2</sup> ]	400 m <sup>2</sup>
Spezifischer Verbrauch Heizwärme	41 kWh/m <sup>2</sup> a
Typ Heizung	IR
spezifische installierte Heizleistung	- W/m <sup>2</sup>
Leistung PV [kWp]	63 kWp
spezifische Leistung PV [Wp/m <sup>2</sup> ]	158 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung / anwesenheitsgeführt

### Betriebsgebäude Auerbach

#### Beschreibung Gebäude

Das Gebäude einer Firma in Auerbach in der Oberpfalz ist in seiner Form, Funktion und Konstruktion ein typisches Büro, Lager und Werkstattgebäude, wie es in Gewerbegebieten häufig vorkommt. Das Gebäude ist mit den Längsseiten Ost-West orientiert. Auf der Nordseite liegen die Büroräume in einer eingeschobenen, gedämmten Box mit ca. 100 m<sup>2</sup> Bürofläche, auf der Südseite befinden sich Lager und Werkstatt mit ca. 300 m<sup>2</sup> Fläche.



Abbildung 13: Büro und Werkstattgebäude, Ansicht Nord / West

### Beschreibung Energiekonzept

Die Büroflächen werden mit Infrarotheizungen an der Wand und an der Decke mit einer Leistung von ca. 7,2 kW beheizt. Im Werkstatt und Lagerbereich gibt es im Bereich der Werkstatt eine von der Decke abgehängte, ringförmige Infrarotheizung mit ca. 3 kW Leistung. Geregelt werden die IR-Heizungen mit einer einfachen 2-Punktregelung. Das Dach des Gebäudes ist vollflächig mit einer Photovoltaikanlage mit 69 kWp Leistung belegt. Auf dem Dach des Carports sind weitere 20 kWp Photovoltaik untergebracht. Bezogen auf die beheizte Fläche ergeben sich so ca. 890 Wp/m<sup>2</sup> PV-Leistung.



Abbildung 14: Büro und Werkstattgebäude, Dachaufsicht, Foto: privat

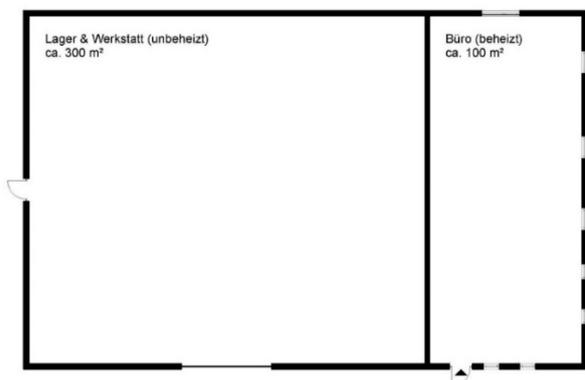


Abbildung 15: Grundriss-Skizze Büro und Werkstattgebäude

### Beschreibung Messkonzept

Bauseits war bereits ein Messsystem auf KNX Basis vorhanden. Das Messsystem wurde durch die Firma ts-solution um die für das energetische Monitoring notwendigen Messpunkte erweitert. Die Daten wurden auf einem ftp Server abgelegt womit ein Fernzugriff aus Konstanz möglich war.

Die Mitarbeiter des Büros wurden einmal im Monat über einen Onlinefragebogen zur Behaglichkeit und Bedienbarkeit der IR-Heizungen befragt. Die wichtigsten Kennwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 5: Merkmale Büro- und Werkstattgebäude

Bezeichnung	Betriebsgebäude Auerbach
Standort	Auerbach BY
Gebäudetyp	Büro + Betriebsfläche
Gebäudenutzfläche	100 m <sup>2</sup>
Spezifischer Verbrauch Heizwärme	104 kWh/m <sup>2</sup> (2022)
Typ Heizung	IR, ca. 3,5 kW Büro + 3,5 kW Lager
spezifische installierte Heizleistung	ca. 35 W/m <sup>2</sup> (Büro)
Leistung PV	89 kWp
spezifische Leistung PV	890 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung

## 2.2 Messergebnisse der Pilotprojekte

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der messtechnischen Erfassung und Auswertung für die fünf untersuchten Pilotprojekte dargestellt. Die Dokumentation folgt dabei einer festen Struktur, die sich auf vier zentrale Grafiken bezieht:

- Die erste Grafik stellt die absoluten monatlichen Verbräuche für Heizwärme und teilweise Trinkwassererwärmung dar.
- Die zweite Grafik stellt die absoluten monatlichen Erzeugungswerte der Photovoltaiksysteme dar, sowie die jeweils anteilige Deckung des Wärmeverbrauchs. Die Zuordnung erfolgte auf Basis der zeitlichen Auflösung der Messungen von minütlich bis stündlich. Wichtig: Den dargestellten Eigenverbrauchswerten liegt eine Berechnungsmethode zugrunde. Dabei wurden Haushaltsstrom und sonstige Verbraucher nicht berücksichtigt, und der Verbrauch für die Warmwassererzeugung nur so weit, wie die entsprechenden Daten vorhanden waren.
- Die dritte Grafik stellt nun den Wärmeverbrauch ins Verhältnis zur lokalen solaren Stromerzeugung, und bildet die theoretische Eigenversorgungsrate bzw. den Autarkiegrad ab. Auch hier erfolgte die Zuordnung auf Basis von 5-Minuten-Zeitschritten. Wichtig: In dieser Darstellung wurden sämtliche Erzeugungsmengen den Wärmeverbräuchen zugeordnet.
- Die vierte Grafik stellt abschließend die durchschnittlichen Lastprofile für die Wärme- und Stromerzeugung dar. Die Daten entsprechen im Tagesverlauf den mittleren Werten über die Heizperiode (1. Oktober bis 30. April).

Am Ende des Kapitels folgt eine vergleichende Betrachtung.

### 2.2.1 MFH K76 Darmstadt

#### **Kennwerte:**

Bezeichnung	MFH K76 Darmstadt
Standort	Darmstadt HE
Gebäudetyp	MFH
Gebäudenutzfläche	1.360 m <sup>2</sup>
Spezifischer Verbrauch Heizwärme	17 kWh/m <sup>2</sup> a (2022)
Typ Heizung	IR Decke, 72,4 kW gesamt
spezifische installierte Heizleistung	53 W/m <sup>2</sup>
Leistung PV	36 kWp
spezifische Leistung PV	27 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung / Nachtabsenkung

Die Monatsbilanz für den Wärmeverbrauch des Mehrfamilienhauses entspricht dem typischen Verlauf und bestätigt in der Summe die Ergebnisse der Vorjahre. Der Gesamtverbrauch von 31.178 kWh/a entspricht einem spezifischen Verbrauch von ca. 17 kWh/m<sup>2</sup>a für Heizwärme, was neben dem hohen Dämmniveau und der Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung auch auf ein sparsames Nutzerverhalten schließen lässt. Dies gilt ebenso für den sehr geringen Verbrauch von Trinkwasserwärme in Höhe von 5,7 kWh/m<sup>2</sup>a. Dieser Wert stellt analog zur IR-Heizung reine Nutzenergie dar, da die

Erwärmung über elektrische Durchlauferhitzer erfolgte. Auf die Heizperiode von Oktober bis April entfallen entsprechend ca. 98% des Wärmebedarfs, wobei allein die beiden Monate Dezember und Januar rund 49% umfassen (siehe Abbildung 13)

Auch die Monatsbilanz der Photovoltaikanlage zeigt einem typischen Verlauf. Die Gesamterzeugung in Höhe von 33.845 kWh/a entspricht einem guten spezifischen Ertrag von 940 kWh/kWp. Auf die Heizperiode entfällt rund ein Drittel der Erzeugungsmenge, für die Monate Dezember und Januar sind es nur 2 Prozent. Obwohl die PV-Anlage in der Jahressumme mehr Strom erzeugt hat, als für die Wärmeversorgung erforderlich war (33.845 zu 31.178), konnte aufgrund der unterschiedlichen Jahresprofile nur rund 17% des Solarstroms für deren Deckung genutzt werden (siehe Abbildung 14).

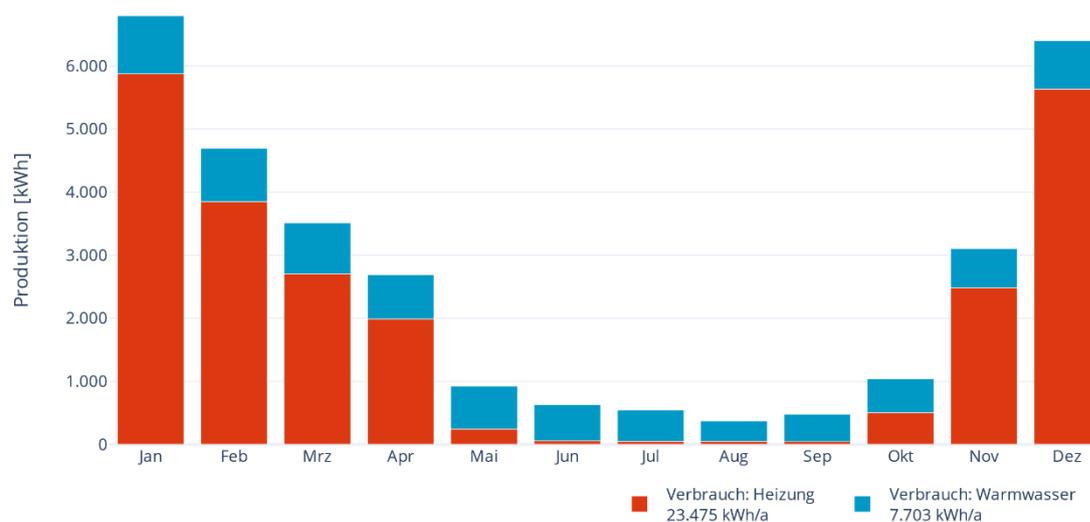


Abbildung 16: Verbrauch Wärme MFH K76 Darmstadt 2022 (nicht witterungsbereinigt)

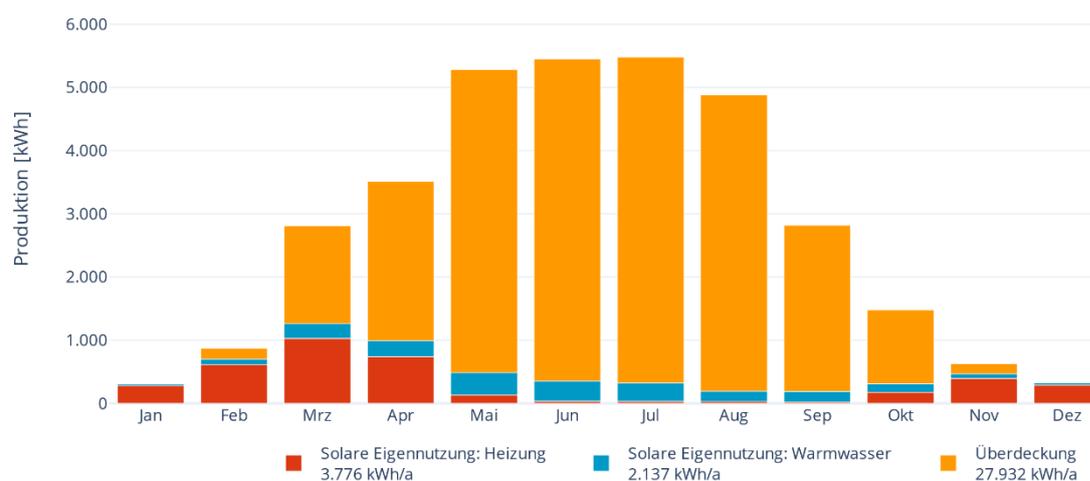


Abbildung 17: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme MFH K76 Darmstadt 2022

Dies bildet sich entsprechend auch in Abbildung 15 ab: Die solare Deckung der Wärmeerzeugung über die Jahresbilanz lag bei nur rund 14 Prozent, bezogen auf die Heizwärme bei 17 Prozent. Dass auch in den Übergangszeiten und in den Sommermonaten der Wärmeverbrauch nicht vollständig solar gedeckt werden konnte liegt an den Inkompatibilitäten im Tageslastprofil (siehe Abbildung 16). Trotz einer deutlich erkennbaren Nachabsenkung im Heizbetrieb entstanden während der Heizperiode erhebliche Strombedarfe außerhalb der solaren Erzeugungsphasen. Ebenso ergibt sich auch beim Trinkwarmwasser durch die frühen Morgenstunden und in den Abendstunden ein nicht unerheblicher Verbrauch. Eine Erhöhung des Eigenversorgungsgrades wäre bei diesem Projekt durch thermische Pufferspeicher für das Trinkwarmwasser oder durch entsprechende elektrische Speicher möglich (siehe auch Kapitel 3. Strategien zur Optimierung des Lastprofils).

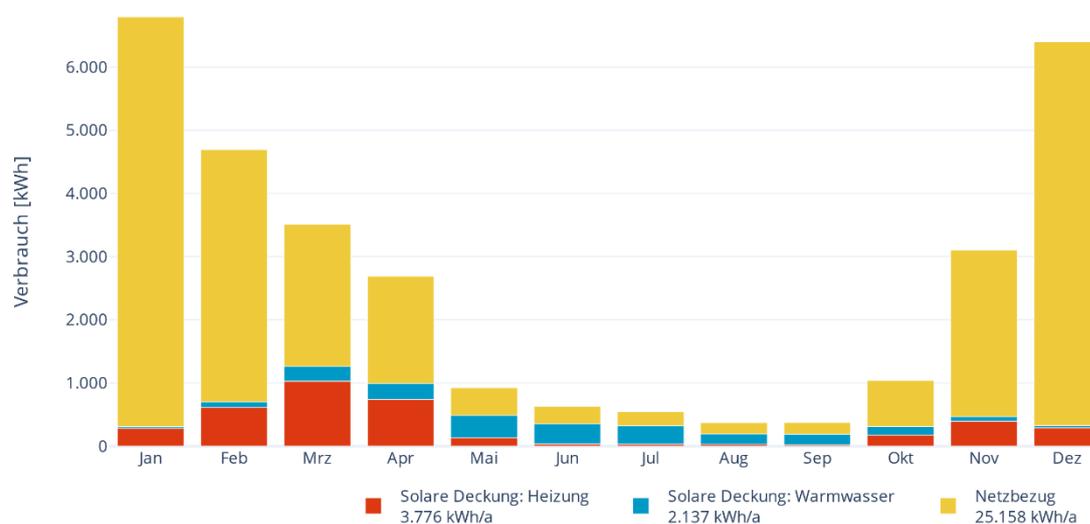


Abbildung 18: Verbrauch und solare Deckung Wärme MFH K76 Darmstadt 2022

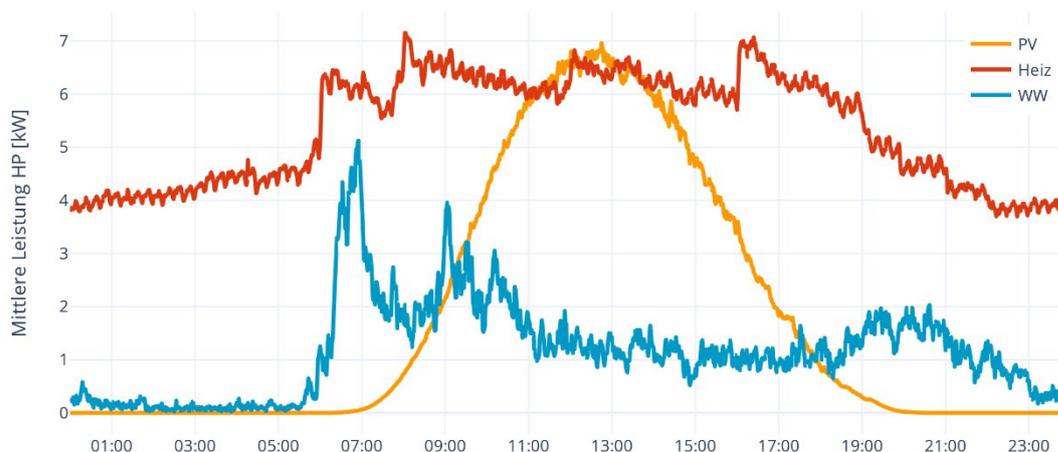


Abbildung 19: durchschnittliches Tageslastprofil HP 21/22 MFH K76 Darmstadt

## 2.2.2 Mehrfamilienhaus Lauerz (CH)

### Kennwerte:

Bezeichnung	MFH Lauerz (CH)
Standort	Lauerz CH
Gebäudetyp	MFH
Gebäudenutzfläche	515 m <sup>2</sup>
spezifischer Verbrauch Heizwärme	32 kWh/m <sup>2</sup> a (2022)
Typ Heizung	IR, 27 kW gesamt
spezifische installierte Heizleistung	52 W/m <sup>2</sup>
Leistung PV	38 kWp
spezifische Leistung PV	74 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung / Nachtabsenkung

Die Monatsbilanz für den Wärmeverbrauch des Mehrfamilienhauses entspricht dem typischen Verlauf, lediglich der Wert im Oktober ist ungewöhnlich niedrig. Der Gesamtverbrauch von 16.376 kWh/a entspricht einem spezifischen Verbrauch von ca. 32 kWh/m<sup>2</sup>a für Heizwärme bei einem hohem Dämmniveau ohne spezielle Lüftungstechnik. Der Verbrauch für Trinkwarmwasserwärme konnte in diesem Gebäude leider nicht erfasst werden. Auf die Heizperiode von Oktober bis April entfallen entsprechend ca. 99% des Wärmebedarfs, wobei die beiden Monate Dezember und Januar rund 50% umfassen (siehe Abbildung 20)

Auch die Monatsbilanz der Photovoltaikanlage zeigt einem typischen Verlauf. Die Gesamterzeugung in Höhe von 39.852 kWh/a entspricht trotz deutlicher Verschattung in den Wintermonaten einem sehr guten spezifischen Ertrag von 1.049 kWh/kWp. Auf die Heizperiode entfallen rund 37% der Erzeugungsmenge, für die Monate Dezember und Januar sind es nur 3 Prozent. Obwohl die PV-Anlage in der Jahressumme mehr als das doppelte an Strom erzeugt hat, als für die Wärmeversorgung erforderlich war (39.852 zu 16.376), konnte aufgrund der unterschiedlichen Jahresprofile nur rund 8% des Solarstroms für deren Deckung genutzt werden (siehe Abbildung 21).

Dies bildet sich entsprechend auch in Abbildung 22 wieder: Die solare Deckung der Heizwärme über die Jahresbilanz lag bei rund 19 Prozent. Dass auch in den Übergangszeiten und in den Sommermonaten der Wärmeverbrauch nicht vollständig solar gedeckt werden konnte liegt auch hier an den Inkompatibilitäten im Tageslastprofil (siehe Abbildung 23). Trotz einer deutlich erkennbaren Nachtabsenkung im Heizbetrieb entstanden während der Heizperiode erhebliche Stromverbräuche außerhalb der solaren Erzeugungsphasen. Trotz der geringen solaren Erzeugung in den Monaten Januar und Dezember konnte dennoch ein relevanter Anteil nicht für die Heizung verwendet werden. Dieser Anteil lässt sich durch die für dieses Gebäude speziellen Sperrzeiten der Heizung erklären, wie ebenfalls in Abbildung 23 zu sehen.

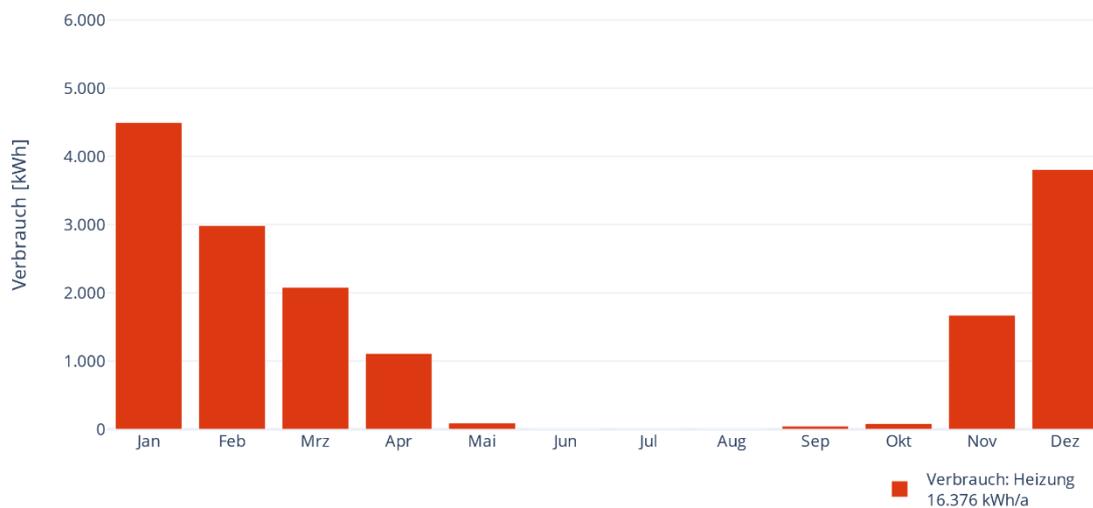


Abbildung 20: Verbrauch Wärme MFH Lauerz 2022

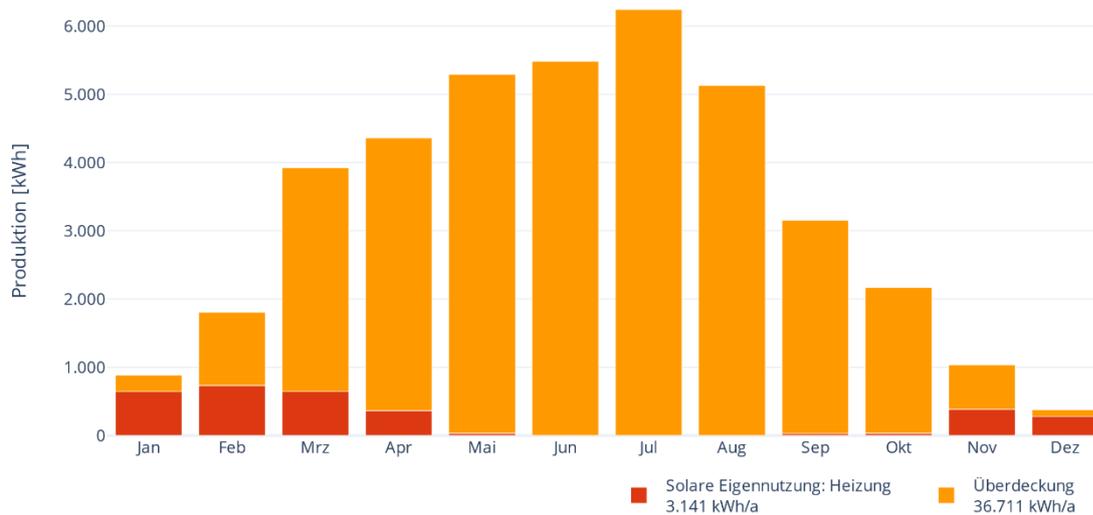


Abbildung 21: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme MFH Lauerz

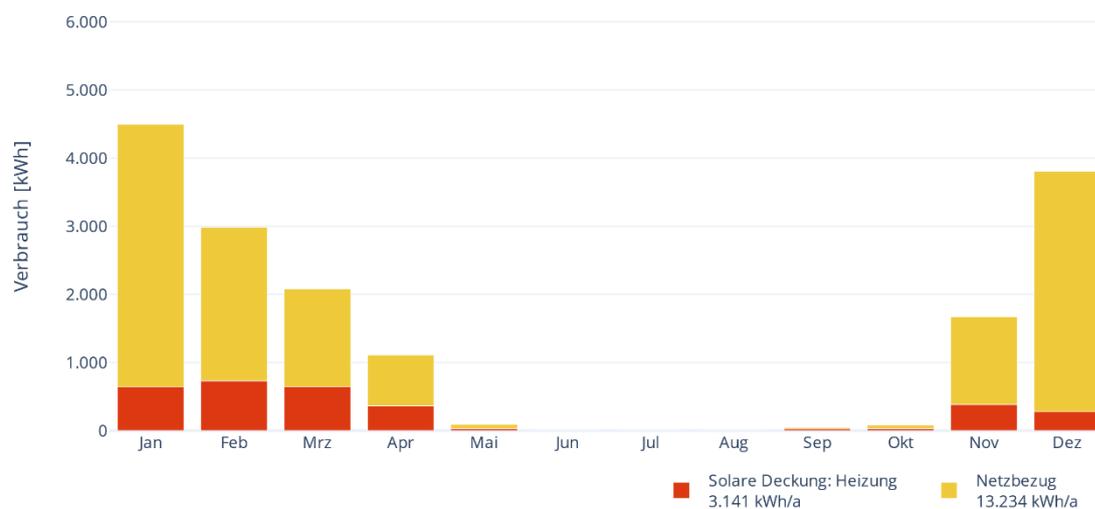


Abbildung 22: Verbrauch und solare Deckung Wärme MFH Lauerz

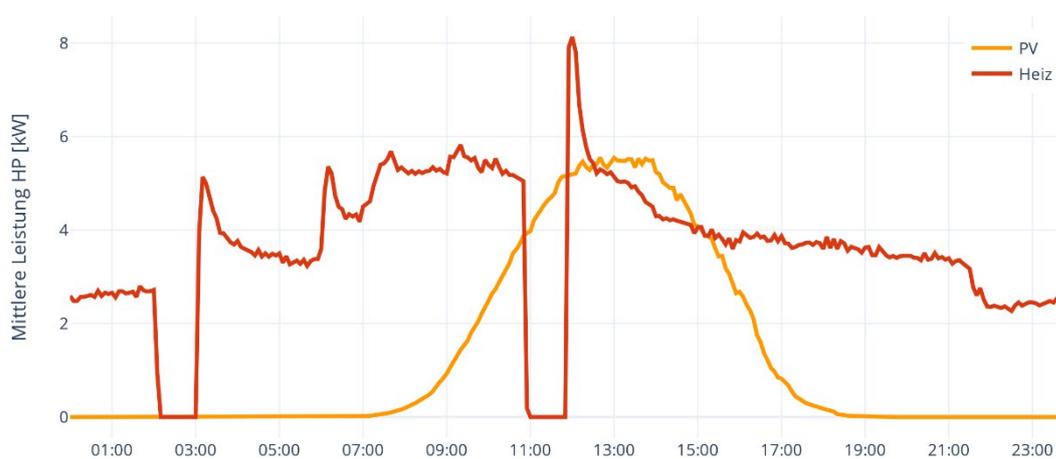


Abbildung 23: durchschnittliches Tageslastprofil HP 21/22 MFH Lauerz (CH)

### 2.2.3 Mikrohaus Singen

#### Kennwerte:

Bezeichnung	Mikrohaus Singen
Standort	Singen BW
Gebäudetyp	EFH
Gebäudenutzfläche	50 m <sup>2</sup>
Spezifischer Verbrauch Heizwärme	37 kWh/m <sup>2</sup> a (2022)
Typ Heizung	el. FBH, 4,3 kW
spezifische installierte Heizleistung	86 W/m <sup>2</sup>
Leistung PV	8,6 kWp
spezifische Leistung PV	164 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung / Nachtabsenkung / PV-geführt

Die Monatsbilanz für den Wärmeverbrauch des Mikrohauses unterscheidet sich vom typischen Verlauf durch einen etwas geringeren Anteil im Februar. Der Gesamtverbrauch von 1.834 kWh/a entspricht einem spezifischen Wert von ca. 37 kWh/m<sup>2</sup>a für Heizwärme. Das Dämmniveau für dieses Gebäude ist zwar sehr hoch, jedoch machen sich das ungünstige A/V-Verhältnis und die Lüftungsanlage ohne Wärmerückgewinnung beim Verbrauch bemerkbar. Bei einem Wert von 694 kWh ist der spezifische Verbrauch für die Trinkwarmwassererwärmung mit rund 14 kWh/m<sup>2</sup>a relativ hoch für eine Belegung mit einer Person. Unter Berücksichtigung der Speicherverluste des Trinkwasserboilers (1,48 kWh/24h) entfallen bis zu 537 kWh/a auf die Speicherverluste bei einem kleinen Speichervolumen von 120 Litern. Dies entspricht 77% des Stromverbrauchs für die Trinkwarmwassererwärmung und ist auch eine Konsequenz der für das Mikrohaus speziellen Regelung, welche das Gebäude und den Trinkwarmwasserspeicher bei PV-Überschuss übertemperiert, um die gewünschte Lastverschiebung in Zeiten mit solarer Erzeugung zu erreichen (siehe Kapitel 3. Strategien zur Optimierung des Lastprofils). Auf die Heizperiode von Oktober bis April entfallen entsprechend ca. 91% des Heizwärmebedarfs, wobei die beiden Monate Dezember und Januar rund 41% umfassen (siehe Abbildung 24).

Die Monatsbilanz der Photovoltaikanlage entspricht trotz Teilverschattungen einem typischen Verlauf. Die Erzeugung im Dezember ist ungewöhnlich gering. Dies liegt insbesondere am Schnee, welcher in diesem Zeitraum länger auf der Anlage lag. Die Gesamterzeugung in Höhe von 8.118 kWh/a entspricht dennoch einem guten spezifischen Ertrag von 990 kWh/kWp. Auf die Heizperiode entfallen rund 36% der Erzeugungsmenge, für die Monate Dezember und Januar sind es nur 3 Prozent. In der Jahressumme hat die PV-Anlage mehr als das 3-fache des Stroms erzeugt, welcher für die Wärmeversorgung erforderlich war (8.118 kWh zu 2.529 kWh). Es konnten rund 21% des Solarstroms für deren Deckung genutzt werden (siehe Abbildung 25).

Dies bildet sich entsprechend auch in Abbildung 25 ab: Die solare Deckung der Wärmeerzeugung über die Jahresbilanz lag bei rund 68 Prozent, bezogen auf die Heizwärme mit 61 Prozent etwas darunter. Durch die Verschiebung des Lastprofils konnte der Verbrauch in den Übergangszeiten fast vollständig gedeckt werden (siehe Abbildung 26). In den Monaten Januar und Dezember tritt jedoch die geringe solare Erzeugung in den Vordergrund. Dies bildet das Lastprofil nicht exakt ab, da hier auch Tage mit hoher Erzeugung und geringem Verbrauch sowie Tage mit geringer Erzeugung und hohem Verbrauch zusammengefasst werden. Dennoch ist in Abbildung 27 die Wirkung des jeweiligen Regelungskonzepts am besten veranschaulicht. Eine Reduzierung des Verbrauchs wäre durch eine dynamische Übertemperierung möglich, da diese in den Übergangszeiten oft nicht benötigt wird bzw. reduziert werden könnte. Eine Erhöhung des Deckungsgrades ist dadurch jedoch eher nicht zu erwarten, da der Verbrauch zu Zeiten niedriger solarer Erzeugung anteilig am Gesamtverbrauch zunehmen würde.

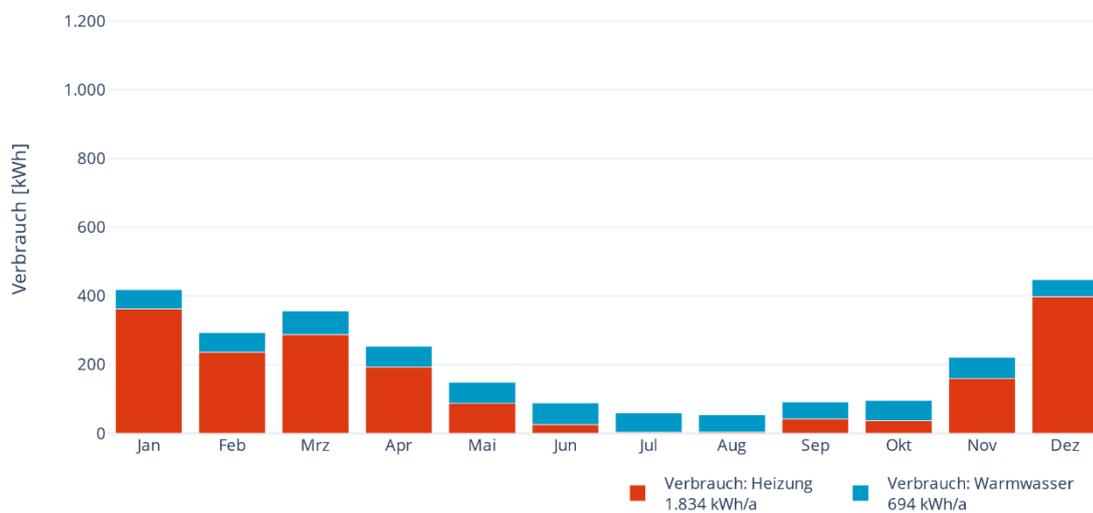


Abbildung 24: Verbrauch Wärme Mikrohaus Singen

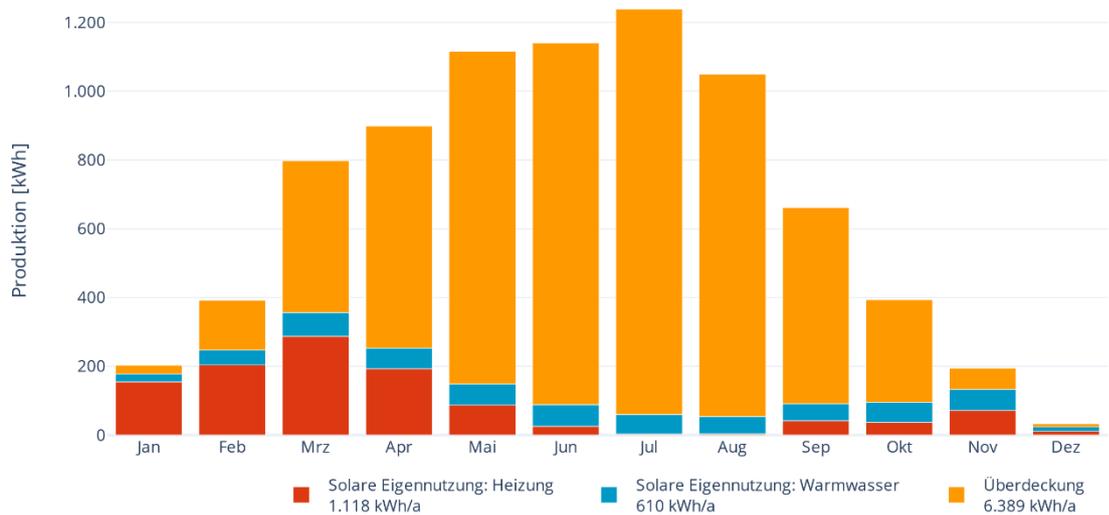


Abbildung 25: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme Mikrohaus Singen

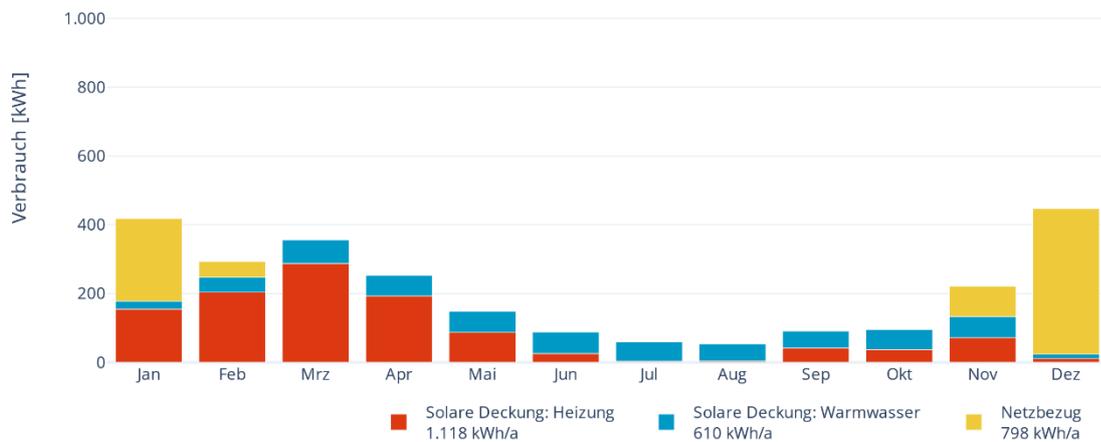


Abbildung 26: Verbrauch und solare Deckung Wärme Mikrohaus Singen

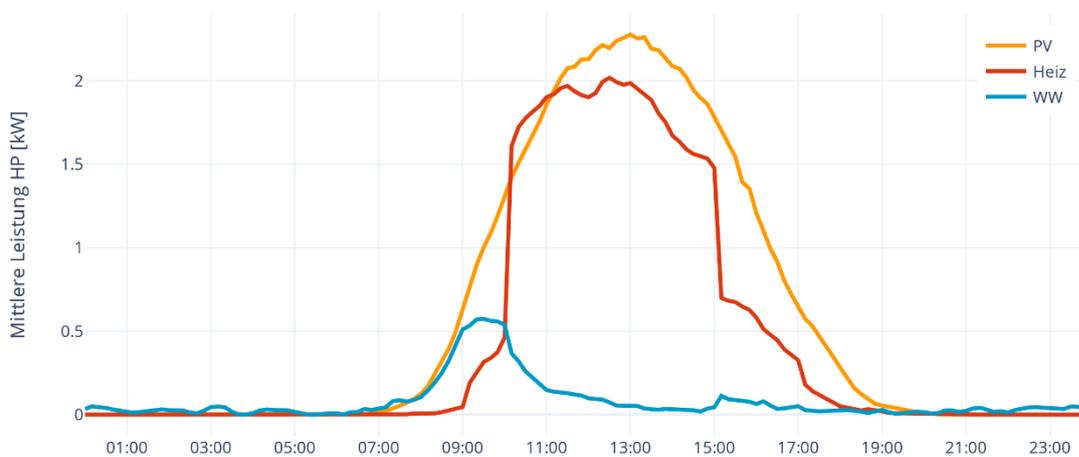


Abbildung 27: Lastprofil HP 21/22 Mikrohaus Singen

## 2.2.4 Bürogebäude Teningen

### Kennwerte:

Bezeichnung	Bürogebäude Teningen
Standort	Teningen BW
Gebäudetyp	Büro
Gebäudenutzfläche [m <sup>2</sup> ]	400 m <sup>2</sup>
Spezifischer Verbrauch Heizwärme	41 kWh/m <sup>2</sup> a
Typ Heizung	IR
spezifische installierte Heizleistung	- W/m <sup>2</sup>
Leistung PV [kWp]	63 kWp
spezifische Leistung PV [Wp/m <sup>2</sup> ]	158 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung / anwesenheitsgeführt

Die Monatsbilanz für den Wärmeverbrauch des Bürogebäudes entspricht dem zu erwartenden Verlauf. Auf den Gesamtverbrauch von 16.548 kWh/a entfallen 16.263 kWh/a auf die Heizwärme, was einem spezifischen Verbrauch von ca. 41 kWh/m<sup>2</sup>a entspricht. Einem moderaten Dämmniveau kommt hier die Lüftungstechnik mit Wärmerückgewinnung zu Gute. Der Stromverbrauch für die Warmwassererzeugung spielt mit 284 kWh/a eine untergeordnete Rolle. Ein Vergleich ist hier nur bedingt möglich, da für das Warmwasser ein Wärmepumpenboiler zum Einsatz kommt. Allein aus dem Stromverbrauch lässt sich hier nicht auf die Jahresarbeitszahl (JAZ), Speicherverluste oder das Volumen des Warmwasserverbrauchs schließen. Auf die Heizperiode von Oktober bis April entfallen ca. 96% des Wärmeverbrauchs, wobei die beiden Monate Dezember und Januar rund 39% umfassen (siehe Abbildung 28)

Auch die Monatsbilanz der Photovoltaikanlage zeigt einen typischen Verlauf. Die Gesamterzeugung in Höhe von 61.922 kWh/a entspricht einem guten spezifischen Ertrag von 983 kWh/kWp. Auf die Heizperiode entfallen rund 24% der Erzeugungsmenge, für die Monate Dezember und Januar sind es nur 4 Prozent. In der Jahressumme hat die PV-Anlage mehr als das 3-fache des Stroms erzeugt, welcher für die Wärmeversorgung erforderlich war (61.922 zu 16.547). Es konnten rund 13% des Solarstroms für deren Deckung genutzt werden (siehe Abbildung 29).

Dies spiegelt sich auch in Abbildung 30 ab: Die solare Deckung der Wärmeerzeugung über die Jahresbilanz lag bei rund 48 Prozent. Dass auch in den Übergangszeiten und in den Sommermonaten der Wärmebedarf nicht vollständig solar gedeckt werden konnte liegt an den Inkompatibilitäten im Tageslastprofil (siehe Abbildung 31). Durch die auf Verbrauchsreduzierung ausgerichtete, anwesenheitsgesteuerte Regelung kann der Verbrauch außerhalb der Betriebszeiten zwar auf nahezu Null reduziert werden. Dies hat jedoch stärkere Aufheizphasen zur Folge, welche überwiegend in den Morgenstunden noch vor der solaren Erzeugung liegen. Trotzdem konnte insgesamt die solare Deckung der Heizwärme durch diese Regelung signifikant erhöht werden. Das Nutzungsprofil des Gebäudes hat dabei einen großen Einfluss, ein entsprechend dimensionierter Stromspeicher würde hier eine sinnvolle Ergänzung darstellen.



Abbildung 28: Verbrauch Wärme Bürogebäude Teningen

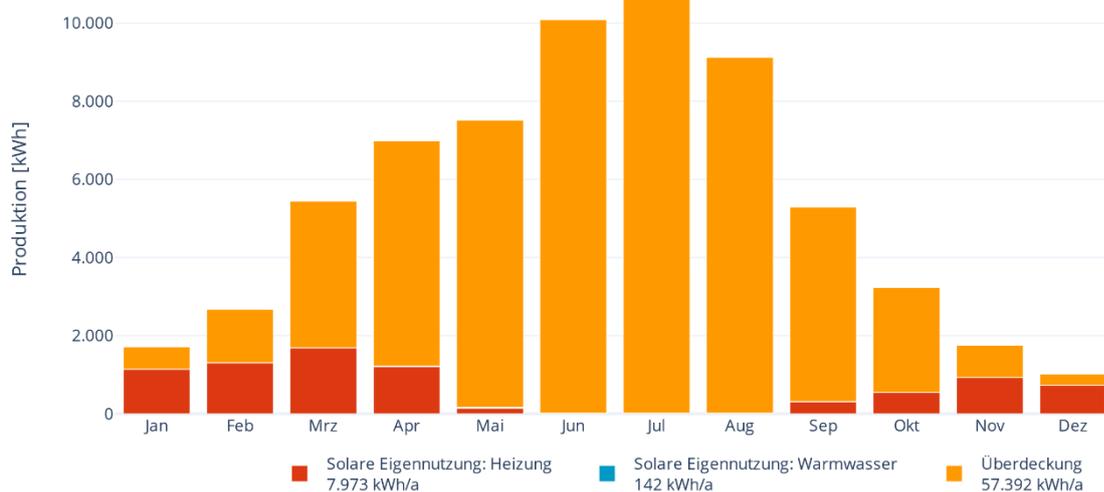


Abbildung 29: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme Bürogebäude Teningen

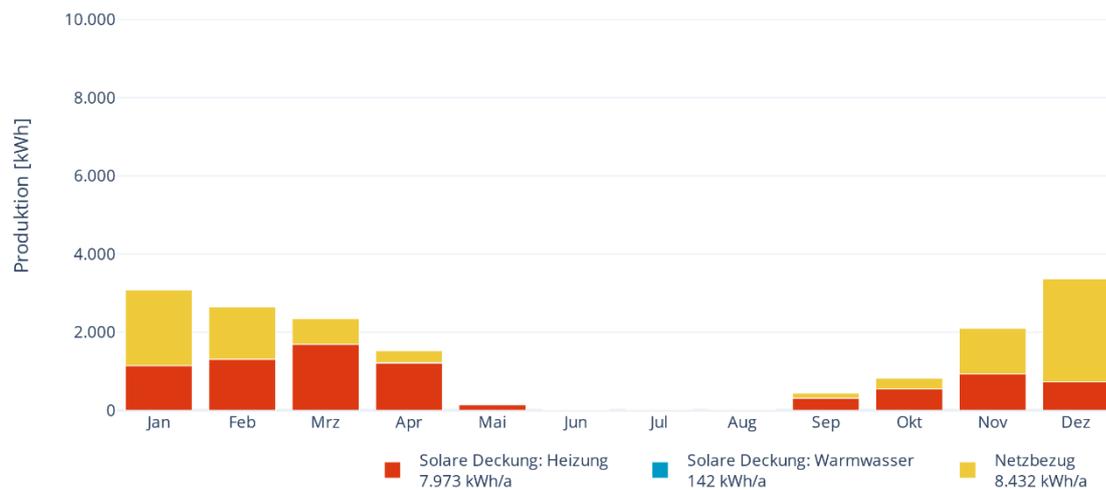


Abbildung 30: Verbrauch und solare Deckung Wärme Bürogebäude Teningen

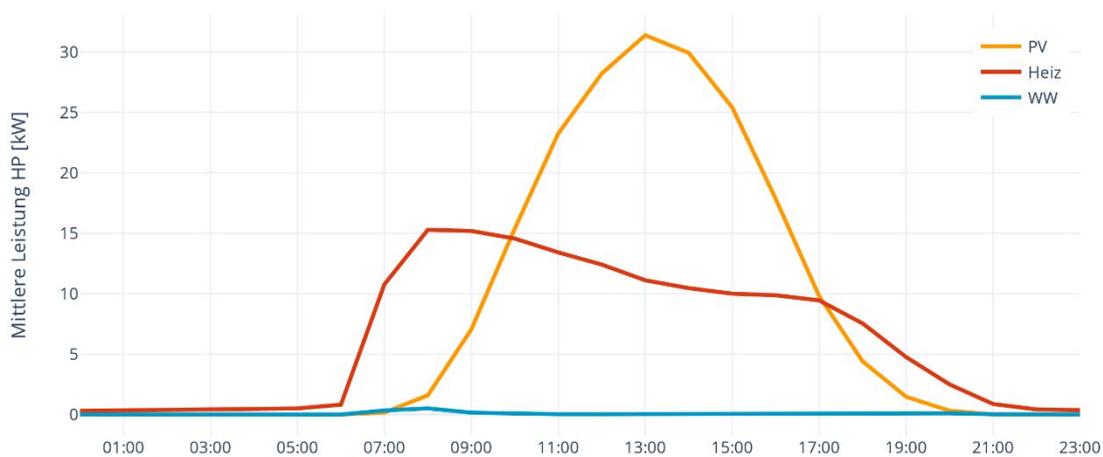


Abbildung 31: Lastprofil HP 21/22 Bürogebäude Teningen.

## 2.2.5 Betriebsgebäude Auerbach

### Kennwerte:

Bezeichnung	Betriebsgebäude Auerbach
Standort	Auerbach BY
Gebäudetyp	Büro + Betriebsfläche
Gebäudenutzfläche	100 m <sup>2</sup>
Spezifischer Verbrauch Heizwärme	104 kWh/m <sup>2</sup> (2022)
Typ Heizung	IR, ca. 3,5 kW Büro + 3,5 kW Lager
spezifische installierte Heizleistung	ca. 35 W/m <sup>2</sup> (Büro)
Leistung PV	89 kWp
spezifische Leistung PV	890 Wp/m <sup>2</sup>
Regelung	2-Punktregelung

Die Monatsbilanz für den Wärmeverbrauch des Betriebsgebäudes entspricht dem typischen Verlauf. Der Gesamtverbrauch von 10.372 kWh/a entspricht einem hohen spezifischen Verbrauch von ca. 104 kWh/m<sup>2</sup>a. Darin enthalten ist auch die teilweise Beheizung eines Arbeitsplatzes im Lagerbereich, welcher nicht separat erfasst werden konnte. Auf die Heizperiode von Oktober bis April entfallen entsprechend ca. 92% des Wärmebedarfs, wobei die beiden Monate Dezember und Januar rund 31% umfassen (siehe Abbildung 32)

Auch die Monatsbilanz der Photovoltaikanlage zeigt einen typischen Verlauf. Die Gesamterzeugung in Höhe von 86.803 kWh/a entspricht einem guten spezifischen Ertrag von 975 kWh/kWp. Auf die Heizperiode entfällt rund ein Drittel der Erzeugungsmenge, für die Monate Dezember und Januar sind es nur 2 Prozent. Obwohl die PV-Anlage in der Jahressumme mehr als das 8-fache des Stroms erzeugt hat, der für die Wärmeversorgung erforderlich war (86.803 zu 10.372), konnten aufgrund der unterschiedlichen Jahresprofile und der rudimentären Regelung nur rund 3% des Solarstroms für deren Deckung genutzt werden (siehe Abbildung 33).

Dies bildet sich entsprechend auch in Abbildung 34 ab: Die solare Deckung der Wärmeerzeugung über die Jahresbilanz lag bei nur rund 27 Prozent, trotz einer spezifischen PV-Leistung von 890 Wp pro Quadratmeter beheizter Fläche! Dass auch in den Übergangszeiten und in den Sommermonaten der Wärmebedarf nicht vollständig solar gedeckt werden konnte liegt neben den jahreszeitlichen Verschiebungen auch an den Inkompatibilitäten im Tageslastprofil (siehe Abbildung 35). Der Verzicht auf eine solar optimierte Regelung führt dazu, dass der größere Teil der Wärmeerzeugung nachts außerhalb der Zeiten mit solarer Erzeugung liegt. Für die Lastverschiebung könnte hier ein thermischer oder elektrischer Speicher zum Einsatz eingebunden werden (siehe Kapitel 3. Strategien zur Optimierung des Lastprofils).

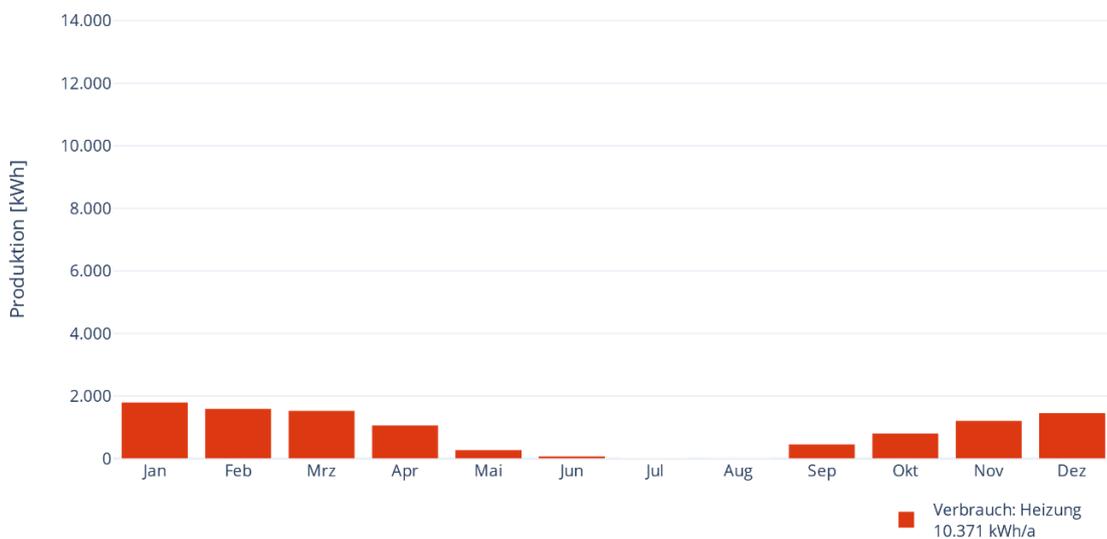


Abbildung 32: Verbrauch Wärme Betriebsgebäude Auerbach

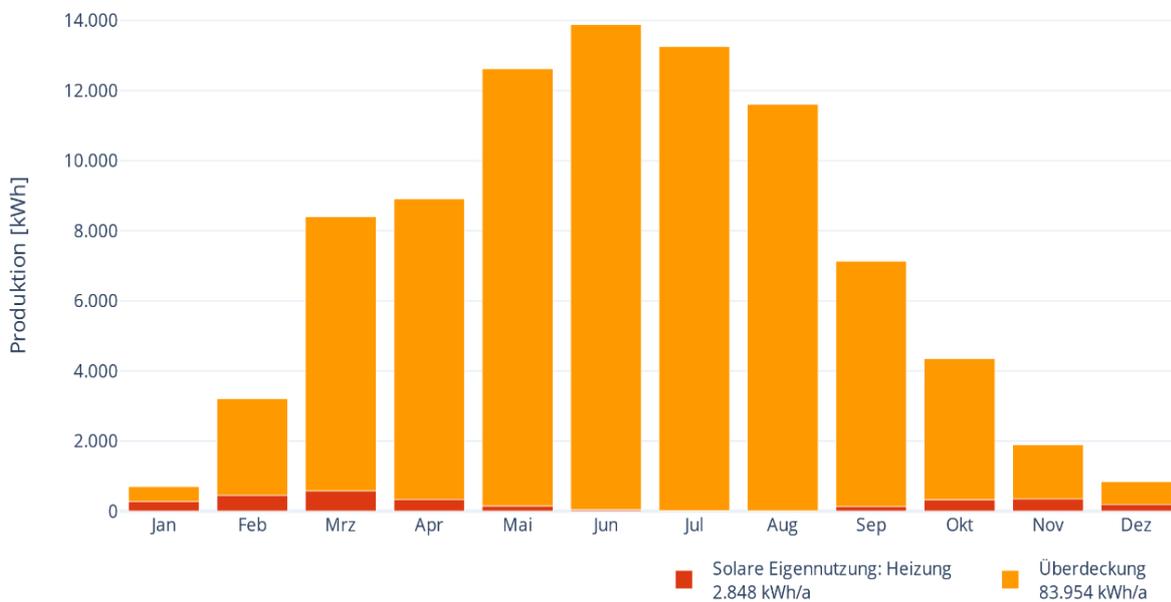


Abbildung 33: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme Betriebsgebäude Auerbach

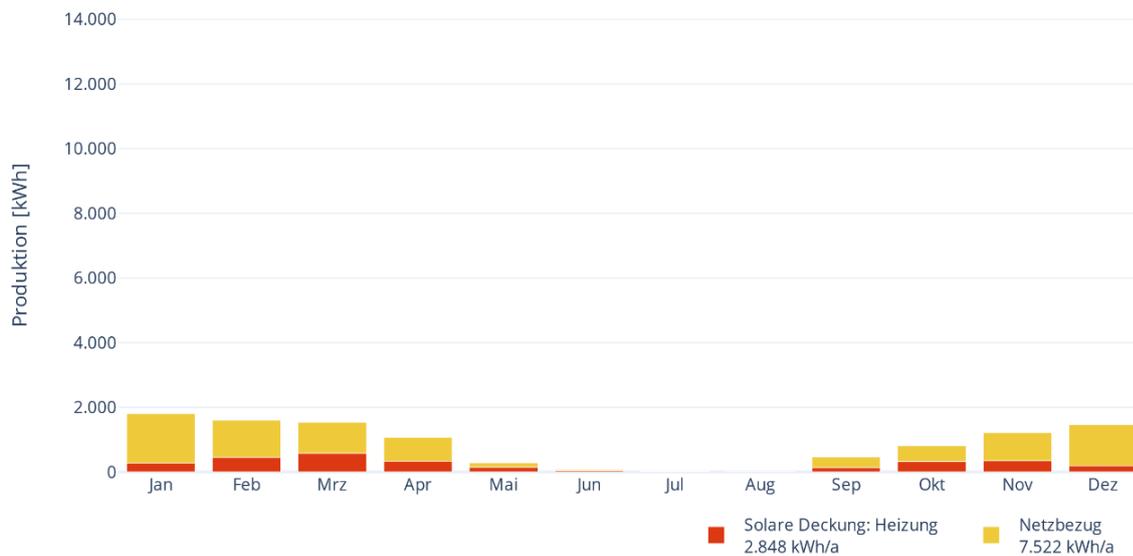


Abbildung 34: Verbrauch und solare Deckung Wärme Betriebsgebäude Auerbach

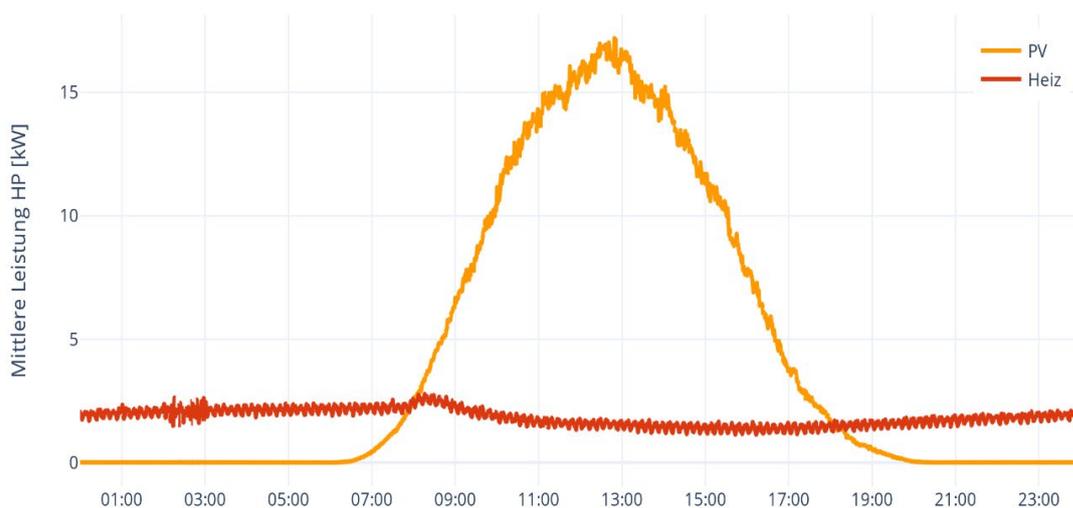


Abbildung 35: Lastprofil HP 21/22 Betriebsgebäude Auerbach

## 2.2.6 Zusammenfassung Pilotprojekte

In Tabelle 6 sind die Kennwerte zur solaren Eigendeckung durch Photovoltaik zusammenfassend dargestellt. Im Mehrfamilienhaus K76 werden sehr geringe spezifische Wärmeverbräuche von nur 17,3 kWh/m<sup>2</sup>a Heizwärme und 5,7 kWh/m<sup>2</sup>a Trinkwarmwasser erreicht. Trotz einer nahezu vollständigen Belegung des Flachdaches mit PV kann bei dem viergeschossigen Gebäude jedoch nur ein solarer Deckungsgrad von 16% bzw. 19% erreicht werden und liegt damit beim lokalen regenerativen Anteil deutlich unter einem vergleichbaren Wärmepumpensystem. Selbst bei einer vollständigen Nutzung des überschüssigen Solarstroms in der Heizperiode durch z.B. elektrische Speicher beträgt das Potenzial maximal rund 8.000 kWh/a bzw. 5 kWh/m<sup>2</sup>a. Mit einer Optimierung der Dachflächenausnutzung wäre eine Ertrags-Steigerung um ca. 30 % erreichbar.

Im Mehrfamilienhaus Lauerz werden ähnliche Werte erreicht, obwohl die spezifische installierte Leistung knapp dreimal so hoch ist. Dies liegt vor allem an dem ebenso fast dreimal so hohen Wärmeverbrauch des Gebäudes. Bei diesem nur dreigeschossigen Gebäude wären durch Effizienzsteigerungen und einer Optimierung des Lastprofils deutlich bessere Werte erreichbar.

Das Mikrohaus Singen stellt ein Extrembeispiel dar, in dem bei relativ hoher Effizienz bezüglich des Wärmebedarfs durch die Eingeschossigkeit sehr hohe spezifische Erzeugungskapazitäten erreicht werden. Dennoch können auch hier trotz einer optimierten Regelung mit relativ hohem Potenzial der Lastverschiebung nur Werte von 61 % bzw. 68 % erreicht werden. Sie liegen damit zwar im Bereich einer vergleichbaren Wärmepumpe, es muss hierfür jedoch das gesamte Flächenpotenzial an PV-Leistung für die Kompensation der Anergiequelle herangezogen werden. In Kombination mit dem hohen Überschuss in den Sommermonaten ergibt sich jedoch für diese spezielle Gebäudetypologie (kleines, hocheffizientes Wohngebäude) insgesamt eine vorteilhafte ökologische und ökonomische Situation, wie im Vorläuferprojekt IR-Bau als These formuliert. Allerdings verbleiben selbst hier deutlich höhere Netzbelastungen in der Heizperiode, da im Januar und Dezember die solare Eigendeckung nur rund 14 Prozent beträgt. Eine Optimierung wäre hier nur durch eine saisonale Speicherung möglich, was sich jedoch sehr negativ auf die ökonomischen Werte auswirken würde. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Lastoptimierung durch Übertemperaturen auch negative Auswirkungen auf den Wärmeverbrauch und den Nutzerkomfort hat.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Energiekennwerte der Pilotprojekte

	Heizwärme [kWh/m <sup>2</sup> a]	Trinkwasser- wärme [kWh/m <sup>2</sup> a]	PV- Leistung [Wp/m <sup>2</sup> ]	Eigendeckung PV ohne WW	Eigendeckung PV mit WW
MFH K76 Darmstadt	17,3	5,7	26	17 %	14 %
MFH Lauerz (CH)	48,4		74	19 %	
Mikrohaus Singen	39,7		164	61 %	68 %
Bürogebäude Teningen	40,6		158	49 %	49 %
Betriebsgebäude Auerbach	103,7		890	28 %	

Das Bürogebäude in Teningen weißt ebenso sehr günstige Rahndbedingungen auf wie das Mikrohaus. Durch die Eingeschossigkeit und die vollflächige Belegung des Flachdachs mit Photovoltaik ergibt sich eine sehr hohe spezifische Leistung von 158 Wp/m<sup>2</sup>. Auch das Nutzungsprofil ist sehr günstig, da der

Wärmebedarf ausschließlich am Tag parallel zur Solarstrahlung entsteht. Schließlich erfolgt eine Optimierung durch die anwesenheitsgesteuerte Heizungsregelung. Dennoch können hier ohne saisonale Speicherung nur Werte um 50 % solare Deckung erreicht werden. Dies liegt sowohl an den geringen Erträgen im Kernwinter als auch an der durch die frühe Anwesenheit entstehende Wärmenachfrage vor Sonnenaufgang und in reduzierter Form auch nach Sonnenuntergang. Bezüglich letzterem könnten durch einen elektrischen Kurzzeitspeicher Verbesserungen erreicht werden.

Ein weiteres Extrembeispiel stellt das Betriebsgebäude in Auerbach dar. Bei der im Verhältnis zur beheizten Fläche extrem großen spezifischen installierten Leistung in der Größe von  $890 \text{ W/m}^2$  (!) könnte man sehr gute solare Deckungsgrade bis hin zur völligen Autarkie erwarten. Dennoch wurden hier nur Werte unter 30 % erreicht, was insbesondere auf die ungünstige Regelung zurückzuführen ist, so dass auch durchgängig in den Nachtstunden eine Stromnachfrage für die Wärmeerzeugung entsteht. Doch selbst bei einer optimierten Regelung in Verbindung mit einem elektrischen Kurzzeitspeicher wäre eine Autarkie nicht möglich, da auch in diesem Extrembeispiel im Monat Januar der Strombedarf die Erzeugungskapazität übersteigt.

## 2.3 Nutzerbefragung

### 2.3.1 Einleitung

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

Ziel ist die Verifizierung und Absicherung der Ergebnisse aus IR-Bau I und die Untersuchung eines weiteren Anwendungsfalls (Gewerbeimmobilie). Die hierzu genutzte Methode ist eine Erhöhung der Anzahl und Diversität der zu befragenden Personen und Nutzungssituationen und nicht die Erweiterung der Fragestellungen.

### 2.3.2 Fragestellungen

Da in Bezug auf die Nutzung von Infrarotstrahlungsheizungen in Wohngebäuden und Bürogebäuden noch kaum auf bestehende Untersuchungsergebnisse zurückgegriffen werden kann, ergeben sich für diese Untersuchung drei grundlegende Fragestellungen:

- Ist die Infrarotstrahlungsheizung für Wohngebäude und Bürogebäude aus der Perspektive der Behaglichkeit eine sinnvolle Technologie für die Beheizung?
- Ist die Infrarotstrahlungsheizung für Wohngebäude und Bürogebäude aus der Perspektive der Bedienbarkeit eine sinnvolle Technologie für die Beheizung?
- Wirken sich weitere Einflussfaktoren (z.B. die Ausrichtung der Räume,..) negativ auf die Behaglichkeit aus?

### 2.3.3 Hypothesen

Aus diesen Fragestellungen ergeben sich drei Hypothesen für die sozialwissenschaftliche Begleitforschung:

**Hypothese 1:**

In den Wohn- / Büroräumen der Pilotprojekte kann mit Hilfe von Infrarotstrahlungsheizungen ein behagliches Raumklima erzeugt werden.

**Hypothese 2:**

Die in den Wohn- / Büroräumen der Pilotprojekte eingesetzte Regelungstechnik der Infrarotstrahlungsheizungen ist für die Nutzer gut bedienbar.

**Hypothese 3:**

Weitere Einflussfaktoren (wie z.B. Art der Wärmeübergabe) wirken sich nicht negativ auf die Behaglichkeit in den Räumen aus.

**Zusatz für Bürogebäude Knöllner:**

Im Bürogebäude Knöllner fanden wir eine besondere Situation vor. Die Temperatur der Arbeitsplätze kann von den Personen ganz individuell lokal eingerichtet werden (z.B. Wärmeplatte für die Füße unter den Schreibtischen), während die Grundtemperatur im Gebäude reduziert wird. Zusätzlich wird die Temperatur im Gebäude nach Anwesenheit gesteuert. Daraus ergeben sich zwei weitere Hypothesen für die Untersuchung, welche bei der Befragung vor Ort überprüft werden konnten.

**Hypothese 4:**

Die lokale Beheizung des Arbeitsplatzes wird als angenehm und die Reduzierung der Temperatur im restlichen Raum als nicht unangenehm wahrgenommen.

**Hypothese 5:**

Die anwesenheitsgesteuerte Regelung wird nicht als unangenehm empfunden.

### 2.3.4 Methodik

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

Nicht jeder Mensch fühlt sich bei gleichen thermischen Bedingungen gleich wohl. Daher war es wichtig, die thermischen Bedingungen, unter denen sich die einzelnen Personen wohl fühlen, zu erfassen. Für die Befragungen kamen zwei unterschiedliche Fragebögen zum Einsatz: eine lange Version, deren Beantwortung etwa 20 Minuten Zeit in Anspruch nahm und eine kurze Version, die in ca. 5 Minuten beantwortet werden konnte.

Die lange Version wurde genutzt, um zu Beginn des Projektes die jeweiligen räumlichen Bedingungen zu ermitteln.

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

### Unterschiedliche räumliche Gegebenheiten / Projekte

Bei der Studie beteiligten sich Nutzende folgender Projekte:

- MFH K76 in Darmstadt – 7 Personen online
- MFH Lauerz (CH) – 5 Personen online
- Mikrohaus in Singen – eine Person online
- Bürogebäude Knölller – eine Person online + 6 Personen in Präsenz vor Ort
- Betriebsgebäude in Teningen – 3 Personen online - einmalige Beteiligung in der ersten Fragerunde, das Projekt wurde später aufgrund eines Besitzerwechsels aus der Auswertung herausgenommen.

Durch das Untersuchungssetting ist eine Anonymisierung nicht in jedem Fall gewährleistet, da das Mikrohaus in Singen nur von einer Person genutzt wurde. Daher lassen sich die Datensätze aus diesem Objekt dieser Person direkt zuordnen. Bei den anderen Objekten ist eine solche Zuordnung nicht möglich. Rein theoretisch wäre es möglich, über die Angaben von Objekt, Geschlecht, Alter und dem Code, der sich aus dem Geburtsnamen der Mutter und deren Geburtsjahr bildet, auch die anderen Datensätze bestimmten Personen zuzuordnen. Diese Betrachtung war zu keinem Zeitpunkt im Interesse dieser Studie und wurde nicht durchgeführt.

### Versuchsteilnehmende

An der Studie nahmen Nutzer und Nutzerinnen der untersuchten Gebäude im Alter zwischen ca. 20 und 70 Jahren teil (das Alter wurde nicht genau angegeben). Sie wurden für ihre Teilnahme nicht entlohnt.

### **Vorhergehende Untersuchung**

Im Rahmen des Projekts IR Bau fand im Frühjahr 2017 in Darmstadt ein vorbereitendes Treffen mit den zukünftigen Teilnehmenden der Studie zur Vorstellung der Zielsetzung und des Entwurfs der Befragung statt. Im Gespräch ergaben sich noch Anpassungen einzelner noch unklarer Formulierungen. Von diesem Feedback und den Erfahrungen aus der ersten Studie profitierte die Untersuchung im Projekt IR Bau II.

### **Befragungen 1 und 2**

Fragebogen lange Version: Frühjahr 2021, 26 Teilnehmende

Erste Befragungsrunde zur Gewinnung der Basisdaten der unterschiedlichen räumlichen Gegebenheiten. In dieser ersten Befragungsrunde beantworteten die Teilnehmenden Fragen zu den räumlichen Gegebenheiten und baulichen Grunddaten sowie zur subjektiven Behaglichkeit und Bedienbarkeit der vorhandenen Heizanlage.

### **Befragungen 3 bis 9**

Fragebogen kurze Version: Heizperiode 21/22, 50 Teilnehmende

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

### **Befragungen 10 bis 14**

Fragebogen kurze Version: Heizperiode 22/23, 26 Teilnehmende

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

### Zusätzliche Befragung vor Ort

Da sich aus den Onlinebefragungen in den Bürogebäuden keine hohe Beteiligung und keine klare Tendenz abzeichnete (stark konträre Aussagen zur Behaglichkeit im später ausgeschlossenen Projekt), wurde beschlossen noch eine Befragung vor Ort durchzuführen. Dazu erhielten sechs Mitarbeitende der Fa. Knölller den Onlinefragebogen in einer ausgedruckten Version und füllten diesen anonymisiert vor Ort aus.

Im Rahmen des Projekts IR Bau II wurden insgesamt 14 Befragungen durchgeführt. 13 Befragungen wurden online durchgeführt, eine Befragung wurde vor Ort durchgeführt.

Die Befragungen fanden statt in der ausklingenden Heizperiode im Frühjahr 2021

2 Befragungen:

04.03.21 - 13 Datensätze

21.04.21 - 13 Datensätze

und über zwei komplette Heizperioden im Winter 21/22 insgesamt 7 Befragungen:

17.10.21 – 8 Datensätze

17.11.21 – 9 Datensätze

20.12.21 – 8 Datensätze

18.01.22 – 6 Datensätze

15.02.22 – 8 Datensätze

16.03.22 – 5 Datensätze

14.04.22 – 6 Datensätze

und Winter 22/23 4 Befragungen:

07.11.22 – 6 Datensätze

22.12.22 – 4 Datensätze

20.02.23 – 3 Datensätze

06.04.23 – 7 Datensätze

Eine Befragung fand „Vor-Ort“ bei Fa. Knölller statt: 16.03.23 – 6 Datensätze

Insgesamt ergaben sich aus den Befragungen 102 Datensätze, die zu 84,7% von Männern und zu 15,3% von Frauen beantwortet wurden, was bei technisch orientierten Fragen nicht untypisch ist.

### Überblick Gebäude

Die verschiedenen **Gebäude** sind unterschiedlich stark vertreten:

Gebäude 1: 44 Datensätze (K76 in Darmstadt)

Gebäude 2: 36 Datensätze (Mehrfamilienhaus in Lauerz (CH))

Gebäude 3: 10 Datensätze (Mikrohaus in Singen)

Gebäude 4: 9 Datensätze (Bürogebäude in Teningen)

Gebäude 5: 3 Datensätze (Betriebsgebäude in Auerbach)



Abbildung 36: Konzeption Nutzerbefragung

### Online-Befragung

Bei der durchgeführten Online-Befragung handelt es sich um eine anonymisierte Umfrage via Internet, die keine Verknüpfung zwischen den Antworten und den antwortenden Personen zulässt. Allerdings wird in der Umfrage ein Bezug zwischen der antwortenden Person und dem genutzten Gebäude hergestellt, sodass nachvollziehbar bleibt, auf welches Projekt sich die Antworten beziehen. Die Umfrage wurde über das Programm Uni-Park durchgeführt. Die Links zur jeweiligen Umfrage wurden durch die Versuchsleiterin per E-Mail an die einzelnen Teilnehmenden versandt. Über den Link erhielten die Teilnehmenden den Zugang zum Fragebogen. Sie hatten nach der Zusendung des Links etwa 10 Tage Zeit für die Beantwortung der Fragen.

Die Befragung enthielt vornehmlich Pflichtfragen, die erst nach einem Hinweis auf die noch ausstehende Beantwortung durch Anklicken eines speziellen Feldes übersprungen werden konnten. Die Felder zur freien Texteingabe für besondere Anmerkungen konnten optional genutzt werden. Am oberen Bildschirmrand befand sich ein Anzeiger, der die Teilnehmer über den Verlauf der Befragung informierte. Für Fragen und Anmerkungen zur Befragung war die Versuchsleiterin per Mail erreichbar, dieses Angebot wurde jedoch nur wenige Male genutzt und bezog sich ausschließlich auf technische Probleme mit dem Zugang zur Umfrage.

## Struktur der Befragung

Die Befragung war wie folgt strukturiert (lange Version):

Teil 1 - Aktuelle Situation:

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

Teil 2 - Konstante Daten:

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

Teil 3 - Effizienz:

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

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

## Beispiele zu einzelnen Fragen (Auszug):

### Fragen zur subjektiven Behaglichkeit

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

### Angabe der objektiv gemessenen thermischen Bedingungen

- Lufttemperatur Innen
- Lufttemperatur Außen
- Temperatur der Umgebungsflächen
- relative Luftfeuchte
- CO<sub>2</sub>- Gehalt der Raumluft
- aktuelles Wetter

### Angabe der räumlichen Gegebenheiten

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

**Einfluss des Nutzers auf die Heizungsregelung**

- Einflussname möglich?
- Genutzt / wie häufig?

**Screenshot Befragung:**

**6.1 1. Fragen zur Person, aktuell bzgl. Behaglichkeit**

---

**Teil 1 - aktuelle Situation**

**1A - Behaglichkeit**

**Im Folgenden stellen wir Ihnen Fragen zu Ihrer momentanen Behaglichkeit.**

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

**Wie warm ist es Ihnen in diesem Moment?**

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

Abbildung 37: Auszug - Onlinefragebogen

Der Fragebogen mit allen Fragestellungen kann auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

Datenerfassung und Analyse

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

## 2.3.5 Ergebnisse

### Ergebnisse zu Hypothese 1

„In den Wohn- / Büroräumen der Pilotprojekte kann mit Hilfe von Infrarotstrahlungsheizungen ein behagliches Raumklima erzeugt werden.“

Diese Hypothese wurde bestätigt.

Die Nutzer werteten die Gesamt-Behaglichkeit in den untersuchten Räumen als „eher behaglich bis behaglich“.

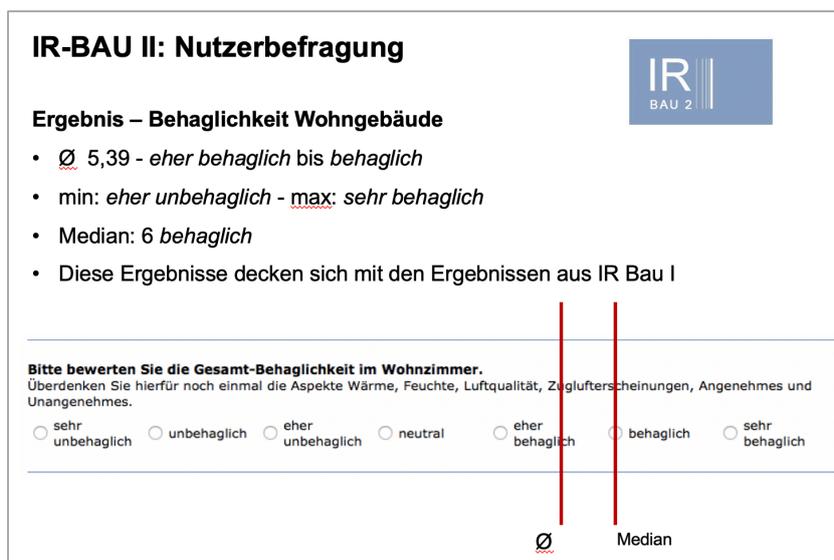


Abbildung 38: Auswertung Nutzerbefragung – Behaglichkeit Wohngebäude





Abbildung 41: Auswertung Nutzerbefragung – Bedienbarkeit, Fa. Knöllner

### Ergebnisse zu Hypothese 3

Hypothese 3:

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

Diese Hypothese wurde bestätigt.

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

### Ergebnisse zu Hypothese 4

Hypothese 4:

Die lokale Beheizung des Arbeitsplatzes wird als angenehm und die Reduzierung der Temperatur im restlichen Raum als nicht unangenehm wahrgenommen.

Diese Hypothese wurde bestätigt.

Über die Befragung vor Ort unter den Beschäftigten der Fa. Knöllner konnte bestätigt werden, dass die lokale Beheizung des Arbeitsplatzes als besonders angenehm empfunden wurde. Interessanterweise beschrieben die Beschäftigten, dass die Kolleginnen ein sehr unterschiedliches Wärmeempfinden hätten und dass die individuelle Einstellung für alle unterschiedlichen „Wärmetypen“ sehr positiv bewertet wird. Die Reduzierung der Temperatur im restlichen Gebäude wurde nicht als unangenehm bewertet, da die individuelle Temperierung am Arbeitsplatz dies ausgleiche.

### Ergebnisse zu Hypothese 5

Hypothese 5:

Die anwesenheitsgesteuerte Regelung wird nicht als unangenehm empfunden.

Diese Hypothese wurde bestätigt.

Die Beschäftigten der Fa. Knölller bewerteten die anwesenheitsgesteuerte Regelung nicht als unangenehm, merkten aber an, dass die Temperatur im Gebäude zu Beginn des Arbeitstags etwas kühl ist. Dies fiel aber nicht ins Gewicht, da der Arbeitsplatz selbst schnell eine angenehme Temperatur erreichte.

### **Kommentare zur Behaglichkeit:**

Der Fragebogen bot die Möglichkeit, zusätzliche Kommentare frei zu ergänzen. Diese werden nachfolgend in anonymisierter Form, aber ansonsten nicht weiterbearbeitet wiedergegeben.

Frage: Gibt es im Wohnzimmer / im Büroraum etwas besonders Angenehmes und / oder Unangenehmes (bezüglich der Temperatur)? Bitte geben Sie hier an, was Ihnen aktuell angenehm oder unangenehm auffällt, wie z.B. Wohlfühlbereiche, zu kalte oder zu warme Bereiche, Strahlungseinflüsse oder Ähnliches.

- *Alles in Ordnung*
- *Es passt wunderbar*
- *Beim normalen aufhalten in der Wohnung sind die Temperaturen sehr angenehm. Wenn ~~nabe~~ in der Nähe eines Heizkörpers körperlich betätigt (Staubsaugen, Bügeln usw.) bemerkt man eine größere Wärmeabstrahlung. Wenn man hingegen längere Zeit auf einer Couch liegt kann es vorkommen, dass man ein wenig zu kühl hat. Was uns aber am meisten adieser Heizung stört sind die Fenster, die bei kalten Außentemperaturen (ab ca. 4°C und tiefer) an den Rändern Kondenswasser bilden. Dieses Phänomen beobachteten wir auch in den Ferien in einem Hotel, dass die gleiche Heizung hatte. Die Wohnung selber ist aber nicht zu feucht.*
- *Alles gut ... wobei es sicherlich ein Phänomen gibt, dass man sich an die Heizung und die Wärme gewöhnt hat und sich entsprechend einrichtet.*
- *Auf dem Sofa direkt unter der IR Heizung ist es besonders angenehm.*
- *Es fällt nichts auf, ~~Strahlung~~ Strahlungseinflüsse müsste man messen.*
- *Direkt unter den Panels ist es ein bisschen zu warm.*
- *Es fühlt sich frisch und warm an.*
- *Besonders angenehm ist der Sitzplatz direkt unter der Strahlungsheizung.*
- *Wir haben die Heizung seit einigen Tagen nicht mehr angeht. ~~Es~~ Es ist in Darmstadt nicht so kalt, in den Räumen ist es knappe 18 Grad und wir haben Hausschuhe und Pullis an. (Umfrage Januar)*
- *Momentan ist die Heizung im Wohnzimmer nicht funktionsfähig. Raum wird indirekt durch das Schlafzimmer und das Bad geheizt.*
- *Lüftungsanlagensteuerung scheint nicht zu funktionieren. Lläuft höher als sie eingestellt ist. (K76)*
- *Heizung im Wohnzimmer konnte noch nicht repariert werden, da das entsprechende Ersatzteil noch nicht beschafft werden konnte. ~~Dadurch~~ Dadurch ist der Boden kühl. (Mikhaus)*
- *Es ist ein Sonniger Tag. Da heizt sich die Luft in der Wohnung recht gut auf und ich bin erst vor kurzem von der Arbeit gekommen und lüfte gerade durch.*
- *Ich finde die Frage zu den Heizflächen nicht passend. Diese sind ~~heiß~~ Heißen und sind wenn sie an sind - sehr sehr heiß und sonst eben nicht. Und, das geht mir immer durch den Kopf: es fehlt mir eine Frage, ob man aus aktuellen Energiespargründen die Heizung den vergangenen Winter die Heizung vielleicht*

runtergeregelt hat. Das klar ist, ~~wann~~ ~~man~~ einem kalt ist. Vielleicht ist es nicht, weil das Haus oder Heizung oder Lüftung nicht gut funktionieren, sondern ~~man~~ einfach nur 17 oder ~~18~~ manchmal 19 Grad eingestellt hat.

- Auch heute ist wieder einer der Tage, an denen man gerne die Heizung ~~ang~~ ~~acht~~ hätte, dies aber aus Kostengründen doch sein lässt. So wenig, wie in diesem Jahr haben wir noch nie geheizt....

#### Kommentare zur Bedienbarkeit:

Frage: Gibt es Probleme oder Besonderheiten bei der Bedienung der Heizung?

- ~~Schlafzimmer und Bad haben eine~~ gemeinsame Temperatureinstellung. Es können also 2 Temperatur Sets eingegeben werden (Wohnküche und ~~Schlafzimmer~~ Bad).
- überhaupt nicht. einfache Bedienung
- Sie ist mit Menu, Untermenu usw. etwas unübersichtlich bei der Bedienung.
- Wir haben zuletzt im ~~Jahr~~ geheizt, weil die Temperatur auch ohne ~~Heizung~~ in der Wohnküche bei 19 ~~ad~~ liegt. Abends auf dem Sofa reicht dann eine Wolldecke.
- Wir haben eine Zonenheizung die jeder Mitarbeiter auf seine spezielle Temperatur einstellt an seinem Arbeitsplatz. (Knölle)
- und 7 Kommentare mit dem Inhalt ~~ein~~

#### Anmerkungen:

Bei der Bewertung der Gesamtbehaglichkeit wurde insgesamt fünfmal ein „sehr unbehaglich“ angegeben, obwohl alle vorhergehenden Fragen zu Temperatur, Zugscheinungen etc. mit gut bis sehr gut bewertet wurden. Auch gab es keine Kommentare, die auf Probleme mit der Behaglichkeit hingedeutet hätten. Die Vermutung liegt nahe, dass die Versuchspersonen die Skala in umgekehrter Reihenfolge angesehen haben. Diese Personen haben bei den anderen Befragungen diese Frage mit 5 bzw. 7, also „eher behaglich“ bis „sehr behaglich“ bewertet. Wir gehen hier also von einem Versehen aus und übernehmen die Einschätzungen, die die Personen (so vorhanden) in den anderen Befragungsrunden gemacht hatten.

### 2.3.6 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die vorliegenden Daten zeigen, dass die Teilnehmenden der Studie mit der durch die Infrarotstrahlungsheizung erzeugten Behaglichkeit und der Bedienbarkeit der Technik zufrieden sind. Die Behaglichkeit wird über alle Messungen recht hoch bewertet, mit wenigen Einschränkungen, wie beispielsweise kühleren Bereichen unter dem Tisch, Kondensat am Fenster oder einer gewissen Trägheit der Heizung gegenüber einem kurzfristig veränderten Wärmebedürfnis. Die durchschnittlichen Temperaturen liegen im normalen Bereich. Die Bedienbarkeit wird weitestgehend als gut eingestuft. Die Befragung der Teilnehmenden am Projekt IR Bau II hat ergeben, dass die Nutzenden das IR-Heizsystem als thermisch „eher behaglich“ bis „behaglich“ empfinden und als „gut“ bis „sehr gut“ bedienbar bewerten. Die Ergebnisse bezüglich Behaglichkeit im Gebäude K76 entsprechen den Ergebnissen aus IR Bau I. Die Ergebnisse für das Wohngebäude in Lauerz entsprechen den Ergebnissen aus dem Gebäude K76. Das Mikrohaus in Singen wird bezüglich der Behaglichkeit noch etwas höher eingestuft.

### Methodenkritik

Die erhobenen Daten lassen auf Grund der geringen Teilnehmerzahl keine pauschale Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu. Zudem besteht die Möglichkeit, dass die Teilnehmenden durch die starke Bindung an Räumlichkeiten oder Betrieb dazu tendieren, Unannehmlichkeiten eher in Kauf zu nehmen und die Behaglichkeit und Bedienbarkeit der Technik daher höher einzustufen als dies Menschen in anderen Kontexten tun würden.

Die Teilnehmenden stellen mit Sicherheit keine Stichprobe dar, die die Bevölkerung repräsentativ spiegelt, obwohl die Repräsentativität höher einzuschätzen ist, als bei der Untersuchung im Rahmen des Vorläuferprojekts IR-Bau, bei dem die Identifikation mit dem Wohnraum und dem gesamten Projekt noch deutlicher war. Weitere Studien mit repräsentativeren und größeren Stichproben könnten Aufschluss darüber geben, wie die Behaglichkeit und Bedienbarkeit von Infrarotstrahlungsheizungen von den Nutzenden bewertet wird.

### 3. Strategien zur Optimierung des Lastprofils

Für die Optimierung von Elektrodirektheizungen spielt vor allem das Zusammenspiel von lokaler regenerativer Stromerzeugung und dem Stromverbrauch der Heizungen eine entscheidende Rolle. Wie die Messergebnisse der untersuchten Pilotprojekte aufzeigen, gibt es hierbei je nach Konstellation sehr große Unterschiede. Am einfachsten beeinflussen lässt sich dabei das Lastprofil der elektrischen Verbraucher. Durch eine mögliche Angleichung des Verbrauchs im Tagesverlauf an die Erzeugungskurve der PV-Anlage lässt sich der Eigennutzungsgrad sowie der solare Deckungsgrad entscheidend optimieren. Für ein besseres Verständnis werden daher zunächst die Begriffe Lastprofil, Eigennutzungsgrad und solarer Deckungsgrad beschrieben.

#### 3.1 Elektrische Lastprofile

Das Lastprofil oder auch Lastgang oder Lastkurve eines elektrischen Verbrauchers beschreibt die Verteilung der elektrischen Leistung über einen bestimmten Zeitraum. Es gibt einzelne Tageslastprofile, gemittelte Tageslastprofile über längere Zeiträume oder auch Jahresprofile, die die jahreszeitlichen Schwankungen zeigen können.

Abbildung 42 zeigt das elektrische Lastprofil eines beispielhaften Haushalts über den Tagesverlauf in stündlicher Auflösung an. Im Verlauf sind deutliche Schwankungen und Lastspitzen erkennbar. Morgens nach dem Aufstehen, um die Mittagszeit beim Kochen und abends durch die Beleuchtung, Medien und Kochen. Der Stromverbrauch ist bei Wohnnutzung im Winter generell etwas höher, da hier mehr Strom für die Beleuchtung gebraucht wird.

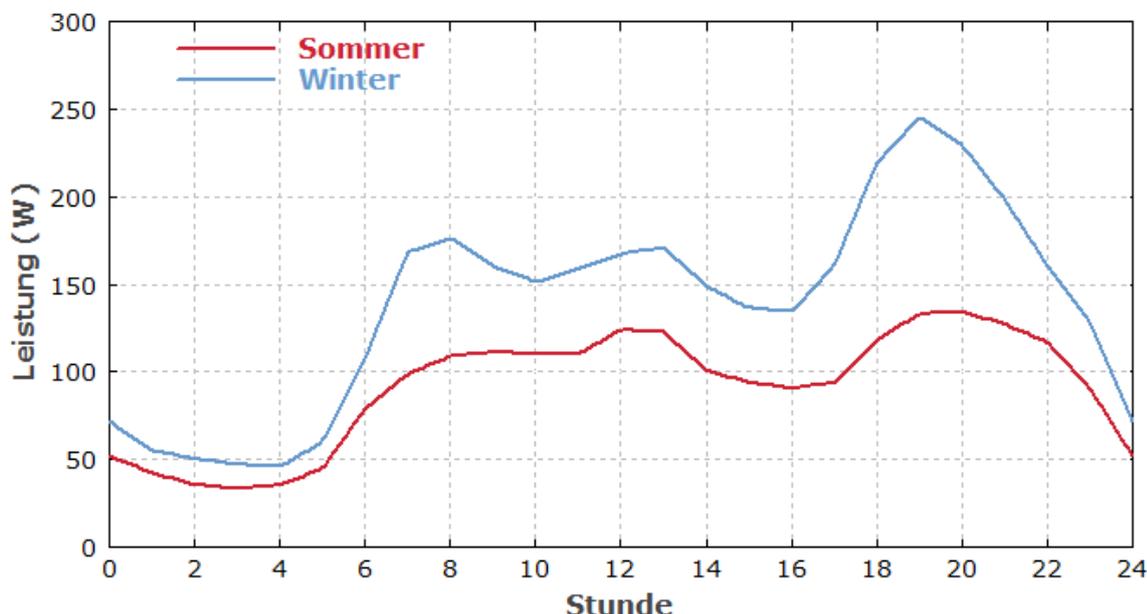


Abbildung 42: Beispielhafte durchschnittliche Tages-Lastprofile von Wohngebäuden für elektrische Energie im Sommer und Winter, Grafik:: [www.energie-lexikon.info/lastprofil](http://www.energie-lexikon.info/lastprofil)

Das individuelle Lastprofil eines Gebäudes hängt stark von der Geräteausstattung und dem Nutzungsprofil ab. Im Zusammenspiel mit Elektroheizungen spielt vor allem eine mögliche Anpassung der Verbrauchskurve an die Erzeugungskurve von gebäudeintegrierten Photovoltaikanlagen eine große

Rolle. Würde der Verbrauch nur zu Zeiten der Stromproduktion, und auch nur immer genau in der Höhe der Produktion stattfinden, könnte man eine optimale solare Eigendeckungsrate erhalten. In der Praxis ist dies jedoch nicht ohne weiteres möglich. Elektroheizungen haben eine feste Leistung. Werden Sie mit einem handelsüblichen Thermostat betrieben, ist die Heizung entweder aktiv und bezieht 100 % ihrer Leistung oder sie ist aus und bezieht keine Leistung. Die Ertragskurve der Stromproduktion jedoch hat bei PV-Anlagen im Tagesverlauf durch Sonnenbahnen und Witterung sehr starke Schwankungen und ist in der Heizperiode ohnehin verhältnismäßig niedrig. Auch ist der Heizwärmebedarf in der Regel in der Nacht höher als am Tag und demnach in einem Zeitraum, in dem keine solare Stromproduktion stattfindet.

Um auf diese Umstände zu reagieren gibt es mehrere Optionen, wie die Regelung der Heizungen, die Speicherung des überschüssigen Stroms, die Speicherung von Wärme oder Anreize für ein unterstützendes Nutzerverhalten. Die Wirkung dieser Maßnahmen lässt sich im sogenannten solaren Deckungsgrad ausdrücken.

### 3.2 Eigennutzungsgrad und solarer Deckungsgrad

Eigennutzungsgrad und solarer Deckungsgrad sind wichtige Kenngrößen beim Betrieb einer Photovoltaikanlage und dem Zusammenspiel der Anlage mit lokalen Energieverbrauchern.

#### Eigennutzungsgrad

Der Eigennutzungsgrad beschreibt das Verhältnis von selbstgenutztem PV-Strom zum gesamten von der PV-Anlage erzeugten Strom. Der Eigennutzungsgrad wird in % angegeben und berechnet sich wie folgt:

$$\text{Eigennutzungsgrad (in \%)} = \frac{\text{Eigenverbrauch PV (in kWh)}}{\text{Gesamterzeugung PV (in kWh)}}$$

Ist der Strompreis für den Netzbezug höher als die Einspeisevergütung des PV-Stroms, wirkt sich ein hoher Eigennutzungsgrad in der Regel positiv auf die Wirtschaftlichkeit einer PV Anlage aus. Ebenso führt er durch die lokale Nutzung zu einer Entlastung des öffentlichen Stromnetzes und verhält sich somit „netzdienlich“.

#### Solarer Deckungsgrad

Der solare Deckungsgrad beschreibt das Verhältnis von selbst genutztem PV Strom zum gesamten Stromverbrauch im Gebäude. Der solare Deckungsgrad wird in % angegeben und lässt sich wie folgt berechnen.

$$\text{Solarer Deckungsgrad (in \%)} = \frac{\text{Eigenverbrauch PV (in kWh)}}{\text{Gesamtstromverbrauch (in kWh)}}$$

Um einen hohen solaren Deckungsgrad zu erreichen ist es aufgrund der oben beschriebenen Differenzen in den Lastprofilen erforderlich, entweder den am Tag von der PV-Anlage erzeugten Strom zu speichern, die solar produzierte Wärme zu speichern oder durch ein günstiges Nutzerverhalten den Strombedarf möglichst mit dem Stromertrag in Deckung zu bringen. Da in der Regel am Gebäude solar erzeugter Strom deutlich günstiger ist als der Bezug über das Netz ist der solare Deckungsgrad neben der netzentlastenden Funktion vor allen ein wesentlicher Aspekt für die ökonomische Bewertung von Stromdirektheizungen und bildet sinngemäß den Autarkiegrad eines Gebäudes ab.

### 3.3 Optimierung der Lastprofile

Aus den Messergebnissen in Kapitel 3.2 geht hervor, dass die Anpassung des Stromverbrauchs an die Stromerzeugung von hoher Relevanz für den solaren Deckungsgrad und damit auch für die ökologische und ökonomische Bilanz des Gesamtsystems ist. Im nachfolgenden Abschnitt werden Strategien vorgestellt mit denen sich die Lastprofile hinsichtlich eines hohen solaren Deckungsgrads optimieren lassen.

#### **Anpassung der solaren Stromerzeugung**

Der hohe Stromverbrauch einer Elektrodirektheizung stellt für die Optimierung besonders hohe Anforderungen an die Nutzung der Gebäudehüllflächen zur solaren Stromerzeugung durch PV-Systeme. Somit ist aus wirtschaftlicher und vor allem ökologischer Sicht der Zubau einer größer dimensionierten PV-Anlage gegenüber mit Wärmepumpen oder Fernwärme beheizten Gebäude sinnvoll. Die Wirtschaftlichkeit der Elektrodirektheizung steigt, je weniger Netzstrom im Winter zum Heizen bezogen werden muss. Gleichzeitig sinkt der CO<sub>2</sub> Ausstoß bei hohem solaren Deckungsgrad und die lokale Netzbelastung sinkt (siehe hierzu Kapitel 5.1 Einfluss von gebäudeintegrierter Photovoltaik auf die Jahresbilanzen bei Stromdirektheizungen).

Hierzu sollte die Photovoltaikanlage an den Strombedarf im Winter und den Übergangsmontaten angepasst werden. Will man den Solarertrag für die Heizperiode optimieren, muss man den zu dieser Zeit vorherrschenden geringeren Einstrahlungswinkel der Sonne und mögliche Schneebedeckung beachten. Vor allem Schneebedeckung kann in bestimmten Regionen zu einer erheblichen Minderung der solaren Deckung im Winter führen. Für eine Optimierung ist es entsprechend von Vorteil, die PV-Module neben der Montage am Dach zusätzlich an der Fassade zu installieren. Der vertikale Winkel sorgt bei flacherer Einstrahlung für einen relativ gesehen höheren Ertrag in den Kernmonaten November bis Februar, zugleich kann Schnee nicht liegen bleiben (siehe Abbildung 36).

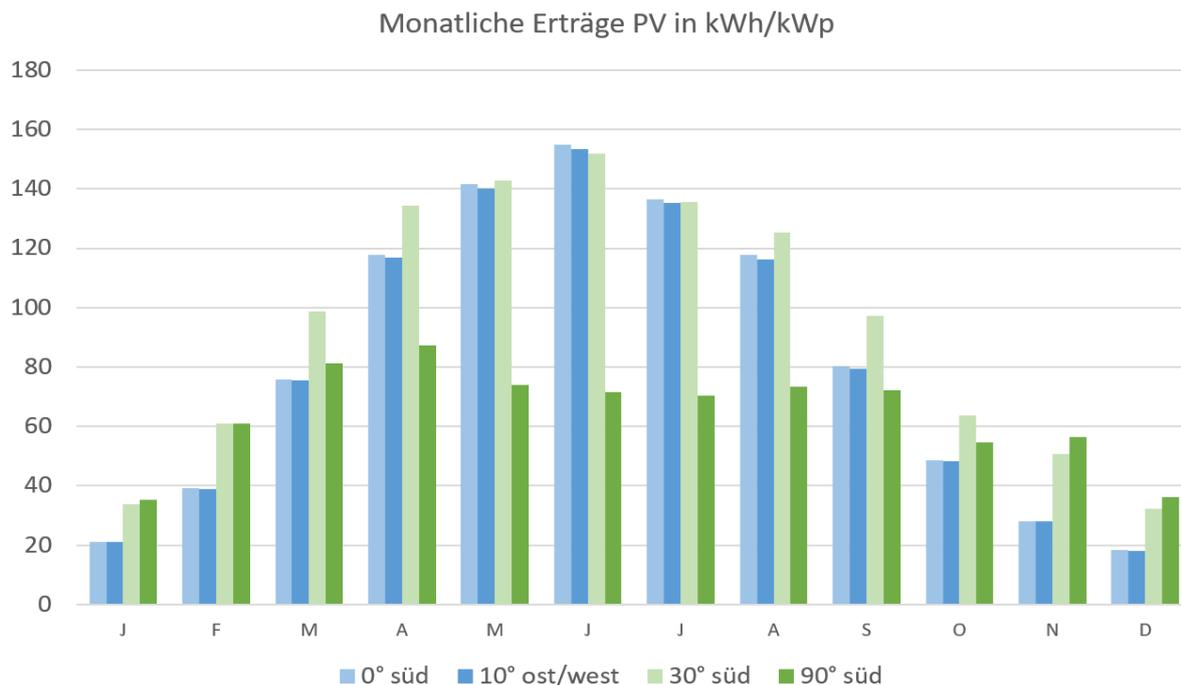


Abbildung 43: Typische monatliche Stromerträge bei PV-Anlagen pro kWp in Abhängigkeit der Orientierung (Simulation mit PV-SOL, Standort Würzburg)

### Lastverschiebung über elektrische Speicher

Ein technisch einfacher Weg der Lastanpassung stellt ein elektrischer Speicher dar. Der erzeugte Strom kann lokal, z.B. über Batteriespeicher, ohne große Verluste gespeichert und flexibel bei Bedarf wieder abgerufen werden. Dies ist aufgrund der hohen Speicherkosten nur als Kurzzeitsystem sinnvoll. Zur Einordnung der Sinnhaftigkeit können folgende Kennwerte aus den Messungen hilfreich sein: Der Tagesstromverbrauch eines mit Elektrodirektheizung versorgten Gebäudes kann an einem Wintertag bereits in sehr kleinen Gebäuden, wie dem untersuchten Mikrohaus (ca. 50 m<sup>2</sup>), bis zu rund 35 kWh betragen. In größeren Gebäuden wie dem MFH K76 (ca. 1.360 m<sup>2</sup>) beträgt der tägliche Strombedarf bereits bis zu 300 kWh (siehe Abbildung 44). Die Speicherung dieser Energiemengen ist mit den heute verfügbaren Stromspeichern wirtschaftlich und ökologisch noch nicht darstellbar. Sollte sich die Speichertechnologie in Zukunft, was zu erwarten ist, deutlich verbessern, wäre eine Lastanpassung mittels dezentraler Stromspeicher die beste und flexibelste Möglichkeit. Alternativen zu Batteriespeichern in Form von Systemen zur lokalen Wasserstoffproduktion, Speicherung und Rückverstromung sind aktuell in der Erprobung, auch hier ist eine wirtschaftliche und großmaßstäbliche Anwendung noch nicht absehbar. Die Speicherkapazität ist dann auch in jahreszeitlicher Dimension möglich, jedoch müssen in diesem Fall erhebliche Umwandlungsverluste in der Größenordnung von 50% kompensiert werden.

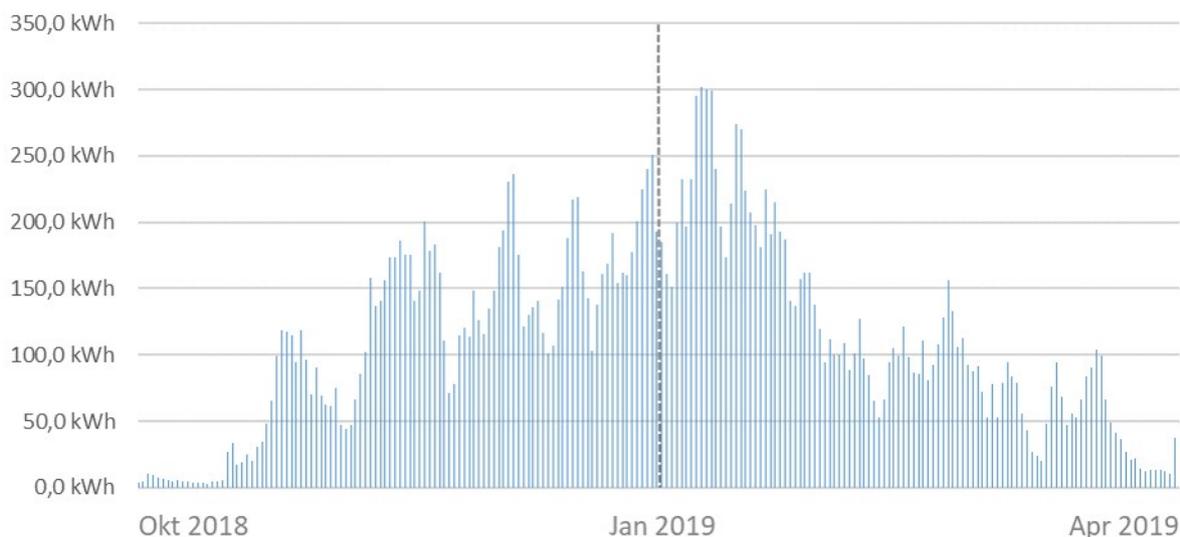


Abbildung 44: Gemessene Tagesverbräuche der IR-Heizungen im MFH K76 (HP 2018/2019)

### Lastverschiebung über thermische Speicher

Eine wichtige Alternative ist die lokale thermische Speicherung der elektrischen Energie. Hier wird der überschüssige PV-Strom auch ohne zeitgleichen Bedarf in Wärme umgewandelt. Die Wärme kann auf verschiedene Weise erzeugt, thermisch gespeichert und sowohl für die Heizwärmeversorgung als auch für das Trinkwarmwasser genutzt werden.

Gegenüber einem üblicherweise bei Stromdirektheizungen eingesetzten Durchlauferhitzer für die Trinkwassererwärmung hat ein elektrisch beheizter Warmwasserspeicher deutliche Vorteile für die Lastverschiebung und die potenzielle Nutzung solarer Erträge. Der durchschnittliche Warmwasserbedarf pro Person und Tag beträgt etwa 40 L. In einem typischen 120 L Warmwasserspeicher lässt sich so der Bedarf einer dreiköpfigen Familie speichern. Das Wasser kann tagsüber mit flexibler, dem Solarertrag angepasster Leistung erzeugt, gespeichert und am Abend oder bis zum nächsten Morgen ohne den Bezug von zusätzlichem Netzstrom genutzt werden. Zudem ist in diesem Fall eine wesentlich geringere elektrische Anschlussleistung erforderlich als bei einem elektrischen Durchlauferhitzer (typisch: 2-6 kW gegenüber 18-33 kW). Ist genug Raum vorhanden, kann die Speichergröße entsprechend erhöht werden, die auftretenden Speicherverluste müssen jedoch in der Gesamtbilanz berücksichtigt werden.

Bei der Heizwärmeversorgung auf Basis direktelektrischer Systeme entfällt diese Option aufgrund des fehlenden hydraulischen Verteilsystems. Eine thermische Speicherung findet hier systembedingt dadurch statt, dass die Wärmeleistung über einen hohen Strahlungsanteil in die raumumfassenden Bauteile übertragen wird oder das wärmeerzeugende Element selbst eine entsprechende Speichermaße besitzt (z.B. elektrische Fußbodenheizung im Estrich oder IR-Heizung mit rückseitiger Speicherplatte). Ein Nachteil dieses Prozesses besteht darin, dass die Wärme nicht zeitlich flexibel abgerufen werden kann. Ebenso ist die spezifische Wärmespeicherkapazität von Wasser beispielsweise vier Mal so hoch wie von Beton, Stein oder Estrich. Ebenso ist auch die für die Speicherkapazität relevante mögliche Temperaturspreizung in einem Bauteil deutlich geringer als bei Warmwasserspeichern. Die mögliche Speicherkapazität ergibt sich insbesondere durch eine temporäre Übertemperatur. Versucht man die Temperaturspreizung bei der Bauteilaktivierung zu erhöhen, hat dieses jedoch ab einem entsprechenden Niveau Einfluss auf die Raumlufttemperatur, die damit verbundene Behaglichkeit und die Wärmeverluste

des Raumes durch Transmission und Lüftung. Das Prinzip bildet dennoch eine wichtige Komponente in der Planung, die einen relevanten Beitrag zur lokalen Lastverschiebung in Gebäuden beitragen kann.

Abbildung 45 zeigt exemplarisch für das Mikrohaus die möglichen Wärmespeicherkapazitäten verschiedener Ansätze. In einem typischen 1000 l Warmwasserspeicher können bei einem Temperatur-Delta von 30 Kelvin (z.B. 40 – 70 °C) ca. 35 kWh gespeichert werden. Erhöht man z.B. mit einer direktelektrischen Fußbodenheizung die Temperatur im Estrich bei 50 m<sup>2</sup> beheizter Wohnfläche um vier Kelvin lassen sich 7,2 kWh Energie einspeichern. Aktiviert man, wie im Mikrohaus umgesetzt, die gesamte Betonbodenplatte und erhöht die Kern-Temperatur um vier Kelvin lassen sich knapp 30 kWh einspeichern. Die Übertemperatur im Bauteil kommt dabei nur verzögert und mit niedrigerer Amplitude in der Raumluft an. Bei einer direkten Erwärmung der Raumluft im selben Gebäude von 20 °C auf 26 °C ließen sich hingegen nur 0,3 kWh im Luftvolumen speichern.

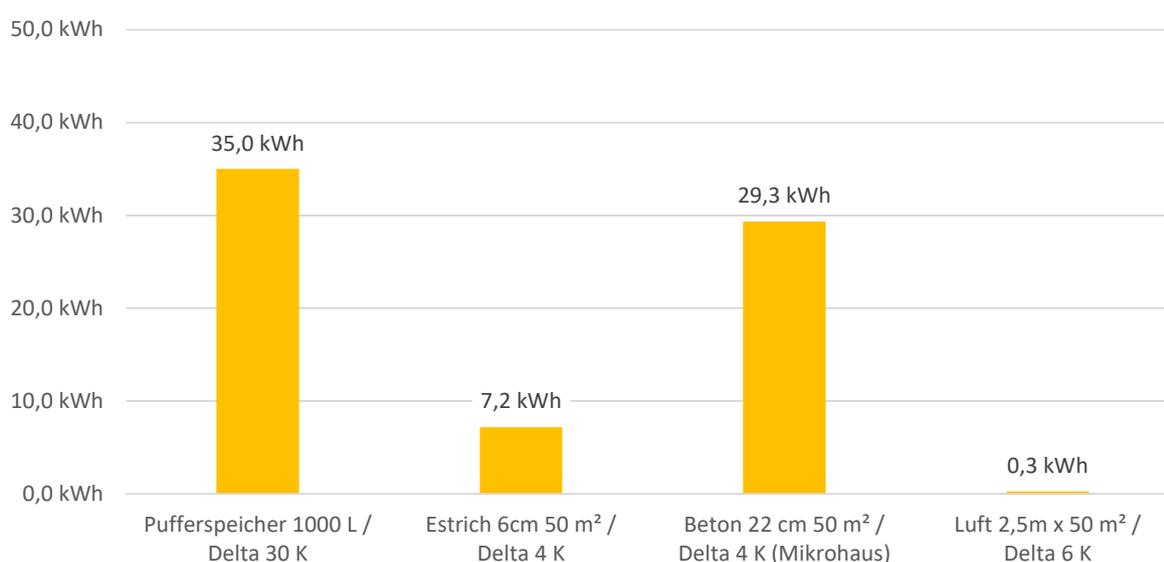


Abbildung 45: Beispielhafte thermische Speicherkapazität verschiedener Ansätze zur Lastverschiebung im Mikrohaus

### Lastmanagement über eigenverbrauchsoptimierte Regelung

Für die thermische Speicherung ist dementsprechend eine Regelung von Vorteil, die speziell auf eine Optimierung des Eigenverbrauchs von lokaler solarer Stromgewinnung ausgelegt ist. Neben den typischen Regelsystemen auf Erzeugerseite kommen aktuell und zukünftig auf Nutzerseite vermehrt elektrische Verbraucher zum Einsatz, die ihren Strombezug und die damit verbundene Dienstleistung bis zu einem bestimmten Maß in Abhängigkeit des solaren Stromangebotes steuern können (z.B. smarte Haushaltsgeräte, wie Kühlschränke, Waschmaschine etc. oder smarte Ladestationen). Bei der Wärmeversorgung muss die Regelung die Wärmeerzeuger (Heizung und Warmwasser) möglichst mit flexibler, dem solaren Ertrag angepassten Leistung ansteuern, die thermischen Speicher sinnvoll über den Tag aufladen und gleichzeitig die thermische Behaglichkeit im Raum berücksichtigen können.

### 3.4 Optimierung des Lastprofils am Beispiel des Mikrohauses

Im Gebäude Mikrohaus wurde die solare Deckung der Wärmeverbraucher Heizung und Warmwasser mithilfe einer speziellen, auf Eigenverbrauch optimierten Regelung (myPV AC-Thor 9s), eines elektrisch betriebenen Trinkwasserboilers sowie einer elektrischen Fußbodenheizung in der Betonbodenplatte als thermischer Speicher verbessert. Das Funktionsprinzip zeigt die Grafik in Abbildung 46:

1. In der Nacht wird auch während der Heizperiode im Idealfall nur für die Haushaltsbedarfe Strom vom Netz bezogen.
2. Sobald die PV-Anlage mit der Stromerzeugung beginnt, wird möglicher Überschussstrom dafür verwendet, den Trinkwasserboiler zu erhitzen.
3. Ist dessen Maximaltemperatur (ca. 80°C) erreicht, wird in der Heizperiode weiterhin produzierter Solarstrom dafür verwendet, über die Fußbodenheizung die Bodenplatte als thermischen Speicher aufzuladen.
4. Die Erwärmung der Bodenplatte endet, sobald kein Solarstrom mehr produziert wird oder die vom Nutzer individuell einstellbare maximale Lufttemperatur im Raum (hier ca. 26 °C) erreicht ist.
5. Wird weiterhin Überschussstrom produziert, erfolgt eine Einspeisung in das öffentliche Netz.
6. Im Idealfall konnte am Tag so viel Wärme in die Bodenplatte eingespeichert werden, dass ein Unterschreiten der Raumsolltemperatur über die gesamte Nacht nicht erfolgt und daher kein Netzbezug für die Wärmeerzeugung erforderlich ist.

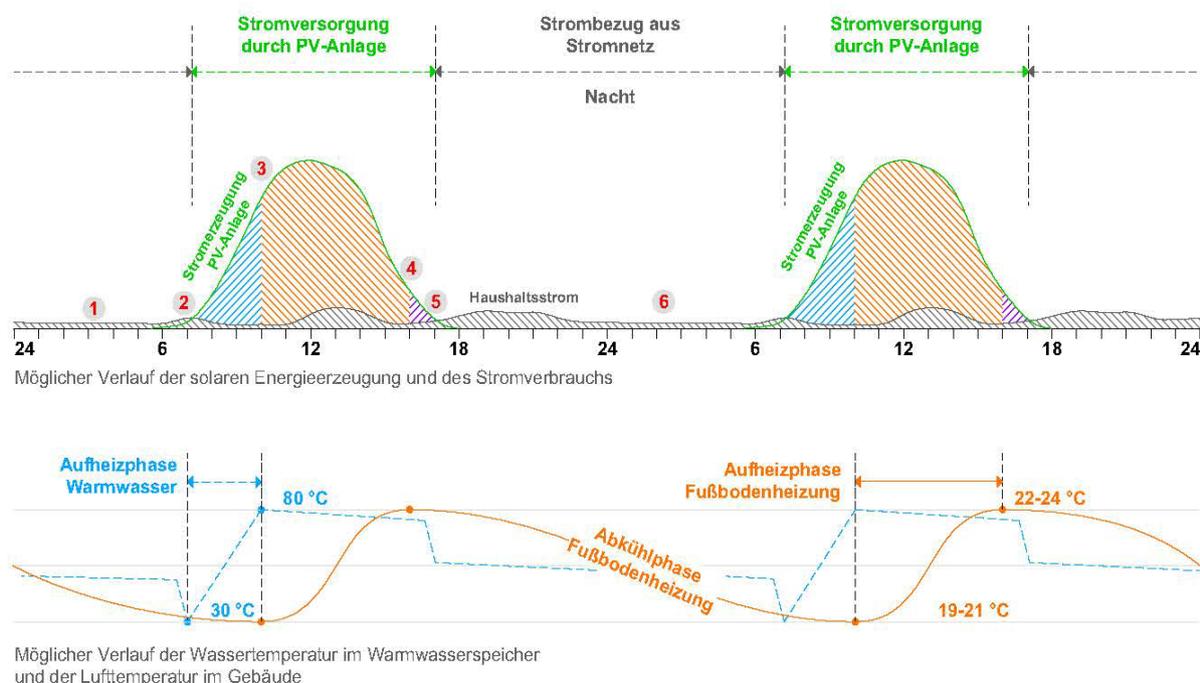
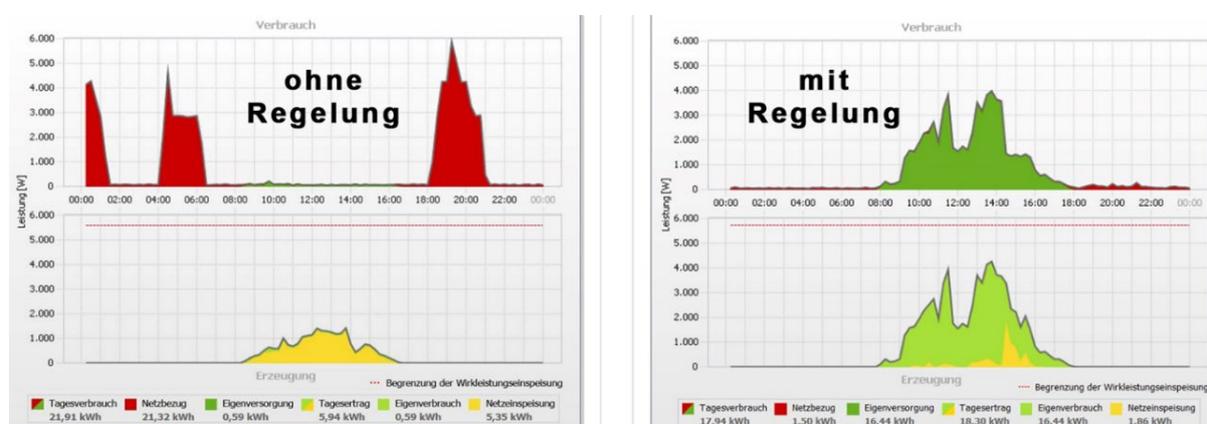


Abbildung 46: Funktionsweise der Aktivierung von thermischer Speichermaße im Mikrohaus

Abbildung 47 zeigt deutlich die Unterschiede in der Lastkurve ohne und mit optimierter Regelung. Diese wurde erst mehrere Wochen nach Fertigstellung aktiviert, so dass – zumindest für den unbewohnten Zustand – Messdaten für den Heizbetrieb ohne und mit Optimierung erfasst werden konnten. Ohne Regelung war die elektrische Fußbodenheizung vor allem nachts aktiv, da hier ohne solare thermische Gewinne der Heizwärmebedarf am höchsten war. Der solare Ertrag der PV-Anlage am Tag wurde fast vollständig ins Netz eingespeist. Mit Regelung wurde die elektrische Fußbodenheizung durch die Regelung dynamisch, entsprechend dem aktuellen Stromertrag der PV-Anlage, in der Leistung geregelt. Die Bodenplatte wurde entsprechend tagsüber durch den direkt genutzten Strom vom Dach erwärmt und somit als Speichermaße aktiviert. Ein nächtlicher Strombezug aus dem öffentlichen Netz war dann nicht mehr erforderlich. Für die Bewohner des Mikrohauses wurde eine zweiseitige Erläuterung verfasst, in dem das Konzept detailliert beschrieben ist.



Grafik links: 31. Dezember 2020, unbewohnt. Grafik rechts: 17. Februar 2021, unbewohnt.

Abbildung 47: Vergleich der Last- und Erzeugungsprofile im Mikrohaus ohne und mit Regelung, Grafik: Auszug aus SMA Sunny Portal

Voraussetzung für einen solchen Ansatz ist, dass der thermische Speicher ausreichend groß dimensioniert ist und die Leistung des Wärmeerzeugers mit der Leistung der PV-Anlage (in den Übergangszeiten und im Winter) kompatibel ist.

Abbildung 48 zeigt die im Januar 2022 gemessenen Stromverbräuche im inzwischen bewohnten Mikrohaus. Im Peak werden im Mittel rund 16 kWh und bis zu 30 kWh pro Tag verbraucht. Zwar ist der solare Ertrag im Januar noch zu gering, um den thermischen Speicher voll zu laden, aber wie in Abbildung 45 zu sehen ist, kann die Bodenplatte bei einer Temperaturspreizung von 4 K den Tagesverbrauch prinzipiell einspeichern. Im Januar betrug die Autarkierate rund 37%.

Abbildung 47 zeigt die Tagesverbräuche im Februar. Der Tagesverbrauch liegt hier im Mittel bei ca. 13 kWh und max. 16 kWh. Der thermische Speicher könnte bei voller Beladung den Wärmeverbrauch von bis zu zwei Tagen decken und so auch Tage mit nur geringer solarer Einstrahlung überbrücken. Ab Mitte Februar konnte der Stromverbrauch für die Wärmeversorgung vollständig durch die PV-Anlage gedeckt werden. Der geringe Reststrombezug aus dem Netz resultiert aus Haushaltsstrom in den Abendstunden. Im Februar wurde dadurch bereits eine Autarkiequote von rund 94% erreicht.

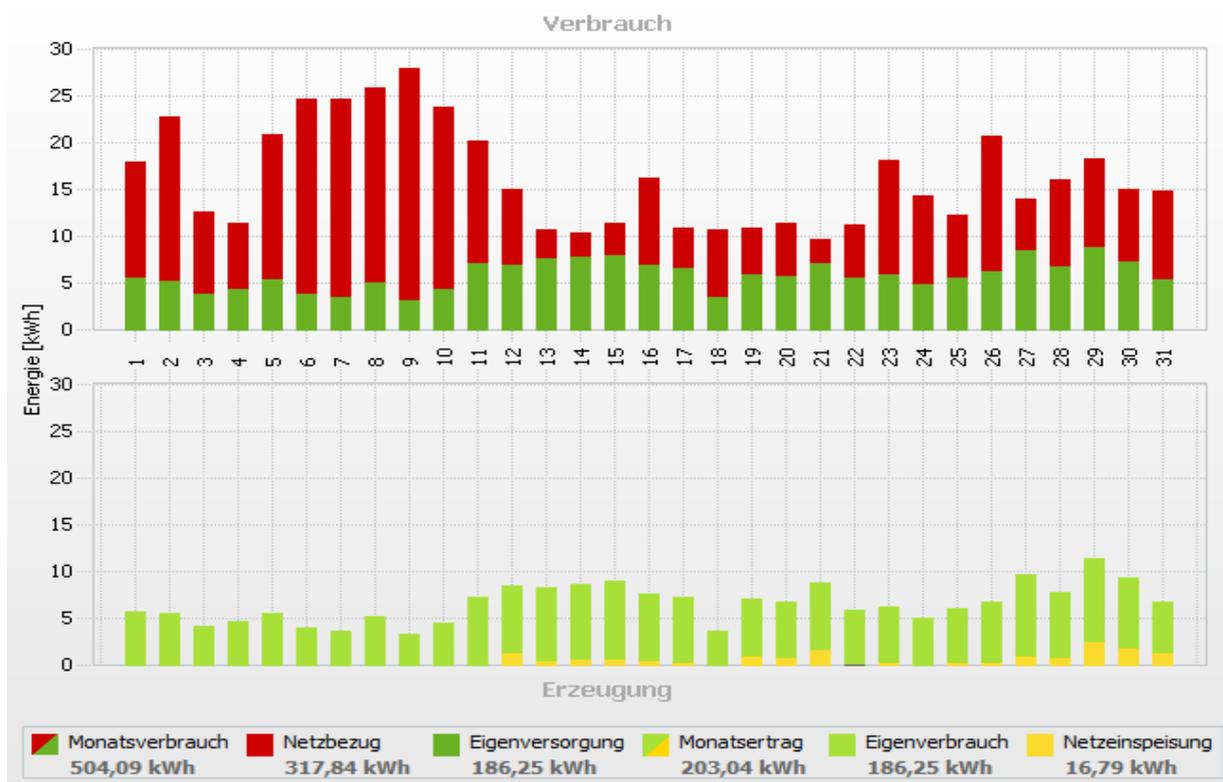


Abbildung 48: Stromverbrauch und Erzeugung im Mikrohaus Januar 2022, Grafik: Auszug aus SMA Sunny Portal

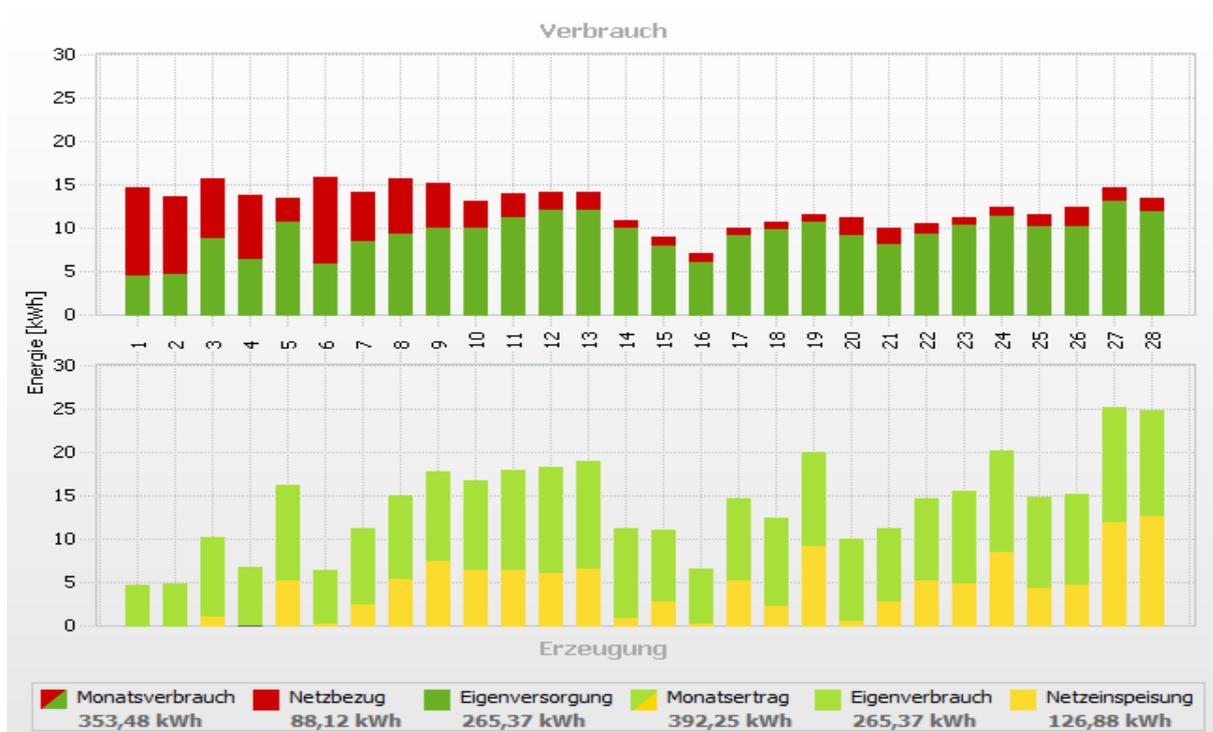


Abbildung 49: Stromverbrauch und Erzeugung im Mikrohaus Februar 2022, Grafik: Auszug aus SMA Sunny Portal

Für eine Detailuntersuchung zum thermischen Verhalten der elektrischen Fußbodenheizung in Verbindung mit der Raumluft wurden im Gebäude entsprechende Sensoren eingebaut. Abbildung 50 zeigt die Positionen in der Bodenplatte, einmal oberhalb der Heizdrähte (oben), was im Wesentlichen der Oberflächentemperatur des Bodens entspricht. Ein weiterer Sensor ist am unteren Rand der Betonplatte im Übergang zur Dämmung angebracht (Mitte), sowie ein dritter Sensor unterhalb der Dämmebene gegen das Erdreich (unten).

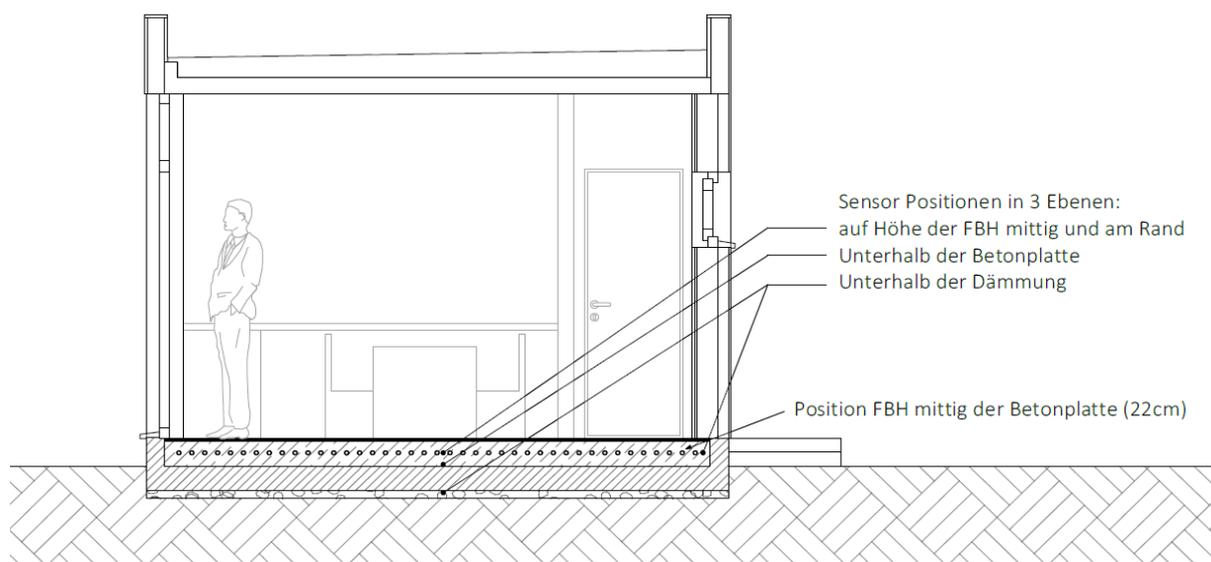


Abbildung 50: Anordnung der Temperatursensoren in der Bodenplatte im Mikrohaus auf drei Ebenen (oben / Mitte / unten)

Das Verhalten im Detail zeigen die Grafiken in Abbildung 51 und Abbildung 52. Dort ist gut zu erkennen, dass im November der PV-Ertrag ausreichend war, um die Lasten der Fußbodenheizung und des Trinkwasserboilers abzudecken, entsprechend gut konnte die Regelung das gewünschte Verhalten abbilden. Die Daten zeigen jedoch auch die damit verbundene hohe Dynamik bei der Lufttemperatur. Diese schwankt bedingt durch die Beladungs- und Entladungsphasen zwischen 18°C und 24°C. Im Sinne der Energieoptimierung ist dies günstig, jedoch entspricht dies nicht unbedingt den Erwartungshaltungen typischer Nutzer.



Abbildung 51: Beispielhaftes Wochenprofil im November von PV-Ertrag und Stromverbrauch für die elektrische Fußbodenheizung im Hauptraum (Wohnzimmer) und dem Trinkwasserboiler im Mikrohaus (Heizperiode 2021/2022)

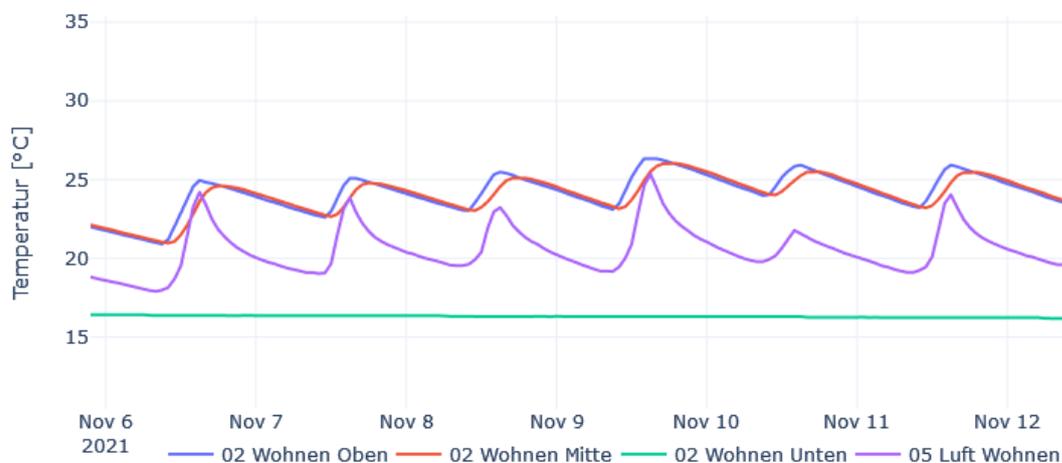


Abbildung 52: Beispielhaftes Wochenprofil im November der Temperaturen in der Fußbodenheizung (Oberflächentemperatur / Kerntemperatur / Temperatur unter der Dämmebene) sowie die Lufttemperatur im Mikrohaus (Heizperiode 2021/2022)

Ungünstiger sieht die Wochenbilanz in der Kernzeit der Heizperiode aus. Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen die entsprechenden Daten drei Wochen später. Der PV-Ertrag ist trotz der spezifischen Leistung von  $164 \text{ Wp/m}^2$  Wohnfläche inzwischen so gering, dass nur ein kleiner Teil der Wärmelast abgedeckt werden kann. Die höhere Heizleistung führt zu längeren Verbrauchsphasen sowie zu zusätzlichen Verbräuchen zwischen den PV-Erträgen. Dies führt zu höheren Oberflächentemperaturen am Fußboden, aber auch zu einem homogeneren Verlauf der Lufttemperatur.

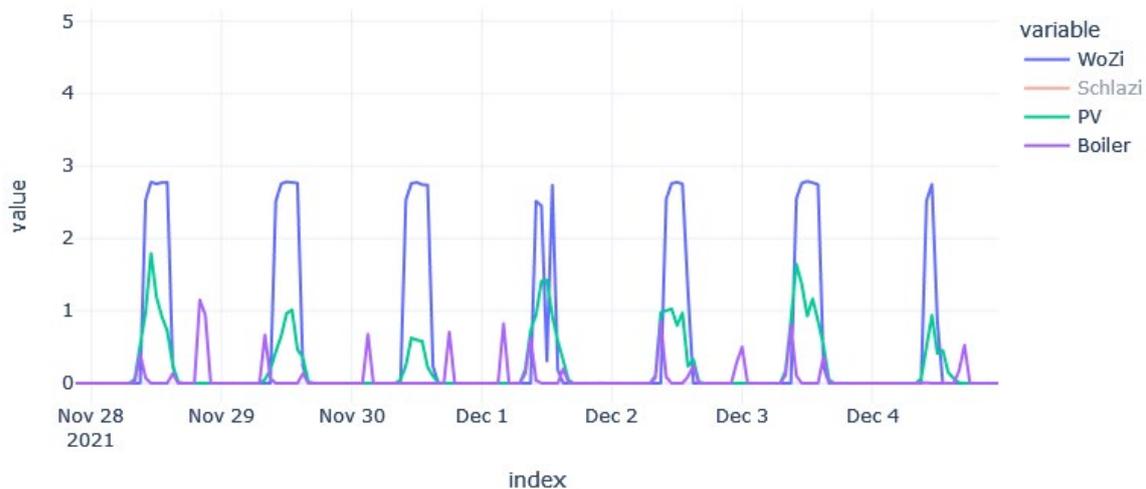


Abbildung 53: Beispielhaftes Wochenprofil im Januar von PV-Ertrag und Stromverbrauch für die elektrische Fußbodenheizung im Hauptraum (Wohnzimmer) und dem Trinkwasserboiler im Mikrohaus (Heizperiode 2021/2022)



Abbildung 54: Beispielhaftes Wochenprofil im Januar der Temperaturen in der Fußbodenheizung (Oberflächentemperatur / Kerntemperatur / Temperatur unter der Dämmebene) sowie die Lufttemperatur im Mikrohaus (Heizperiode 2021/2022)

### 3.5 Optimierung des Lastprofils am Beispiel von Wohnung 6 im Gebäude MFH K76

Im Mehrfamilienhaus K76 wurde bei Inbetriebnahme keine spezielle, auf Eigenverbrauch des Solarstroms optimierte Regelung eingebaut. Die installierten Temperaturregler für die Infrarot-Elemente erlauben aber die Festlegung verschiedener Solltemperaturvorgaben zu unterschiedlichen Zeitfenstern. So lässt sich durch den Nutzer ein intermittierender Betrieb z.B. für eine Nachtabsenkung einstellen. Dieser kann jedoch vom Nutzer auch zur bedingten Anpassung des Verbraucherlastprofils der Infrarotheizungen an die solare Erzeugung der PV-Anlage genutzt werden.

In Wohnung 6 wurde dazu der Sollwert der Heizung ergänzend zur Nachtabsenkung auf eine Übertemperatur am Tag eingestellt (tagsüber 24 °C / nachts 18 °C). Das Ziel war, durch eine verstärkte Aktivierung der thermischen Speichermaße in der Wohnung eine Reduktion des Stromverbrauchs in den Nachtstunden zu erreichen. Abbildung 55 zeigt in roter Farbe den Tageslastgang der so geregelten IR-Heizungen in Wohnung 6, sowie in blau dargestellt den mittleren Tageslastgang der IR-Heizungen in den restlichen Wohnungen. In Grün ist ergänzend die Erzeugungskurve der PV-Anlage dargestellt. Man erkennt deutlich, dass die Lastkurve der Wohnung 6 zwar nicht optimal, aber schon deutlich verbessert mit der Erzeugungskurve der PV-Anlage zusammenpasst. Als negative Konsequenz führt diese Methodik jedoch zu einer deutlich erhöhten Lastspitze in den Morgenstunden, die zudem mit dem typischen Lastprofil des Trinkwarmwasserbedarfs korreliert, das beim Gebäude K67 über elektrische Durchlauferhitzer bereitgestellt wird. In Abbildung 56 ist der Temperaturverlauf in Wohnung 6 zu sehen. Die über den Tag zugeführte Wärme mit einer Übertemperatur von nur rund 0,5 K reicht hier aus, um einen nächtlichen Strombezug für die Heizung zu vermeiden. Somit kann bereits über die vorhandenen Thermostate eine einfache Optimierung der solaren Deckung erreicht werden. Auf Schwankungen im Ertrag der PV-Anlage im Tagesverlauf aufgrund von Sonnenstand, Witterung oder Tageslänge kann dieser Art der Regelung jedoch keinen Einfluss nehmen.

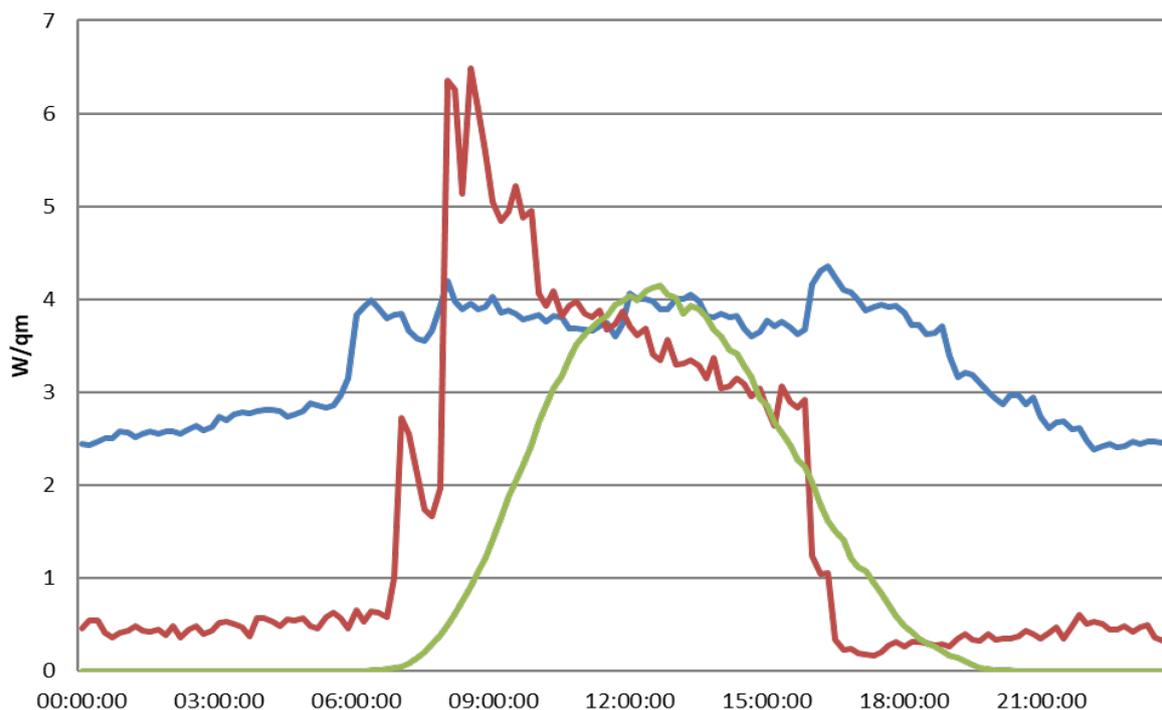


Abbildung 55 Tageslastgang IR Heizung und PV-Erzeugung K76 (rot: Wohnung 6, blau: Mittelwert aller übrigen Wohnungen)

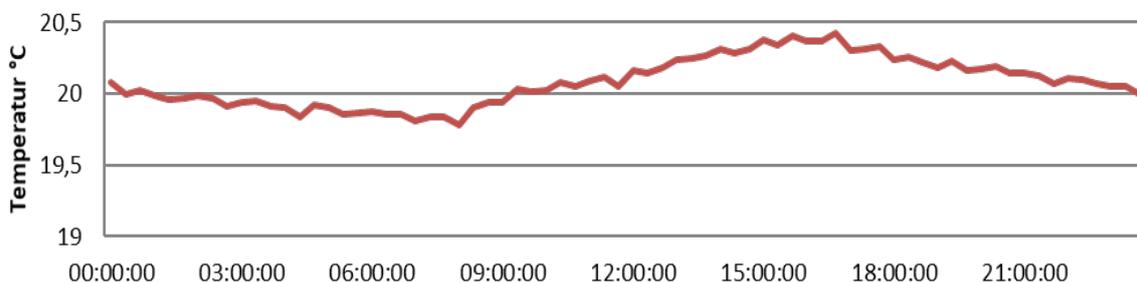


Abbildung 56: Temperaturverlauf Wohnung 6 über den Tag

### 3.6 Optimierung des Lastprofils der Warmwassererzeugung am Beispiel von Gebäude MFH K76 und Mikrohaus

Neben dem Verhalten der Heizung muss, wie oben aufgeführt, genauso der Lastgang der Warmwassererzeugung an den solaren Ertrag angepasst werden. Abbildung 57 und Abbildung 58 zeigen deutlich die Unterschiede zwischen unregelmäßigem elektrischen Durchlauferhitzern im MFH K76 und geregelter elektrischer Warmwasserboiler im Mikrohaus. Die Durchlauferhitzer sind immer dann aktiv, wenn Warmwasserbedarf besteht. So ergibt sich ein deutlicher Peak in den Morgenstunden zwischen sechs Uhr und neun Uhr. Da diese Zeiten üblicherweise außerhalb der Stromerzeugung der PV-Anlage liegen muss der dafür benötigte Strom fast vollständig aus dem Netz bezogen werden.

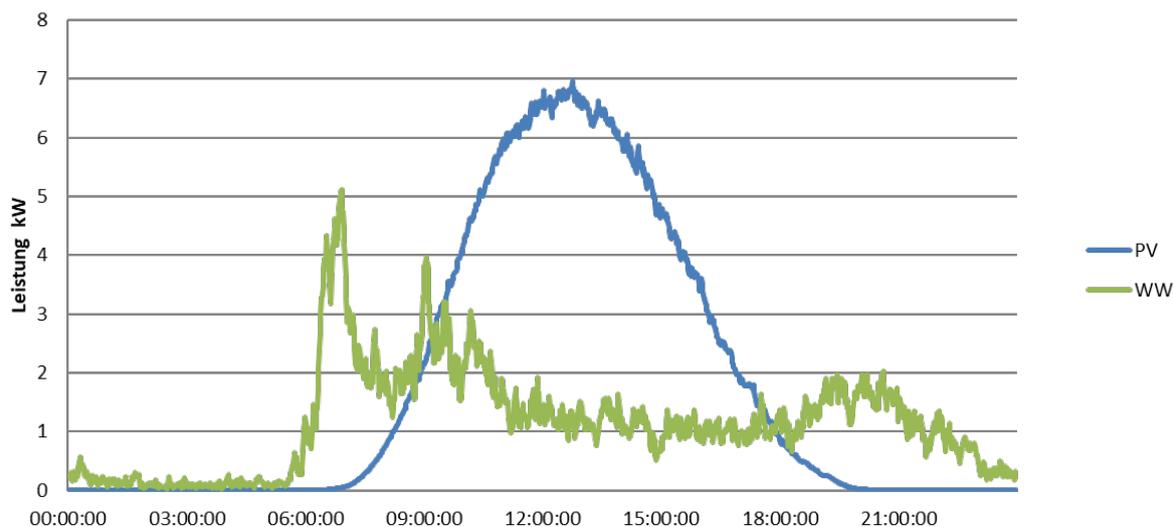


Abbildung 57: Mittlerer Tageslastgang Durchlauferhitzer und Photovoltaik K76

Im Mikrohaus hingegen wird der 120 l Warmwasserspeicher dynamisch in der Leistung mit der morgentlichen Stromerzeugung über den Elektroheizstab geladen. Das erwärmte Wasser kann dann flexibel im Tagesverlauf genutzt werden und reicht in der Regel bis zum nächsten Morgen. Das Trinkwasser wird so zu nahezu 100 % direkt durch lokal erzeugten PV-Strom erwärmt. Nachteile sind jedoch hier der höhere Platzbedarf des Boilers und die nicht unerheblichen Speicherverluste (siehe hierzu Kapitel EFH in Singen (Mikrohaus)). Im Mikrohaus wurde ein spezieller Flachspeicher (EKF120) der Firma Austria Email AG verwendet, um den Speicher möglichst platzsparend in die Trennwand zwischen Bad und Küche zu integrieren.

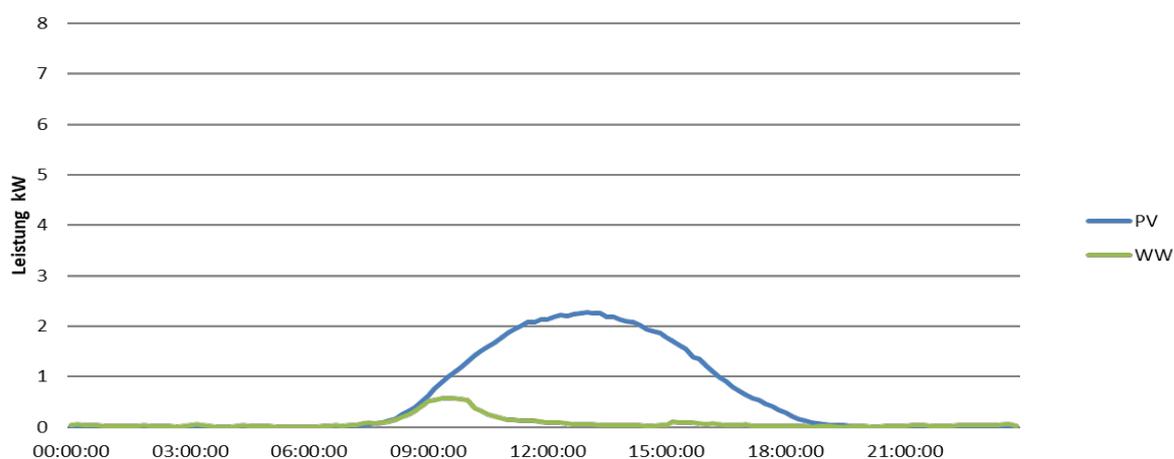


Abbildung 58: Mittlerer Tageslastgang Elektroboiler und Photovoltaik Mikrohaus

## 4. Laborraummessungen

Für das Projekt IR-Bau 2 bestand die Gelegenheit, das Forschungsgebäude ECOLAR auf dem Campus der HTWG um einen neuen Laborraum für Untersuchungen zum thermischen Verhalten unterschiedlicher Wärmeabgabesysteme zu erweitern (siehe Abbildung 52). Der Raum bietet nun die Möglichkeit, spezifische Fragestellungen zur thermischen Behaglichkeit im Raum oder der thermischen Speicherefähigkeit verschiedener direktelektrischer Wärmeerzeuger bzw. Wärmeübergabesysteme zu untersuchen. Dazu wurde der Laborraum mit entsprechender Messtechnik ausgestattet.



Abbildung 59: Forschungsgebäude ECOLAR auf dem Campus der HTWG Konstanz

### 4.1 Beschreibung des Laborraums

Da für die geplanten Messungen ein Raum mit möglichst gleichbleibenden thermischen Bedingungen von Vorteil war, fiel die Wahl auf den Nordpatio, da dort die geringere solare Einstrahlung wenig Dynamik in den Raumtemperaturen verursacht (siehe Abbildung 60).

Der Nordpatio hat Außenabmessungen von 4,25 x 4,25 Meter und ca. 3,50 Meter Höhe. Im Inneren, zwischen den bestehenden Trägern und Stützen verbleiben 4,00 x 4,00 Meter womit sich eine Fläche von 16,00 m<sup>2</sup> für den neuen Raum ergibt. Die Innenraumhöhe des neuen Raums beträgt 2,54 m und orientiert sich an der Raumhöhe des Bestands (siehe Abbildung 61).

Zwischen den Holzhohlkastenträgern wurde eine neue Außendecke eingebaut. Analog zur bestehenden Konstruktion des Bestands wurden alle neuen Außenflächen weitestgehend aus nachwachsenden Baustoffen gebaut. Die Decke hat einen U-Wert von 0,14 W/m<sup>2</sup>K.

Die neue Außenwand auf der Nordseite wurde als Holzständerwand konstruiert und analog zum Gebäudebestand mit Hanffaserdämmung ausgedämmt. Auf der Außenseite wurde Sichtkork als bewitterte Fassadenoberfläche und zusätzliche Dämmung verwendet. Die Wand hat einen U-Wert von 0,17 W/m<sup>2</sup>K. In die Nordwand wurden zwei dezentrale Lüftungsgeräte (Inventer IV-R) mit Wärmerückgewinnung eingebaut.



Abbildung 60: Neuer Laborraum (rot umrandet) im ECOLAR Laborgebäude, Ansicht Nord / West

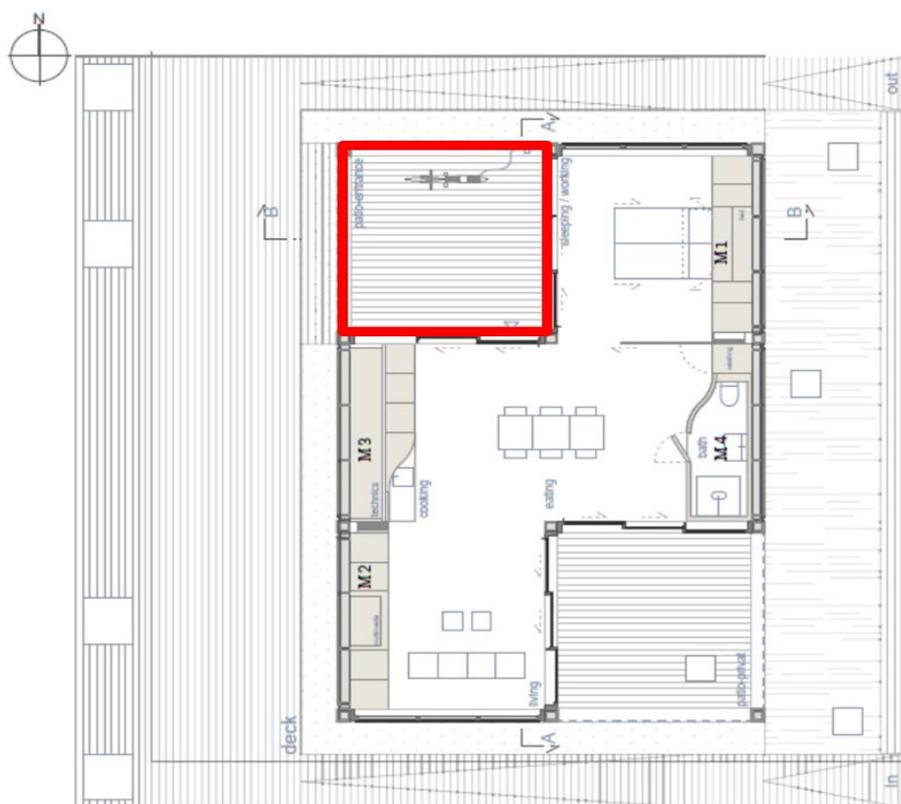


Abbildung 61: Grundriss ECOLAR Laborgebäude

Auf der Westseite wurde eine neue Dreifachverglasung eingebaut. Der mittlere Flügel ist als Öffnungsflügel ausgeführt. Die Hebeschiebetüre erreicht mit einem Ug Wert von  $0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$  und einem Uf Wert von  $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$  einen gesamt Uw Wert von  $0,89 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Zur räumlichen und thermischen Abgrenzung des neuen Raums zum Bestand wurden die bestehenden raumhohen Dreifachverglasungen belassen. Da dies eher unüblich für Wohnräume gewesen wäre, wurden die Verglasungen bis auf den Zugang zum Raum innenseitig mit OSB Platten verkleidet.

Der Bestandsboden des Patios wurde als Holzkonstruktion erstellt und war bereits mit Hanffaser gedämmt. Es musste daher lediglich der bestehende Terrassenbelag aus Holzdielen rückgebaut werden. Die sich daraus ergebene Höhendifferenz zum Bestandsboden wurde genutzt, um ein elektrisches Fußbodenheizungssystem mit einer Speichermasse aus Lehmballastplatten einzubauen (siehe Abbildung 62). Die Lehmballastplatten bieten zum einen ökologische Vorteile gegenüber einem klassischen Heizestrich, sie sind einfach rückbaubar und sie können trocken eingebaut werden, womit ein zusätzlicher Feuchteintrag ins Gebäude vermieden wurde. Auf den Lehmballastplatten wurde auf einer 1 mm Trennlage aus Kork ein Eichenparkettbelag schwimmend verlegt.



Abbildung 62: Einbau der elektrischen Fußbodenheizung und der Lehmballastplatten



Abbildung 63: fertig eingerichteter Laborraum

## 4.2 Beschreibung der eingesetzten Wärmeerzeuger

Der Laborraum hat einen rechnerischen  $ht'$  Wert von  $0,265 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ohne Wärmebrücken). Mit einem angenommenen Wärmebrückenzuschlag von  $0,05$  erhöht sich der  $ht'$  Wert auf  $0,315 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Zusammen mit einem angenommenen Luftwechsel von  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  (bei  $80\%$  WRG), einem N50 Wert von  $1,0$  und einem Windschutzkoeffizienten von  $0,07$  ergibt sich eine Heizlast von ca.  $750 \text{ W}$  (ca.  $46 \text{ W/m}^2$ ) bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  Innentemperatur und  $-12 \text{ }^\circ\text{C}$  Außentemperatur.

Die ausgewählten Heizelemente wurden auf die erforderliche Heizleistung dimensioniert. Bei den IR-Heizungen wurden Module verwendet, die eine hohe Oberflächentemperatur erreichen können, um die thermische Behaglichkeit in einem breiten Spektrum untersuchen zu können. Folgende Heizsysteme wurden im Laborraum installiert:

- IR-Heizung an der Decke zentral

Als zentrales IR-Heizelement wurde eine Heizung der Firma Therm IQ mit Leistung von  $1.300 \text{ W}$  verwendet. Die IR-Heizung hat eine Länge von  $1,20 \text{ m}$  und eine Breite von  $0,6 \text{ m}$ . Die dem Raum zugewandte Seite besteht aus Glas. Bei einer spezifischen Leistungsdichte von ca.  $1.800 \text{ W/m}^2$  erreicht das Modul eine maximale Oberflächentemperatur von bis zu  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Das Element wurde ausgewählt, da es aus vorangegangenen Messungen im Projekt IR-Bau, einen hohen Strahlungswirkungsgrad von rund  $60 \%$  erzielt hat. Zudem hat es einen bereits bauseits integrierten Temperatursensor (Pt1000), der zur Messung und regelungstechnischen Begrenzung der Oberflächentemperatur verwendet werden konnte.

- IR-Heizung an der Decke dezentral (4 Heizflächen)

Um im Vergleich zur zentralen Variante die Behaglichkeit im Raum bei dezentral im Raum verteilten IR-Heizungen zu untersuchen, wurden vier IR-Module von Vitramo VH 04848 mit je  $550 \text{ W}$  Leistung ( $2.200 \text{ Watt}$  Gesamtleistung) gleichmäßig an der Decke verteilt. Die Module haben je eine Länge und Breite von  $0,48 \text{ m}$ . Die dem Raum zugewandte, wärmeabgebende Seite besteht aus Glas. Bei einer spezifischen Leistungsdichte von ca.  $2400 \text{ W/m}^2$  können sie eine maximale Oberflächentemperatur an der Decke von ca.  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  erreichen.

Die Elemente wurden aufgrund ihrer Kompaktheit und ihrer ähnlichen Beschaffenheit wie die Therm IQ Module ausgewählt (hohe Leistungsdichte und hohe Oberflächentemperaturen, Glasvorderseite und guter Strahlungswirkungsgrad von ca.  $60 \%$ ). Durch nachträglich angebrachte Pt100 Temperatursensoren auf der Glasoberfläche konnten auch diese Module in ihrer Oberflächentemperatur geregelt werden.

- IR-Heizung an der Wand zentral

Als zentrales IR-Heizelement an der Wand wurde der gleiche Modultyp (Therm IQ  $1300\text{W}$ ) wie an der Decke verwendet. Das Modul wurde in einer Höhe von  $1,2 \text{ Metern}$  horizontal an der Nordwand befestigt.

- IR-Heizung als runde Stele

Als vierte Variante an IR-Heizkonzepten wurde ein mobiles System untersucht. Zum Einsatz kamen zwei „Pipewave 600“ Stelen der Firma Redwell mit je  $600 \text{ W}$  Leistung. Die Stelen sind rund mit einem Durchmesser von ca.  $20 \text{ cm}$ , einer Höhe von ca.  $100 \text{ cm}$  und können frei im Raum positioniert werden. Die Stele ist als Rohr konstruiert und innen hohl. Dadurch wird neben der radialen Wärmestrahlung nach außen auch gezielt eine vertikale Konvektion erwirkt.

- E-FBH mit Speichermasse

Als direktelektrisches Pendant zur „klassischen“ Fußbodenheizung wurde der Laborraum mit einer elektrischen Fußbodenheizung ausgestattet („Devicell Dry“ / Devi Danfoss). Die Heizschlange ist vollflächig über den Raum auf 12 mm starken, alukaschierten EPS Platten verlegt. Die Heizung hat eine Leistung von 1.400 W. Um eine thermische Speichermaße ähnlich zu einem Heizestrich zu erhalten, wurde auf die Fußbodenheizung eine Lage Lehmballastplatten der Firma Lemix mit 40 mm Stärke verlegt. Mit einer Rohdichte von 1.950 kg/m<sup>3</sup> und einer Wärmespeicherkapazität von 1,0 kJ/kgK lassen sich bei einem gemessenen möglichen Delta von 9 Kelvin ca. 3,2 kWh Energie thermisch einspeichern. Damit werden vergleichbare Werte wie bei einem Estrich erreicht.

- Elektro-Radiator

Als weitere Variante wurde neben der Fußbodenheizung ein häufig verwendeter Radiator untersucht. Anstelle der üblichen wasserdurchströmten Elemente kam im Laborraum eine Elektro-Variante mit einer Wärmeleistung von 1,5 kW zum Einsatz.

- Elektro-Konvektionsheizung

Die bisherigen Elemente sind Systeme mit tendenziell höherem Strahlungsanteil in der Wärmeabgabe. Um den Unterschied der Behaglichkeit und der Temperaturverteilung im Raum zwischen konvektions- und strahlungsdominierten Heizungen messtechnisch zu untersuchen, wurde eine Elektroheizung mit hohem Konvektionsanteil in die Untersuchungen aufgenommen (elektrischer Konvektor als Standgerät ohne Ventilation). Die Heizung hat eine Leistung von 2.000 W und kann variabel im Raum auf dem Boden positioniert werden.

In Abbildung 64 und Abbildung 65 sind die drei festinstallierten IR-Grundsysteme dargestellt. An der Wand auf 1,2 m Höhe sowie zentral an der Decke die Module ThermIQ mit 1300 W, bezeichnet als „Wand“ und „Decke zentral“. Dazu das System „Decke dezentral“ mit den 4 kleineren Heizungen von Vitramo mit je 550W. In Abbildung 66 ist die Position der 3 mobilen Heizsysteme am Beispiel der Stelen dargestellt (ebenso Radiator und Konvektor). Während der Messphasen wurde die Glasfassade mit einer opaken Membran abgedeckt, um den vergleichbaren Effekt eines Vorhangs zu erwirken.

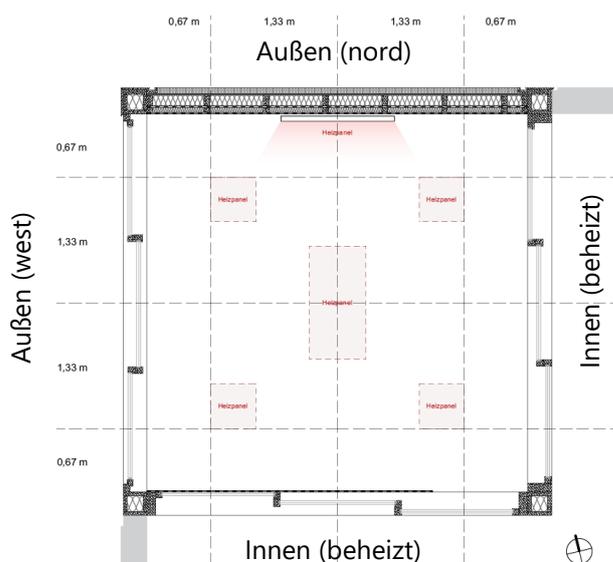


Abbildung 64: Grundriss Laborraum mit Position der IR-Heizungen Decke zentral, Decke dezentral und Wand.

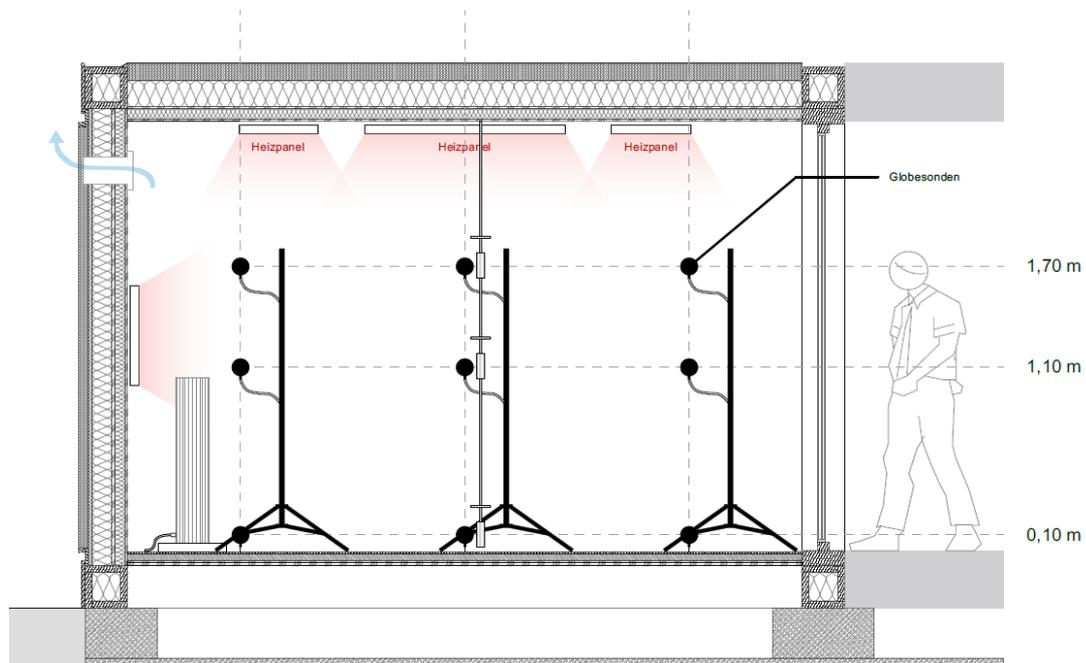


Abbildung 65: Schnitt Laborraum mit Position der IR-Heizungen und der Temperatursensoren.

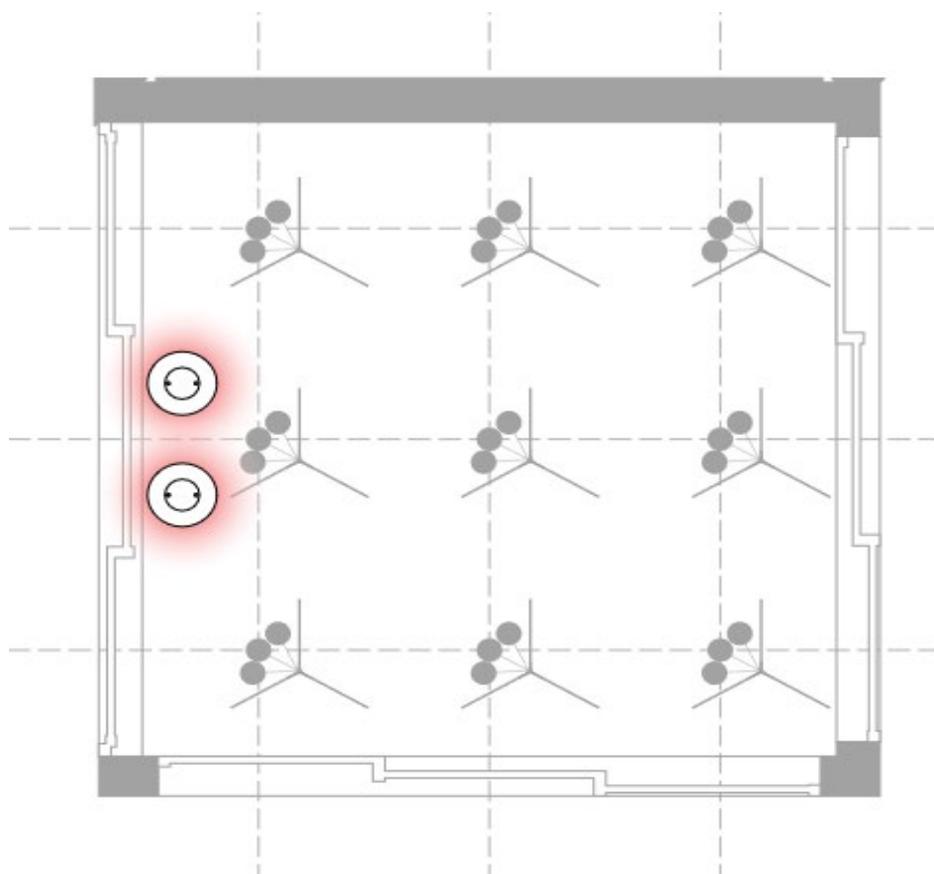


Abbildung 66: Aufstellung der mobilen Heizsysteme im Grundriss (IR-Stelen)

### 4.3 Beschreibung der eingesetzten Messtechnik & Regelungstechnik

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

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

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

- Messung der Stromverbräuche

Mit MID geeichten Wechselstromzählern werden die Verbräuche aller elektrischen Komponenten der Wärmeerzeuger erfasst und im minütlichen Intervall aufgezeichnet. Die Datenübertragung erfolgt dabei über die S0 Schnittstelle der Stromzähler an eine „digitale Extension“ des Miniservers. Diese empfängt die Impulse, im Miniserver werden daraus der Verbrauch und die Leistung errechnet.

- Messung der Globaltemperaturen an 27 Stellen im Raum

Zur Messung der operativen Temperatur an verschiedenen Stellen im Raum wurde ein System aus 27 Globesonden erstellt. Es wurden sehr dünnwandige, mattschwarz lackierte Edelstahlhohlkugeln mit 100 mm Durchmesser verwendet. Als Sensoren wurden kalibrierte Pt100 Sensoren 1/3 DIN mit Vierleiteranschluss verwendet. Diese sind mithilfe einer Kunststoffkabelverschraubung mittig im Inneren der Edelstahlkugeln platziert. Die analogen Signale der Pt 100 Sensoren werden von A/D Wandlern (DMB 96500 - Universal AI/DI Modul / Drago) in digitale Signale übersetzt. Die A/D Wandler sind wiederum mit der Modbus Extension verbunden, die die Signale an den Miniserver weiterleitet. Alle Sensoren wurden mit Hilfe eines Kalibrierbades vor Ort kalibriert und erreichen dadurch eine Messgenauigkeit von unter einem Zehntel Grad.

Es wurden auf Stativen horizontal je neun Kugeln in drei Ebenen installiert. Die Höhe der Ebenen zur Messung wurde nach EN ISO 7726 „Umgebungs-klima / Instrumente zur Messung physikalischer Größen“ für die untere Ebene auf 0,1 m, für die mittlere Ebene auf 1,1 m und die oberer Ebene auf 1,7 m über der Fußbodenoberfläche festgelegt.

- Messung der Lufttemperaturen in verschiedenen Höhen

Zur Messung der Lufttemperatur wurden die Sensoren im Laborraum mittig in einem vertikal aufgehängten HT-Rohr positioniert, welches zum Raum hin mit Alufolie bekleidet wurde. Damit wurde eine Abschirmung gegen Strahlung, zugleich eine gute Luftzirkulation gewährleistet. Als Sensor wurde wie bei den Globesonden ein kalibrierter Pt100 Sensoren je Messpunkt verwendet.

Der Anschluss der Sensoren an den Miniserver erfolgt analog zu den Globesonden. Es wurden drei Sensoren in drei Höhen (0,1m / 1,1m / 1,7m) eingesetzt.

- Messung der Bauteiltemperaturen in je drei Schichttiefen in Boden, Wand und Decke

Zusätzlich zu den Globe- und Lufttemperaturen wurden Temperatursensoren in der Decke, der Außenwand Nord und dem Fußboden in verschiedenen Schichttiefen und Positionen verbaut. Zur Messung der Temperaturen wurden zuvor kalibrierte 1-Wire Temperatursensoren verwendet. Diese wurden über die 1-Wire Extension an den Loxone Miniserver angeschlossen.

#### Boden

Im Boden wurden je drei Sensoren in drei Schichttiefen verbaut. Die ersten drei Sensoren wurden zwischen Holzparkett und den Lehmballastplatten verbaut. Die zweiten drei Sensoren wurden zwischen den Lehmballastplatten und der elektrischen Fußbodenheizung verbaut. Die dritte Lage der Sensoren schließlich unter der Dämmung in dem vorhandenen Fußbodenaufbau.

#### Nordwand

In der Außenwand Nord wurden je drei Sensoren in zwei Schichttiefen in drei Höhen verbaut. Einmal direkt hinter den OSB Platten zum Innenraum, die zweite Lage an der Innenseite der DWD Platten.

#### Decke

In der Decke wurden je drei Sensoren in zwei Schichttiefen verbaut. Die erste Lage Sensoren direkt auf der Rückseite der zum Innenraum orientierten OSB Platten. Die zweite Lage auf der Innenseite der Holzweichfaserplatten. Zusätzlich wurde ein Sensor verbaut, um die Lufttemperatur im Zwischenraum zwischen Decke und PV Paneelen zu messen, sowie ein Sensor auf der Unterseite der PV Paneele verbaut. Die genaue Position der Bauteiltemperatursensoren ist in Abbildung 67 und Abbildung 68 zu sehen

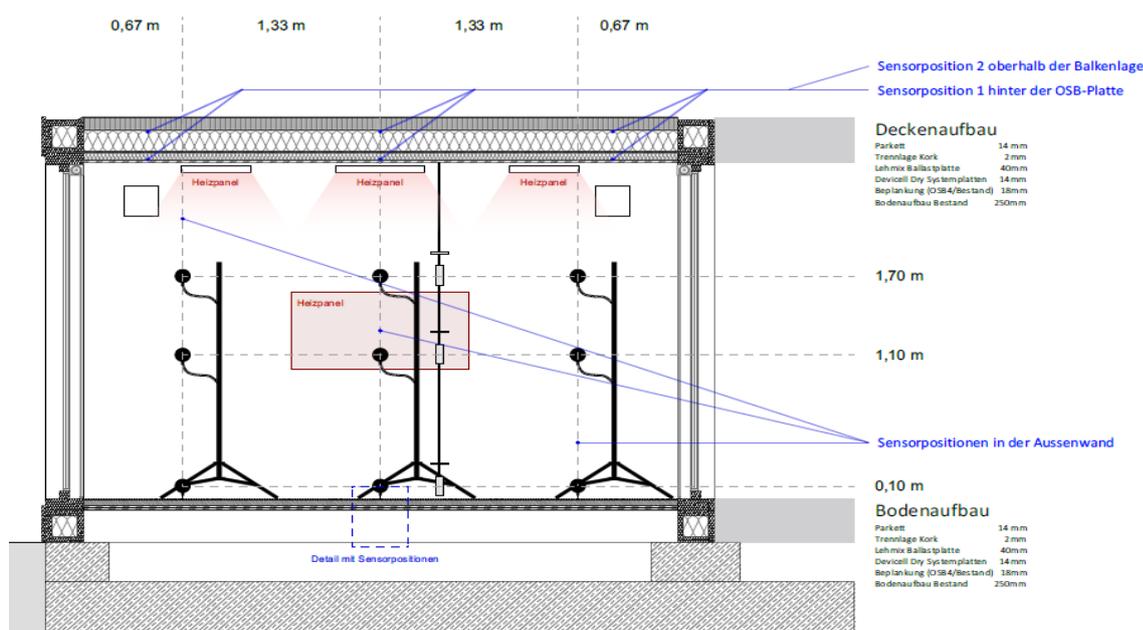


Abbildung 67: Position der Bauteiltemperatursensoren im Laborraum

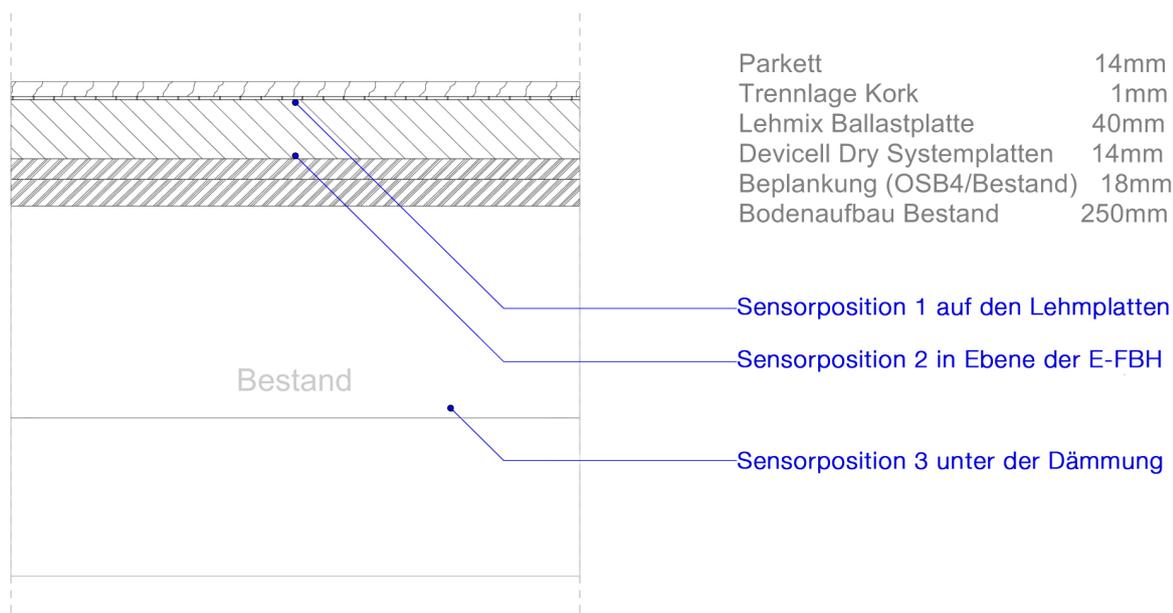


Abbildung 68: Position der Bauteiltemperatursensoren im Boden

- Regelung der Elektro-Heizungen

Neben der zentralen Erfassung aller Sensordaten sind über die Loxone Relay Extension auch alle elektrischen Verbraucher des Laborraums zentral am Loxone Miniserver angeschlossen. Über das Softwaretool Loxone Config können so über eine Bausteinprogrammierung Sensoren und Aktoren vielfältig regelungstechnisch miteinander verknüpft werden. Jeder Sensor kann so theoretisch zur Regelung der Heizungen genutzt werden. Für die Laborraummessungen wurden die verschiedenen Heizungen überwiegend zentral durch den Miniserver geregelt. Es kam für alle Räume ein Zweipunktregler sowie ein PI Regler zum Einsatz. Als Regelgröße dient die in Raummitte gemessene Lufttemperatur von 20 °C. Als Hysterese der Regelung wurde ein Wert von 0,5 K gewählt. Die direktelektrischen Wärmeerzeuger werden über die Loxone Relay-Extension geschaltet.

Zusätzlich zur Regelung durch den Loxone Miniserver wurde auch das auf Optimierung des solaren Eigenverbrauchs entwickelte System „AC-Thor 9s“ der Firma My-PV im ECOLAR Gebäude eingebaut und sowohl mit dem Wechselrichter, als auch mit dem Loxone Miniserver verbunden. Die Funktionsweise der AC-Thor 9s“ Regelung wird im Kapitel 3.3.2. Optimierung des Lastprofils am Beispiel des Mikrohauses im Detail erläutert.

- Regelung der Lüftungsanlage

Im Laborraum sind zwei dezentrale Lüftungsgeräte (inVENTer iV14R) mit WRG eingebaut um verschiedene Luftwechselraten erzeugen zu können. Im Modus WRG können so Raten von 12 - 27,5 m<sup>3</sup>/h erreicht werden. Im reinen Abluftbetrieb können bis zu 55 m<sup>3</sup>/h erreicht werden.

## 4.4 Grundsysteme im Vergleich

Bei der Wärmeversorgung von Räumen erfolgt die Wahl des Aufstellungsortes und des Temperaturniveaus der Heizkörper üblicherweise nach etablierten Regeln. Typische Heizkörper werden bei hydraulischen Systemen meist an der Außenwand unterhalb des Fensters positioniert und mit einer Vorlauftemperatur zwischen ca. 50 bis 80 °C betrieben. Fußbodenheizungen sind in der Regel vollflächig im Estrich verlegt und werden mit einer Vorlauftemperatur zwischen 30 und 35 °C betrieben. Bei Infrartheizungen gibt es diese klaren Definitionen bislang nicht. Zum einen erreichen IR-Heizungen meist deutlich höhere Oberflächentemperaturen von 100 – 180 °C auf kleinerer Fläche, zum anderen soll bei IR-Heizungen die Wärme primär über Strahlung in den Raum abgegeben werden. Systembedingt sind unterschiedliche räumliche Temperaturverteilungen zu erwarten, die für die Planung einer behaglichen Raumsituation berücksichtigt werden müssen. Ziel der Untersuchungen ist daher zu klären, wie sich die Wärmeverteilung im Raum bei verschiedenen Heizsystemen darstellt.

In Messzyklus 1 werden dazu nachfolgende Grundsysteme verglichen:

- IR-Heizung an der Decke zentral
- IR-Heizungen an der Decke dezentral
- IR-Heizung an der Wand zentral
- IR-Heizung als mobile Stehle
  
- Elektrische Fußbodenheizung
- Elektrischer Konvektor
- Elektrischer Radiator

Jedes System ist über den eingesetzten Wärmeerzeuger und die Aufstellung im Raum definiert. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden die Messungen jeweils unter den gleichen Randbedingungen durchgeführt:

- Außentemperaturen um 0 °C
- Regelung der Raumtemperatur über den Luftsensor in Raummitte auf 1,1m Höhe
- 2 Punkt-Regler mit einer Hysterese von 0,5 Kelvin
- Lüftung abgeschaltet und Lüftungsöffnungen verschlossen.
- Verschattung der Glasfassade durch die opake Membran

Um äußere Einflüsse durch die Solarstrahlung zu minimieren und die Anforderungen an ein reales Umfeld abzubilden erfolgte jede Messung einem festgelegten Ablauf. Dazu wurden 2 Temperaturniveaus mit 18 °C und 20 °C definiert. Der Zeitraum mit höherer Temperatur und der Messzeitraum wurde auf die Nachtstunden gelegt, um solare Einflüsse auszuschließen. Aus dem Wechsel zwischen den beiden Temperaturen entstehen Aufheiz- und Abkühlphasen, die für die Bewertung des jeweiligen Heizsystems und dessen Steuerung ebenfalls untersucht werden konnten. Der Zeitraum für 20°C wurde definiert auf die Zeit von 22:00 Uhr abends bis 8:00 Uhr morgens. Die restliche Zeit war auf eine Solltemperatur auf 18°C eingestellt. Für die Auswertung der Grundsysteme wurde jeweils der Messzeitraum von 2:00 bis 6:00 Uhr morgens ausgewertet (siehe Abbildung 62). Die Aufzeichnung der Messwerte aller Sensoren war durchgehend aktiv.

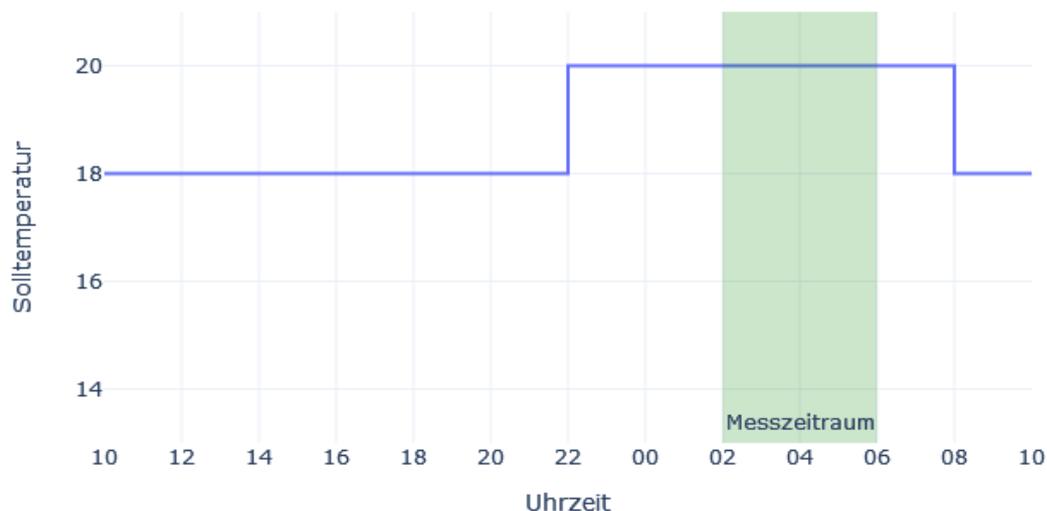


Abbildung 69: Darstellung Solltemperatur und Messzeitraum

Zur Auswertung wurden für alle Grundsysteme 4 Diagramme erstellt, welche im Folgenden erläutert werden (siehe Abbildung 50):

- Das erste Diagramm in der Übersicht zeigt jeweils den zeitlichen Temperaturverlauf der Globesonden sowie der Lufttemperaturen im Messzeitraum. Da in diesem Diagramm die Darstellung aller 27 Globesonden zu unübersichtlich wäre, sind jeweils die Globesonden einer Ebene als Mittelwert zusammengefasst. Da die Globesonden sowie die Lufttemperatursensoren jeweils auf der gleichen Höhe angebracht sind, ist hier ein Vergleich beider Sensortypen möglich. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass pro Ebene nur ein Temperatursensor vorhanden ist, welcher sich am nächsten zu der Globesonde in Raummitte befindet.
- Das zweite Diagramm besteht aus 3 Teil-Diagrammen (Minimum, Mittel und Maximum), welche sich im ausgewählten Zeitraum unterscheiden. Jede dieser 3 Darstellungen bildet auf 3 Ebenen die räumliche Anordnung der Globesonden ab. Die Temperaturskala ist für alle 3 Darstellungen identisch und lässt damit auch Vergleiche untereinander zu. Die Darstellung für Minimum und Maximum bilden jeweils einen einzelnen Zeitpunkt aus dem im ersten Diagramm dargestellten Temperaturverlauf ab (Extremwerte). Das mittlere Diagramm stellt den Mittelwert jeder Globesonde über den Messzeitraum dar. Diese Mittelwerte werden auch im nächsten Diagramm verwendet. Der Betrachter befindet sich westlich vom Laborraum und blickt auf die Glasfassade im Westen. Die Bezeichnung der Globesonden ist in Abbildung 71 dargestellt und ergibt sich aus dem Standpunkt des Betrachters: Links – Mitte – Rechts, Innen – Mitte – Außen und Unten – Mitte – Oben. Durch die Anfangsbuchstaben ergibt sich jeweils eine eindeutige Bezeichnung. RIO steht zum Beispiel für Rechts – Innen – Oben.
- Die Darstellung der Mittelwerte wird durch das dritte Diagramm ergänzt. Das Histogramm stellt in 0,1°C Schritten den Mittelwert jeder Globesonde über den Messzeitraum dar und gibt somit Auskunft über die Häufigkeit und Spreizung unterschiedlicher Temperaturen im Raum.

- Für die festmontierten Heizsysteme wurde auch der Temperaturverlauf der Oberflächen aufgezeichnet. Soweit vorhanden wird in einem vierten Diagramm der entsprechende Temperaturverlauf über den Messzeitraum in der Auswertung ergänzt.
- Für die meisten Systeme sind in einem weiteren Diagramm die elektrischen Leistungsaufnahmen im Messzeitraum dargestellt. Diese bilden die Regelungsintervalle ab und korrelieren mit den Temperaturen.

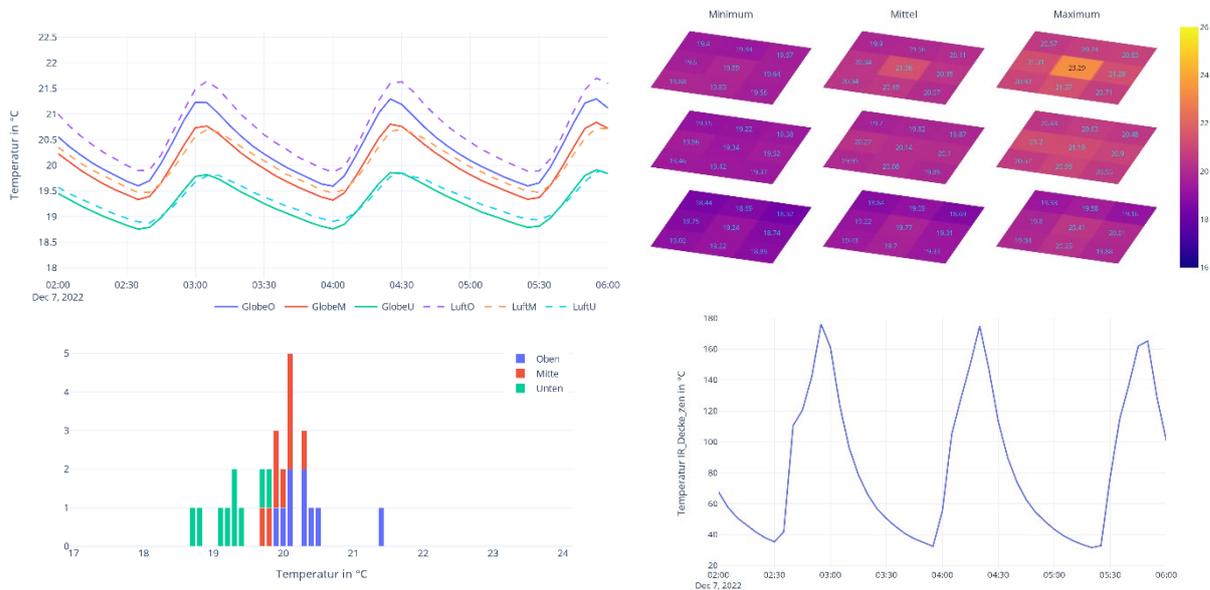


Abbildung 70: Übersicht Diagramme Labor: Temperaturverlauf - 3d Globesonden – Histogramm – Temperatur Heizsystem

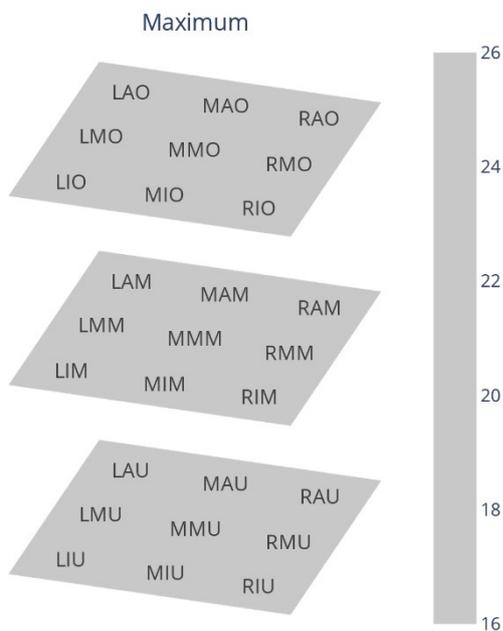


Abbildung 71: Anordnung und Bezeichnung der 27 Globesonden im Raum

#### 4.4.1 IR-Heizung Decke zentral

Abbildung 72 zeigt den Temperaturverlauf der 3 Lufttemperatursensoren auf 3 Ebenen sowie den mittleren Verlauf der Globetemperaturen in den drei Ebenen. Bedingt durch die Hysterese der 2-Punktregelung entstehen deutlich ausgeprägte Aufheiz- und Abkühlphasen, hier mit einer durchschnittlichen Periode von ca. 80 Minuten und einer Aufheizzeit von 30 Minuten.

Ebenfalls deutlich erkennbar ist die relativ lineare Temperaturschichtung sowohl bei der Lufttemperatur wie auch bei den Globesonden. Der Mittelwert des Temperatursensors Luft-Mitte, nach dem auch die Heizung geregelt wurde, liegt wie erwartet bei 20,0°C, die beiden anderen erreichen oben ein Maximum von 21,7°C sowie ein Minimum von 18,9°C. Dies ergibt im Messzeitraum eine maximale vertikale Spreizung der Lufttemperatur von ca. 2,8 Kelvin in Raummitte.

Der Mittelwert aller 27 Globesonden liegt über den Messzeitraum bei 19,9°C und damit auf allen drei Ebenen etwas niedriger als die jeweilige Lufttemperatur. Die Globesonden erreichen mit minimal 18,8°C und maximal 21,3°C eine vertikale Spreizung von 2,5 Kelvin. In der unteren und mittleren Ebene ergeben sich für die Globesonden und die Lufttemperatur sehr ähnliche Werte, auffällig ist der durchgehend etwa 0,5 Kelvin niedrigere Wert der oberen Globesonden im Vergleich zu den Lufttemperaturen. Dies lässt sich damit erklären, dass durch die zentrale Anordnung des Heizpanels insbesondere bei den oberen Globesonden am Rand deutlich weniger Wärmestrahlung ankommt und damit der Flächenmittelwert geringer ist.

Dies zeigt sich auch in der räumlichen Darstellung aller Globesonden (Abbildung 73). Hier bildet sich der Strahlungsradius und die daraus resultierenden Temperaturen deutlich ab. Die geringste Temperatur entsteht wie erwartet an der unteren nordwestlichen Außenecke mit 18,3°C, die höchste direkt unter dem Heizelement mit 23,3°C, was einer maximalen Spreizung in der operativen Temperatur von ca. 5 Kelvin entspricht. Die hohe Spreizung wird vor allem durch das obere mittlere Feld verursacht, was sich im Histogramm gut abbildet (Abbildung 74). Die restlichen Werte liegen in einem relativ engen Feld.

Abbildung 58 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperatur des Heizelements, der wie zu erwarten den Zyklen des Temperaturverlaufs entspricht. Die Spreizung verläuft von ca. 35°C am Ende der Auskühlphase bis zur maximalen Betriebstemperatur von rund 180°C. Diese wird jedoch nur kurzzeitig erreicht, was auf eine ausreichende Dimensionierung des Heizelements deutet. Im Mittel beträgt die Temperatur des Heizelements jedoch 83°C, wodurch eine Wahrnehmung der Wärmestrahlung im unmittelbaren Umfeld fast durchgängig spürbar war.

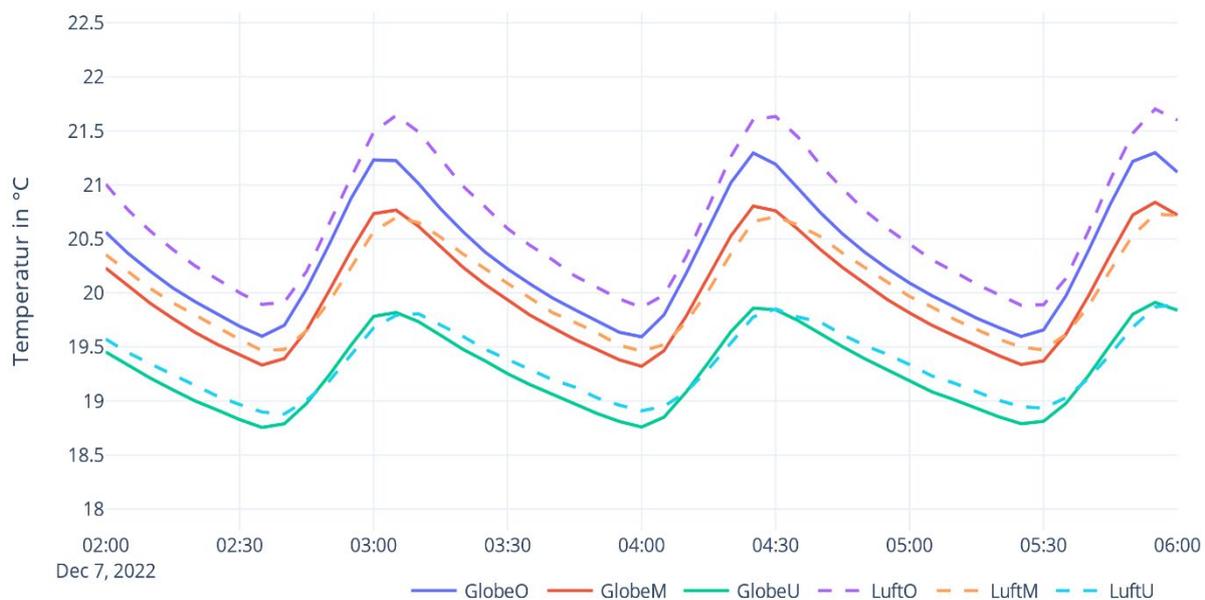


Abbildung 72: IR-Decke Zentral, Temperaturverläufe

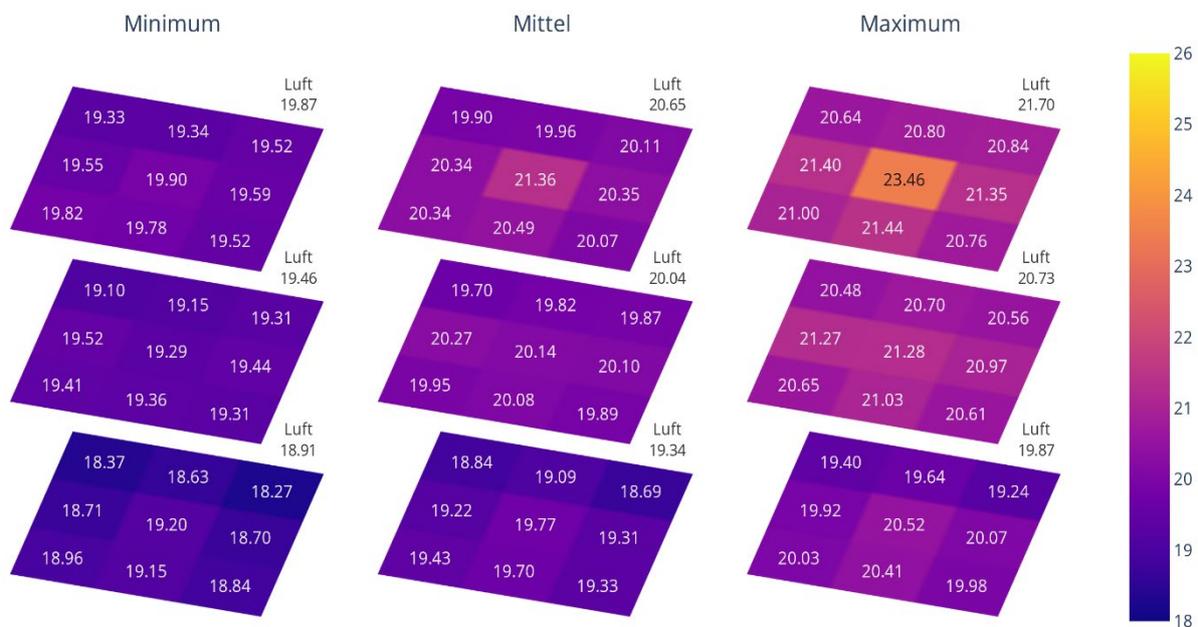


Abbildung 73: IR-Decke Zentral, räumliche Darstellung der gemessenen Globetemperaturen

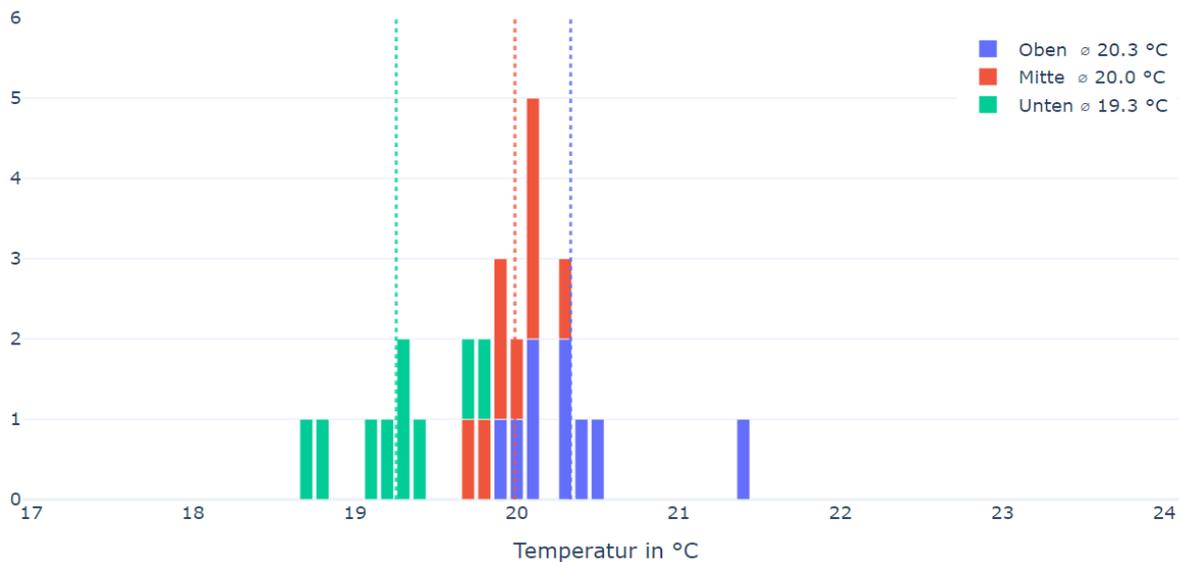


Abbildung 74: IR-Decke zentral / Histogramm mittlere Globetemperaturen

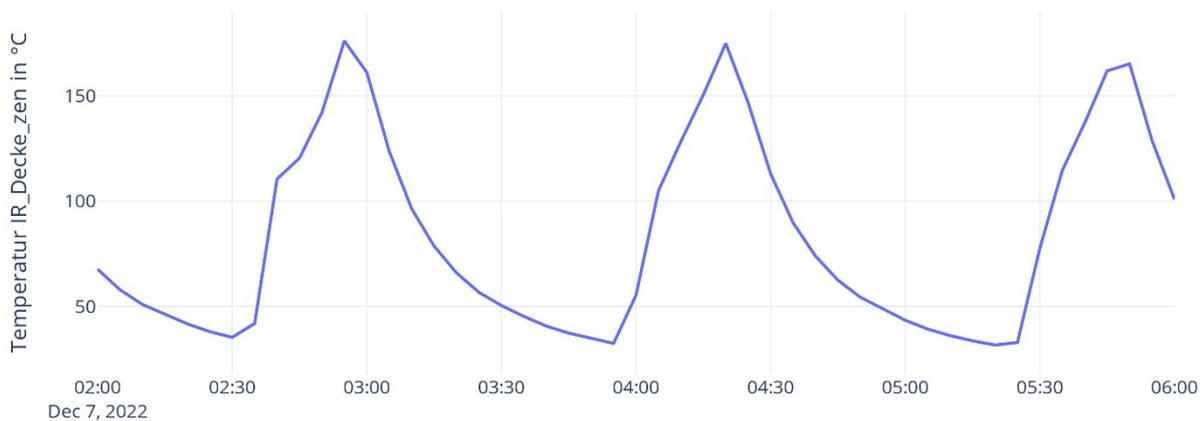


Abbildung 75: IR-Decke zentral / Oberflächentemperaturen IR-Heizung

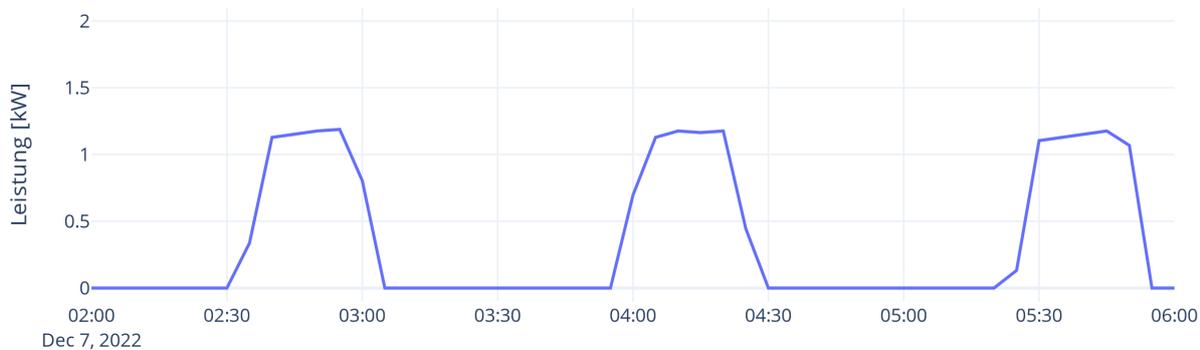


Abbildung 76: IR-Decke zentral / elektrische Leistung Heizelement

#### 4.4.2 IR-Heizung Decke dezentral

Abbildung 77 zeigt den Temperaturverlauf der 3 Lufttemperatursensoren auf 3 Ebenen sowie den mittleren Verlauf der Globesonden in den drei Ebenen. Bedingt durch die Hysterese der 2-Punktregelung entstehen deutlich ausgeprägte Aufheiz- und Abkühlphasen, hier mit einer durchschnittlichen Periode von ca. 112 Minuten und einer Aufheizzeit von 30 Minuten.

Ebenfalls deutlich erkennbar ist die relativ lineare Temperaturschichtung sowohl bei der Lufttemperatur wie auch bei den Globesonden. Der Mittelwert des Temperatursensors Luft-Mitte, nach dem auch die Heizung geregelt wurde, liegt bei 20,3°C, die beiden anderen erreichen oben ein Maximum von 21,5°C sowie ein Minimum von 19,0°C. Dies ergibt im Messzeitraum eine vertikale Spreizung der Lufttemperatur von ca. 2,5 Kelvin.

Der Mittelwert aller 27 Globesonden liegt über den Messzeitraum bei 20,2°C und damit auf allen drei Ebenen nahezu gleichauf mit der jeweiligen Lufttemperatur. Die Globesonden erreichen eine vertikale Spreizung von 3,3 Kelvin. Durch die dezentrale Anordnung mit in der Fläche gleichmäßiger Wärmestrahlung liegt der Flächenmittelwert der oberen Ebene höher als beim vorherigen System Decke zentral.

Dies zeigt sich auch in der räumlichen Darstellung aller Globesonden (Abbildung 78). Hier bilden sich die gleichmäßigere Verteilung und die daraus resultierenden Temperaturen deutlich ab. Die geringste Temperatur entsteht wie erwartet an der unteren Außenecke mit 18,4°C, die höchste direkt unter den Heizelementen mit bis zu 22,8°C, was einer maximalen Spreizung in der operativen Temperatur von 4,4 Kelvin entspricht. Durch die dezentrale Anordnung reduzieren sich die Spitzen unter den Heizelementen und damit auch die Spreizung, was sich in Abbildung 79 ebenfalls abbildet.

Abbildung 80 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperatur des Heizelements, der wie zu erwarten den Zyklen des Temperaturverlaufs entspricht. Die Spreizung verläuft von ca. 32°C am Ende der Auskühlphase bis zur maximalen Betriebstemperatur von rund 175°C. Diese wird jedoch nur kurzzeitig erreicht, was auf eine ausreichende Dimensionierung des Heizelements deutet. Im Mittel beträgt die Temperatur des Heizelements 61 °C und damit über 20 Kelvin niedriger als bei der zentralen Variante. Dies ist neben der vergrößerten Heizfläche (0,92 m<sup>2</sup> gegenüber 0,72 m<sup>2</sup>) auch auf die höhere installierte Leistung (2,2 kW gegenüber 1,8 kW) und die damit verbundenen kürzeren Leistungsspitzen zurückzuführen.

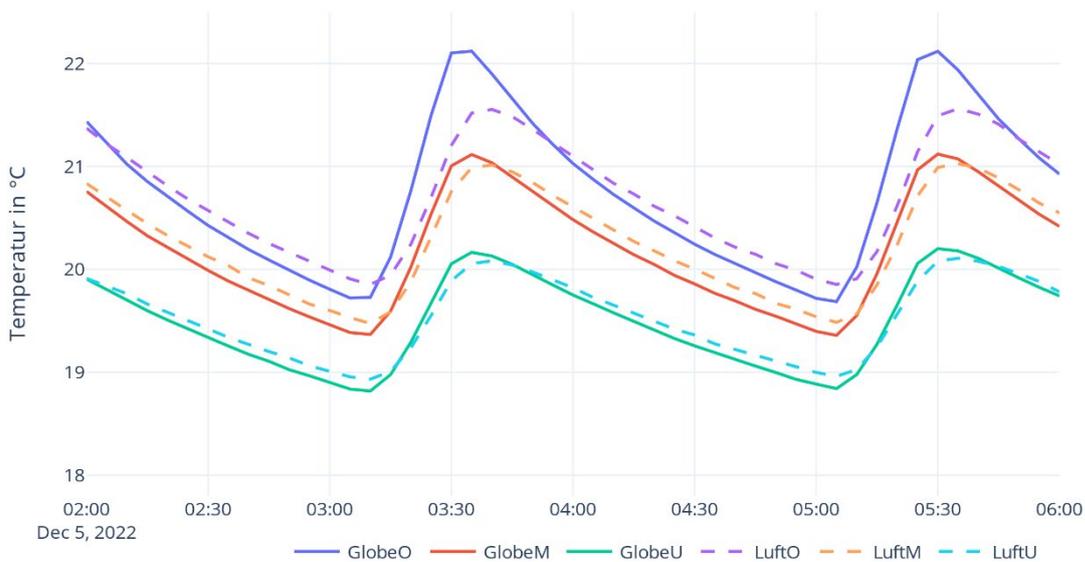


Abbildung 77: IR-Decke-dezentral / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren

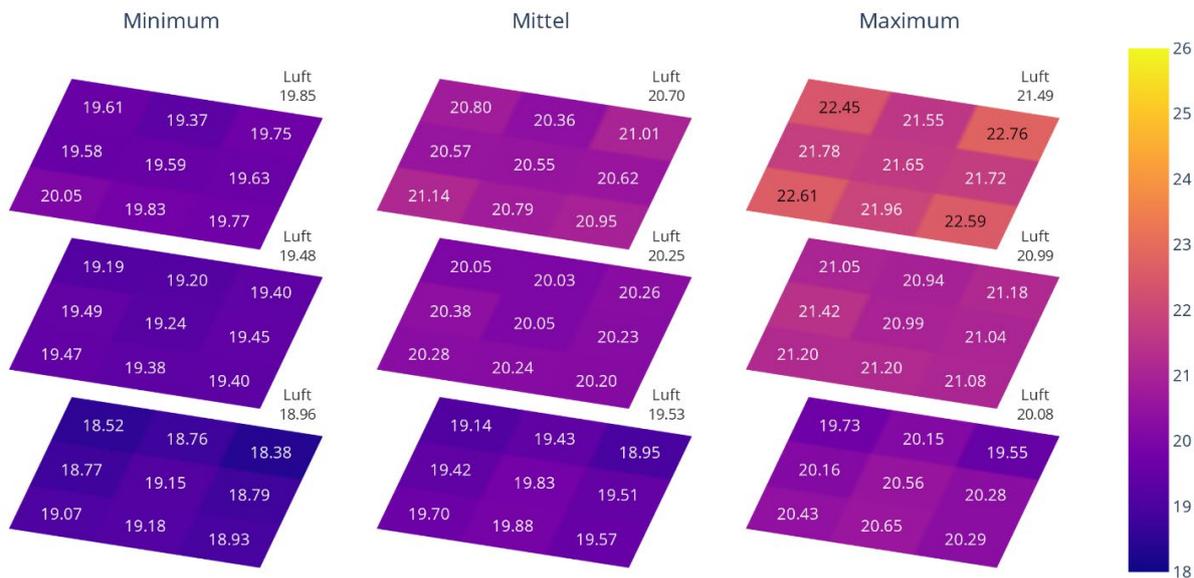


Abbildung 78: IR-Decke-dezentral / räumliche Darstellung Globetemperaturen

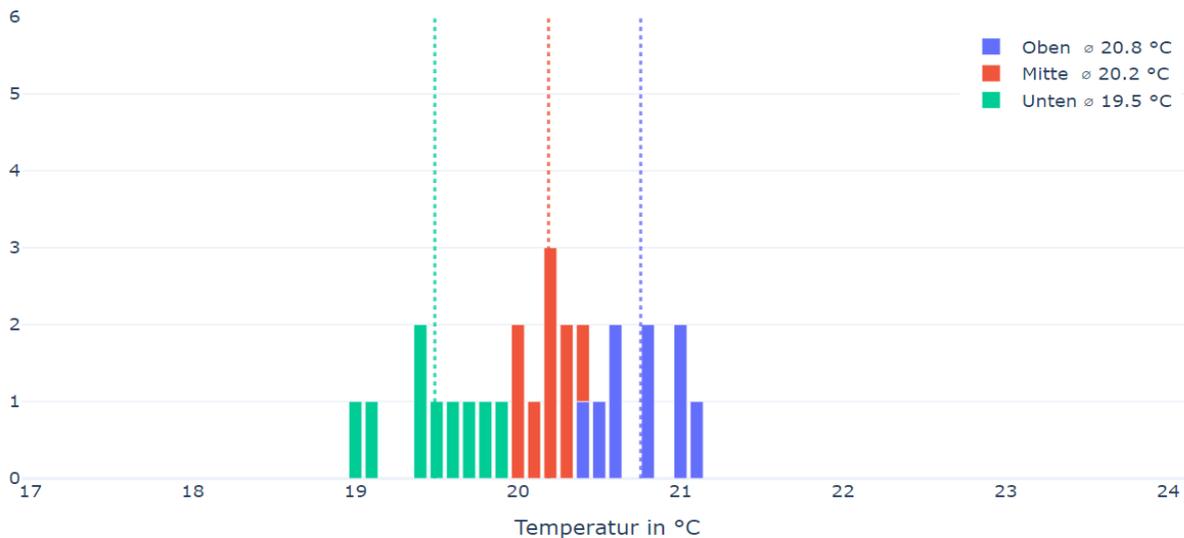


Abbildung 79: IR-Decke-dezentral / Histogramm mittlere Globetemperaturen

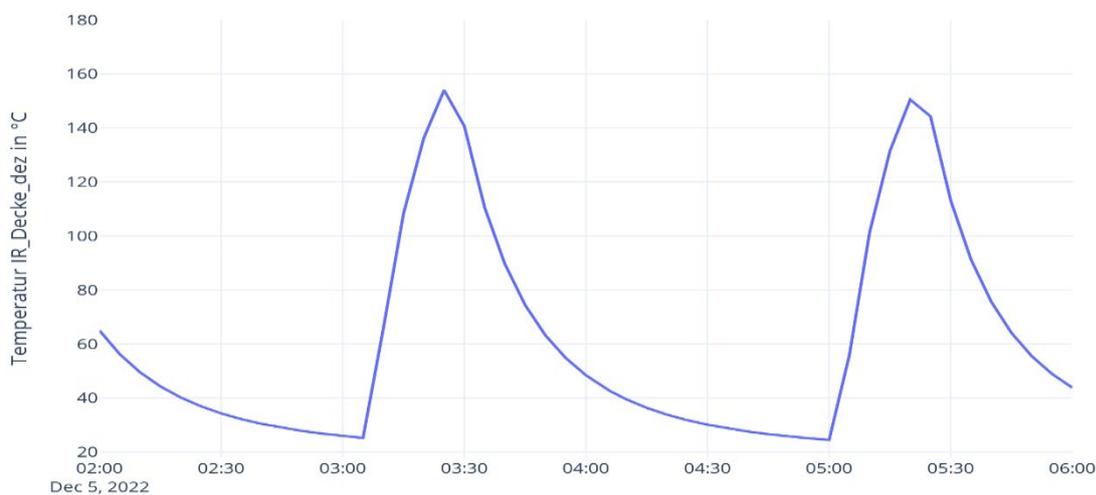


Abbildung 80: IR-Decke-dezentral / Temperaturverlauf Oberflächentemperatur Heizelement



Abbildung 81: IR-Decke-dezentral / Leistung Heizelement

### 4.4.3 IR-Heizung Wand

Abbildung 82 zeigt den Temperaturverlauf der 3 Lufttemperatursensoren auf 3 Ebenen sowie den mittleren Verlauf der Globetemperaturen in den drei Ebenen. Bedingt durch die Hysterese der 2-Punktregelung entstehen deutlich ausgeprägte Aufheiz- und Abkühlphasen, hier mit einer durchschnittlichen Periode von ca. 76 Minuten und einer Aufheizzeit von 30 Minuten. Ebenfalls deutlich erkennbar ist die relativ lineare Temperaturschichtung sowohl bei der Lufttemperatur wie auch bei den Globesonden. Der Mittelwert des Temperatursensors Luft-Mitte, nach dem auch die Heizung geregelt wurde, liegt bei 20,1°C, die beiden anderen erreichen oben ein Maximum von 21,5°C sowie ein Minimum von 18,8°C. Dies ergibt im Messzeitraum eine vertikale Spreizung der Lufttemperatur von ca. 2,7 Kelvin. Der Mittelwert aller 27 Globesonden liegt über den Messzeitraum bei 19,9°C und damit auf allen drei Ebenen nahezu gleichauf mit der jeweiligen Lufttemperatur. Die Globesonden erreichen eine vertikale Spreizung von 3,4 Kelvin. In der unteren und mittleren Ebene ergeben sich für die Globesonden und die Lufttemperatur sehr ähnliche Werte. Auffällig sind die in den Aufheizphasen höheren Globetemperaturen, insbesondere in der oberen Ebene.

In der räumlichen Darstellung (Abbildung 83) zeigt sich die asymmetrische Temperaturverteilung durch die Positionierung an der Wand. Diese resultiert in einem deutlichen lokalen Maximum. Der Abstand des Heizelements zur nächstgelegenen Globesonde ist dabei mit 70 cm identisch zum Grundsystem Decke zentral. Die geringste Temperatur entsteht wie erwartet an der unteren Außenecke mit 18,1°C, die höchste direkt vor dem Heizelement mit 25,7°C, was einer maximalen Spreizung in der operativen Temperatur von ca. 7,7 Kelvin entspricht.

Das Histogramm bildet eine größere Dynamik im Raum ab, es entsteht insgesamt eine inhomogenere Wärmeverteilung mit lokalen Minimal- und Maximalwerten (Abbildung 84).

Abbildung 86 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperatur des Heizelements, der wie zu erwarten den Zyklen des Temperaturverlaufs entspricht. Die Spreizung verläuft von ca. 25°C am Ende der Auskühlphase bis zur maximalen Betriebstemperatur von rund 155°C. Diese wird jedoch nur kurzzeitig erreicht, was auf eine ausreichende Dimensionierung des Heizelements deutet. Im Mittel beträgt die Temperatur des Heizelements 75°C. Die etwas niedrigeren Temperaturen gegenüber dem baugleichen Element an der Decke sind durch den höheren Konvektionsanteil durch die vertikale Montage zu erklären.

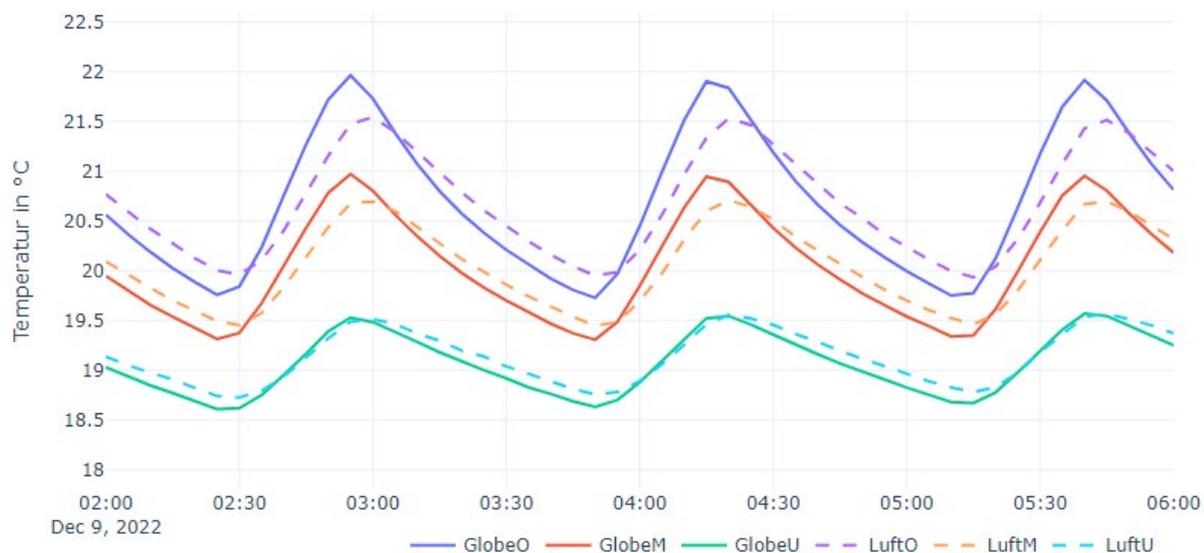


Abbildung 82: IR-Wand / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren

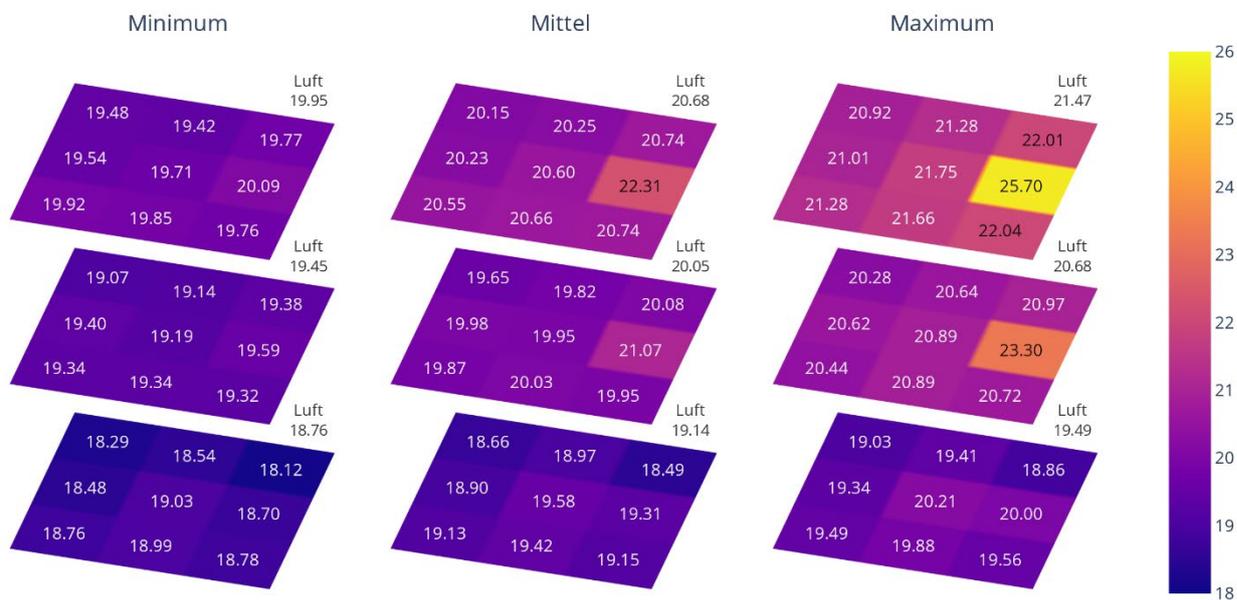


Abbildung 83: IR-Wand / räumliche Darstellung Globetemperaturen

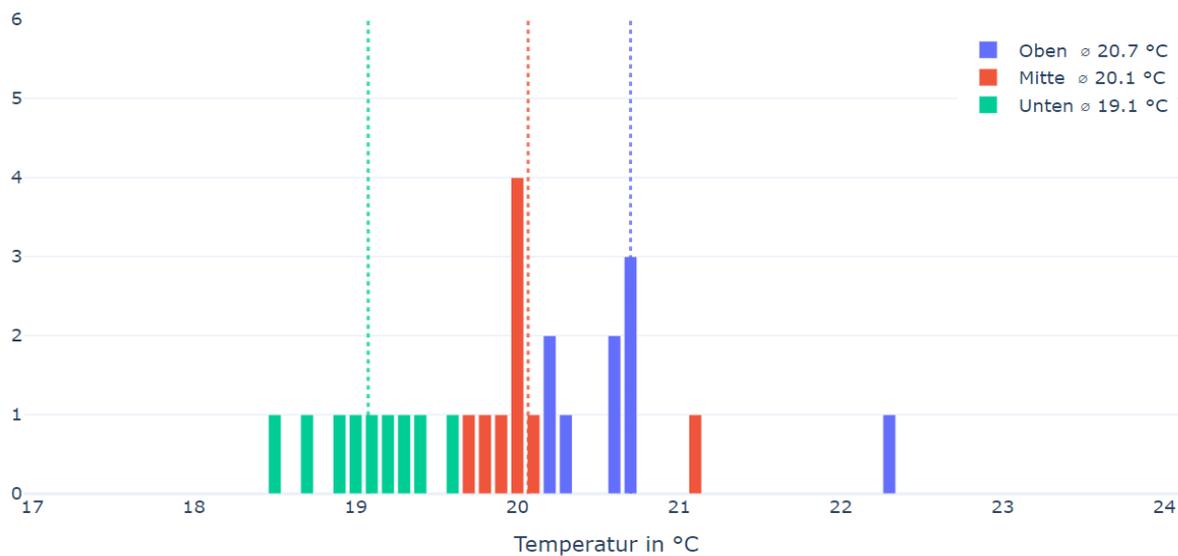


Abbildung 84: IR-Wand / Histogramm mittlere Globetemperaturen

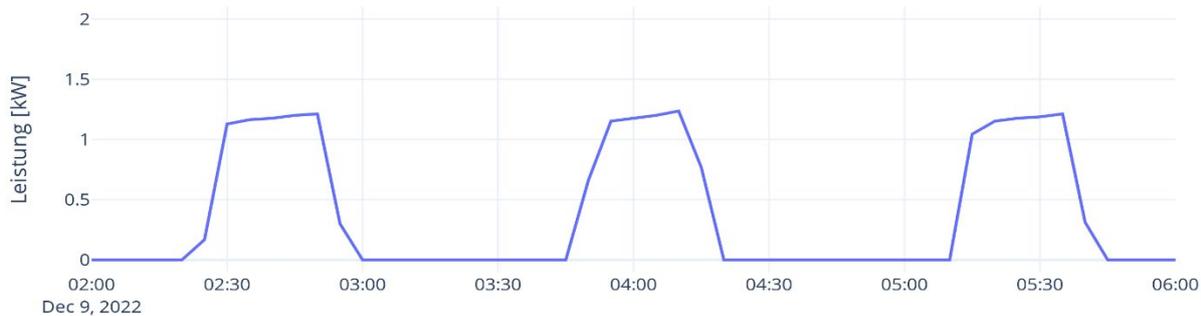


Abbildung 85: IR-Wand / Leistung Heizelement

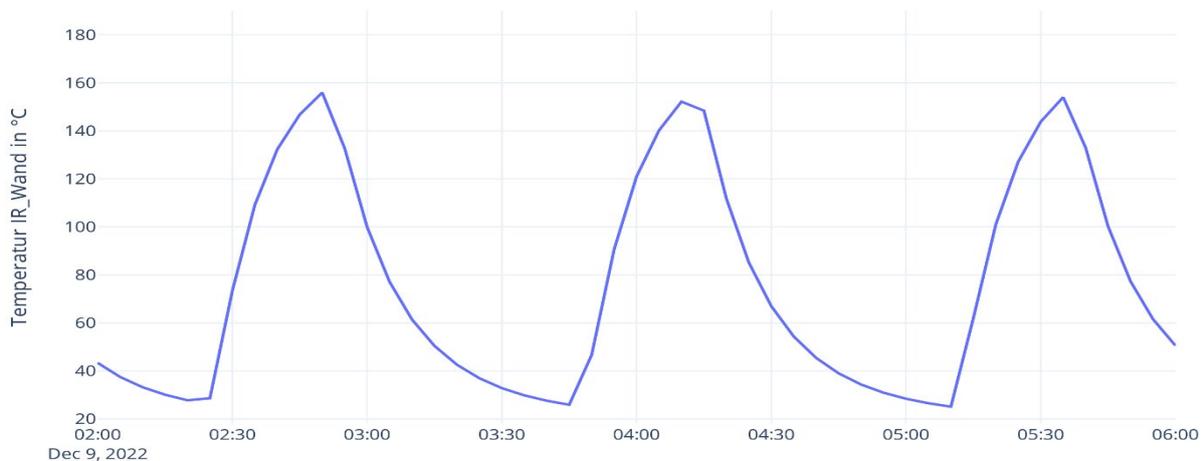


Abbildung 86: IR-Wand / Verlauf Oberflächentemperatur Heizelement

#### 4.4.4 Elektrische FBH

Abbildung 87 zeigt den Temperaturverlauf der 3 Lufttemperatursensoren auf 3 Ebenen sowie den mittleren Verlauf der Globetemperaturen in den drei Ebenen. Durch die hohe thermische Masse des Systems erweitert sich der Heizzyklus über den Messzeitraum hinaus. Ergänzend ist daher in Abbildung 88 ein größerer Messzeitraum dargestellt, der eine Periodendauer von 9 Stunden und 40 Minuten aufweist, hiervon etwa 2 Stunden 40 Minuten Aufheizzeit. Die Temperaturen im Raum übersteigen die Solltemperatur in der Messperiode deutlich, was ebenfalls auf die Trägheit des Systems zurückzuführen ist. Dabei liegen alle im Raum gemessenen Temperaturen sehr nah beieinander. Eine Temperaturschichtung ist kaum vorhanden. Der Mittelwert des Temperatursensors Luft-Mitte, nach dem auch die Heizung geregelt wurde, liegt bei  $20,2^{\circ}\text{C}$ , die beiden anderen erreichen oben ein Maximum von  $21,0^{\circ}\text{C}$  sowie ein Minimum von  $19,2^{\circ}\text{C}$ . Dies ergibt im Messzeitraum eine vertikale Spreizung der Lufttemperatur von ca. 2,1 Kelvin, die sich auch im erweiterten Zeitraum nicht erhöht. Der Mittelwert aller 27 Globesonden liegt über den Messzeitraum bei  $20,1^{\circ}$ . Aufgrund des zeitlichen Temperaturverlaufs erreichen die Globesonden dennoch eine vertikale Spreizung von 1,9 Kelvin.

Bei einer insgesamt sehr homogenen Temperaturverteilung ergeben sich in der unteren Ebene die größten Temperaturdifferenzen der Globesonden (Abbildung 90). Diese lassen sich auf die nicht vollständig homogene Verlegung der FBH und die angrenzenden Außenwände zurückführen. Die geringste Temperatur entsteht wie erwartet an der unteren Außenecke mit  $18,3^{\circ}\text{C}$ , die höchste am Boden hin zur Gebäudemitte mit  $21,9^{\circ}\text{C}$ , was einer maximalen Spreizung in der operativen Temperatur von 3,6 Kelvin entspricht, hier allerdings in einer Ebene. Ebenso ergibt sich die Spreizung nicht durch die räumliche, sondern die zeitliche Verteilung. Darum ist die Temperaturverteilung des zeitlichen Mittels (Abbildung 89) auch deutlich schmaler und kommt dem Optimum am nächsten.

Die Oberflächentemperatur der Heizung (Abbildung 91) wurde direkt unterhalb des Parketts gemessen. Die Spreizung beträgt maximal 7,6 K und verläuft von  $22,2^{\circ}\text{C}$  bis  $29,8^{\circ}\text{C}$ . Im Mittel liegt die Oberflächentemperatur bei  $25,8^{\circ}\text{C}$ .

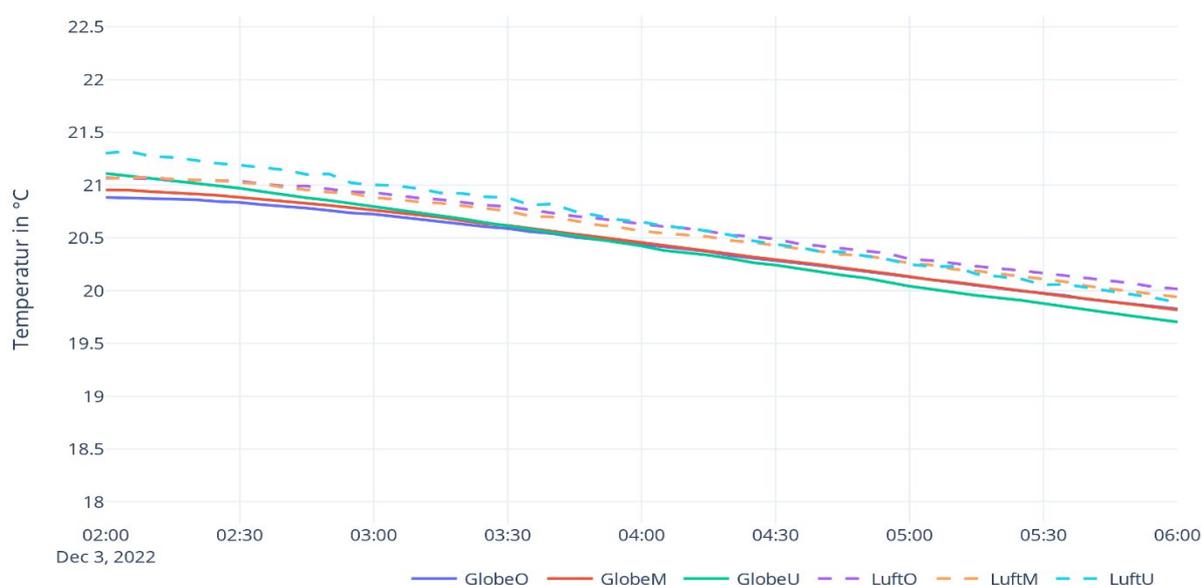


Abbildung 87: Elektrische FBH / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren

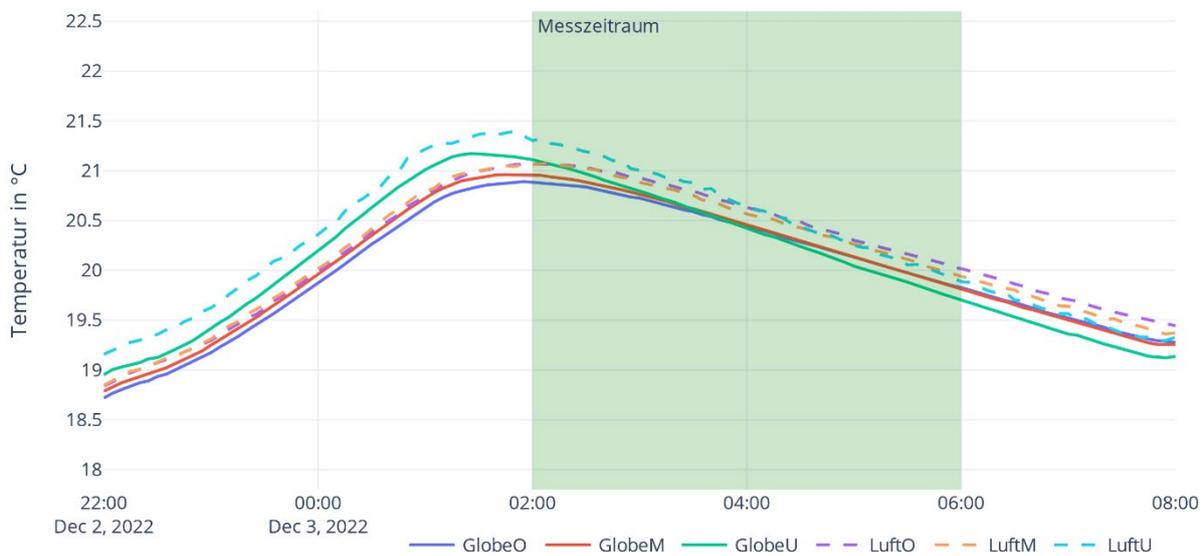


Abbildung 88: Elektrische FBH / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren / erweiterter Messzeitraum

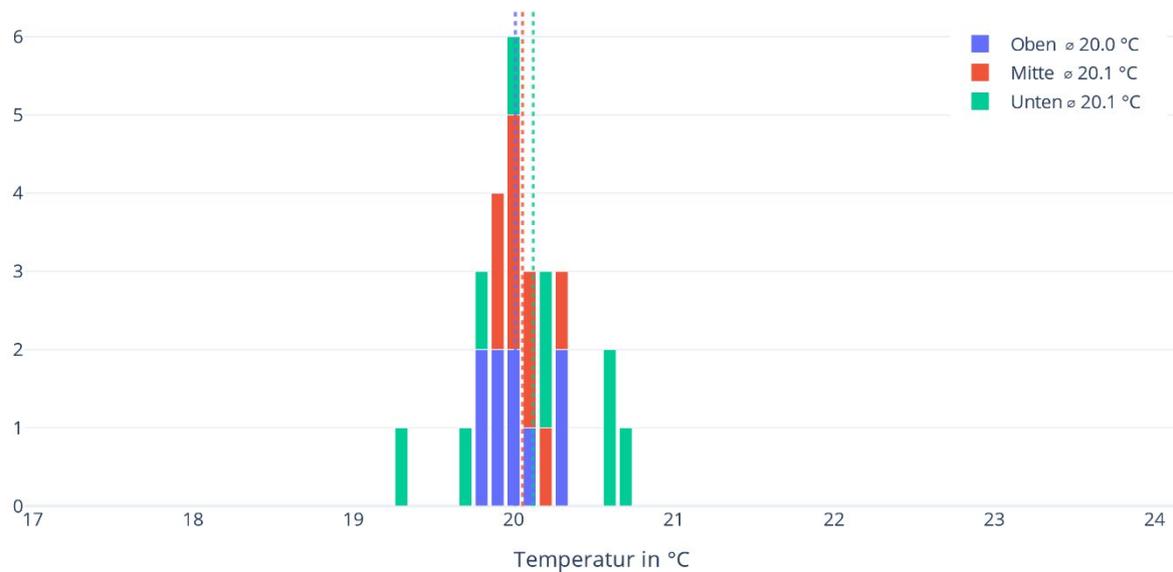


Abbildung 89: Elektrische FBH / Histogramm mittlere Globetemperaturen / erweiterter Messzeitraum

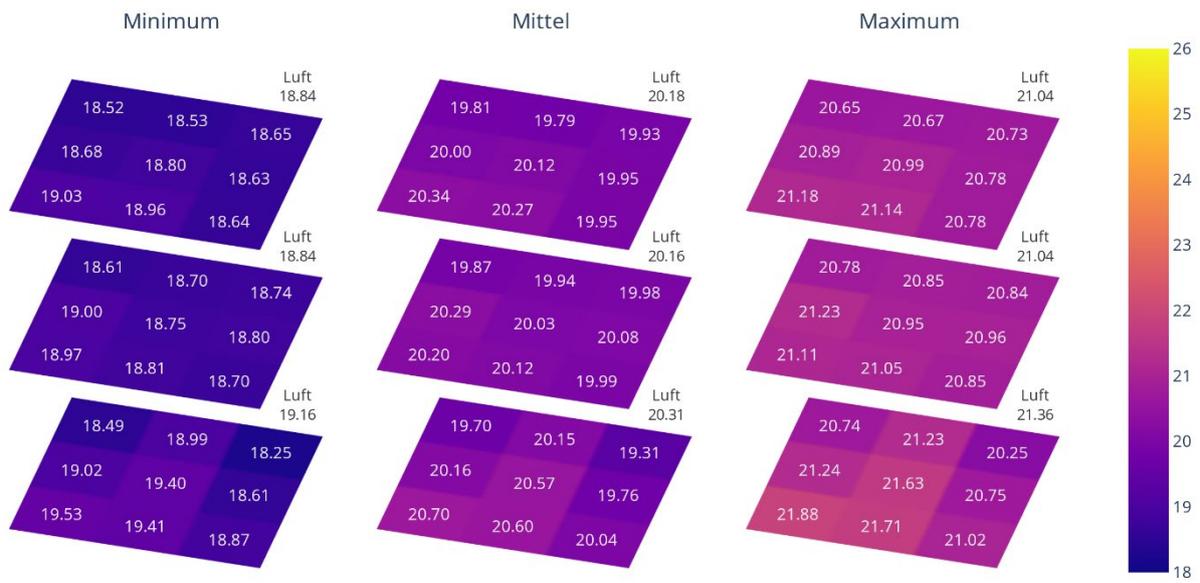


Abbildung 90: Elektrische FBH / Räumliche Darstellung Globetemperaturen / erweiterter Messzeitraum

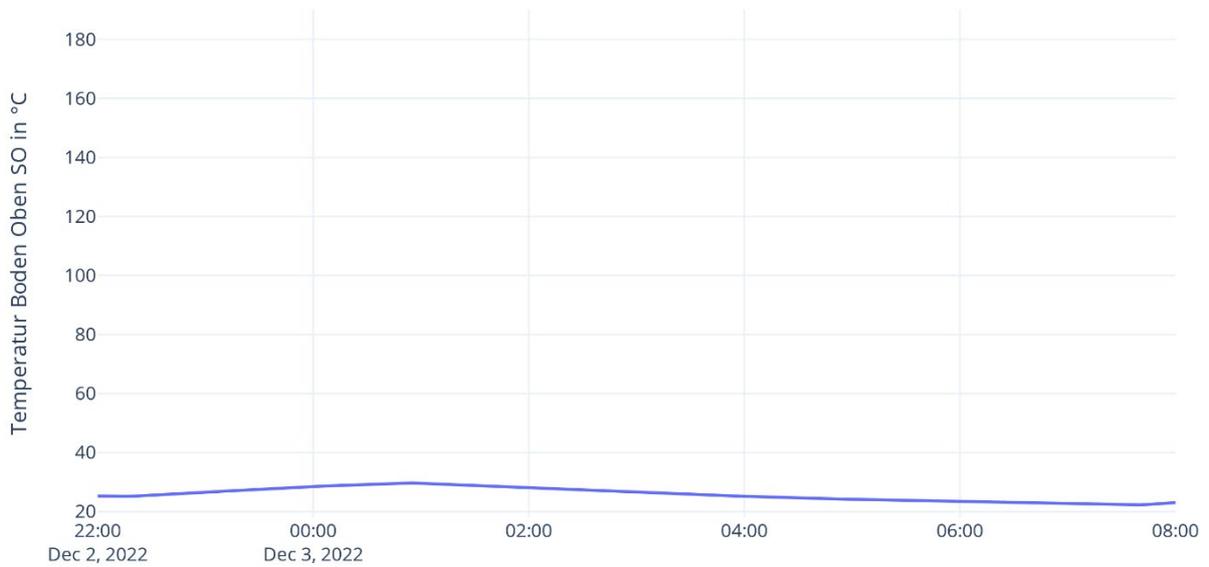


Abbildung 91: Elektrische FBH / Verlauf Oberflächentemperatur Heizelement / erweiterter Messzeitraum

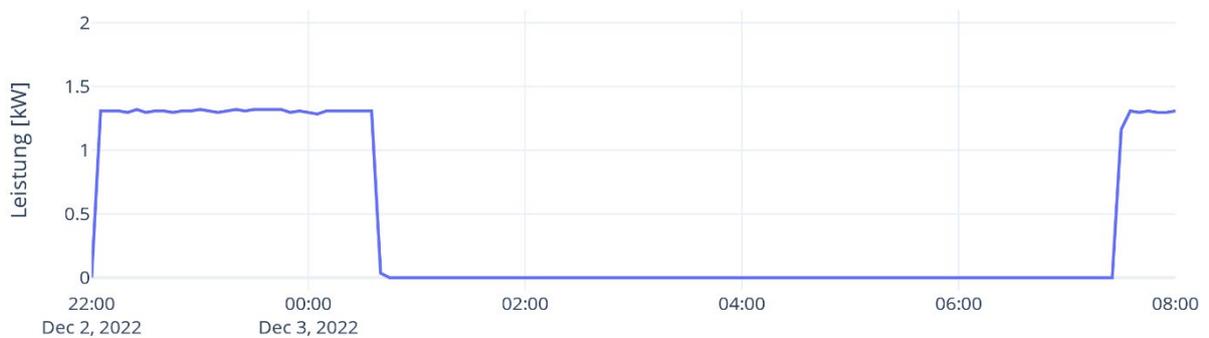


Abbildung 92: Elektrische FBH / Leistung Heizelement

#### 4.4.5 Stelen

Abbildung 93 zeigt den Temperaturverlauf der 3 Lufttemperatursensoren auf 3 Ebenen sowie den mittleren Verlauf der Globetemperaturen in den drei Ebenen. Bedingt durch die Hysterese der 2-Punktregelung entstehen deutlich ausgeprägte Aufheiz- und Abkühlphasen, hier mit einer durchschnittlichen Periode von ca. 61 Minuten und einer Aufheizzeit von 31 Minuten. Außerdem zeigt sich eine ausgeprägte Temperaturschichtung, wobei sich die untere Ebene deutlich von den anderen beiden absetzt. Der Mittelwert des Temperatursensors Luft-Mitte, nach dem auch die Heizung geregelt wurde, liegt bei 20,1°C, die beiden anderen erreichen oben ein Maximum von 21,6°C sowie ein Minimum von 18,4°C. Dies ergibt im Messzeitraum eine vertikale Spreizung der Lufttemperatur von ca. 3,2 Kelvin. Der Mittelwert aller 27 Globesonden liegt über den Messzeitraum bei 19,8°C und dabei auf der mittleren Ebene gleichauf mit der Lufttemperatur. In der unteren Ebene liegen die Globesonden deutlich über der Lufttemperatur, in der oberen Ebene durchgehend darunter. Dies deutet auf einen höheren Konvektionsanteil hin, welcher die oberen Luftschichten überproportional erwärmt. Die Globesonden erreichen eine vertikale Spreizung von 2,9 Kelvin.

Im direkten Umfeld haben die Stelen dennoch einen relevanten Einfluss auf die operative Temperatur wie in Abbildung 94 deutlich wird. Durch ihre runde Form ist die Wärmeabgabe in der Ebene gleichmäßiger. Die geringste Temperatur entsteht dennoch in der unteren Außenecke mit 18°C, die höchste an den Heizelementen mit 22,5°C, was einer maximalen Spreizung in der operativen Temperatur von ca. 4,5 Kelvin entspricht. Die Spreizung wird durch die Globesonden im direkten Umfeld des Heizelements sowie die niedrigen Temperaturen der unteren Ebene verursacht. Die Unterschiede bilden sich vor allem in der unteren Ebene auch im Histogramm in Abbildung 95 ab.

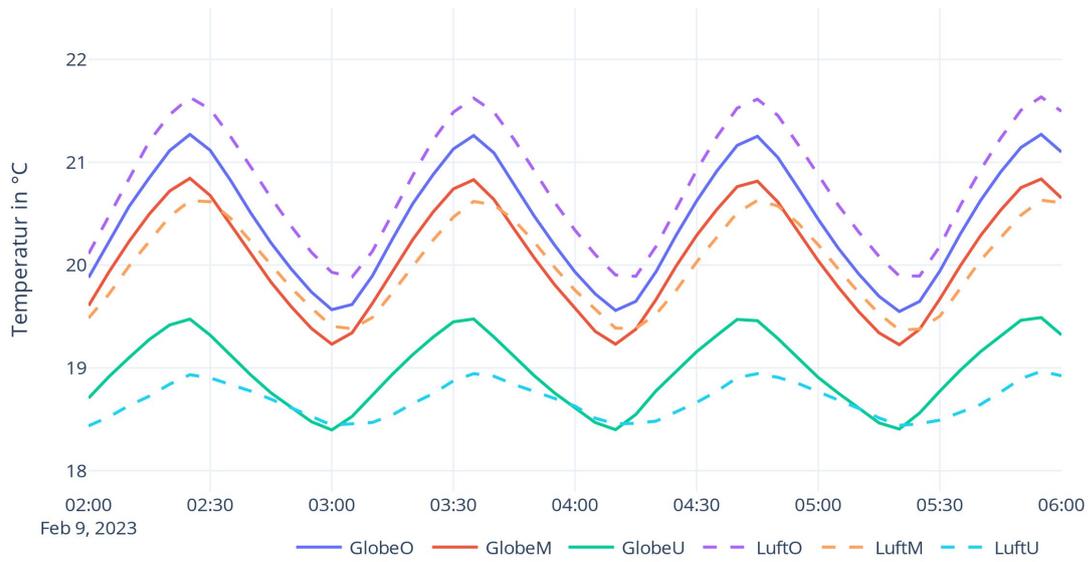


Abbildung 93: Stele 2 / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren

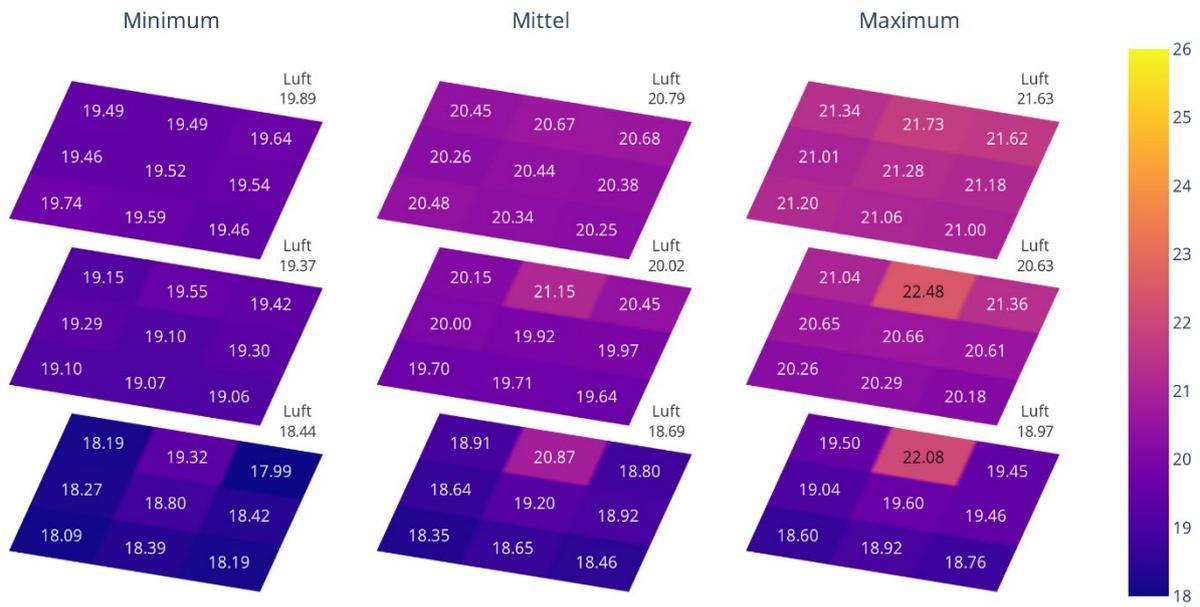


Abbildung 94: Stele 2 / Räumliche Darstellung Globetemperaturen

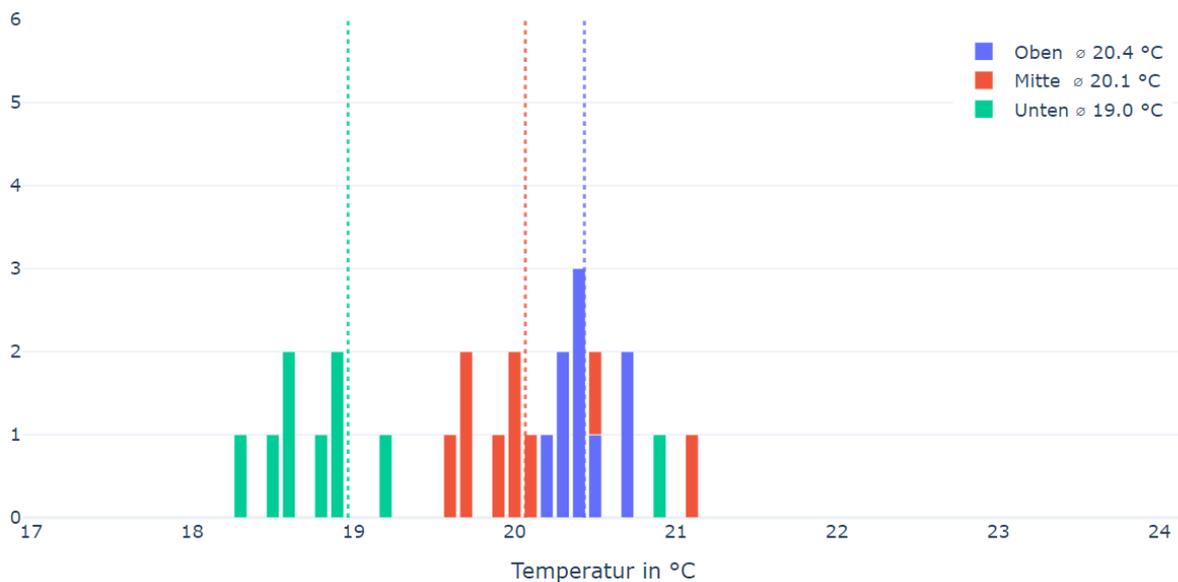


Abbildung 95: Stele / Histogramm mittlere Globetemperaturen

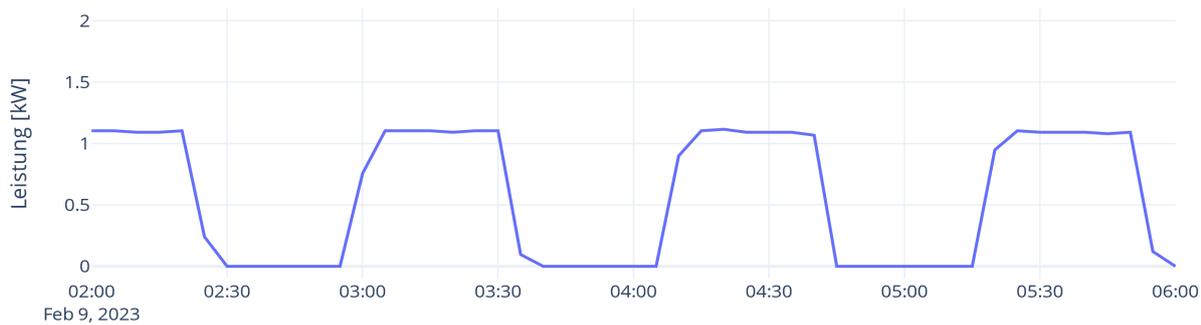


Abbildung 96: Stele / Leistung Heizelemente

#### 4.4.6 Radiator

Abbildung 97 zeigt den Temperaturverlauf der 3 Lufttemperatursensoren auf 3 Ebenen sowie den mittleren Verlauf der Globetemperaturen in den drei Ebenen. Bedingt durch die Hysterese der 2-Punktregelung entstehen deutlich ausgeprägte Aufheiz- und Abkühlphasen, hier mit einer durchschnittlichen Periode von ca. 87 Minuten und einer Aufheizzeit von 32 Minuten.

Es zeigt sich wieder eine ausgeprägte Temperaturschichtung, wobei sich die untere Ebene deutlich von den anderen Beiden absetzt. Der Mittelwert des Temperatursensors Luft-Mitte, nach dem auch die Heizung geregelt wurde, liegt bei  $20,4^{\circ}\text{C}$ , die beiden anderen erreichen oben ein Maximum von  $22,3^{\circ}\text{C}$  sowie ein Minimum von  $18,5^{\circ}\text{C}$ . Dies ergibt im Messzeitraum eine vertikale Spreizung der Lufttemperatur von ca. 3,8 Kelvin.

Der Mittelwert aller 27 Globesonden liegt über den Messzeitraum bei  $19,9^{\circ}\text{C}$ . In der unteren Ebene liegen die Globesonden etwas über der Lufttemperatur, in den beiden oberen Ebenen durchgehend darunter. Dies deutet auf einen höheren Konvektionsanteil, welcher die oberen Luftschichten überproportional erwärmt. Die Globesonden erreichen eine vertikale Spreizung von 3,2 Kelvin.

Dies zeigt sich auch in der räumlichen Darstellung aller Globesonden (Abbildung 98). Hier bildet sich die Schichtung und die daraus resultierenden Temperaturen deutlich ab. Die geringste Temperatur entsteht wie erwartet an der unteren Außenecke mit  $18^{\circ}\text{C}$ , die höchste Temperatur mit  $21,9^{\circ}\text{C}$  erreichen alle 3 übereinanderliegenden Globesonden direkt am Heizkörper. Das entspricht einer maximalen Spreizung von 3,9 Kelvin, welche vorrangig auf die Temperaturschichtung zurückzuführen ist. Das bildet sich auch im Histogramm in Abbildung 99 ab. Die einzelnen Ebenen haben eine schmale Temperaturverteilung, weisen jedoch besonders bei der unteren Ebene größere Abstände auf.

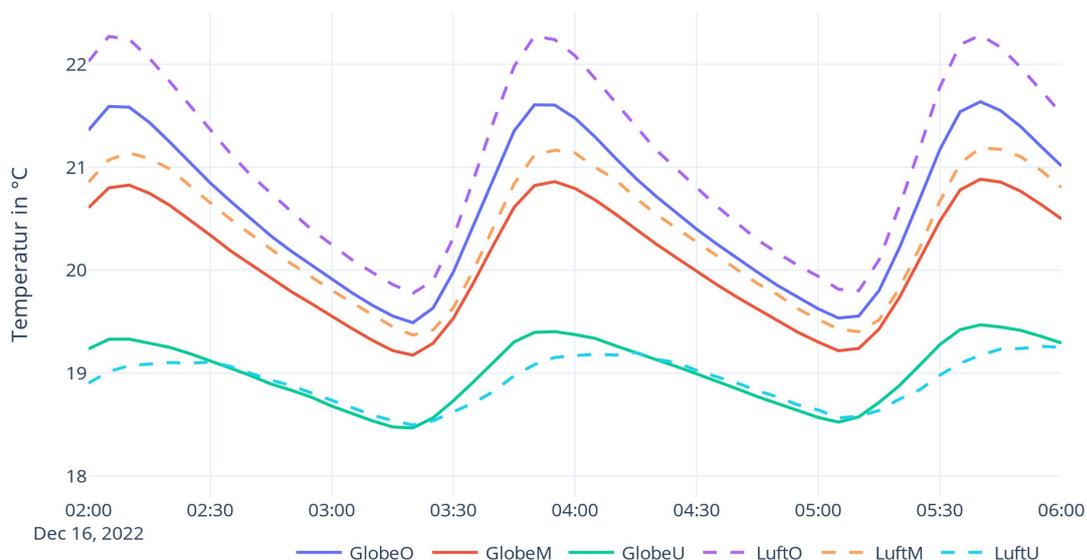


Abbildung 97: Radiator / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren

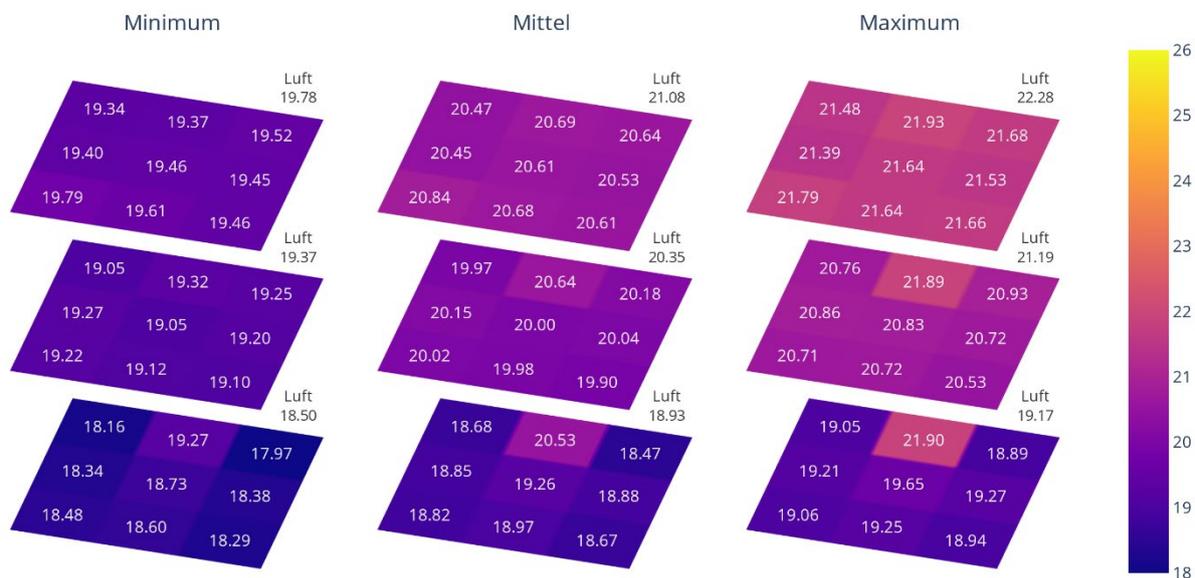


Abbildung 98: Radiator / Räumliche Darstellung Globetemperaturen

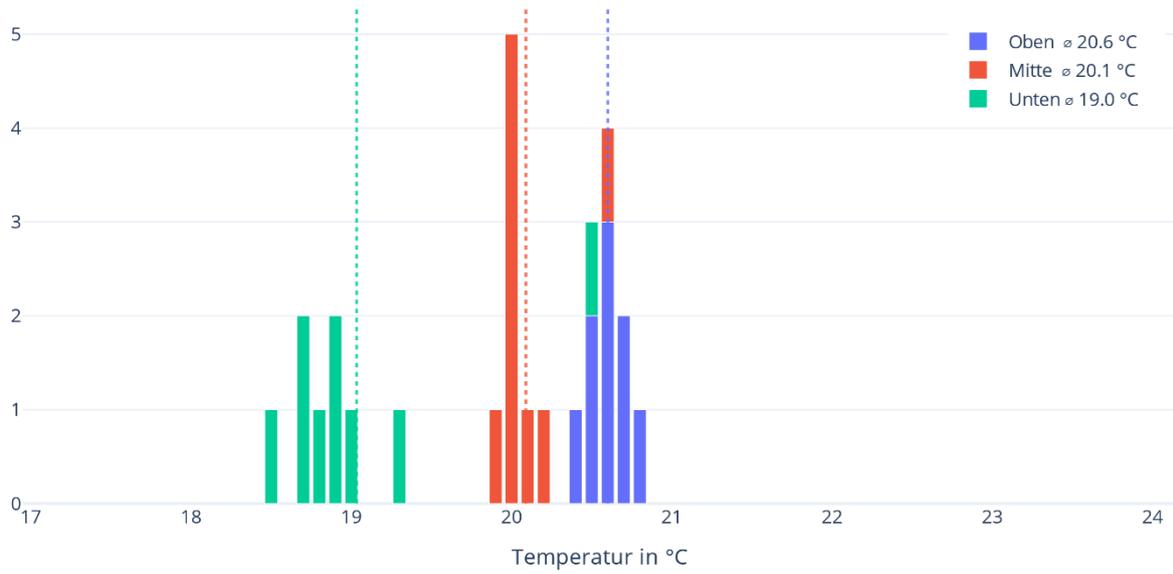


Abbildung 99: Radiator / Histogramm mittlere Globetemperaturen

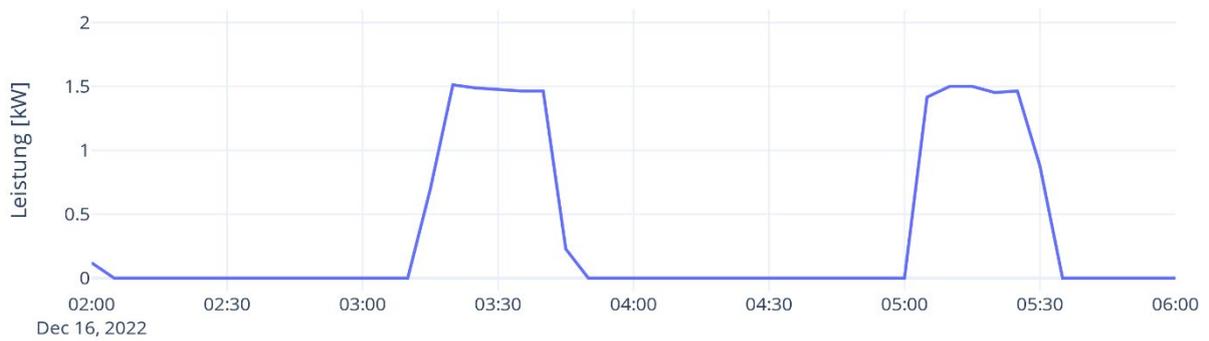


Abbildung 100: Radiator / Leistung Heizelement

#### 4.4.7 Konvektor

Abbildung 101 zeigt den Temperaturverlauf der 3 Lufttemperatursensoren auf 3 Ebenen sowie den mittleren Verlauf der Globetemperaturen in den drei Ebenen. Bedingt durch die Hysterese der 2-Punktregelung entstehen deutlich ausgeprägte Aufheiz- und Abkühlphasen, hier mit einer durchschnittlichen Periode von ca. 33 Minuten und einer Aufheizzeit von 10 Minuten. Da der Konvektor eine sehr geringe thermische Masse besitzt und Wärme überwiegend durch Konvektion abgibt verkürzen sich die Heizzyklen gegenüber den anderen Systemen deutlich.

Es zeigt sich auch hier eine ausgeprägte Temperaturschichtung, wobei sich die untere Ebene ebenso deutlich von den anderen beiden absetzt. Der Mittelwert des Temperatursensors Luft-Mitte, nach dem auch die Heizung geregelt wurde, liegt bei  $20,2^{\circ}\text{C}$ , die beiden anderen erreichen oben ein Maximum von  $22,6^{\circ}\text{C}$  sowie ein Minimum von  $18,4^{\circ}\text{C}$ . Dies ergibt im Messzeitraum eine vertikale Spreizung der Lufttemperatur von 4,2 Kelvin. Der Konvektor erreicht im Vergleich die höchsten Lufttemperaturwerte im oberen Bereich.

Der Mittelwert aller 27 Globesonden liegt über den Messzeitraum bei  $19,7^{\circ}\text{C}$ . In der unteren Ebene liegen die Globesonden etwas über der Lufttemperatur, in den beiden oberen Ebenen durchgehend darunter. Dies deutet auf einen höheren Konvektionsanteil, welcher die oberen Luftschichten überproportional erwärmt. Die Globesonden erreichen eine vertikale Spreizung von 3,5 Kelvin.

Dies zeigt sich auch in der räumlichen Darstellung aller Globesonden (Abbildung 102). Hier bildet sich die Schichtung und die daraus resultierenden Temperaturen deutlich ab. Die geringste Temperatur entsteht wie erwartet an der unteren Außenecke mit  $17,9^{\circ}\text{C}$ , die höchste Temperatur mit  $22^{\circ}\text{C}$  erreicht die Globesonde der oberen Ebenen zur Gebäudemitte hin. Das entspricht einer maximalen Spreizung von 4,1 Kelvin, welche vorrangig auf die Temperaturschichtung zurückzuführen ist. Das bildet sich auch im Histogramm in Abbildung 103 ab. Die einzelnen Ebenen haben eine schmale Temperaturverteilung, haben jedoch besonders bei der unteren Ebene größere Abstände zueinander.

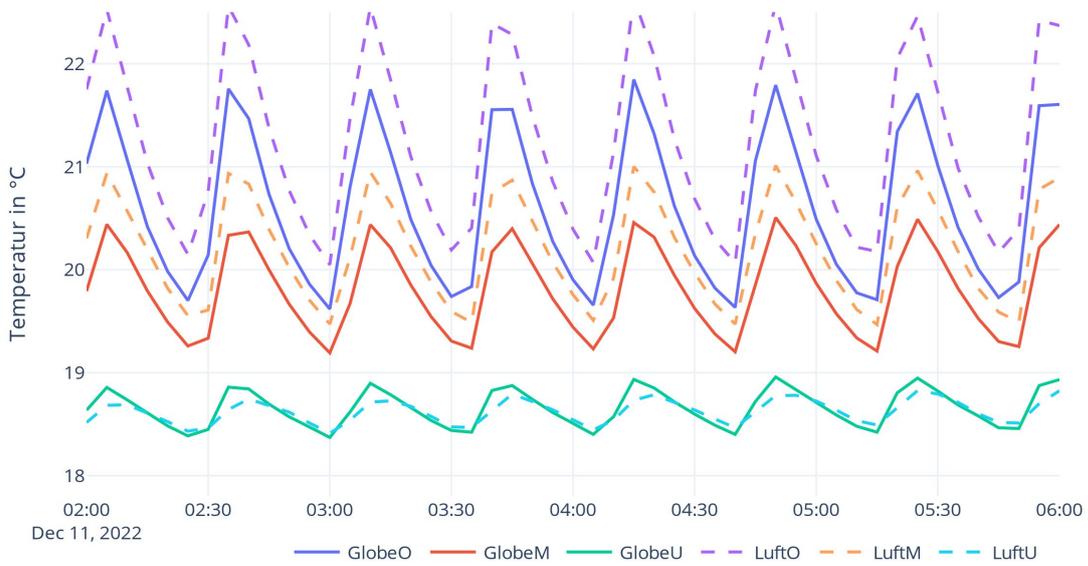


Abbildung 101: Konvektor / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren

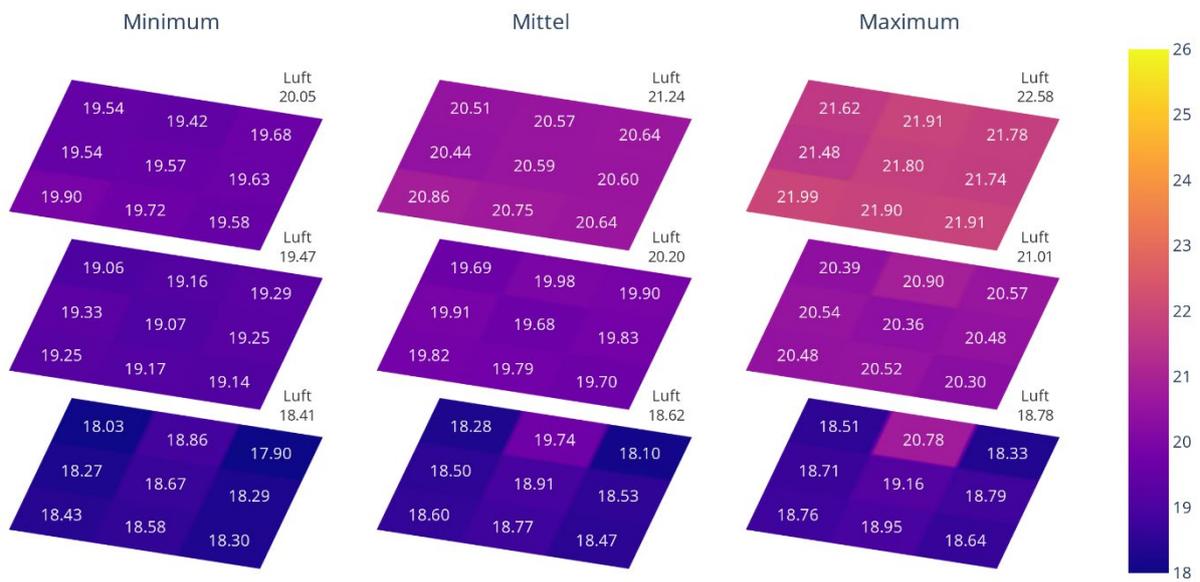


Abbildung 102: Konvektor / Räumliche Darstellung Globetemperaturen

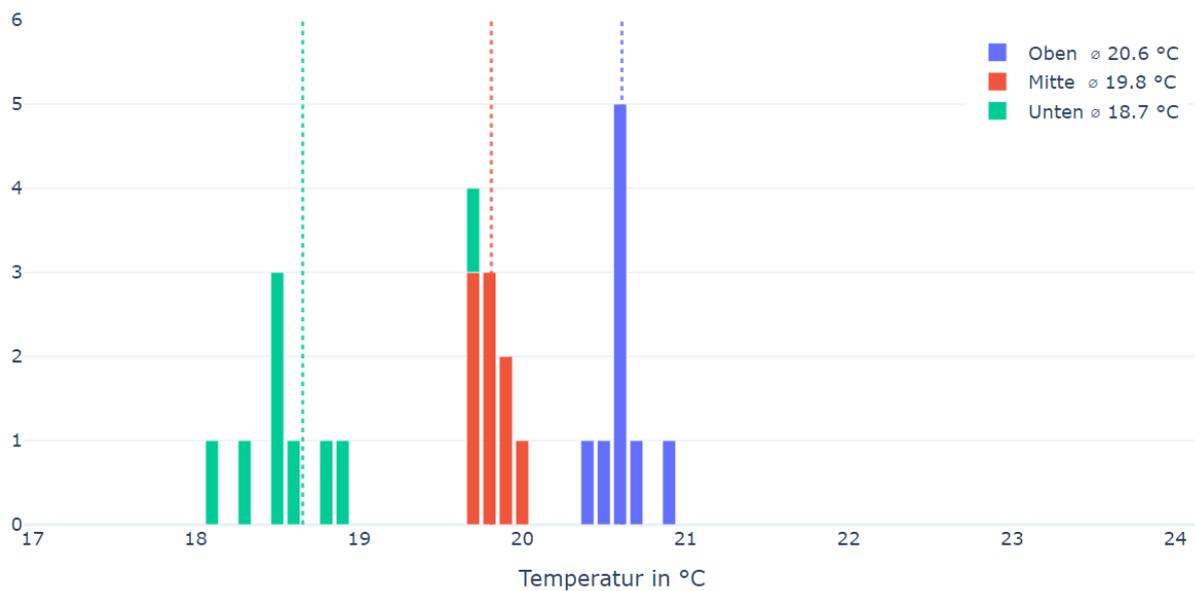


Abbildung 103: Konvektor / Histogramm mittlere Globetemperaturen

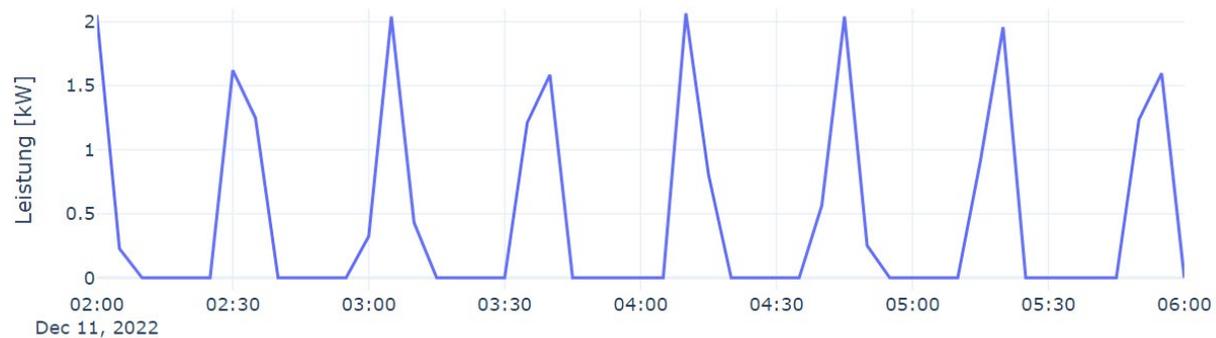


Abbildung 104: Konvektor / Leistung Heizelement

## 4.5 Zusammenfassung Grundsysteme

In Tabelle 7 sind die wichtigsten Kennwerte der gemessenen Grundsysteme zusammenfassend dargestellt. Zu erkennen ist, dass alle Systeme die Solltemperatur der Luft in Raummitte mit nur sehr geringen Abweichungen erreichen. Überraschend ist, dass sich dies im Mittel auch bei den Globesonden mit einer Bandbreite von 19,7 bis 20,2 °C abbildet, obwohl sich die Systeme in der Art der Wärmeabgabe stark voneinander unterscheiden.

Tabelle 7: Zusammenfassung der wichtigsten Kennwerte der Grundsysteme in der Messperiode

Kennwert	IR Decke zentral	IR Decke dezentral	IR Wand	FBH	Stele	Radiator	Konvektor
Temperatur mittlerer Luftsensoren in °C	20,0	20,3	20,1	20,2	20,0	20,4	20,2
mittlere Lufttemperatur in °C	20,0	20,2	20,0	20,2	19,8	20,1	20,0
Lufttemperatur minimal in °C	18,9	18,9	18,7	18,8	18,4	18,5	18,4
Lufttemperatur maximal in °C	21,7	21,6	21,5	21,4	21,6	22,3	22,6
Temperaturspreizung Luft in Kelvin	2,8	2,6	2,8	2,6	3,2	3,8	4,2
mittlere Temperatur aller Globesonden in °C	19,9	20,2	19,9	20,1	19,8	19,9	19,7
Spreizung der Globesonden in den drei Ebenen in Kelvin	2,5	3,3	3,4	1,9	2,9	3,2	3,5
minimale Globetemperatur in °C	18,3	18,3	18,1	18,3	18,0	18,0	17,9
maximale Globetemperatur in °C	23,8	22,8	25,8	21,9	22,5	22,1	22,1
Spreizung aller Globesonden in Kelvin	5,5	4,5	7,7	3,6	4,5	4,1	4,2
Temperatur Heizelement maximal in °C	176	154	156	30			
Temperatur Heizelement minimal in °C	35	61	75	22			
Temperatur Heizelement mittel in °C	83			26			
Periodendauer in Minuten	81	112	76	580	61	87	33
Aufheizzeit in Minuten	30	30	30	160	31	32	10
Abkühlphase in Minuten	51	82	46	420	30	55	23

Einen nennenswerten Unterschied in der zu erwartenden Behaglichkeit durch eine strahlungsoptimierte Wärmeabgabe lässt sich daher aus den Durchschnittswerten nicht ableiten, ebenso wenig ein Nachteil. Deutliche Unterschiede sind jedoch in der räumlichen Homogenität zu erkennen, hier weisen die strahlungsdominierten Systeme in den Histogrammen bessere Werte auf, allen voran die Fußbodenheizung. Der Unterschied ist insbesondere in der vertikalen Spreizung zu erkennen: auch wenn sich die Mittelwerte der Globetemperaturen insgesamt sehr ähnlich sind, gibt es bei den drei Systemen mit anzunehmenden höherem Konvektionsanteil Stele, Radiator und Konvektor in der unteren Ebene im Bereich des Fußbodens ein deutliches Gefälle in der vertikalen Temperaturschichtung. Am deutlichsten ist dies beim Konvektorsystem zu sehen, bei dem die bodennahe Temperatur als wichtiges Kriterium für die zu erwartende Behaglichkeit nur Werte zwischen 18°C und 19°C erreichen.

Ergänzend wurden in den Messzeiträumen auch die jeweiligen Stromverbräuche erfasst. Für die Vergleichbarkeit der Verbrauchswerte wurden von den gemessenen Stromverbräuchen über den Messzeitraum jeweils volle Heizzyklen (Aufheiz- und Abkühlphase) auf den Messzeitraum von 4 Stunden umgelegt. Ergänzend erfolgte eine Temperaturbereinigung, um die geringen Unterschiede der Außentemperatur im jeweiligen Messzyklus zu berücksichtigen (siehe Tabelle 8). Im Ergebnis ergibt sich ein Mittelwert von 1,57 kWh, wobei der geringste Wert bei der Variante Decke dezentral gemessen wurde (-13 %), der höchste Wert bei dem elektrischen Konvektor (+11 %). Hinweis: Die Daten stellen einen beispielhaften Vergleich dar und ermöglichen aufgrund der kurzen Messzeiträume keine generellen Aussagen.

Tabelle 8: Beispielhafte maximale Leistung und Verbrauch in einer Messperiode

	max. Leistung kW (Messung)	Verbrauch über 4h in kWh (Messung korr.)
el. Fußbodenheizung	1,3	1,48
IR Decke dezentral	2,0	1,37
IR Decke zentral	1,2	1,60
IR Wand	1,2	1,60
el. Konvektor	2,0	1,74
el. Radiator	1,5	1,57
IR Stelen	1,2	1,60

## 4.6 Ergänzende Vergleichsmessungen

Im Anschluss an die Messzyklen zum Vergleich der Grundsysteme wurden weitere Detailuntersuchungen durchgeführt. Hierbei waren folgende Fragestellungen im Fokus:

- Welche Effekte entstehen durch eine PI-Regelung gegenüber der klassischen 2-Punkt-Regelung?
- Wie wirkt sich eine asymmetrische Positionierung der Deckenelemente auf die Wärmeverteilung im Raum aus?
- Welche Oberflächentemperaturen entstehen bei IR-Deckensystemen auf der Kopfoberseite bei typischen Abständen in Abhängigkeit der Betriebstemperatur?
- Welche Unterschiede lassen sich im Aufheizverhalten der Heizsysteme erkennen?
- Welchen Einfluss haben „thermische Verschattungen“ durch Möbel (hier konkret ein Tisch)?

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

### 4.6.1 Regelung durch PI-System oder 2-Punkt

Am Beispiel des Systems Decke dezentral wurden unter gleichen Bedingungen entsprechende Messzyklen mit veränderter Regelung durchgeführt (siehe Kapitel 4.4.2. IR-Heizung Decke dezentral). Zum Einsatz kam eine Proportional-Integral-Regelung (PI-Regelung). Diese ist in der Lage, durch die Kombination von proportionalen und integralen Indikatoren eine sehr genaue Regelung der Solltemperatur sicherzustellen, die nahezu ohne Hysterese auskommt. In Abbildung 105 und Abbildung 106 ist das Ergebnis der Temperaturmessungen im Vergleich zur 2-Punkt-Regelung dargestellt. Wie zu erkennen ist, bewirkt die PI-Regelung eine nahezu konstante Temperatur mit minimalen Schwankungen. Es entstehen deutlich geringere Temperaturextreme und eine klare Temperaturschichtung. Zu erkennen ist auch, dass die durchschnittlichen Temperaturen in den drei Ebenen bei der PI-Regelung etwas geringer sind.

Dieser Effekt bildet sich auch deutlich in der räumlichen Wärmeverteilung aus (siehe Abbildung 107 und Abbildung 108). Das Wärmeempfinden ist nahezu unabhängig von der Position im Raum annähernd homogen, die Temperaturunterschiede betragen nur rund 2 Kelvin.

Am deutlichsten ist der Effekt im Vergleich der Oberflächentemperatur zu erkennen. Die PI-Regelung bewirkt fast durchgängig eine konstante Temperatur des Heizelements in Bereich zwischen 50 bis 80 °C. Dies kann sich deutlich vorteilhaft im Sinne der Behaglichkeit auswirken im Vergleich zur 2-Punkt-Regelung, bei der Spitzenwerte von über 150 °C erreicht werden (siehe Abbildung 109 und Abbildung 110).

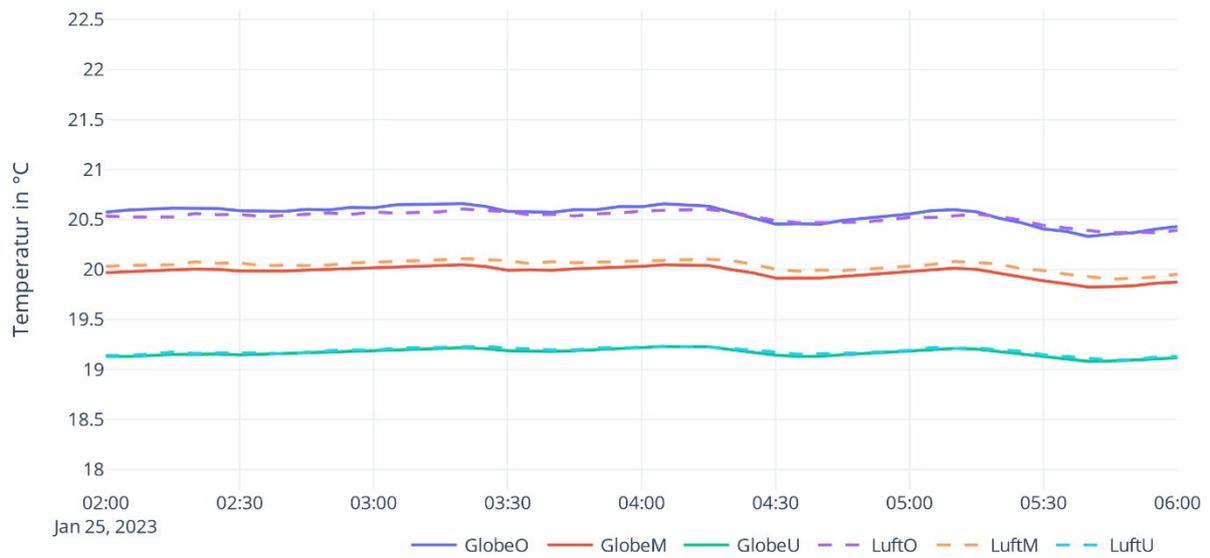


Abbildung 105: IR-Decke-dezentral PI-Regelung / Temperaturverlauf Globe und Temperatursensoren

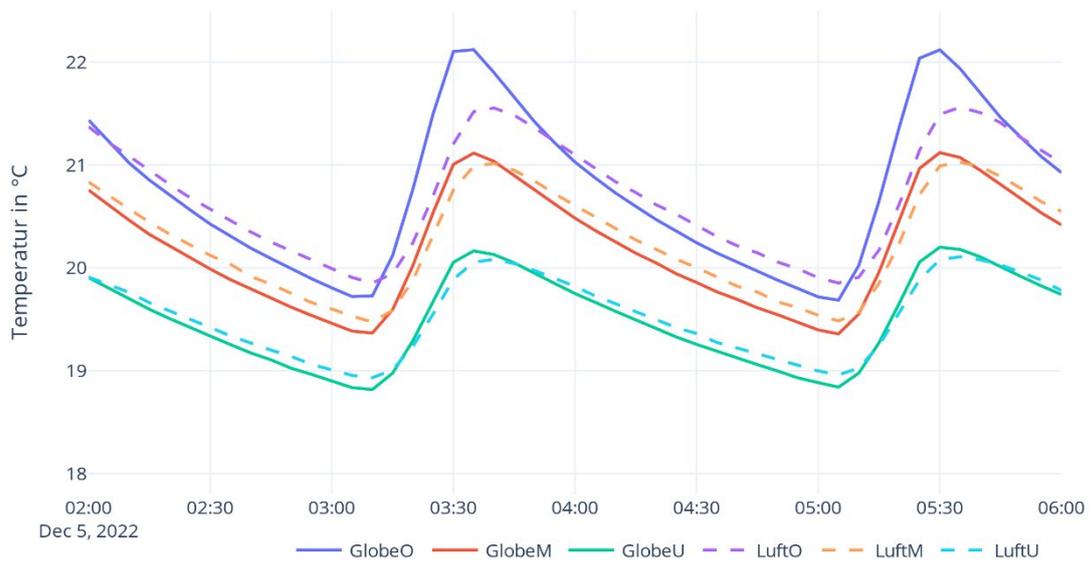


Abbildung 106: IR-Decke-dezentral 2-Punkt-Regelung / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren

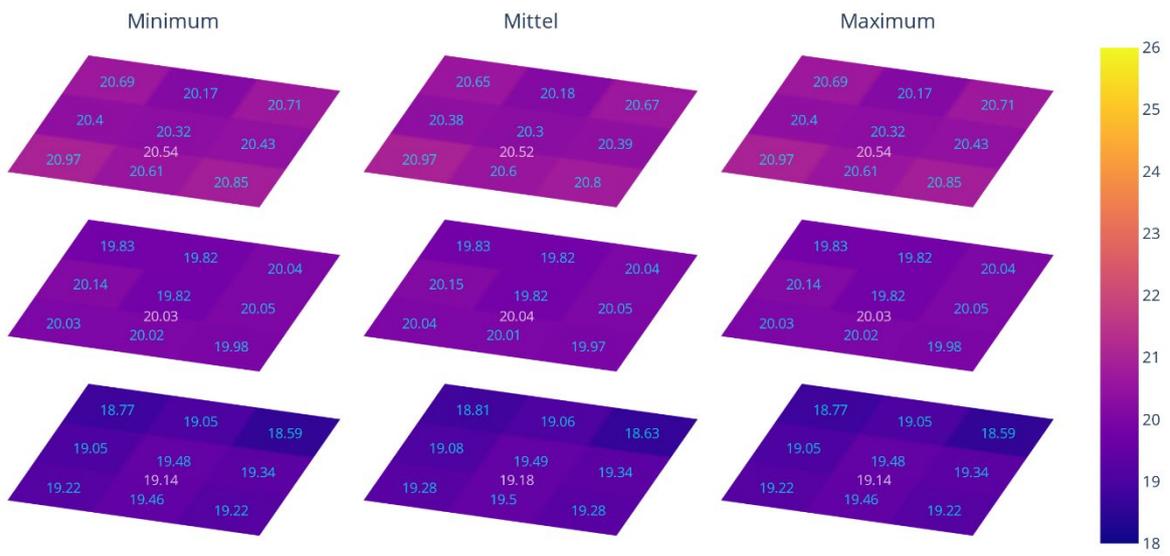


Abbildung 107: IR-Decke-dezentral PI-Regelung / räumliche Darstellung Globetemperaturen

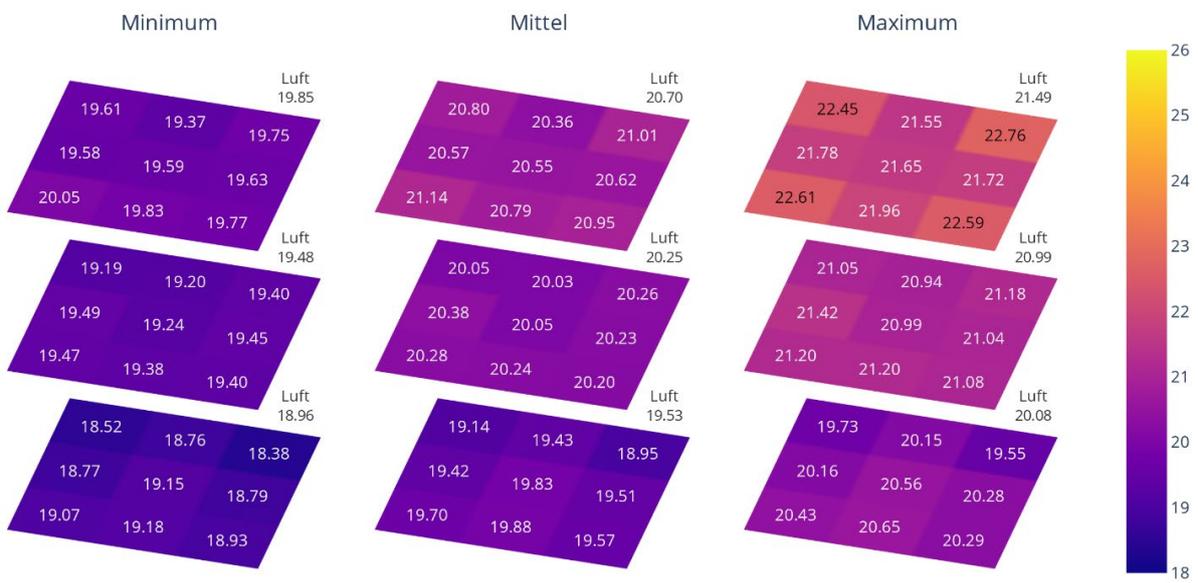


Abbildung 108: IR-Decke-dezentral 2-Punkt-Regelung / räumliche Darstellung Globetemperaturen

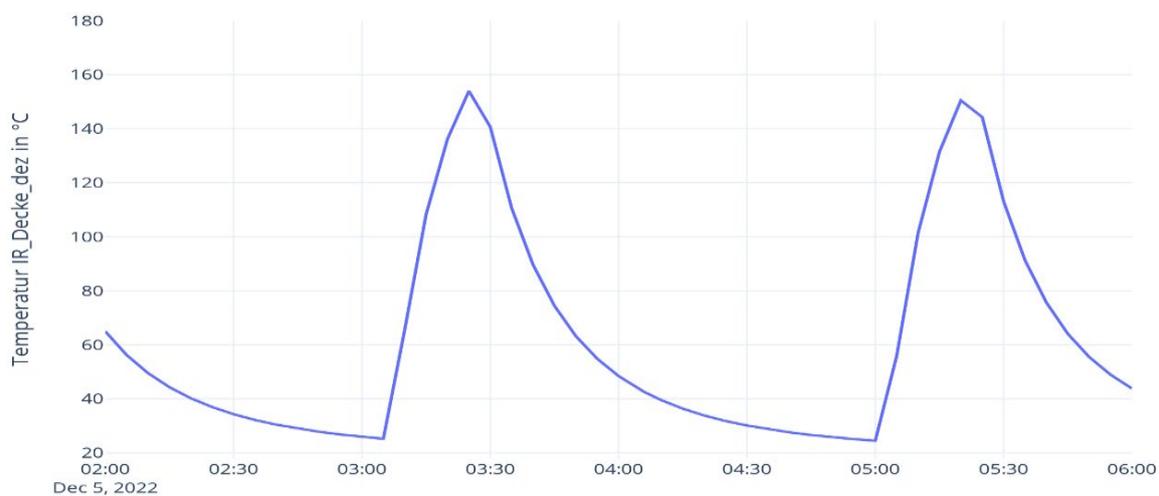


Abbildung 109: IR-Decke-dezentral 2-Punkt-Regelung / Temperaturverlauf Oberflächentemperatur Heizelement

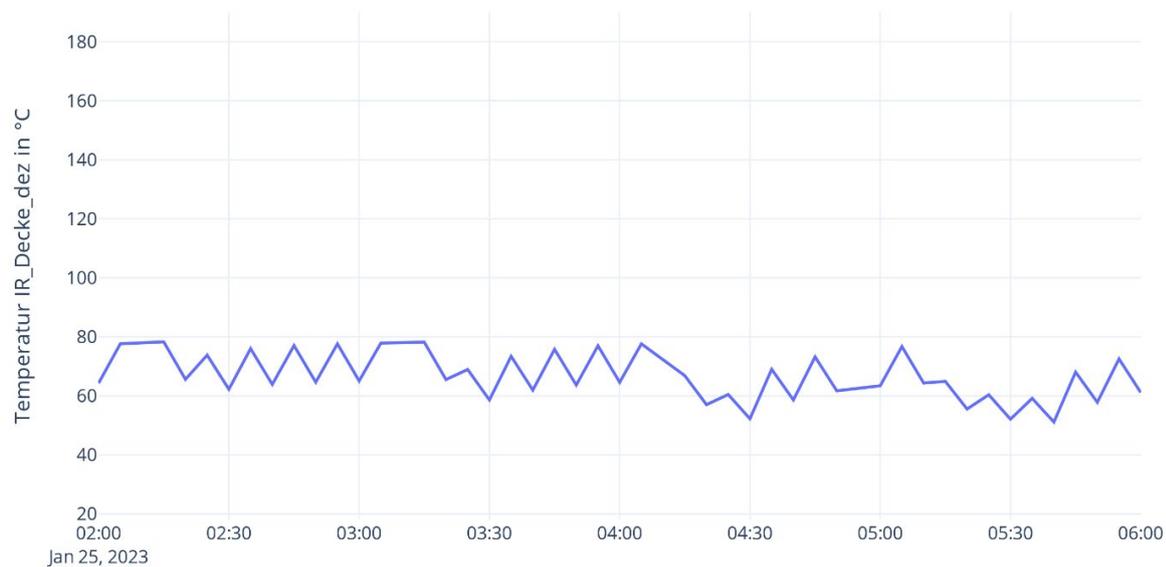


Abbildung 110: IR-Decke-dezentral-PI-Regelung / Verlauf Oberflächentemperatur Heizelement

### 4.6.2 Decke asymmetrisch

Im zweiten Vergleichszyklus wurde die Variante Decke dezentral mit nur zwei Heiz-Elementen betrieben, die an der Gebäudeaußenseite (Nordwand) platziert sind. Dies bewirkt eine eher ungünstige inhomogene Strahlungsverteilung im Raum mit der Erwartung, dass sich ein deutliches Temperaturgefälle abzeichnet. Dies lässt sich entsprechend klar in der räumlichen Wärmeverteilung erkennen (siehe Abbildung 111 und Abbildung 112). Zwischen den beiden Wänden bildet sich ein Temperaturgefälle von bis zu 2,6 Kelvin ab

Beim Vergleich der Oberflächentemperaturen ist zu erkennen, dass sich aufgrund der geringeren installierten Leistung um etwa 25 Kelvin höhere Temperaturen mit deutlich längerer Dauer ergeben (siehe Abbildung 113 und Abbildung 114).

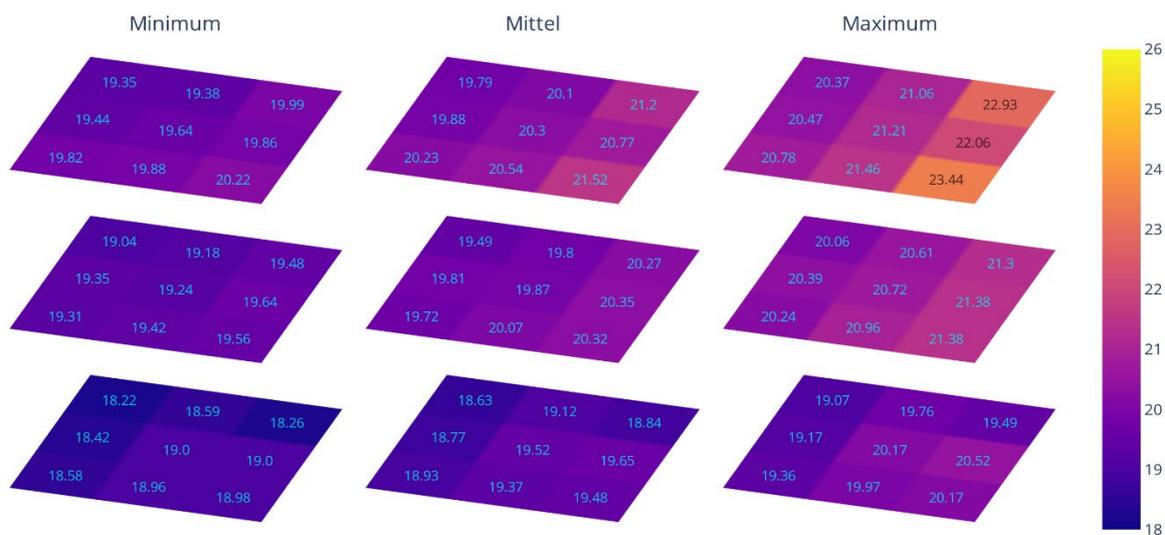


Abbildung 111: IR-Decke asymmetrisch / räumliche Darstellung Globetemperaturen

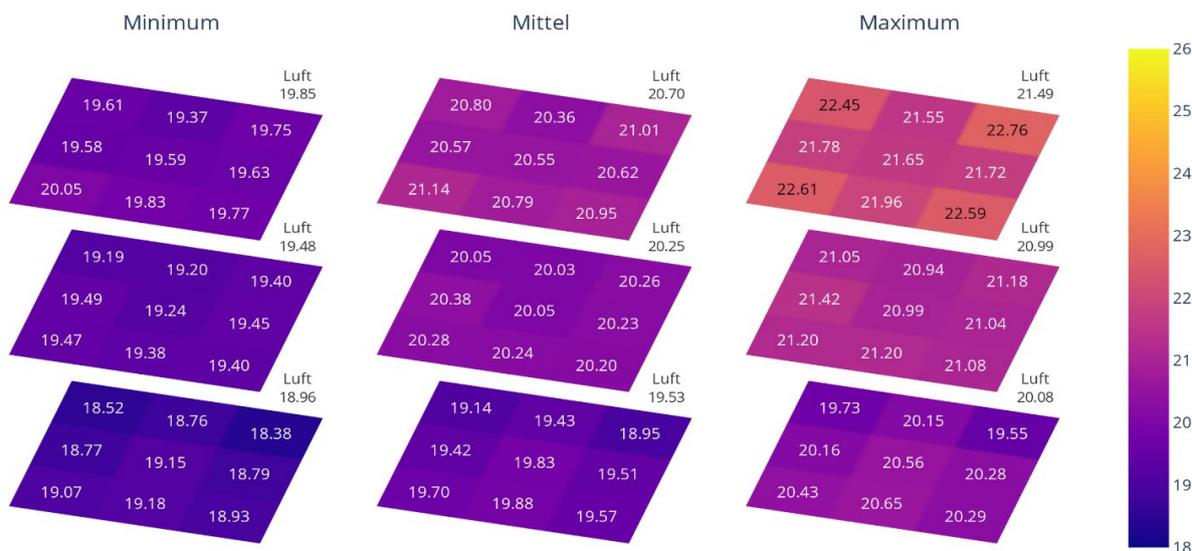


Abbildung 112: IR-Decke dezentral / räumliche Darstellung Globetemperaturen

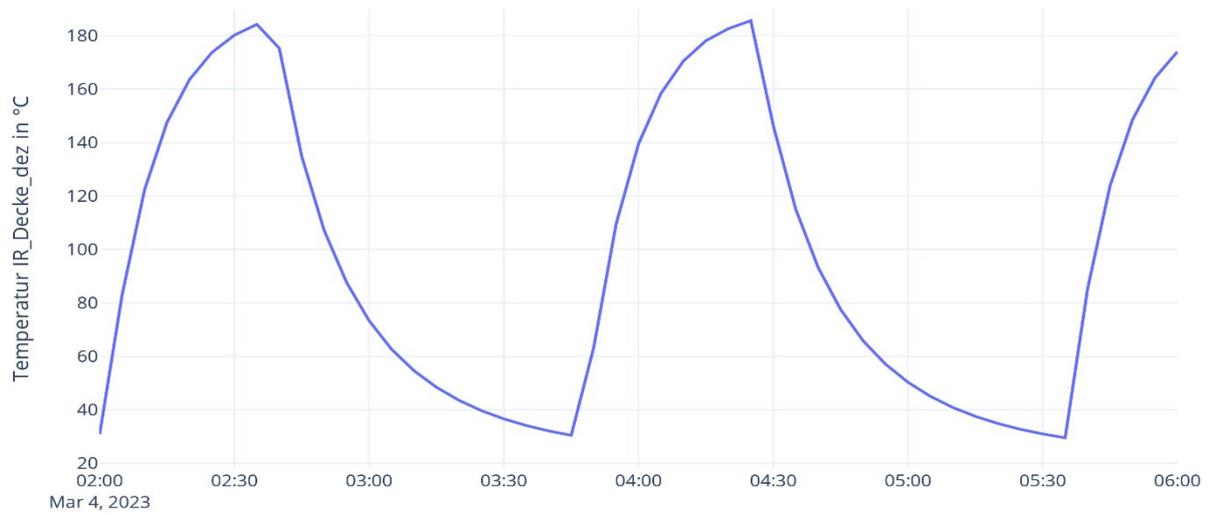


Abbildung 113: IR-Decke-asymmetrisch / Verlauf Oberflächentemperatur Heizelement

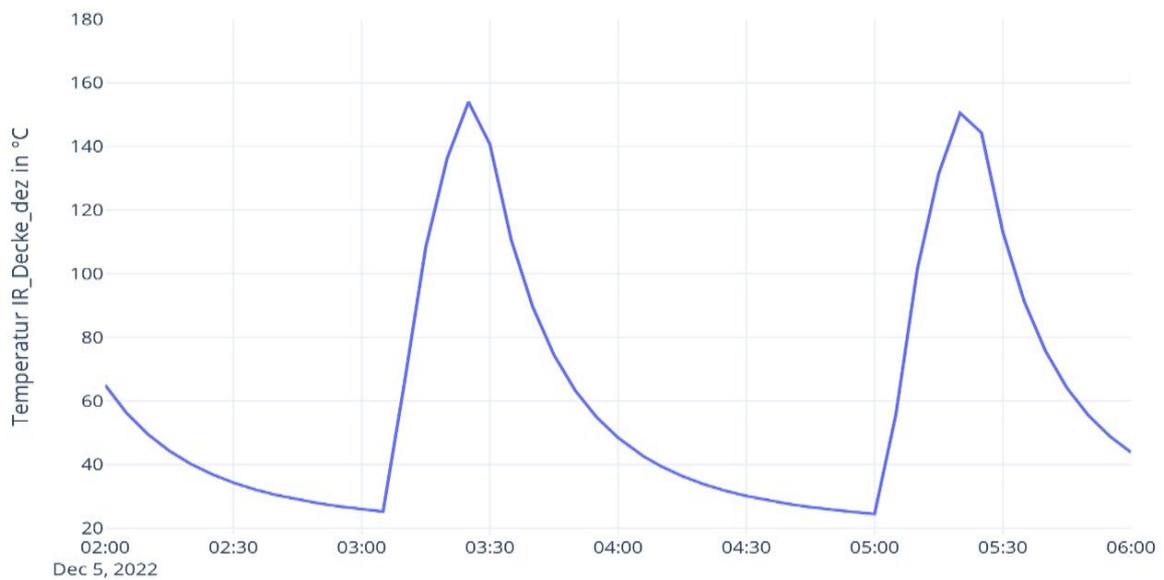


Abbildung 114: IR-Decke-dezentral / Temperaturverlauf Oberflächentemperatur Heizelement

### 4.6.3 Oberflächentemperatur

Eine weitere Untersuchung erfolgte im Hinblick auf den Einfluss der Betriebstemperatur von IR-Elementen auf die daraus resultierenden Oberflächentemperaturen auf Gegenständen bzw. Personen. Hierzu wurde die mittlere Globesonde der oberen Ebene (Position MMO) zusätzlich mit entsprechenden Temperatursensoren ausgestattet (siehe Abbildung 115). Als Heizsystem wurde die Variante IR Decke zentral verwendet (siehe Abschnitt 4.4.1). Die Globesonde liegt im direkten Strahlungsfeld mit einem Abstand von 70 cm vertikal unter dem Heizelement. Dies entspricht einer direkt unter dem Heizelement stehenden Person mit einer Körpergröße von 1,75 m. Die Regelungstechnik wurde mit dem Ziel modifiziert, eine Begrenzung der maximalen Betriebstemperatur definieren zu können. Im Laufe des Messzyklus wurde diese von 80°C in mehreren Stufen auf 150°C erhöht.

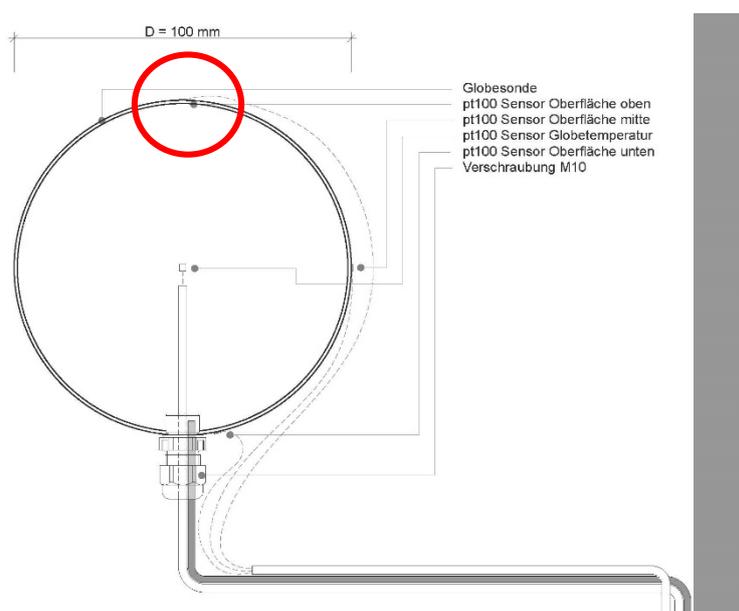


Abbildung 115: Globesonde im Schnitt mit Position der pt100 Oberflächentempersensoren

Abbildung 116 zeigt die Ergebnisse der gemessenen Oberflächentemperaturen auf der Globesonde bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen. Zu erkennen ist, dass der Heizzyklus wie zu erwarten geringer wird, je höher die Betriebstemperatur ist. Die daraus resultierenden Oberflächentemperaturen im Abstand von 70 cm steigen entsprechen von ca. 26°C auf rund 37°C an, sind jedoch in immer kürzer werdenden Zeiträumen vorhanden. In Abbildung 117 ist das Verhältnis von Betriebstemperatur zu Oberflächentemperatur dargestellt. Wie zu erkennen ist, verhalten sich die Daten nahezu linear. Hilfreich für die Planung und Auslegung von IR-Heizungen wäre eine Einordnung, welche Temperaturen über welche Zeiträume unter verschiedenen Randbedingungen als Behaglich bzw. Unbehaglich empfunden werden. Tendenziell ist anzunehmen, dass das Risiko einer unbehaglichen Wahrnehmung durch den Nutzer größer ist, je höher die Maximaltemperatur der Heizelemente ist.

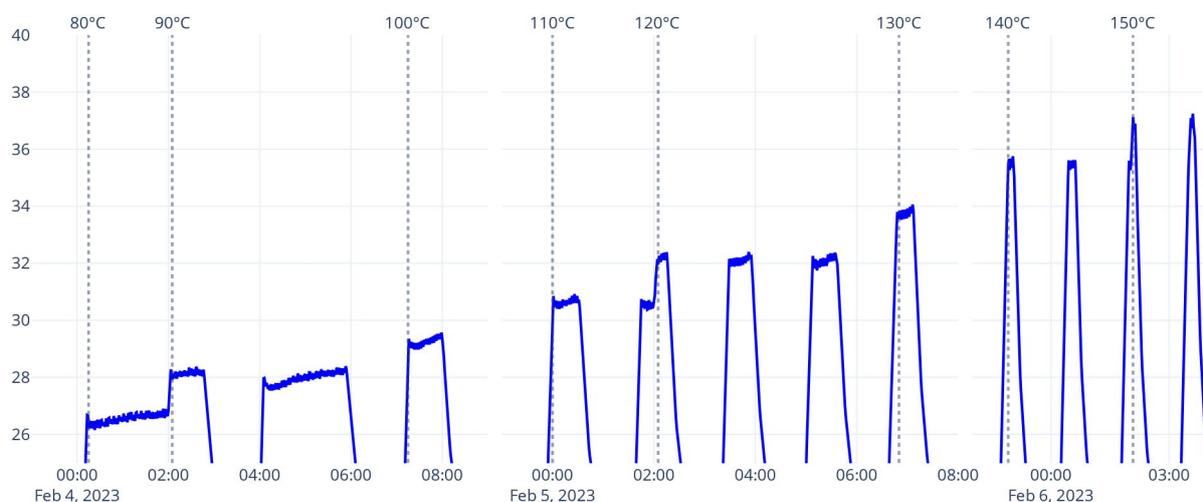


Abbildung 116: Temperaturverlauf Oberflächentemperatur Globesonde MMO

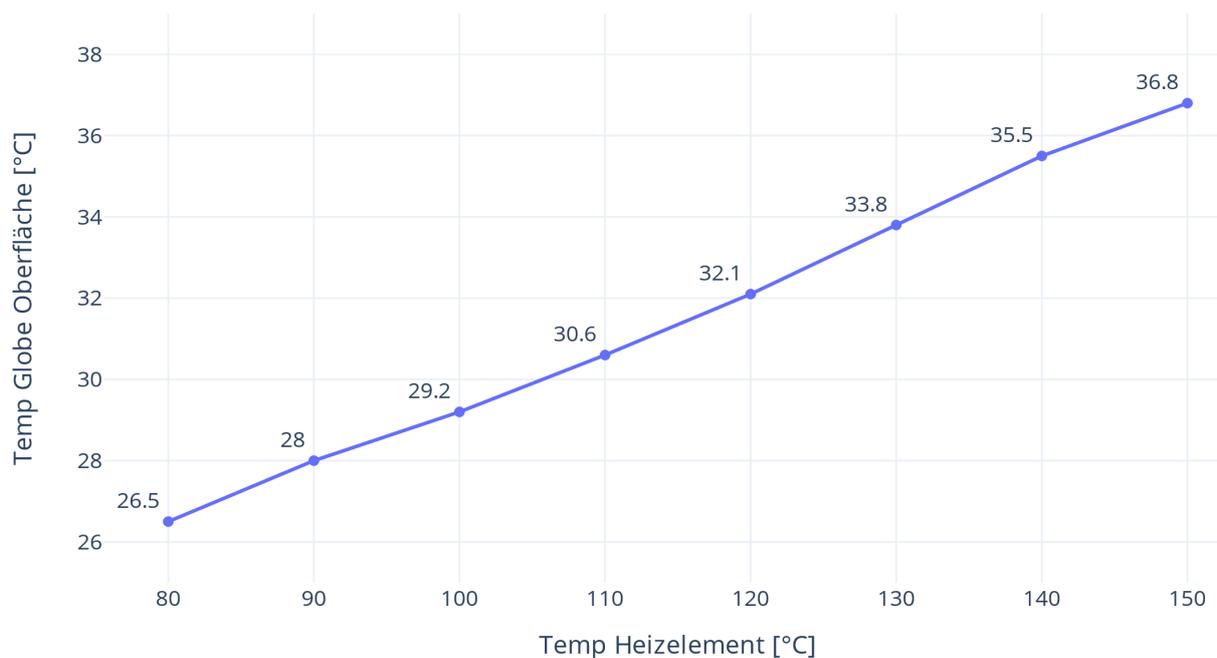


Abbildung 117: Verhältnis von Betriebstemperatur zu gemessener Oberflächentemperatur (Abstand vertikal 70 cm)

#### 4.6.4 Aufheizverhalten

Eine wichtige Eigenschaft von Stromdirektheizungen ist die Möglichkeit einer geringen Trägheit und damit eine schnelle Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Randbedingungen. Zu diesem Zweck wurden in den Messzyklen Änderungen der Solltemperaturen definiert, die einer typischen Nachtabsenkung entsprechen. Untersucht wurde nun, wie sich das Aufheizverhalten der unterschiedlichen Systeme bei einer Änderung um 2 Kelvin von 18°C auf 20°C darstellt. In Abbildung

118 und Abbildung 119 sind exemplarisch die beiden Varianten IR Decke dezentral und der elektrische Konvektor dargestellt. Zu erkennen ist, dass beide Systeme in sehr kurzer Zeit die Anpassung der Solltemperatur erreichen konnten. Bei genauer Betrachtung ist dabei ein wesentlicher Unterschied zu sehen: Die Konvektorheizung erreicht die Solltemperatur bezogen auf die Lufttemperatur in Raummitte deutlich schneller als die IR-Heizung (ca. 5 Min. gegenüber 15 Min.). Die Lufttemperatur erreicht jedoch eine große vertikale Spreizung von 5 Kelvin und eine Übertemperatur von 22,7 °C im oberen Bereich. Bei der IR-Heizung wird hingegen wesentlich schneller eine stabile und höhere operative Temperatur erreicht, was für die Behaglichkeit vorteilhaft ist.

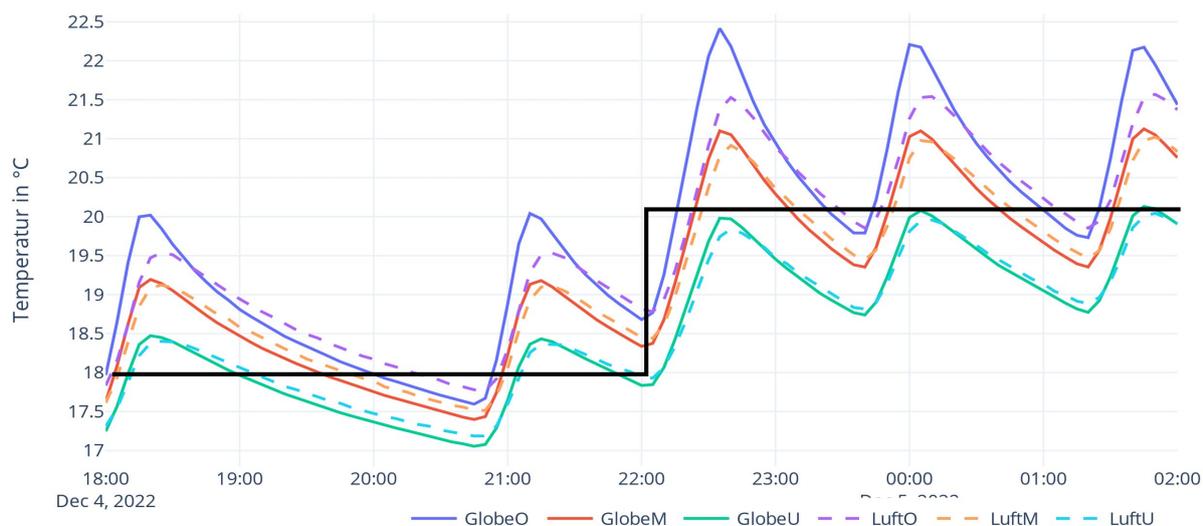


Abbildung 118: Aufheizverhalten der Variante IR Decke dezentral (vier Heizelemente, 2,2 kW) bei einer Erhöhung der Solltemperatur von 2 Kelvin (schwarz: Solltemperatur)

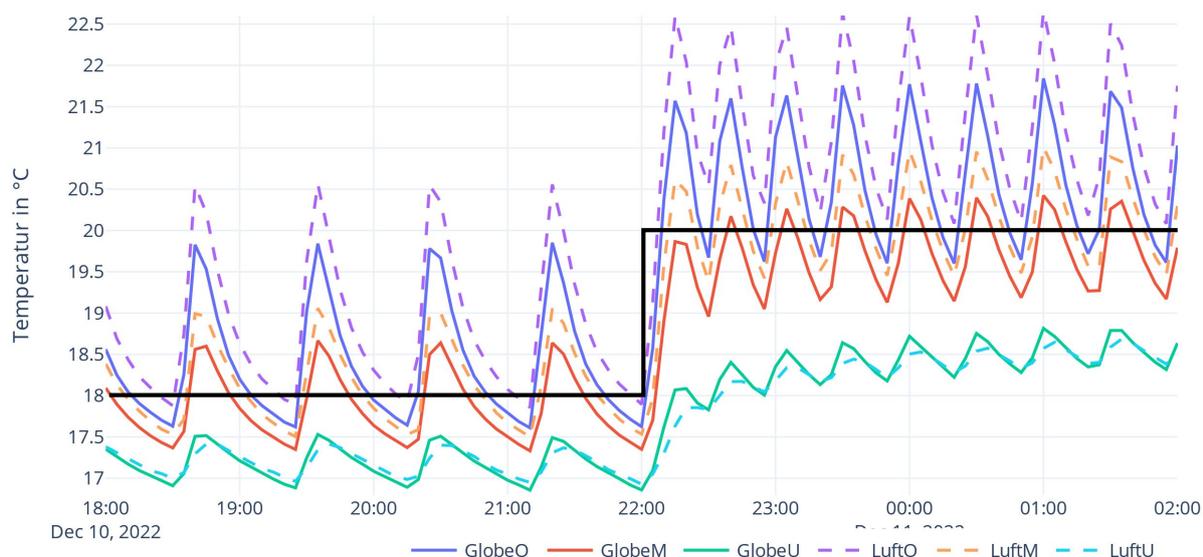


Abbildung 119: Aufheizverhalten der Variante Konvektor (elektr. 2 kW) bei einer Erhöhung der Solltemperatur von 2 Kelvin (schwarz: Solltemperatur)

#### 4.6.5 Auswirkung von „Strahlungsschatten“

Eine strahlungsdominierte Wärmeabgabe basiert in besonderem Maße auf einer direkten Strahlungsbilanz zwischen Heizelement und Bauteiloberflächen bzw. dem Nutzer. Räumliche Element, wie ungünstige Grundrisse oder Möbel können einen ungehinderten und gleichmäßigen Strahlungsaustausch negativ beeinflussen. Dies betrifft zum Beispiel das längere Verweilen an einem Tisch, bei dem die Beine des Nutzers von der Wärmestrahlung des Heizelements abgeschattet ist und in ungünstigen Fall zudem im direkten Strahlungsaustausch mit der kühleren Außenwand oder sogar einer bodentiefen Verglasung steht.

Um den Effekt zu untersuchen wurde die Variante Decke zentral in einer Vergleichsmessung mit einem zusätzlichen Tisch möbliert, der direkt an der Außenwand positioniert ist und eine Barriere der Wärmestrahlung für die darunter befindliche Globesonde darstellt (Position MAU, siehe Abbildung 112). Alle anderen Parameter wurden beibehalten.

In Abbildung 121 und Abbildung 122 sind die Werte der einzelnen Globesonden im Vergleich mit und ohne Tisch dargestellt. Wie zu erkennen ist, werden im „strahlungsschatten“ unter dem Tisch deutlich geringere Werte erreicht, die im Mittel über ein Kelvin betragen. Auch im gemittelten Vergleich der Globetemperaturen ist der Effekt zu erkennen. Der Mittelwert der unteren Ebene sackt um rund 0,5 Kelvin nach unten ab (siehe Abbildung 123 und Abbildung 124). Diese Effekte sollten daher bei der Planung von strahlungsdominierten Heizelementen berücksichtigt werden.



Abbildung 120: Position der Tische für die Vergleichsmessung "Strahlungsschatten"



Abbildung 121: IR-Decke Zentral mit Tischen, räumliche Darstellung der gemessenen Globetemperaturen

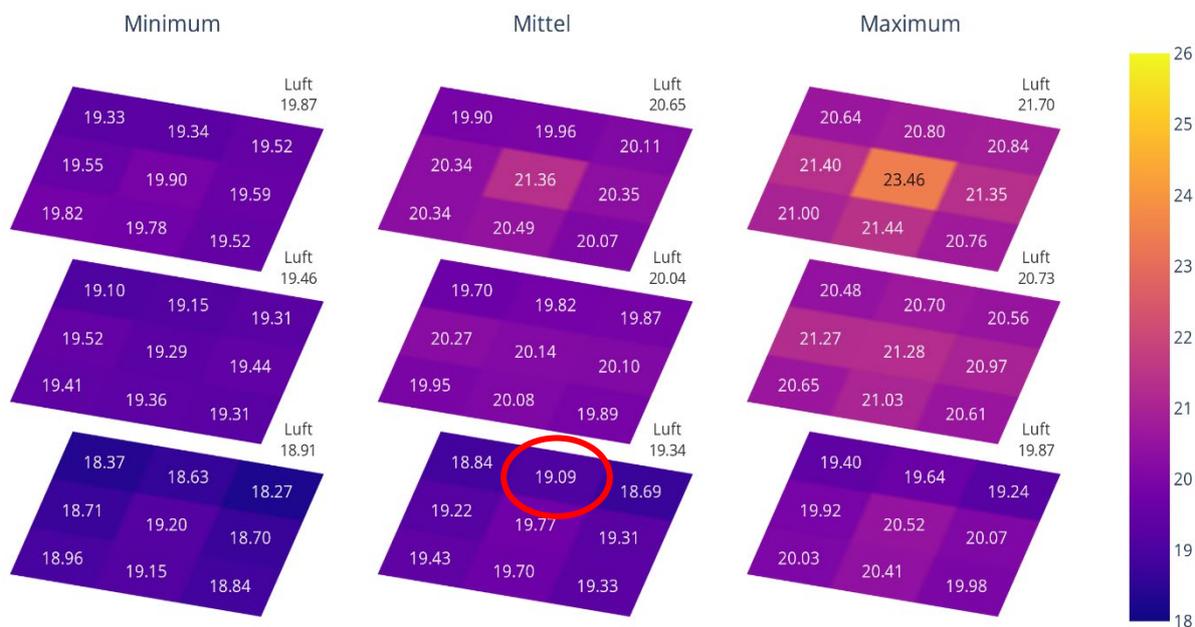


Abbildung 122: IR-Decke Zentral ohne Tische, räumliche Darstellung der gemessenen Globetemperaturen

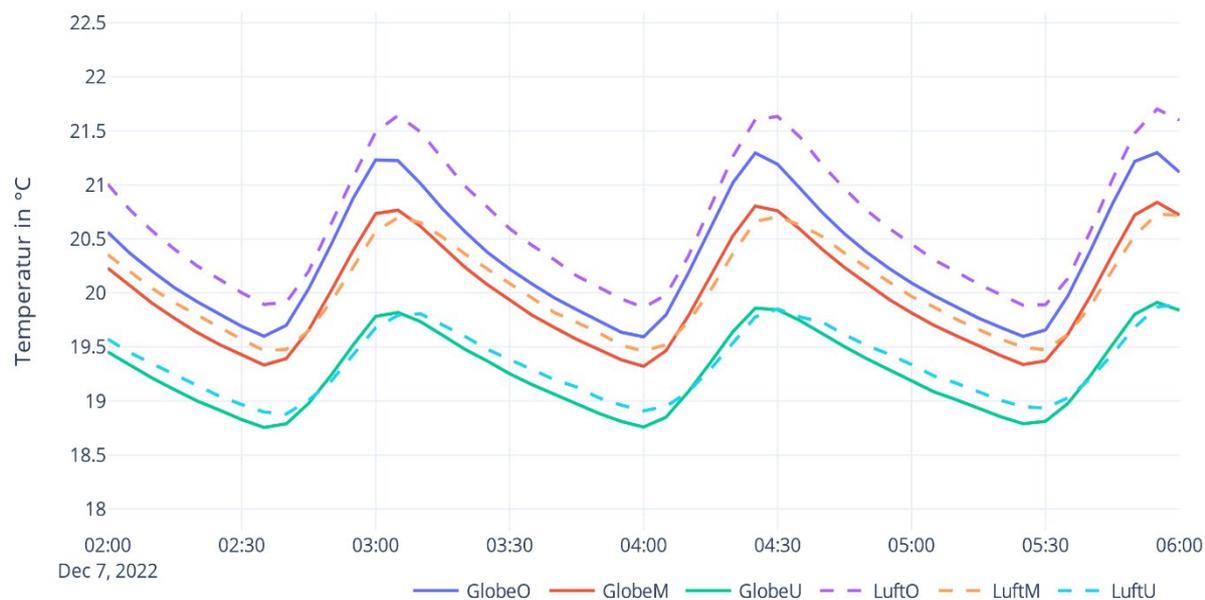


Abbildung 123: IR Decke zentral ohne Tisch, Temperaturverläufe

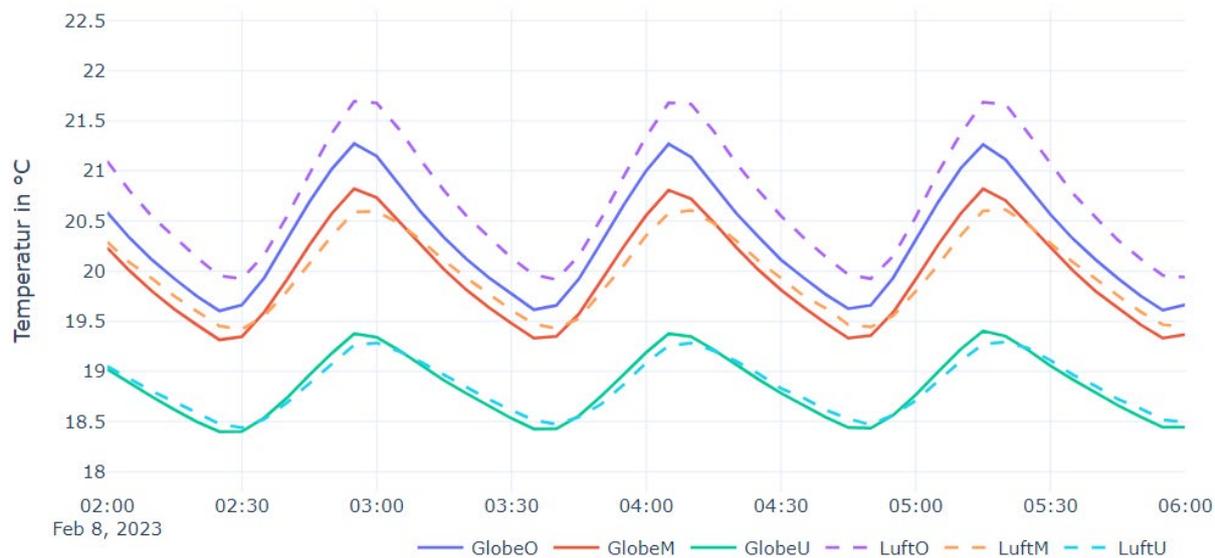


Abbildung 124: IR Decke zentral mit Tisch, Temperaturverläufe

#### 4.6.6 Zusammenfassung ergänzende Labormessungen

Ergänzend zu den Erkenntnissen aus den verglichen Untersuchungen der Grundsysteme können auf Basis der Ergebnisse der ergänzenden Vergleichsmessungen folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

Durch eine PI-Regelung können gegenüber einer typischen 2-Punkt-Regelung in hohem Maße Temperaturschwankungen der Heizelemente und damit verbundene Schwankungen der Luft- und Globetemperaturen reduziert werden. Die nahezu konstante Einhaltung der Solltemperatur führt zudem dazu, dass die Heizelemente keine hohen Temperaturspitzen erreichen, die das Behaglichkeitsempfinden negativ beeinflussen können.

Eine asymmetrische Positionierung der Heizelemente kann zu einem erhöhten horizontalen Temperaturgefälle führen. Beim Ziel möglichst homogener Behaglichkeitsanforderungen ist eine gleichmäßig positionierte Anordnung von im Idealfall mehrerer kleinerer Heizelemente vorteilhaft. Ergänzend lassen sich durch die hohe Flexibilität der Systeme bei Bedarf mit einfachen Mitteln räumlich individuelle Behaglichkeitszonen einrichten.

Ein wesentliches Kriterium für die Wahrnehmung und Akzeptanz von IR-Heizelementen ist die am Körper entstehende Oberflächentemperatur. Diese ist im Wesentlichen von der Betriebstemperatur der Heizelemente und vom Abstandes zum Heizelement abhängig. Die Untersuchung am Beispiel einer stehenden Person unter einem an der Decke positionierten Heizelement zeigt den Einfluss der Betriebstemperatur deutlich auf. Bei marktüblichen Systemen mit Temperaturen zwischen 80°C bis zu 150°C entstehen hierbei Unterschiede auf der Kopfoberseite von über 10 Kelvin. Je höher die Maximaltemperatur des Heizelements ist, desto höher ist das Risiko einer unbehaglichen Wahrnehmung durch den Nutzer. Weitergehende Untersuchungen mit Probanden könnten hierzu wichtige Erkenntnisse liefern.

Ergänzend zur räumlichen Flexibilität differenzierter Wärmeanforderungen spielt auch die zeitliche Flexibilität je nach Energie- und Nutzungskonzept eine große Rolle. Insbesondere bei einer angestrebten hohen Dynamik durch den Nutzer ist das Aufheizverhalten von entscheidender Bedeutung. Bei der Untersuchung des Verhaltens der verschiedenen Systeme bei einer Erhöhung der Solltemperatur um 2 Kelvin wurden deutliche Unterschiede festgestellt. Im Vergleich der zwei Extrembeispiele IR-System Decke dezentral (sehr hoher Strahlungsanteil) und dem elektrischen Konvektor (sehr hoher Konvektionsanteil) zeigte sich, dass zunächst beide Systeme sehr flink auf die Anforderungsänderung reagieren können. Der Konvektor ist hierbei bezogen auf die zu erreichende Soll-Lufttemperatur deutlich schneller, dies jedoch zu Lasten der operativen Raumtemperatur, die bei der IR-Heizung deutlich schneller erreicht wird. Besonders deutlich zeigt sich dies in der unteren Ebene in Fußbodennähe, bei der das IR-System deutliche Vorteile im Hinblick auf eine flinke Erreichung behaglicher Bedingungen aufweisen kann.

Je höher der Strahlungsanteil eines Wärmeabgabesystems, desto bedeutsamer ist der störungsfreie direkte Strahlungsaustausch zwischen Heizelement und Bauteiloberflächen bzw. Nutzer. Bei der vergleichenden Untersuchung einer Beheizung mit zentralem Heizelement in Raummitte konnte beispielhaft der Einfluss eines Tisches auf die operative Temperatur unter dem Tisch gemessen werden. Die Wirkung betrug hierbei im Mittel eine Reduktion von über einem Kelvin und sollte daher bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden. Weitergehende Untersuchungen zu Grundriss- und Möblierungsvarianten sowie der Einfluss von Oberflächen mit unterschiedlichem Absorptions- bzw. Reflexionsverhalten wären hierbei hilfreich.

## 5. Ergänzende Betrachtungen

Die in den vorausgegangenen Kapiteln aufgeführten Untersuchungen bestätigen die Ergebnisse aus dem Vorläufer-Projekt IR-Bau, wonach Infrarotheizungen (bzw. Stromdirektheizungen allgemein) aus technischer Sicht und unter dem Aspekt der Behaglichkeit eine ernsthafte Option für die zukünftige Gebäudeheizung darstellen. Im Kontrast zu den zahlreichen, sehr attraktiven Vorteilen dieser Wärmeerzeugungsart steht der große Nachteil, dass direktelektrische Systeme im Vergleich zu Wärmepumpensystemen deutlich höhere elektrische Leistungskapazitäten und höhere Stromverbräuche verursachen. Im folgenden Kapitel wird der Versuch unternommen, mögliche Konsequenzen einer großmaßstäblichen Realisierung von Stromdirektheizungen in Deutschland zu erörtern und deren Wirkungen einzuordnen. In einem ersten Schritt wird das Zusammenspiel von Stromdirektheizung und lokaler Stromproduktion über Photovoltaik betrachtet, im zweiten Schritt erfolgt eine Abschätzung möglicher Ausbauszenarien auf den zukünftigen Strombedarf in Deutschland.

### 5.1 Einfluss von gebäudeintegrierter Photovoltaik auf die Jahresbilanzen bei Stromdirektheizungen

Eine Elektrodirektheizung verursacht einen höheren Stromverbrauch für die Wärmeerzeugung als eine vergleichbare Wärmepumpe, da diese den Großteil der Wärmemenge aus der lokalen Anergiequelle (Luft, Erdreich, Grundwasser etc.) gewinnt. Dies führt zu höheren Betriebskosten und einem höheren CO<sub>2</sub> Ausstoß, solange der Strom zumindest teilweise aus nicht erneuerbaren Quellen stammt. Erst durch die Kombination der Elektrodirektheizung mit einer Photovoltaikanlage als Umweltenergiequelle können die Betriebskosten und vor allem der höhere CO<sub>2</sub> Ausstoß reduziert werden. Diese ist bei einer Wärmepumpenheizung natürlich ebenso wirksam, der Grundgedanke bei den folgenden Berechnungen ist jedoch, Stromdirektheizungen an einen darüberhinausgehenden Ausbau von Photovoltaik-Kapazitäten zu koppeln. Der zusätzliche Zubau der Umweltenergiequelle Solarstrom ist durch die geringeren Investitionskosten der Elektrodirektheizung gegenüber Wärmepumpensystemen in der Regel möglich (siehe hierzu Abschlussbericht IR-Bau).

Bei diesem Ansatz stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien die Dimensionierung einer zusätzlichen Photovoltaikleistung sinnvoll erfolgen sollte. Ziel des Kapitels ist es, Hinweise für die PV-Anlagendimensionierung in Abhängigkeit von Wohnfläche und Dämmstandard zu geben. Um dies zu erörtern wurden am Beispiel eines gut gedämmten Einfamilienhauses unterschiedliche Szenarien berechnet und miteinander verglichen. Folgende Grundparameter wurden für das Beispielhaus in den nachfolgenden Berechnungen definiert:

Gebäudenutzfläche:	200 m <sup>2</sup>
Jahresheizwärmebedarf (Nutzenergie):	20 kWh/m <sup>2</sup> a
Trinkwarmwasserbedarf (Nutzenergie):	12,5 kWh/m <sup>2</sup> a
Effizienz PV-Stromerzeugung:	950 kWh/kWp
JAZ Wärmepumpe Heizung	3,5 (bei Stromdirektheizung 1,0)
JAZ Wärmepumpe Trinkwarmwasser	2,5 (bei Stromdirektheizung 1,0 durch el. Durchlauferhitzer)
CO <sub>2</sub> Ausstoß Strombezug	0,5 kg/kWh

Die Berechnungen erfolgen auf Basis von Monatsbilanzen. Zur Vereinfachung wurde angenommen, dass durch eine auf Eigenverbrauch optimierte Regelung in Kombination mit einem thermischen Speicher und/oder einem Stromspeicher die Solarstromproduktion innerhalb eines Monats in vollem Umfang zur Deckung des jeweiligen Bedarfs angerechnet werden kann. Es wird somit für jeden Monat der gesamte PV-Stromertrag dem Strombedarf für die Wärmeerzeugung direkt gegenübergestellt. Zusätzlich erforderlicher Strombedarf wird über das Netz bezogen, darüberhinausgehende PV-Erträge werden als Überschuss dargestellt

Abbildung 125 zeigt die beispielhafte Monatsbilanz des zuvor beschriebenen Gebäudes bei Einsatz einer Luft- Wasser Wärmepumpe zur Erzeugung von Heizungswärme und Warmwasser. Für die Wärmeversorgung ergibt sich hier ein Jahresbedarf von 2341 kWh Strom als Netzbezug mit CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 1071 kg/a. In Abbildung 126 ist die analoge Berechnung für die Variante Stromdirektheizung mit elektrischen Durchlauferhitzern dargestellt. Hier ergeben sich wie zu erwarten Werte in etwa 3-facher Höhe. Ohne PV-Anlage hat die Elektroheizungsvariante also deutliche ökologische Nachteile gegenüber der Wärmepumpenvariante, da sie im Gegensatz zur Wärmepumpe keine lokale regenerative Energie nutzt.

**Luft- / Wasser-Wärmepumpe****0,0 kWp ohne PV-Anlage**

Monat	PV-Ertrag	Heizung	Warmwasser	Solare Deckung	Eigenverbrauch	Netzbezug	PV Überschuss
Jan	0 kWh	258 kWh	83 kWh	0%	0 kWh	341 kWh	0 kWh
Feb	0 kWh	243 kWh	83 kWh	0%	0 kWh	326 kWh	0 kWh
Mrz	0 kWh	167 kWh	83 kWh	0%	0 kWh	250 kWh	0 kWh
Apr	0 kWh	54 kWh	83 kWh	0%	0 kWh	138 kWh	0 kWh
Mai	0 kWh		83 kWh	0%	0 kWh	83 kWh	0 kWh
Jun	0 kWh		83 kWh	0%	0 kWh	83 kWh	0 kWh
Jul	0 kWh		83 kWh	0%	0 kWh	83 kWh	0 kWh
Aug	0 kWh		83 kWh	0%	0 kWh	83 kWh	0 kWh
Sep	0 kWh		83 kWh	0%	0 kWh	83 kWh	0 kWh
Okt	0 kWh	38 kWh	83 kWh	0%	0 kWh	121 kWh	0 kWh
Nov	0 kWh	153 kWh	83 kWh	0%	0 kWh	236 kWh	0 kWh
Dez	0 kWh	230 kWh	83 kWh	0%	0 kWh	313 kWh	0 kWh
<b>Jahr</b>	<b>0 kWh</b>	<b>1143 kWh</b>	<b>1000 kWh</b>	<b>0%</b>	<b>0 kWh</b>	<b>2143 kWh</b>	<b>0 kWh</b>

**CO2 Ausstoß****1071 kg CO2****Jahressaldo Strom****-2143 kWh**

Abbildung 125: Verbrauchswerte Typenhaus mit Luft- / Wasser-Wärmepumpe

**Elektrodirektheizung****0,0 kWp ohne PV-Anlage**

Monat	PV-Ertrag	Heizung	Warmwasser	Solare Deckung	Eigenverbrauch	Netzbezug	PV Überschuss
Jan	0 kWh	902 kWh	208 kWh	0%	0 kWh	1111 kWh	0 kWh
Feb	0 kWh	850 kWh	208 kWh	0%	0 kWh	1059 kWh	0 kWh
Mrz	0 kWh	584 kWh	208 kWh	0%	0 kWh	793 kWh	0 kWh
Apr	0 kWh	191 kWh	208 kWh	0%	0 kWh	399 kWh	0 kWh
Mai	0 kWh		208 kWh	0%	0 kWh	208 kWh	0 kWh
Jun	0 kWh		208 kWh	0%	0 kWh	208 kWh	0 kWh
Jul	0 kWh		208 kWh	0%	0 kWh	208 kWh	0 kWh
Aug	0 kWh		208 kWh	0%	0 kWh	208 kWh	0 kWh
Sep	0 kWh		208 kWh	0%	0 kWh	208 kWh	0 kWh
Okt	0 kWh	133 kWh	208 kWh	0%	0 kWh	341 kWh	0 kWh
Nov	0 kWh	535 kWh	208 kWh	0%	0 kWh	743 kWh	0 kWh
Dez	0 kWh	804 kWh	208 kWh	0%	0 kWh	1012 kWh	0 kWh
<b>Jahr</b>	<b>0 kWh</b>	<b>4000 kWh</b>	<b>2500 kWh</b>	<b>0%</b>	<b>0 kWh</b>	<b>6500 kWh</b>	<b>0 kWh</b>

**CO2 Ausstoß****3250 kg CO2****Jahressaldo Strom****-6500 kWh**

Abbildung 126: Verbrauchswerte Typenhaus mit Stromdirektheizung

Im Folgenden wird nun die Variante Stromdirektheizung mit einer Photovoltaikanlage als lokale regenerative Energiequelle ergänzt, um den Nachteil gegenüber einer Wärmepumpenheizung auszugleichen. Wichtig: Da natürlich auch Wärmepumpen mit einer Photovoltaikanlage kombiniert werden können, stellen die hieraus resultierenden Ergebnisse Mindestanforderungen für einen zusätzlichen PV-Ausbau bei Stromdirektheizungen dar, die sich aus dem technischen Nachteil des höheren Stromverbrauchs ergeben.

Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang, nach welchen Kriterien die Dimensionierung der entsprechenden PV-Leistung erfolgen sollte, da es hierbei mehrere Optionen gibt. Der erste Ansatz ist wie folgt definiert:

- Der Jahresstromverbrauch der Stromdirektvariante soll dem Wert der Wärmepumpe entsprechen. Der Ertrag der PV-Anlage wird daher auf die Differenz im Strombezug ausgelegt.

In Abbildung 127 ist das Ergebnis dargestellt. Zu erkennen ist, dass bei der Installation einer PV-Anlage mit einer Leistung von 4,6 kWp der Jahressaldo Strom den Wert der Wärmepumpe erreicht. Allerdings ergibt sich aufgrund der jahreszeitlichen Unterscheide dennoch ein Netzbezug, der knapp doppelt so hoch ist. Die Jahresbilanz ist daher nur bedingt aussagekräftig, da es im Jahresverlauf zu größeren Stromumsätzen und Lastspitzen kommt, die das öffentliche Netz zusätzlich belasten und hier nicht berücksichtigt werden.

Elektrodirektheizung				4,6 kWp	PV-Anlage	Differenz	
Monat	PV Ertrag	Heizung	Warmwasser	Solare Deckung	Eigenverbrauch	Netzbezug	PV Überschuss
Jan	122 kWh	902 kWh	208 kWh	11%	122 kWh	989 kWh	0 kWh
Feb	186 kWh	850 kWh	208 kWh	18%	186 kWh	873 kWh	0 kWh
Mrz	365 kWh	584 kWh	208 kWh	46%	365 kWh	427 kWh	0 kWh
Apr	484 kWh	191 kWh	208 kWh	100%	399 kWh	0 kWh	85 kWh
Mai	559 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	350 kWh
Jun	594 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	385 kWh
Jul	619 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	410 kWh
Aug	530 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	322 kWh
Sep	406 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	198 kWh
Okt	251 kWh	133 kWh	208 kWh	73%	251 kWh	91 kWh	0 kWh
Nov	142 kWh	535 kWh	208 kWh	19%	142 kWh	602 kWh	0 kWh
Dez	99 kWh	804 kWh	208 kWh	10%	99 kWh	913 kWh	0 kWh
<b>Jahr</b>	<b>4356 kWh</b>	<b>4000 kWh</b>	<b>2500 kWh</b>	<b>40%</b>	<b>2605 kWh</b>	<b>3895 kWh</b>	<b>1751 kWh</b>
						<b>CO2 Ausstoß</b>	<b>1948 kg CO2</b>
						<b>Jahressaldo Strom</b>	<b>-2144 kWh</b>

Abbildung 127: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach Jahresstromdifferenz zu WP

In einem zweiten Ansatz wird die Leistung der PV-Anlage erhöht mit folgendem Ziel:

- Der Jahresstromverbrauch der Stromdirektvariante soll in der Jahresbilanz vollständig durch den PV-Ertrag ausgeglichen werden

Die Ergebnisse sind in Abbildung 128 dargestellt. Es ergeben sich wie zu erwarten Verbesserungen der Werte, nach den üblichen Bilanzierungsmethoden entspräche diese Variante in Bezug auf die Wärmeversorgung einem „Nullenergie-Gebäude“ oder einer „CO<sub>2</sub>-neutralen Wärmeversorgung“. Dennoch ist zu erkennen, dass auch hier der Netzbezug mit den entsprechenden Konsequenzen deutlich höher ist als bei der Wärmepumpenvariante. Bezüglich des Jahressaldos wird zudem nicht berücksichtigt, dass der Stromüberschuss im Sommer für eine Anrechnung im Winter gespeichert werden müsste, was mit entsprechenden Verlusten verbunden ist.

<b>Elektrodirektheizung</b>				<b>6,9 kWp</b>	<b>PV-Anlage</b>	<b>Jahresbilanz</b>	
<b>Monat</b>	<b>PV Ertrag</b>	<b>Heizung</b>	<b>Warmwasser</b>	<b>Solare Deckung</b>	<b>Eigenverbrauch</b>	<b>Netzbezug</b>	<b>PV Überschuss</b>
Jan	182 kWh	902 kWh	208 kWh	16%	182 kWh	929 kWh	0 kWh
Feb	277 kWh	850 kWh	208 kWh	26%	277 kWh	781 kWh	0 kWh
Mrz	546 kWh	584 kWh	208 kWh	69%	546 kWh	247 kWh	0 kWh
Apr	724 kWh	191 kWh	208 kWh	100%	399 kWh	0 kWh	325 kWh
Mai	835 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	626 kWh
Jun	887 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	678 kWh
Jul	925 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	716 kWh
Aug	792 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	584 kWh
Sep	606 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	398 kWh
Okt	375 kWh	133 kWh	208 kWh	100%	341 kWh	0 kWh	33 kWh
Nov	212 kWh	535 kWh	208 kWh	28%	212 kWh	532 kWh	0 kWh
Dez	148 kWh	804 kWh	208 kWh	15%	148 kWh	864 kWh	0 kWh
<b>Jahr</b>	<b>6500 kWh</b>	<b>4000 kWh</b>	<b>2500 kWh</b>	<b>48%</b>	<b>3147 kWh</b>	<b>3353 kWh</b>	<b>3361 kWh</b>
						<b>CO<sub>2</sub> Ausstoß</b>	<b>1677 kg CO<sub>2</sub></b>
						<b>Jahressaldo Strom</b>	<b>0 kWh</b>

Abbildung 128: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach ausgeglichenem Jahressaldo

In einer weiteren Variante wird dieser Aspekt nun integriert. Die Annahme besteht darin, dass in diesem Fall eine Speicherung des Überschuss-Stroms in Form von Wasserstoff und Rückverstromung mit Umwandlungsverlusten von ca. 50 % erfolgt. Der erforderliche PV-Ertrag wird daher auf das Doppelte des vorherigen Netzbezugs ausgelegt, da der Stromüberschuss im Sommer nur zur Hälfte im Winterhalbjahr zur Verfügung steht. Das Bilanzierungsziel lautet daher wie folgt:

- Der Jahresstromverbrauch der Stromdirektvariante soll in der Jahresbilanz durch den PV-Ertrag ausgeglichen werden. Zusätzlich sollen potenzielle Verluste durch eine saisonale Speicherung in der Jahresbilanz ausgeglichen werden.

Abbildung 129 zeigt das Ergebnis. Die Leistung der PV-Anlage ist um 50% gestiegen und der Solare Deckungsgrad steigt auf knapp 60%. Dennoch ergibt sich auch hier ein höherer Netzbezug als bei der Wärmepumpenvariante.

<b>Elektrodirektheizung</b>				<b>10,4 kWp</b>	<b>PV-Anlage</b>	<b>Jahresbilanz + Speicher</b>	
<b>Monat</b>	<b>PV Ertrag</b>	<b>Heizung</b>	<b>Warmwasser</b>	<b>Solare Deckung</b>	<b>Eigenverbrauch</b>	<b>Netzbezug</b>	<b>PV Überschuss</b>
Jan	275 kWh	902 kWh	208 kWh	25%	275 kWh	835 kWh	0 kWh
Feb	420 kWh	850 kWh	208 kWh	40%	420 kWh	639 kWh	0 kWh
Mrz	826 kWh	584 kWh	208 kWh	100%	793 kWh	0 kWh	34 kWh
Apr	1095 kWh	191 kWh	208 kWh	100%	399 kWh	0 kWh	697 kWh
Mai	1264 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	1055 kWh
Jun	1342 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	1134 kWh
Jul	1400 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	1191 kWh
Aug	1199 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	991 kWh
Sep	918 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	710 kWh
Okt	567 kWh	133 kWh	208 kWh	100%	341 kWh	0 kWh	226 kWh
Nov	320 kWh	535 kWh	208 kWh	43%	320 kWh	423 kWh	0 kWh
Dez	224 kWh	804 kWh	208 kWh	22%	224 kWh	788 kWh	0 kWh
<b>Jahr</b>	<b>9852 kWh</b>	<b>4000 kWh</b>	<b>2500 kWh</b>	<b>59%</b>	<b>3815 kWh</b>	<b>2685 kWh</b>	<b>6037 kWh</b>
						<b>CO2 Ausstoß</b>	<b>1343 kg CO2</b>
						<b>Jahressaldo Strom</b>	<b>0 (3352) kWh</b>

Abbildung 129: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach ausgeglichenem Jahressaldo inkl. Speicherverluste

In einer vierten Variante wird daher die Leistung der Photovoltaikanlage soweit erhöht, dass der Netzbezug dem Wert der Wärmepumpenvariante entspricht. Der Ansatz lautet entsprechend:

- In der Jahresbilanz soll der Netzstrombezug der Stromdirektvariante nicht höher sein als bei der Wärmepumpenvariante

Das Ergebnis in Abbildung 130 zeigt eine weitere Vergrößerung der Anlagenleistung um über 40% auf nun 14,9 kWp bzw. 75 Wp pro Quadratmeter Nutzfläche. Das Ergebnis lässt sich in zweierlei Hinsicht interpretieren: Im positiven Sinne verursacht diese Variante den gleichen Netzbezug wie eine Wärmepumpenlösung und stellt dabei zusätzlich dem Öffentlichen Netz einen Jahresertrag von knapp 10.000 kWh regenerativen Strom zur Verfügung. Der Solare Deckungsgrad von 67% entspricht dabei dem typischen Anteil der Anergiequelle bei einer Wärmepumpenlösung und ergibt eine vergleichbare Jahresarbeitszahl von 3. In negativer Hinsicht ist aber auch zu erkennen, dass der Netzbezug in der Jahressumme zwar identisch ist, der Zeitraum sich jedoch auf die Wintermonate November bis Februar konzentriert und im Extremmonat Januar mehr als doppelt so hoch ist. Somit ist selbst in dieser Variante die Netzbelastung der Direktstromheizung wesentlich größer als bei der Wärmepumpenvariante.

<b>Elektrodirektheizung</b>				<b>14,9 kWp</b>	<b>PV-Anlage</b>	<b>Netz WP</b>	
<b>Monat</b>	<b>PV Ertrag</b>	<b>Heizung</b>	<b>Warmwasser</b>	<b>Solare Deckung</b>	<b>Eigenverbrauch</b>	<b>Netzbezug</b>	<b>PV Überschuss</b>
Jan	396 kWh	902 kWh	208 kWh	36%	396 kWh	715 kWh	0 kWh
Feb	604 kWh	850 kWh	208 kWh	57%	604 kWh	455 kWh	0 kWh
Mrz	1188 kWh	584 kWh	208 kWh	100%	793 kWh	0 kWh	395 kWh
Apr	1575 kWh	191 kWh	208 kWh	100%	399 kWh	0 kWh	1176 kWh
Mai	1816 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	1608 kWh
Jun	1930 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	1721 kWh
Jul	2012 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	1803 kWh
Aug	1723 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	1515 kWh
Sep	1319 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	1111 kWh
Okt	815 kWh	133 kWh	208 kWh	100%	341 kWh	0 kWh	474 kWh
Nov	460 kWh	535 kWh	208 kWh	62%	460 kWh	283 kWh	0 kWh
Dez	322 kWh	804 kWh	208 kWh	32%	322 kWh	690 kWh	0 kWh
<b>Jahr</b>	<b>14160 kWh</b>	<b>4000 kWh</b>	<b>2500 kWh</b>	<b>67%</b>	<b>4357 kWh</b>	<b>2143 kWh</b>	<b>9803 kWh</b>
						<b>CO2 Ausstoß</b>	<b>1072 kg CO2</b>
						<b>Jahressaldo Strom</b>	<b>7660 kWh</b>

Abbildung 130: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach gleichem Jahres-Netzbezug wie WP

Als letzte Variante wird daher das Ziel verfolgt, eine Angleichung des Netzbezugs im Extremmonat Januar zu erreichen. Der Ansatz lautet entsprechend:

- Im Monat Januar soll der Netzstrombezug der Stromdirektvariante nicht höher sein als bei der Wärmepumpenvariante

Abbildung 131 zeigt das Ergebnis. Die Anlagenleistung steigt auf 29 kWp und damit auf eine spezifische Leistung von 145 Wp/m<sup>2</sup>, was als gebäudeintegrierte Lösung in der Regel nur bei eingeschossigen Gebäuden möglich ist. Selbst in diesem Extremfall ist der Strombezug im Dezember noch höher als bei der Wärmepumpenvariante. Im Gegenzug ergibt sich jedoch ein Stromüberschuss für das Öffentliche Netz in Höhe von über 21.000 kWh pro Jahr bzw. 105 kWh pro Quadratmeter Nutzfläche und Jahr. In der Summe ergibt sich daher bei der Kombination Stromdirektheizung mit PV bei vergleichbarer Netzbelastung ein deutlicher Vorteil in der ökologischen Bewertung.

<b>Elektrodirektheizung</b>				<b>29,0 kWp</b>	<b>PV-Anlage</b>	<b>Netz Dez.</b>		
<b>Monat</b>	<b>PV Ertrag</b>	<b>Heizung</b>	<b>Warmwasser</b>	<b>Solare Deckung</b>	<b>Eigenverbrauch</b>	<b>Netzbezug</b>	<b>PV Überschuss</b>	
Jan	770 kWh	902 kWh	208 kWh	69%	770 kWh	341 kWh	0 kWh	
Feb	1175 kWh	850 kWh	208 kWh	100%	1059 kWh	0 kWh	116 kWh	
Mrz	2311 kWh	584 kWh	208 kWh	100%	793 kWh	0 kWh	1518 kWh	
Apr	3064 kWh	191 kWh	208 kWh	100%	399 kWh	0 kWh	2665 kWh	
Mai	3534 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	3325 kWh	
Jun	3754 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	3546 kWh	
Jul	3914 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	3706 kWh	
Aug	3353 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	3144 kWh	
Sep	2567 kWh		208 kWh	100%	208 kWh	0 kWh	2359 kWh	
Okt	1586 kWh	133 kWh	208 kWh	100%	341 kWh	0 kWh	1244 kWh	
Nov	896 kWh	535 kWh	208 kWh	100%	743 kWh	0 kWh	152 kWh	
Dez	627 kWh	804 kWh	208 kWh	62%	627 kWh	385 kWh	0 kWh	
<b>Jahr</b>	<b>27550 kWh</b>	<b>4000 kWh</b>	<b>2500 kWh</b>	<b>89%</b>	<b>5774 kWh</b>	<b>726 kWh</b>	<b>21776 kWh</b>	
							<b>CO2 Ausstoß</b>	<b>363 kg CO2</b>
							<b>Jahressaldo PV</b>	<b>21050 kWh</b>

Abbildung 131: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach gleichem Netzbezug im Januar wie WP

Eine Zusammenfassung der relevanten Kennwerte sind von Abbildung 132 bis Abbildung 135 dargestellt. Ergänzend sind von Abbildung 136 bis Abbildung 138 in tabellarischer Form für die beiden anspruchsvollsten Varianten der Bilanzierung beim spezifischen Heizwärmebedarf des Mustergebäudes und der Gebäudegröße aufgeführt. Die Berechnungen zeigen, dass das Erreichen der Bilanzziele bei zunehmendem Energieumsatz und Gebäudegröße immer schwieriger wird und eine realistische Zielerreichung nur bei kleinen gut gedämmten Gebäuden möglich ist.

Vergleicht man die hier aufgeführten Ergebnisse mit dem Projekt MFH K76 aus Darmstadt zeigt sich, dass die PV-Anlage ca. dreimal so groß hätte dimensioniert werden müssen, um das Bilanzziel Reststrombedarf übers Jahr und damit einen hohen solaren Deckungsgrad zu erreichen. Dies ist mit dem vorhandenen Flächenpotenzial des Flachdaches nicht zu erreichen.

Das Mikrohaus erreicht mit seinen 50 kWh/m<sup>2</sup>a Jahresheizwärmebedarf, 50 m<sup>2</sup> beheizter Wohnfläche, 8,2 kWp PV-Anlage und seiner auf Eigenverbrauch optimierten Regelung zusammen mit dem thermischen Speicher fast das Bilanzziel Reststrombedarf übers Jahr. Wäre das Haus noch besser gedämmt und hätte nur einen Jahresheizwärmebedarf von 20 kWh/m<sup>2</sup>a könnte mit der gleichen PV-Anlagengröße auch der gleiche Netzbezug im Dezember wie bei einer Wärmepumpenlösung erreicht werden.

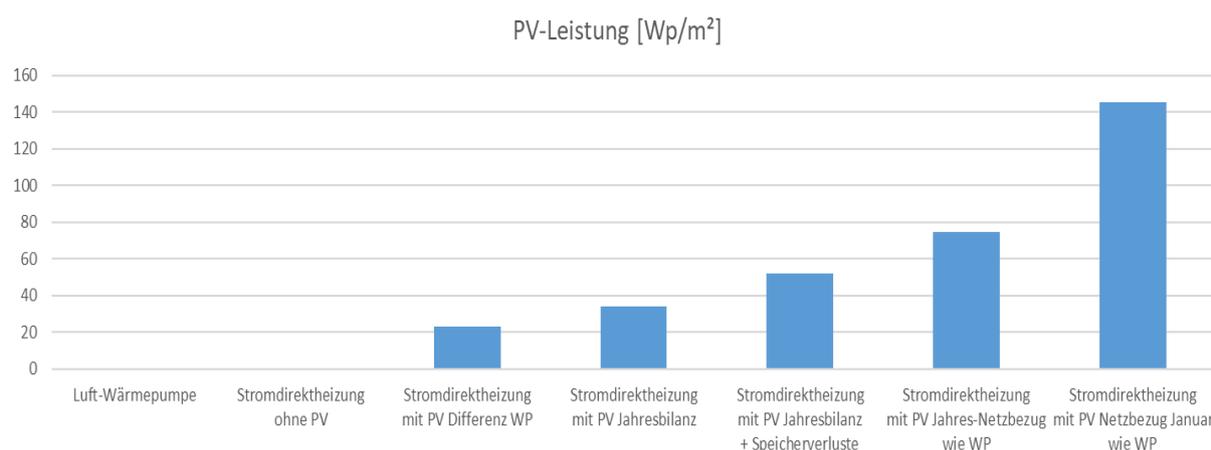


Abbildung 132: Vergleich der Mindestgröße an Photovoltaikleistung für das Mustergebäude unter optimalen Bedingungen bezogen auf die Wohnfläche. Zur Orientierung: 100 Wp entsprechen etwa einer Modulfläche von 0,6 m<sup>2</sup>.

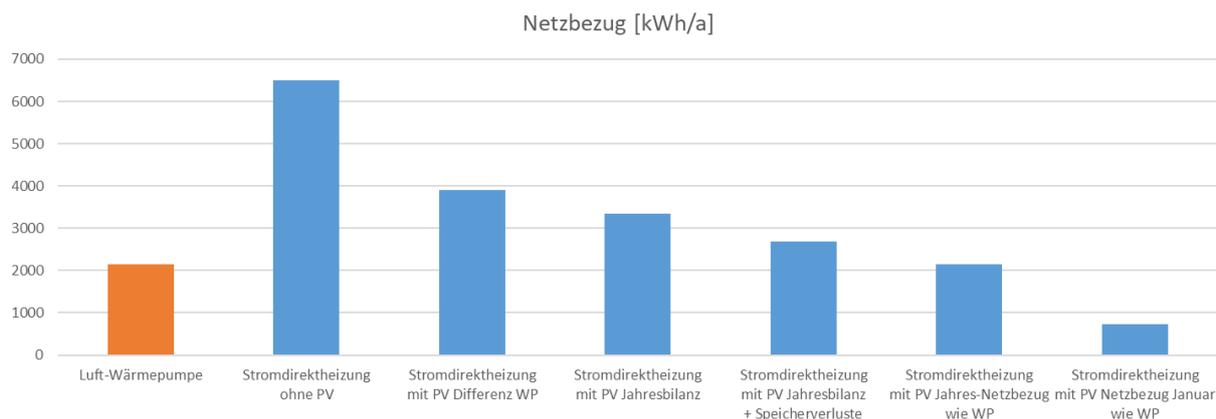


Abbildung 133: Vergleich des Jahres-Netzbezugs für das Mustergebäude für Heizung und Trinkwassererwärmung

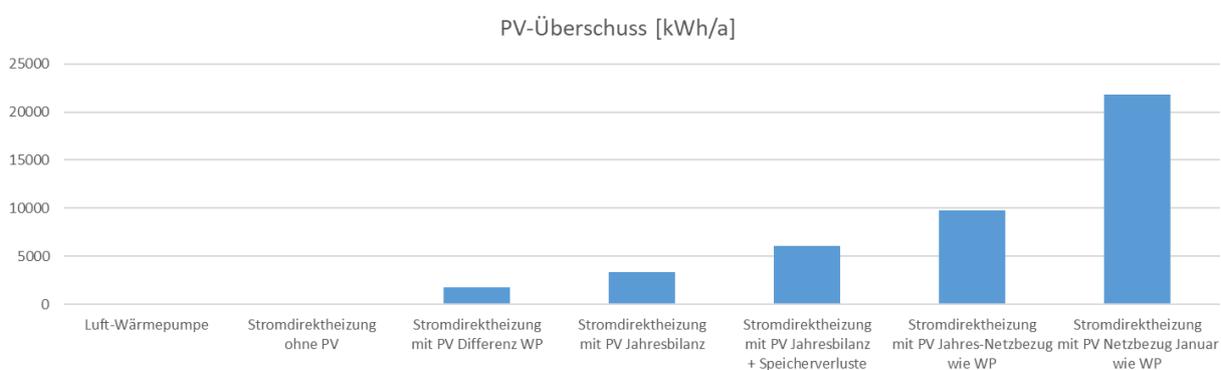


Abbildung 134: Vergleich der ergänzenden Überschussproduktion an Photovoltaikertrag für das Mustergebäude unter optimalen Bedingungen.

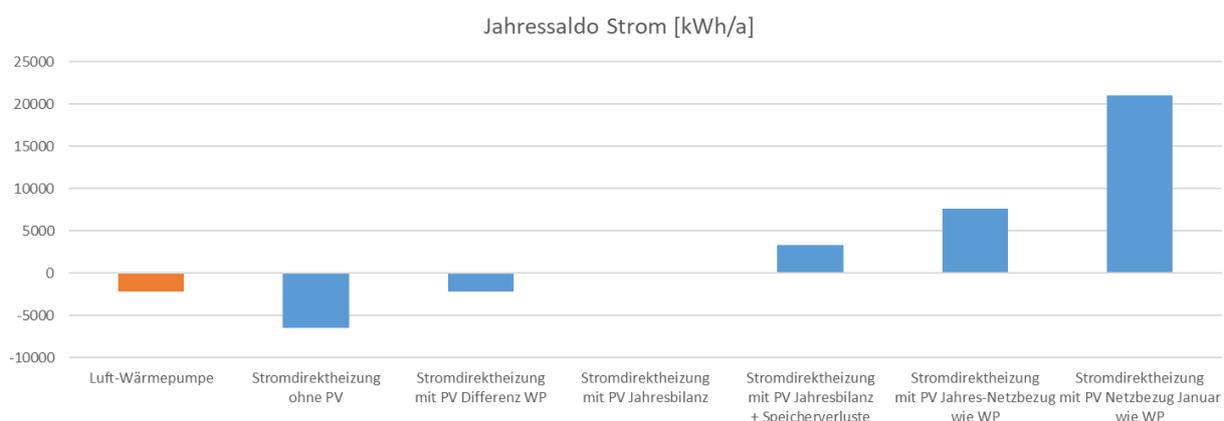


Abbildung 135: Vergleich des Jahressaldos im Strombezug für das Mustergebäude unter gleichwertiger Anrechnung der Überschussproduktion.

<b>Jahresheiz- wärmebedarf</b>	<b>Gleicher Reststrombezug übers Jahr</b>	<b>Gleicher Reststrombezug im Dezember</b>
20,0 kWh/m <sup>2</sup> a	75 Wp/m <sup>2</sup>	162 Wp/m <sup>2</sup>
30,0 kWh/m <sup>2</sup> a	116 Wp/m <sup>2</sup>	205 Wp/m <sup>2</sup>
40,0 kWh/m <sup>2</sup> a	157 Wp/m <sup>2</sup>	264 Wp/m <sup>2</sup>
50,0 kWh/m <sup>2</sup> a	197 Wp/m <sup>2</sup>	324 Wp/m <sup>2</sup>

Abbildung 136: Zusätzlich zu installierende spezifische PV-Leistung in Abhängigkeit des Jahresheizwärmebedarfs

**Bilanzziel gleicher Reststrombezug übers Jahr**

		Jahresheizwärmebedarf			
		20,0 kWh/m <sup>2</sup> a	30,0 kWh/m <sup>2</sup> a	40,0 kWh/m <sup>2</sup> a	50,0 kWh/m <sup>2</sup> a
beheizte Wohnfläche	50 m <sup>2</sup>	3,8 kWp	5,8 kWp	7,9 kWp	9,9 kWp
	100 m <sup>2</sup>	7,5 kWp	11,6 kWp	15,7 kWp	19,7 kWp
	150 m <sup>2</sup>	11,3 kWp	17,4 kWp	23,6 kWp	29,6 kWp
	200 m <sup>2</sup>	15,0 kWp	23,2 kWp	31,4 kWp	39,4 kWp
	250 m <sup>2</sup>	18,8 kWp	29,0 kWp	39,3 kWp	49,3 kWp
	300 m <sup>2</sup>	22,5 kWp	34,8 kWp	47,1 kWp	59,1 kWp
	600 m <sup>2</sup>	45,0 kWp	69,6 kWp	94,2 kWp	118,2 kWp
	1200 m <sup>2</sup>	90,0 kWp	139,2 kWp	188,4 kWp	236,4 kWp

Abbildung 137: Zusätzlich zu installierende PV-Leistung in Abhängigkeit des Jahresheizwärmebedarfs und der Gebäudegröße beim Bilanzziel gleicher Reststrombezug übers Jahr wie WP

**Bilanzziel Gleicher Reststrombezug im Januar**

		Jahresheizwärmebedarf			
		20,0 kWh/m <sup>2</sup> a	30,0 kWh/m <sup>2</sup> a	40,0 kWh/m <sup>2</sup> a	50,0 kWh/m <sup>2</sup> a
beheizte Wohnfläche	50 m <sup>2</sup>	8,1 kWp	10,3 kWp	13,2 kWp	16,2 kWp
	100 m <sup>2</sup>	16,2 kWp	20,5 kWp	26,4 kWp	32,4 kWp
	150 m <sup>2</sup>	24,3 kWp	30,8 kWp	39,6 kWp	48,6 kWp
	200 m <sup>2</sup>	32,4 kWp	41,0 kWp	52,8 kWp	64,8 kWp
	250 m <sup>2</sup>	40,5 kWp	51,3 kWp	66,0 kWp	81,0 kWp
	300 m <sup>2</sup>	48,6 kWp	61,5 kWp	79,2 kWp	97,2 kWp
	600 m <sup>2</sup>	97,2 kWp	123,0 kWp	158,4 kWp	194,4 kWp
	1200 m <sup>2</sup>	194,4 kWp	246,0 kWp	316,8 kWp	388,8 kWp

Abbildung 138: Zusätzlich zu installierende PV-Leistung in Abhängigkeit des Jahresheizwärmebedarfs und der Gebäudegröße beim Bilanzziel gleicher Reststrombezug im Januar

## 5.2 Welche Auswirkungen hätte ein vermehrter Einsatz von Elektrodirektheizungen auf den Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung in Deutschland?

Ergänzend zu der oben dargestellten Studie mit dem Fokus einer Eigennutzung von lokalem Solarstrom erfolgt zunächst eine Betrachtung der zu erwartenden Stromentwicklung über die lokale Ebene hinaus. Der bislang verfolgte Ansatz orientiert sich an einer adäquaten Nutzung lokaler Energiequellen analog zur Anergiequelle einer Wärmepumpe. Als einzige Option bietet hierfür die Gebäudeintegration von Photovoltaik entsprechende Möglichkeiten, jedoch mit den Herausforderungen der saisonalen Diskrepanz, die zu extrem hohen Leistungskennwerten führt. Eine alternative Betrachtung besteht in dem Ansatz, dass der für Stromdirektheizungen erforderliche zusätzliche Ausbau an Erzeugungskapazitäten nicht lokal am Gebäude, sondern überregional an einer beliebigen Stelle des Stromnetzes erfolgen kann. In diesem Fall können auch andere regenerative Stromerzeugungsarten – wie insbesondere die Windkraft – als Ergänzungsmaßnahme in die Bilanz eingebunden werden. Der stetige Ausbau regenerativer Stromerzeugung, und damit deren Anteil an der Gesamterzeugung, ist der zentrale Baustein der Energiewende. Als Grundlage für die folgende Betrachtung dienen die Daten des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE ([www.energy-charts.info](http://www.energy-charts.info)).

Seit der Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) hat sich der Anteil regenerativer Energie an der Stromerzeugung in Deutschland etwa versiebenfacht (siehe Abbildung 139). Eine weitere Beschleunigung des Ausbaus hin zu einer vollständigen Versorgung mit erneuerbarer Energie ist erklärtes Ziel der Bundesregierung. In technischer Hinsicht spielen dabei die Photovoltaik und die Windkraft die zentrale Rolle. Bereits im Jahr 2023 hat die Photovoltaik mit knapp 12 Prozent zur Stromerzeugung in Deutschland beigetragen (siehe Abbildung 140). Das Erzeugungsprofil im Jahresverlauf ist speziell im Hinblick auf eine strombasierte Wärmeerzeugung ungünstig. Ganz anders sieht es bei der Windkraft aus (siehe Abbildung 141). Deren Erzeugungsprofil ist nahezu komplementär zur Photovoltaik und relativ kompatibel mit dem Wärmebedarf in Deutschland. In der Summe und in Ergänzung mit den weiteren erneuerbaren Erzeugern Wasserkraft und Biomasse ergibt sich ein weitgehend homogener Anteil an erneuerbarer Stromerzeugung über das Jahr (siehe Abbildung 142). Im Jahr 2023 war sogar der Dezember der Monat mit dem höchsten erneuerbaren Anteil. Die Jahreserzeugung als Kombination von Photovoltaik und Windkraft entspricht damit sehr gut dem aktuellen und vermutlich auch zukünftigen, über den Jahresverlauf relativ konstanten, Strombedarf in Deutschland, so dass auch langfristig kein relevanter Bedarf an saisonaler Stromspeicherung zu erwarten ist. Voraussetzung hierfür ist jedoch der entsprechende Netzausbau, hierbei insbesondere die Nord-Süd-Trassen. Denn Perspektivisch sollen die mehrheitlich im südlichen Raum installierten Photovoltaikanlagen im Sommerhalbjahr die Kühlsysteme und die Elektromobilität im Norden mitversorgen, während die mehrheitlich im nördlichen Raum installierten Windkraftanlagen die elektrischen Heizsysteme im Süden unterstützen.

Vor diesem Hintergrund könnte für die Bilanzierung und Bewertung von Stromdirektheizungen in Kombination mit lokaler Photovoltaik auch der nicht unmittelbar für die Wärmeerzeugung genutzte Stromertrag als vollwertiger Beitrag zur elektrischen Versorgung des Gesamtsystems angesetzt werden. Denkbar wäre ein angemessener Abschlag bei Netzeinspeisung für die auch perspektivisch entstehenden Verluste, die durch Kurzzeitspeicherung im Tags/Nacht-Ausgleich oder tageweise in der sogenannten „Dunkelflaute“ (Phasen, in denen weder die Windkraft noch die Photovoltaik genügend Leistung bereitstellen können) erforderlich sein werden. Für eine Quantifizierung dieser Entwicklung ist jedoch zum aktuellen Zeitpunkt die Datengrundlage nicht ausreichend.

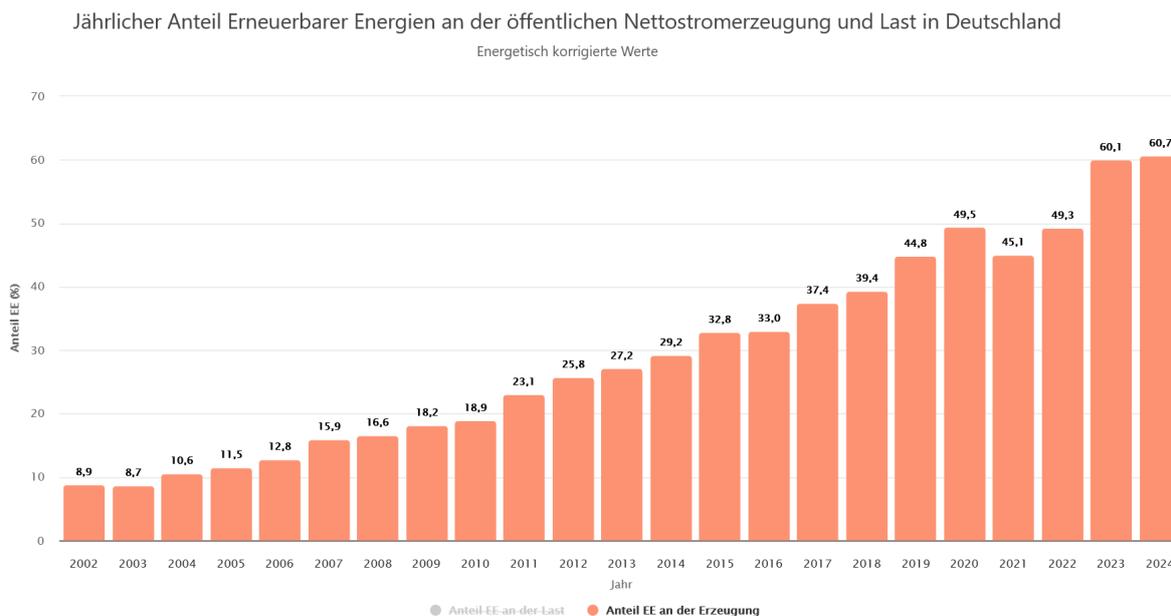


Abbildung 139: Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energie im deutschen Stromnetz seit 2002 (www.energy-charts-info)

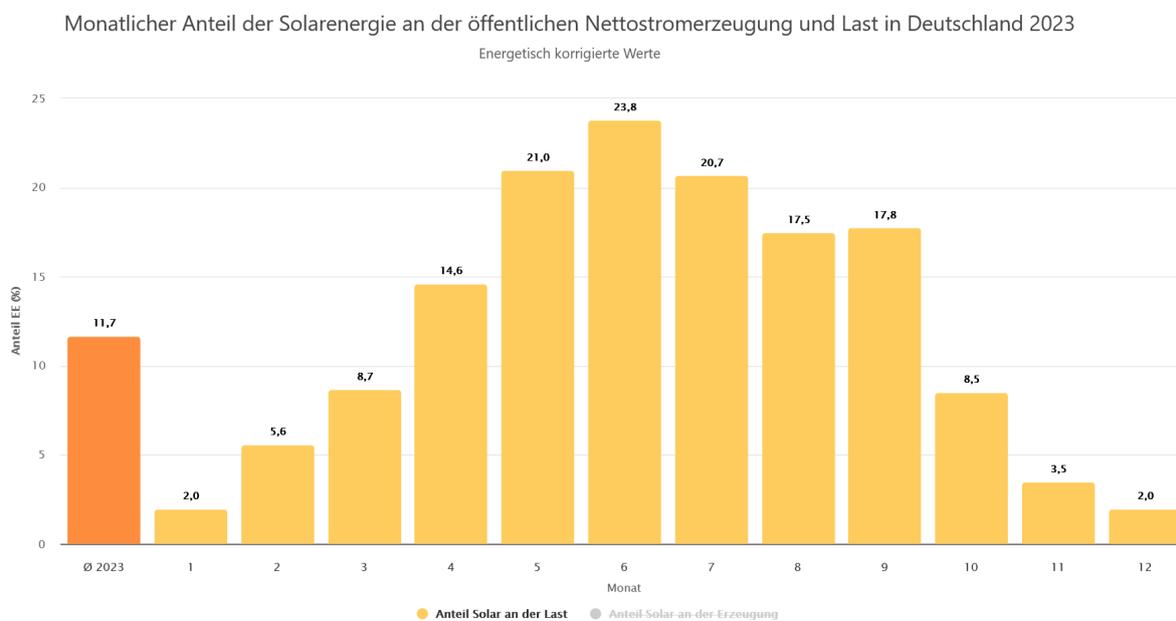


Abbildung 140: Monatlicher Anteil der Photovoltaik an der Stromerzeugung im deutschen Stromnetz im Jahr 2023 (www.energy-charts-info)

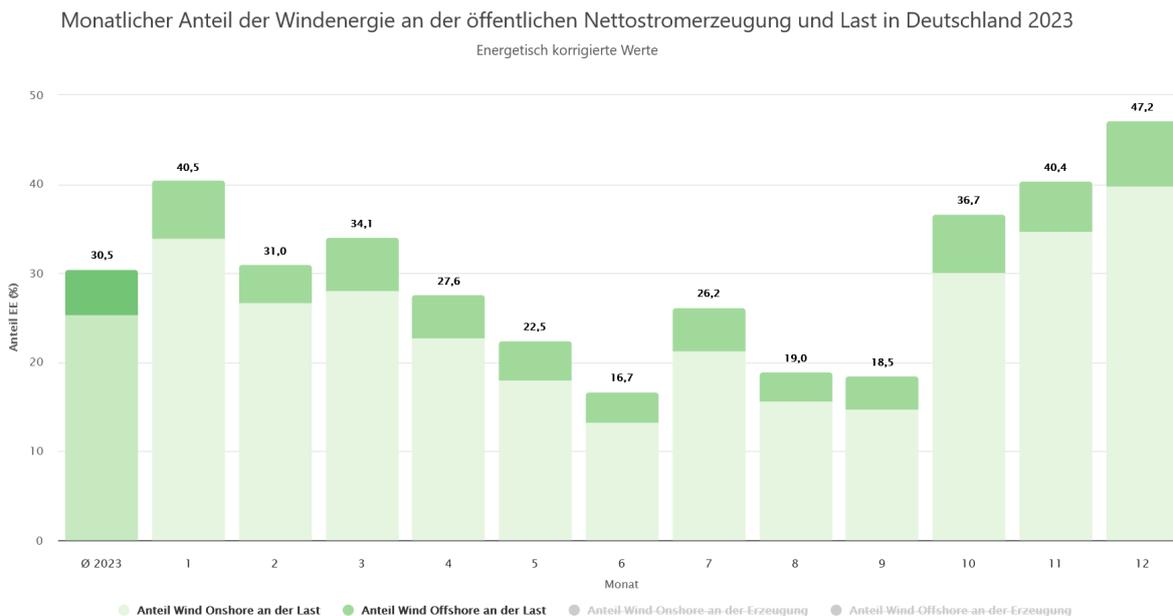


Abbildung 141: Monatlicher Anteil der Windkraft an der Stromerzeugung im deutschen Stromnetz im Jahr 2023 (www.energy-charts-info)

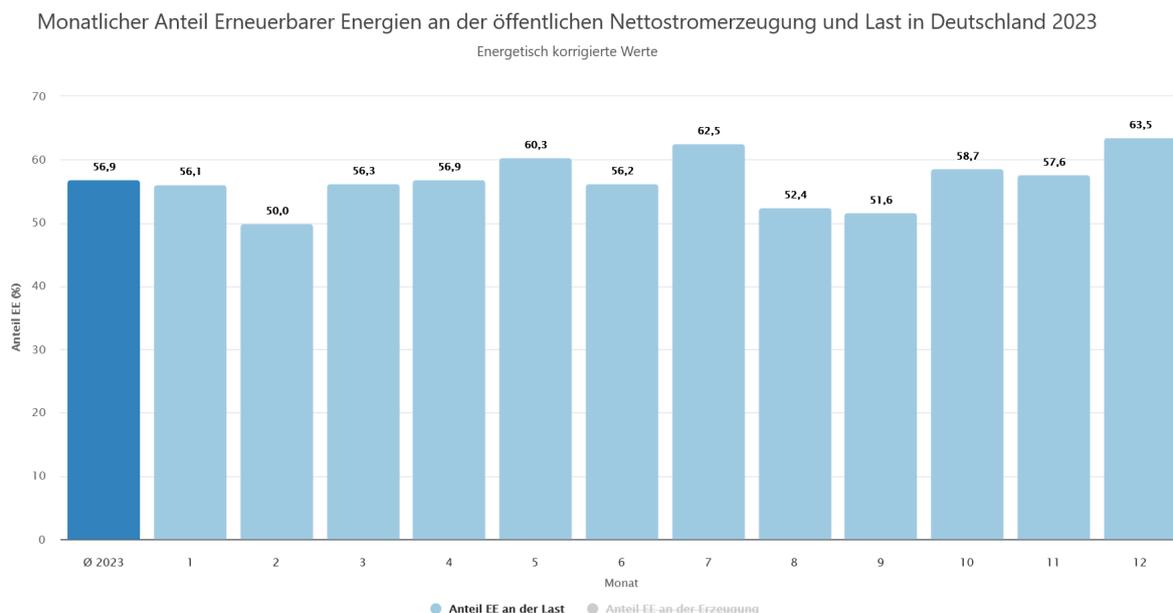


Abbildung 142: Monatlicher Anteil der Erneuerbaren Energiequellen an der Stromerzeugung im deutschen Stromnetz im Jahr 2023 (www.energy-charts-info)

Unter der daraus ableitbaren Annahme, dass im zukünftigen Stromsystem der Zeitpunkt des Strombedarfs im Jahresverlauf kein relevantes Kriterium ist, kann die Kombination von Stromdirektheizung mit gekoppelter Photovoltaik eine sinnvolle Ergänzung bei der Elektrifizierung des Wärmesektors darstellen, da die Überschusseinspeisung im Sommer als gleichwertig zum Winterstrombezug angesetzt werden kann. Als einfacher Ansatz für eine Dimensionierung der zusätzlichen Photovoltaikleistung als Kompensation gegenüber Wärmepumpensystemen kann für

Stromdirektheizungen die Vorgabe dienen, dass in der Jahressumme dieselbe Strommenge erzeugt wird, wie für die Wärmeerzeugung erforderlich ist (siehe Abschnitt 5.1). Ab dieser Größe kann sichergestellt werden, dass in der Jahresbilanz unter Berücksichtigung des Überschussertrags im Vergleich zum Wärmepumpensystem ein effektiver Beitrag zum Ausbau der erneuerbaren Erzeugungskapazität erfolgt (siehe Abbildung 143).

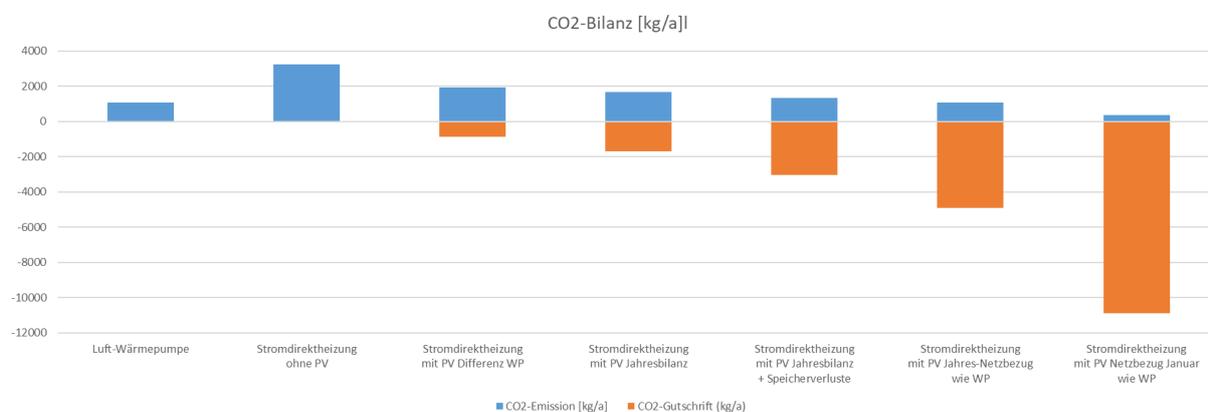


Abbildung 143: CO2-Bilanz für das Mustergebäude aus Abschnitt 5.1 bei voller und gleichwertiger Anrechnung der PV-Überschussproduktion

Im Folgenden wird der Versuch unternommen, auf einfache Weise abzuschätzen, welche Auswirkungen eine Zunahme an Stromdirektheizungen anstelle von Wärmepumpensystemen auf die erforderlichen Erzeugungskapazitäten im Stromnetz haben könnte. Als Vergleichsgrundlage dient für den ersten Schritt eine Berechnung mit folgenden Annahmen, die sich an einer Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme orientiert (Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem):

- Die energetische Gebäudesanierung wird bis 2050 mit einer durchschnittlichen Sanierungsrate von 1,4% fortgesetzt und umfasst dann rund 80% des Bestandes. Der Nutzwärmebedarf sinkt bis 2050 geringfügig auf ca. 600 TWh (eine Neubaurate ist nicht angegeben).
- Die aktuellen Gas- und Ölheizungen werden konsequent durch dezentrale Wärmepumpen und Nahwärmnetze ersetzt, die wiederum überwiegend von Großwärmepumpen gespeist werden. Im Jahr 2050 beträgt der Nahwärmeanteil ca. 37%, der Anteil dezentraler Wärmepumpen ca. 53%. Die restlichen 10% werden durch andere Technologien erzeugt (Biomasse, Wasserstoff, Erdgas etc.). Der Elektrifizierungsgrad für die Wärmebereitstellung liegt dann bei ca. 90% (Industriewärme ca. 78%, Mobilität ca. 85%).
- Die Stromerzeugung erfolgt insbesondere durch konsequenten Ausbau von Windkraftanlagen (Installierte Leistung in 2050 ca. 260 GWp) und Photovoltaik (in 2050 ca. 415 GWp) nahezu vollständig mit erneuerbare Energien.

Auf Basis dieser Annahmen ergibt sich für die zukünftige Strombereitstellung in Deutschland das in Abbildung 144 dargestellte Bild. Hieraus sind zwei wesentliche Entwicklungen zu erkennen: Zum einen erhöht sich durch die konsequente Elektrifizierung der zukünftige Strombedarf um rund 140% von heute ca. 600 TWh/a auf ca. 1.450 TWh/a. Zum anderen erfolgt die Stromerzeugung dann zu etwa 90% durch Windkraft und Photovoltaik.

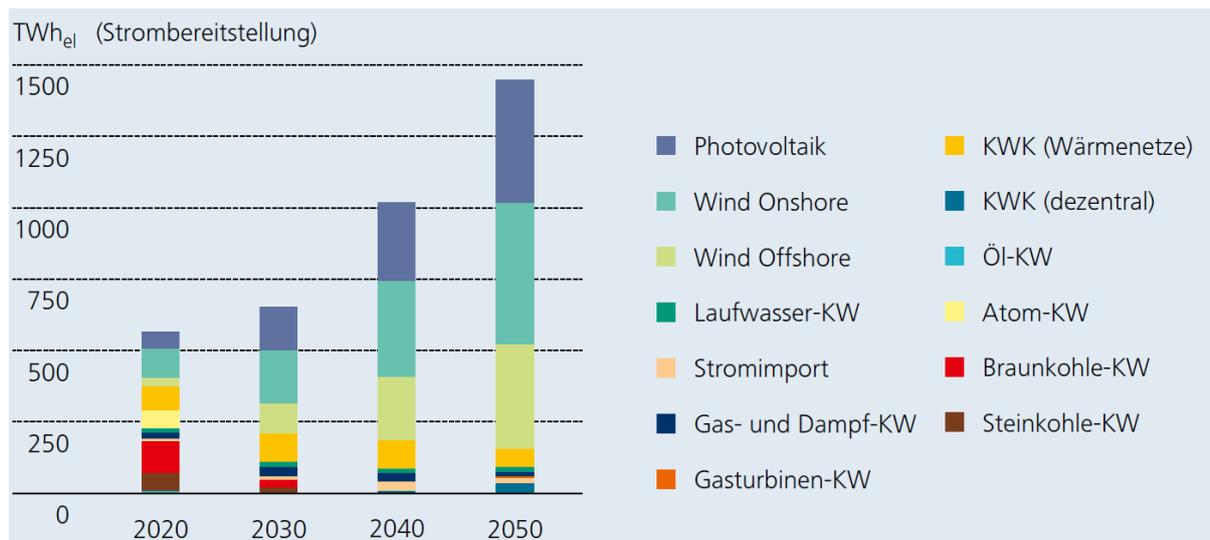


Abbildung 144 Mögliche Entwicklung der Strombereitstellung [Fraunhofer-ISE, 2021]

In einem zweiten Schritt wird nun versucht abzuschätzen, welche Annahmen für eine Substitution von Wärmepumpen durch Stromdirektheizungen sinnvolle Szenarien bilden. Der Einsatz von Stromdirektheizungen ist sowohl im Neubau als auch in der Sanierung eine zulässige Option, die im Gebäudeenergiegesetz 2024 aufgeführt ist (Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden / Gebäudeenergiegesetz - GEG, 2024). Der § 71d „Anforderungen an die Nutzung einer Stromdirektheizung“ regelt hierzu folgendes:

„Eine Stromdirektheizung darf in einem zu errichtenden Gebäude nur eingebaut werden, wenn das Gebäude die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz nach den §§ 16 und 19 um mindestens 45 Prozent unterschreitet“ (Anmerkung: Dies entspricht dem Niveau des KfW Effizienzhaus 40-Standards)

„Eine Stromdirektheizung darf in ein bestehendes Gebäude (ohne hydraulische Wärmeverteilung) nur eingebaut werden, wenn das Gebäude die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz nach den §§ 16 und 19 um mindestens 30 Prozent unterschreitet“ (Anmerkung: Dies entspricht dem KfW Effizienzhaus 55-Standards).

Wenn ein bestehendes Gebäude bereits über eine Heizungsanlage mit Wasser als Wärmeträger verfügt, ist der Einbau einer Stromdirektheizung nur zulässig, wenn das Gebäude die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz nach den §§ 16 und 19 um mindestens 45 Prozent unterschreitet.

Ausnahmen sind:

- Austausch einer bestehenden einzelnen Einzelraum-Stromdirektheizung
- Wohngebäude mit nicht mehr als zwei Wohnungen, von denen der Eigentümer eine Wohnung selbst bewohnt.
- Gebäude, in dem ein dezentrales Heizungssystem zur Beheizung von Gebäudezonen mit einer Raumhöhe von mehr als 4 Metern eingebaut oder aufgestellt wird (z.B. Hallentypus)

Für den Einbau von Stromdirektheizungen gelten demnach bis auf die aufgeführten Ausnahmen strenge Effizienzvorgaben, die bei Wärmepumpenlösungen nicht in gleichem Maße greifen. Dennoch sind Maßnahmen zum baulichen Wärmeschutz sinnvollerweise unabhängig vom Heizsystem zu betrachten und werden daher im Weiteren nicht differenziert. Der Fokus für den Einsatz von Stromdirektheizungen liegt aufgrund der Ausnahmeregelungen insbesondere auf Gebäude mit Einzelraumheizungen sowie Einfamilienhäuser.

Zur Einschätzung der möglichen Potenziale für Stromdirektheizungen werden folgende statistische Daten herangezogen:

- Der oben aufgeführte Nutzwärmebedarf 2050 in Höhe von ca. 600 TWh/a wird aktuell zu rund 85% für die Raumheizung verwendet und entspricht damit ca. 510 TWh/a. Der Anteil wird aufgrund der zu erwartenden Verbesserungen des Dämmniveaus voraussichtlich sinken, zur Vereinfachung wird jedoch der aktuelle Anteil angesetzt.
- Die Erzeugung dieser Wärme erfolgt aktuell zu über 90% durch Verbrennung fossiler Energie. Im Szenario 2050 wird die Wärme über Wärmepumpen erzeugt. Bei einer durchschnittlichen Jahresarbeitszahl von 3,5 entspricht dies einem Strombedarf von rund 146 TWh/a
- In Deutschland existieren rund 4 Mrd. Quadratmeter Wohnfläche. Davon entfallen etwa 2/3 auf Einfamilienhäuser. Bei der vereinfachten Annahme eines einheitlichen durchschnittlichen Wärmebedarfs entspricht dies einem zukünftigen Stromanteil von ca. 96 TWh/a bezogen auf 146 TWh/a.
- In Deutschland werden aktuell noch ca. 4 % der Wohnungen mit Einzel- oder Mehrraumöfen beheizt. Dies entspricht bei angenommenen durchschnittlichen Wohnungsgrößen einem Anteil von ca. 7 TWh/a bezogen auf 146 TWh/a

Die statistischen Daten wurden den folgenden Quellen entnommen: (DENA, 2022); (Statista, 2023a), (Statista, 2023b); (Statista, 2023c); (BDEW, 2023); (Umweltbundesamt, 2024a); (Umweltbundesamt, 2024b); (BWP, 2024)

Die Berechnung einiger beispielhafter Szenarien ist in Tabelle 9 dargestellt. Zu erkennen ist, dass in der Variante, in der 50 % der aktuellen Gebäude mit Einzelheizungen anstelle von Wärmepumpen eine Stromdirektheizung erhalten, sich der Gesamtstrombedarf um ca. 0,6% erhöht. Deutlich relevanter würde sich dies bei den Einfamilienhäusern auswirken mit bis zum 1,6-fachen des Wärmestrombedarfs bzw. knapp 17 % des Gesamtstrombedarfs.

Tabelle 9: Abschätzung der zusätzlich erforderlichen Stromerzeugungsmenge bei Substitution von Wärmepumpen durch Stromdirektheizungen

Anteil Stromdirektheizung		Einzelheizung 50 %	Einzelheizung 100 %	EFH 30 %	EFH 50 %	EFH 100 %	Einzelheizung + EFH 100 %
Strombedarf WP	TWh/a	3,5	7	29	48	96	103
Strombedarf SDH	TWh/a	12,3	24,5	100,8	168	336	360,5
Differenz	TWh/a	8,8	17,5	72	120	240	257,5
Mehrbedarf Strom für Heizwärme (bezogen auf 146 TWh/a)	%	6	12	49	82	164	176
<b>Mehrbedarf Strom insgesamt (bezogen auf 1.450 TWh/a)</b>	<b>%</b>	<b>0,6</b>	<b>1,2</b>	<b>5,0</b>	<b>8,3</b>	<b>16,6</b>	<b>17,8</b>

**Fazit**

Ein großmaßstäblicher Ausbau von Stromdirektheizungen anstelle von Wärmepumpensystemen würde für das zukünftige Stromnetz eine deutliche Mehrbelastung darstellen. Im Szenario mit 50 % der Wohnungen mit Einzelraumheizungen (ca. 2 % des Wohnungsbestandes) wäre der Mehrbedarf beispielsweise bei knapp 9 TWh/a. Um diese Größenordnung anschaulicher zu machen, kann folgender Vergleich helfen: Zur Erzeugung dieser Energiemenge über Photovoltaikanlagen sind unter optimalen Randbedingungen rund zusätzliche 9 GWp installierte Leistung bzw. 50 Mio. m<sup>2</sup> Modulfläche erforderlich.

Eine vollständige Umstellung auf Stromdirektheizungen in allen Wohngebäuden hätte eine Erhöhung von ca. 25% des Gesamtstrombedarfs bzw. einem zusätzlichen Strombedarf in Höhe von ca. 360 TWh/a zur Folge. Dies entspricht rund 360 GWp installierter Leistung an Photovoltaik bzw. 2,1 Mrd. m<sup>2</sup> Modulfläche. Prinzipiell sind solche Flächenpotenziale in Deutschland zwar vorhanden, jedoch ist in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, welche Konsequenzen für die Netz- und Speicherinfrastruktur durch den höheren Stromumsatz entstehen.

Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um diese Effekte in ökologischer und ökonomischer Hinsicht angemessen bewerten zu können. Als Konsequenz kann daher zum aktuellen Zeitpunkt abgeleitet werden, dass der Einsatz von Stromdirektheizungen im Sinne der Energiewende nur in Situationen erfolgen sollte, in denen die Alternative dezentrale Wärmepumpe oder Nahwärme aus technischer Sicht oder unter ökonomischen Aspekten nicht sinnvoll umgesetzt werden kann. Da dies in der Regel bei Neubauprojekten selten der Fall ist, liegt das Potenzial hauptsächlich im Bestand, hier insbesondere bei Gebäuden ohne hydraulischem Wärmeverteilsystem. Weitergehende Untersuchungen, die eine quantifizierbare Grundlage für diese Fragestellung liefern, sind daher wünschenswert.

## 6. Zusammenfassung

Im Vorgängerprojekt IR-Bau (SWD-10.08.18.7-17.11) wurde das Mehrfamilienhaus K76 messtechnisch und sozialwissenschaftlich begleitet. Durch die Untersuchungen und ergänzende Vergleichsrechnungen mit einem alternativen Wärmepumpensystem konnte gezeigt werden, dass IR-Heizungssysteme vollwertige, zuverlässige und einfach handhabbare Lösungen für die Wärmeversorgung von Gebäuden sind. Sie weisen zudem eine hohe Attraktivität auf, da sie die technisch einfachste Form der Wärmeversorgung darstellen und ohne typische Wärmeverteilsysteme mit allen dadurch verbundenen Komponenten und Maßnahmen auskommen (Hydraulik, Pumpen, Ventile, Wärmemengenzähler, Meßdatenerfassung und –abrechnung etc.) Dies führt neben dem stark reduzierten Bedarf an Fachkräften insbesondere zu deutlich geringeren Investitionskosten und unterstützt damit in idealer Weise die Ziele eines einfachen und kostengünstigen Bauens sowie der Elektrifizierung der Wärmeversorgung.

Der große Nachteil gegenüber Wärmepumpensystemen liegt jedoch darin, dass keine lokalen Energiequellen genutzt werden und damit sowohl der Strombedarf als auch die Lastspitzen in der Heizperiode ungefähr dreimal so hoch sind (regenerativer Energie-Anteil bei WP üblicherweise > 65%). Um diesen Nachteil auszugleichen wurde im Vorläuferprojekt bereits der Ansatz betrachtet, das durch den geringen Investitionsbedarf „frei werdende“ Kapital ergänzend in die lokale Erzeugung von regenerativem Strom über Photovoltaikanlagen zu investieren. Dadurch ist es möglich, mit vergleichbarem oder sogar geringerem Gesamtinvest den gleichen oder sogar höheren Anteil an lokaler regenerativer Energie zu nutzen, und damit sowohl in ökologischer als auch ökonomischer Hinsicht Vorteile zu bewirken. Ergänzende Parameterstudien haben die These unterstützt, dass die Vorteile bei kleineren Wohngebäuden und auch bei Nichtwohngebäuden weiter zunehmen könnten. Weiterhin wurde als relevante Fragestellung postuliert, welche für die thermische Behaglichkeit im Raum relevanten Effekte durch unterschiedliche Arten der Wärmeerzeugung mit verschiedenen Strahlungsanteilen entstehen. Hierzu wurden entsprechende Laboruntersuchungen durchgeführt. Ergänzend wurden die wichtigsten Aspekte untersucht, inwieweit durch die Kombination mit Photovoltaik die Netzbelastung von Stromdirektheizungen optimiert werden kann und welche Auswirkungen ein großmaßstäblicher Ausbau von Stromdirektheizungen auf den zukünftigen Ausbau an Erzeugungskapazität haben kann. Die wichtigsten Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst.

### Wissenschaftliche Auswertung Pilotprojekte

Im Rahmen dieses Projektes IR-Bau 2 konnten hierzu ergänzend zum MFH K76 vier weitere realisierte Gebäude mit Stromdirektheizungs-Systemen und Photovoltaikanlagen messtechnisch detailliert untersucht werden (siehe Kapitel 2.1 Beschreibung Pilotgebäude und Messkonzept). Diese wurden über zwei Heizperioden einheitlich analysiert und insbesondere im Hinblick auf das Zusammenspiel von Stromdirektheizung mit photovoltaischer Stromerzeugung ausgewertet (siehe Kapitel 2.2 Messergebnisse der Pilotprojekte). Es liegen somit erstmals entsprechend belastbare Daten aus der Praxis vor, die eine Konkretisierung der Thesen ermöglichen. Insgesamt handelt es sich um folgende Typologien:

#### Wohngebäude

- Mehrfamilienhaus, 15 Wohneinheiten, ca. 1.360 m<sup>2</sup> beheizte Fläche, 36 kWp PV
- Mehrfamilienhaus, 6 Wohneinheiten, ca. 515 m<sup>2</sup> beheizte Fläche, 38 kWp PV
- Einfamilienhaus, 1 Wohneinheit, ca. 50 m<sup>2</sup> beheizte Fläche, 9 kWp PV

#### Nichtwohngebäude

- Bürogebäude, 1 Nutzungseinheit, ca. 400 m<sup>2</sup> beheizte Fläche, 63 kWp PV
- Betriebsgebäude mit Büroeinheit, 1 Nutzungseinheit, ca. 100 m<sup>2</sup> beheizte Fläche, 89 kWp PV

Beim Mehrfamilienhaus K76 wurden auch in der zweiten Messphase sehr geringe spezifische Wärmeverbräuche von nur 17,3 kWh/m<sup>2</sup>a Heizwärme und 5,7 kWh/m<sup>2</sup>a Trinkwarmwasser erreicht. Trotz einer nahezu vollständigen Belegung des Flachdaches mit PV konnte bei dem viergeschossigen Gebäude jedoch nur ein solarer Deckungsgrad von 14% bzw. 17% erreicht werden, er liegt damit beim lokalen regenerativen Anteil erheblich unter einem vergleichbaren Wärmepumpensystem.

Im deutlich kleineren Mehrfamilienhaus Lauerz wurden ähnliche Werte erreicht, obwohl die spezifische installierte PV-Leistung knapp dreimal so hoch ist. Dies liegt vor allem an dem ebenso fast dreimal so hohen Wärmeverbrauch des Gebäudes. Bei diesem nur dreigeschossigen Gebäude wären durch Effizienzsteigerungen vermutlich deutlich bessere Werte erreichbar.

Das Extrembeispiel Mikrohaus Singen stellt im Sinne der obengenannten Grundthese bei relativ hoher Effizienz und der Eingeschossigkeit optimale Randbedingungen dar. Dennoch konnten auch hier trotz einer optimierten Regelung mit relativ hohem Potenzial der Lastverschiebung nur Werte von 61 % bzw. 68 % erreicht werden. Sie liegen damit zwar im Bereich einer vergleichbaren Wärmepumpe, es musste hierfür jedoch das gesamte Flächenpotenzial an PV-Leistung für die Kompensation der Anergiequelle herangezogen werden. In Kombination mit dem hohen Überschuss in den Sommermonaten ergibt sich für diese spezielle Gebäudetypologie (kleines, hocheffizientes Wohngebäude) insgesamt zwar eine vorteilhafte ökologische und ökonomische Situation. Allerdings verbleiben selbst hier deutlich höhere Netzbelastungen in der Heizperiode, da im Januar und Dezember die solare Eigendeckung nur rund 14 Prozent beträgt (bei Wärmepumpen üblicherweise > 50%). Eine Optimierung wäre nur durch eine saisonale Speicherung möglich, was sich jedoch negativ auf die ökonomischen Werte auswirken würde. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Lastoptimierung durch Übertemperaturen auch negative Auswirkungen auf den Wärmeverbrauch und den Nutzerkomfort haben kann.

Das Bürogebäude in Teningen weißt als Typologie ebenso sehr günstige Randbedingungen auf wie das Mikrohaus. Durch die Eingeschossigkeit und die vollflächige Belegung des Flachdachs mit Photovoltaik ergibt sich eine sehr hohe spezifische Leistung von 158 Wp/m<sup>2</sup>. Auch das Nutzungsprofil ist sehr günstig, da der Wärmebedarf ausschließlich am Tag parallel zur Solarstrahlung entsteht. Schließlich erfolgt eine Optimierung durch die anwesenheitsgesteuerte Heizungsregelung. Dennoch konnten hier ohne saisonale Speicherung nur Werte um 50 % solare Deckung erreicht werden. Dies liegt sowohl an den geringen Erträgen im Kernwinter als auch an der durch die frühe Anwesenheit entstehende Wärmenachfrage vor Sonnenaufgang und in reduzierter Form auch nach Sonnenuntergang. Hier kann durch einen entsprechend geregelten elektrischen Kurzzeitspeicher Verbesserung erreicht werden.

Ein weiteres Extrembeispiel stellt das Betriebsgebäude in Auerbach dar. Bei der im Verhältnis zur beheizten Fläche extrem großen spezifische installierte Leistung in der Größe von 890 W/m<sup>2</sup> (!) könnte man sehr gute solare Deckungsgrade bis hin zur völligen Autarkie erwarten. Dennoch wurden hier nur Werte unter 30 % erreicht, was insbesondere auf die fehlende Regelung zurückzuführen ist, so dass auch durchgängig in den Nachtstunden eine Stromnachfrage für die Wärmeerzeugung entsteht. Doch selbst bei einer optimierten Regelung in Verbindung mit einem elektrischen Kurzzeitspeicher wäre eine Autarkie nicht möglich, da auch in diesem Extrembeispiel im Monat Januar der Strombedarf die Erzeugungskapazität übersteigt.

Die begleitenden sozialwissenschaftlichen Befragungen haben bestätigt, dass die Teilnehmenden der Studie mit der durch die Infrarotstrahlungsheizung erzeugten Behaglichkeit und der Bedienbarkeit der Technik zufrieden sind. Die Befragung der Teilnehmenden am Projekt IR Bau II hat ergeben, dass die Nutzenden das IR-Heizsystem als thermisch „eher behaglich“ bis „behaglich“ empfinden und als „gut“ bis „sehr gut“ bedienbar bewerten (siehe Kapitel 2.3 Nutzerbefragung).

Aus den Messergebnissen der Pilotprojekte geht hervor, dass die Anpassung des Stromverbrauchs an die Stromerzeugung von hoher Relevanz für den solaren Deckungsgrad ist und damit auch Einfluss auf

die ökologische und ökonomische Bilanz des Gesamtsystems hat. Maßnahmen zur Optimierung bestehen zum einen in der Planung der lokalen Stromerzeugung durch Photovoltaik, hier insbesondere durch eine fokussierte Nutzung der vertikalen Gebäudeflächen, um den Stromertrag speziell in der Heizperiode zu verbessern. Zum weiteren spielt das Potenzial zur Lastverschiebung eine große Rolle. Dies kann sowohl auf der elektrischen als auch auf der thermischen Seite erfolgen. Bei der lokalen elektrischen Speicherung sind aktuell nur Akkusysteme verfügbar, die bislang in der Regel keine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Variante darstellen, um den gesamten Wärmebedarf von einem oder mehreren Tagen zu speichern. Interessant ist die thermische Variante, bei der am Beispiel des Mikrohauses über die thermische Aktivierung der Bodenplatte nahezu über die gesamte Heizperiode ein Wärmebedarf außerhalb der Sonnenstunden vermieden werden konnte. Dieser Ansatz verringert allerdings die Flinkheit einer typischen Infrarotheizung und erfordert eine teilweise Übertemperierung, die zu einer Reduktion der Behaglichkeit führen kann. Entscheidend für die effektive Nutzung der Speicherpotenziale ist eine entsprechend optimierte Regelung. In Kombination mit einer hohen spezifischen PV-Leistung konnte im Projekt Mikrohaus dadurch ein Eigenversorgungsgrad in der Wärmeversorgung von bis zu 68 % erreicht werden. Dies gilt ebenso für die Optimierung des Lastprofils für die Erzeugung von Trinkwarmwasser (siehe Kapitel 3. Strategien zur Optimierung des Lastprofils).

### Laborraummessungen

Für das Projekt IR-Bau 2 bestand die Möglichkeit, das Forschungsgebäude ECOLAR auf dem Campus der HTWG um einen neuen Laborraum für Untersuchungen zum thermischen Verhalten unterschiedlicher Wärmeabgabesysteme zu erweitern. Der Raum mit 16 m<sup>2</sup> Fläche und quadratischen Grundriss bot erstmals die Gelegenheit, spezifische Fragestellungen zur thermischen Behaglichkeit im Raum oder der thermischen Speicherfähigkeit verschiedener direktelektrischer Wärmeerzeuger bzw. Wärmeübergabesysteme vergleichend zu untersuchen (siehe Kapitel 4.1 Beschreibung des Laborraums). Dazu wurde der Laborraum umfassend mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Für die Untersuchungen wurden sieben unterschiedliche direktelektrische Wärmeerzeuger installiert, zum Einsatz kamen folgende Systeme (siehe Kapitel 4.2 Beschreibung der eingesetzten Wärmeerzeuger):

- Ein Infrarot-Plattenelement, zentral in Deckenmitte montiert
- Vier Infrarot-Plattenelemente, dezentral an der Decke montiert
- Ein Infrarot-Plattenelement, zentral an einer opaken Außenwand montiert
- Zwei Infrarot-Rundstelen, freistehend an der transparenten Außenwand platziert
- Elektrische Fußbodenheizung im Trockenbau mit Speichermaße auf Lehmbasis
- Elektrischer Radiator, freistehend an der transparenten Außenwand platziert
- Elektrischer Konvektor, freistehend an der transparenten Außenwand platziert

Alle Systeme wurden unter vergleichbaren Randbedingungen vermessen und die Messdaten in einheitlichen Grafiken aufbereitet. Im Ergebnis liegen nun jeweils die zeitlich aufgelösten Lufttemperaturen in drei Ebenen sowie die operativen Temperaturen über Globesonden für 27 Punkte im Raum vor. Aus den Daten konnten die Aufheiz- und Abkühlphasen sowie die vertikalen und horizontalen Temperaturschichtungen analysiert werden, so dass erstmals eine detaillierte zeitliche und räumliche Wärmeverteilung für verschiedenen Arten der Wärmeabgabe dokumentiert werden konnte (siehe Kapitel 4.4 Grundsysteme im Vergleich).

In der vergleichenden Betrachtung ist zu erkennen, dass alle Systeme die Solltemperatur der Luft in Raummitte mit nur sehr geringen Abweichungen erreichen. Überraschend ist, dass sich dies im Mittel auch bei der operativen Temperatur über die Globesonden mit einer Bandbreite von 19,7 bis 20,2 °C abbildet, obwohl sich die Systeme in der Art der Wärmeabgabe stark voneinander unterscheiden. Einen nennenswerten generellen Unterschied in der zu erwartenden Behaglichkeit durch eine strahlungsoptimierte Wärmeabgabe lässt sich daher aus den Durchschnittswerten nicht ableiten, ebenso wenig ein Nachteil.

Deutliche Unterschiede sind jedoch in der räumlichen Homogenität zu erkennen, hier weisen die strahlungsdominierten Systeme in den Histogrammen bessere Werte auf, allen voran die Fußbodenheizung. Der Unterschied ist insbesondere in der vertikalen Spreizung zu erkennen: auch wenn sich die Mittelwerte der Globetemperaturen insgesamt sehr ähnlich sind, entsteht bei den drei Systemen mit anzunehmenden höherem Konvektionsanteil Stele, Radiator und Konvektor in der unteren Ebene im Bereich des Fußbodens ein ausgeprägtes Gefälle in der vertikalen Temperaturschichtung. Am deutlichsten ist dies beim Konvektorsystem zu sehen, bei dem die bodennahe Temperatur als wichtiges Kriterium für die zu erwartende Behaglichkeit nur Werte zwischen 18°C und 19°C erreichen.

Auf Basis der Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Grundsysteme wurden weitere Vergleichsmessungen durchgeführt, aus denen folgende Erkenntnisse abgeleitet werden können (siehe Kapitel 4.6 Ergänzende Vergleichsmessungen):

Durch eine PI-Regelung können gegenüber einer typischen 2-Punkt-Regelung in hohem Maße Temperaturschwankungen der Heizelemente und damit verbundene Schwankungen der Luft- und Globetemperaturen reduziert werden. Die nahezu konstante Einhaltung der Solltemperatur führt zudem dazu, dass die Heizelemente keine hohen Temperaturspitzen erreichen, die das Behaglichkeitsempfinden negativ beeinflussen können.

Eine asymmetrische Positionierung der Heizelemente führt zu einem erhöhten horizontalen Temperaturgefälle. Beim Ziel möglichst homogener Behaglichkeitsanforderungen ist eine gleichmäßig positionierte Anordnung von im Idealfall mehrerer kleinerer Heizelemente vorteilhaft. Alternativ lassen sich durch die hohe Flexibilität der Systeme bei entsprechenden Planungszielen mit einfachen Mitteln räumlich individuelle Behaglichkeitszonen einrichten.

Die Untersuchung am Beispiel einer stehenden Person unter einem an der Decke positionierten Heizelement zeigt den Einfluss der Betriebstemperatur auf die Behaglichkeit deutlich auf. Bei marktüblichen Systemen mit Temperaturen zwischen 80°C bis zu 150 °C entstehen hierbei Unterschiede auf der Kopfoberseite von über 10 Kelvin. Je höher die Maximaltemperatur des Heizelements ist, desto höher ist das Risiko einer unbehaglichen Wahrnehmung durch den Nutzer.

Ergänzend zur räumlichen Flexibilität differenzierter Wärmeanforderungen spielt auch die zeitliche Flexibilität je nach Energie- und Nutzungskonzept eine große Rolle. Insbesondere bei einer angestrebten hohen Dynamik durch den Nutzer ist das Aufheizverhalten von entscheidender Bedeutung. Bei der Untersuchung des Verhaltens der verschiedenen Systeme bei einer Erhöhung der Solltemperatur um 2 Kelvin wurden deutliche Unterschiede festgestellt. Im Vergleich der zwei Extrembeispiele IR-System Decke dezentral (sehr hoher Strahlungsanteil) und dem elektrischen Konvektor (sehr hoher Konvektionsanteil) zeigte sich, dass zunächst beide Systeme sehr flink auf die Anforderungsänderung reagieren können. Der Konvektor ist hierbei bezogen auf die zu erreichende Soll-Lufttemperatur deutlich schneller, dies jedoch zu Lasten der operativen Raumtemperatur, die bei der IR-Heizung deutlich schneller erreicht wird. Besonders deutlich zeigt sich dies in der unteren Ebene in Fußbodennähe, bei der das IR-System deutliche Vorteile im Hinblick auf eine flinke Erreichung behaglicher Bedingungen aufweisen kann.

Bei der vergleichenden Untersuchung einer Beheizung mit zentralem Heizelement in Raummitte konnte beispielhaft der Einfluss eines Tisches auf die operative Temperatur unter dem Tisch gemessen werden. Die Wirkung betrug hierbei im Mittel eine Reduktion von über einem Kelvin und sollte daher bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden. Weitergehende Untersuchungen zu Grundriss- und Möblierungsvarianten sowie der Einfluss von Oberflächen mit unterschiedlichem Absorptions- bzw. Reflexionsverhalten wären hierbei hilfreich.

## Ergänzende Untersuchungen

Eine Elektrodirektheizung verursacht einen höheren Stromverbrauch für die Wärmeerzeugung als eine vergleichbare Wärmepumpe, da diese den Großteil der Wärmemenge aus der lokalen Anergiequelle (Luft, Erdreich, Grundwasser etc.) gewinnt. Durch die Kombination der Elektrodirektheizung mit einer Photovoltaikanlage als Umweltenergiequelle können die Strommengen aus dem Netzbezug reduziert werden. Bei diesem Ansatz stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien die Dimensionierung der Photovoltaikleistung sinnvoll erfolgen kann. Hierzu wurden am Beispiel eines gut gedämmten Einfamilienhauses unterschiedliche Szenarien berechnet und miteinander verglichen.

Die Berechnungen zeigen, dass das Erreichen der Bilanzziele bei zunehmendem Energieumsatz und Gebäudegröße immer schwieriger wird und eine realistische Zielerreichung nur bei kleinen gut gedämmten Gebäuden möglich ist.

Vergleicht man die Ergebnisse mit dem Projekt MFH K76 aus Darmstadt zeigt sich, dass die PV-Anlage ca. dreimal so groß hätte dimensioniert werden müssen, um das Bilanzziel „gleicher Reststrombedarf übers Jahr wie ein WP-System“ und damit einen hohen regenerativen Deckungsgrad bei der Wärmeerzeugung zu erreichen. Dies ist mit dem vorhandenen Flächenpotenzial des Flachdaches nicht zu erreichen. Das Extrembeispiel Mikrohaus erreicht mit 50 kWh/m<sup>2</sup>a Jahresheizwärmebedarf, 50 m<sup>2</sup> beheizter Wohnfläche, 8,2 kWp PV-Anlage und seiner auf Eigenverbrauch optimierten Regelung zusammen mit dem thermischen Speicher zwar nahezu das Bilanzziel „gleicher Reststrombedarf über das Jahr wie ein WP-System“. Dennoch ist selbst in diesem Idealfall der Strombezug in den Kernmonaten der Heizperiode höher, als es bei einem WP-System der Fall wäre und könnte nur durch eine saisonale lokale Stromspeicherung verbessert werden. Aus der Betrachtung kann daher abgeleitet werden, dass eine Kombination von Stromdirektheizungen mit Photovoltaik sinnvoll ist und in der Jahresbilanz hohe solare Deckungsraten erreicht werden können. Das Ziel einer identischen Netzbelastung analog einer Wärmepumpe führt jedoch ohne lokale Langzeitspeicherung zu keinem realistischen oder sinnvollen Ergebnis, insbesondere mit dem Fokus auf die Kernmonate Dezember und Januar in der Heizperiode.

Wichtig ist hierbei allerdings zu beachten, dass bei allen Bilanzierungsarten zusätzlicher, nicht für die Wärmeerzeugung genutzter Solarstrom produziert wird, der bei voller Berücksichtigung und Inkaufnahme der höheren Netzbelastung insgesamt zu guten ökologischen und ökonomischen Werten führen kann (siehe Abschlussbericht IR-Bau).

Ergänzend zu der Studie mit dem Fokus einer Eigennutzung von lokalem Solarstrom erfolgte eine Betrachtung der zu erwartenden Stromentwicklung über die lokale Ebene hinaus. Der bislang verfolgte Ansatz orientierte sich an einer adäquaten Nutzung lokaler Energiequellen durch PV analog zur Anergiequelle einer Wärmepumpe. Eine alternative Betrachtung besteht in dem Ansatz, dass der für Stromdirektheizungen erforderliche zusätzliche Ausbau an Erzeugungskapazitäten nicht lokal am Gebäude, sondern überregional an einer beliebigen Stelle des Stromnetzes erfolgen kann. In diesem Fall können auch andere regenerative Stromerzeugungsarten – wie insbesondere die Windkraft – als Ergänzungsmaßnahme in die Bilanz eingebunden werden. Die bundesweite Jahreserzeugung als Kombination von Photovoltaik und Windkraft entspricht sehr gut dem aktuellen und vermutlich auch zukünftigen, über den Jahresverlauf relativ konstanten, Strombedarf in Deutschland, so dass auch langfristig kein relevanter Bedarf an saisonaler Stromspeicherung zu erwarten ist. Vor diesem Hintergrund könnte für die Bilanzierung und Bewertung von Stromdirektheizungen in Kombination mit lokaler Photovoltaik auch der nicht unmittelbar für die Wärmeerzeugung genutzte Stromertrag als vollwertiger Beitrag zur elektrischen Versorgung des Gesamtsystems angesetzt werden.

Es wurde daher der Versuch unternommen, auf einfache Weise abzuschätzen, welche Relevanz eine Zunahme an Stromdirektheizungen anstelle von Wärmepumpensystemen auf die erforderlichen Erzeugungskapazitäten im Stromnetz haben könnte. Als Vergleichsgrundlage diente eine Studie der zu erwartenden Stromentwicklung sowie eine Abschätzung mit beispielhaften Annahmen der Substitution

von Wärmepumpen durch an Stromdirektheizungen. Das Ergebnis zeigt, dass ein großmaßstäblicher Ausbau von Stromdirektheizungen anstelle von Wärmepumpensystemen für das zukünftige Stromnetz eine deutliche Mehrbelastung darstellen würde. Im Szenario mit 50% der Wohnungen mit Einzelraumheizungen (ca. 2 % des Wohnungsbestandes) wäre der Mehrbedarf beispielsweise bei knapp 9 TWh/a, was rund 9 GWp installierte Leistung bzw. 50 Mio. m<sup>2</sup> Modulfläche an zusätzlicher Produktionskapazität erforderlich machen würde.

Eine vollständige Umstellung auf Stromdirektheizungen in allen Einfamilienhäusern und Wohngebäuden mit Einzelheizungen hätte eine Erhöhung von ca. 25% des Gesamtstrombedarfs bzw. einem zusätzlichen Strombedarf in Höhe von ca. 360 TWh/a zur Folge. Dies entspricht rund 360 GWp installierter Leistung an Photovoltaik bzw. 2,1 Mrd. m<sup>2</sup> Modulfläche. Prinzipiell sind solche Flächenpotenziale in Deutschland zwar vorhanden, jedoch ist in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, welche Konsequenzen für die Netz- und Speicherinfrastruktur durch den höheren Stromumsatz entstehen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um diese Effekte in ökologischer und ökonomischer Hinsicht angemessen bewerten zu können. Weitergehende Untersuchungen, die eine quantifizierbare Grundlage für diese Fragestellung liefern, sind daher wünschenswert. Als Konsequenz kann daher zum aktuellen Zeitpunkt abgeleitet werden, dass der Einsatz von Stromdirektheizungen im Sinne der Energiewende nur in Situationen sinnvoll ist, in denen die Alternative dezentrale Wärmepumpe oder über Nahwärme aus technischer Sicht oder unter ökonomischen Aspekten nicht umgesetzt werden kann. Dies ist in der Regel bei Neubauprojekten selten der Fall und beschränkt sich im Wesentlichen auf kleinere Gebäude mit hohem baulichen Wärmeschutz, bei temporärer Nutzung oder in Hybridsystemen. Im Bestand liegt das Potenzial ergänzend bei Gebäuden ohne hydraulischem Wärmeverteilsystem.

## Mitwirkende

### Autorinnen und Autoren

Prof. Dr.-Ing Stark, Thomas, (HTWG Konstanz)

Dr.-Ing. Heider, Jan (HTWG Konstanz)

Dipl. Ing. Conrad, Nicole (HTWG Konstanz)

Bachmann, Niklas (HTWG Konstanz)

### Weitere Mitwirkende

Dr.-Ing. Kosack, Peter (ehem. Technische Universität Kaiserslautern)

Rosenfelder, Manuel (studentische Hilfskraft)

### Projektpartner und weitere Fördermittelgeber

Knöller, Detlef (Knöller - Hausverwaltung Immobilien Wohnbau, Teningen)

Gundendorfer, Markus, (my-PV GmbH)

Prof. Dr. Tersluisen, Angèle (ee concept GmbH)

Schmidt, Markus (EVO Elektroheizung GmbH & Co.KG)

Heller, Roger (Oekoswiss Energy AG)

Ringbauer, Michael (Redwell Manufaktur GmbH)

Steffen, Arne (werk.um architekten GmbH)

Das Projektteam dankt den nachfolgenden Sponsoren für Ihren Beitrag zum Forschungsprojekt IR-Bau 2:

KOSTAL Solar Electric GmbH

(Wechselrichter)



LOXONE Electronics

(Mess- und Regeltechnik / Smart Home)



ZIPSE GmbH & Co. KG

(Sichtkorkfassade)



TS-Smartsolution

(messtechnische Ausstattung Firmengebäude)



## Kurzbiographien



Prof. Dr.-Ing Thomas Stark

Seit 2008 lehrt und forscht Professor Stark im Fachgebiet Energieeffizientes Bauen an der HTWG Konstanz. 2003 gründete er das Planungsbüro ee-plan, das 2008 in die ee concept GmbH überging.



Dr.-Ing Jan Heider

Jan Heider studierte Architektur an der HTWG Konstanz. Zwischen 2009 und 2018 arbeitete er mit dem Schwerpunkt energieeffizientes Bauen in verschiedenen Architekturbüros. Seit 2015 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Energieeffizientes Bauen der HTWG Konstanz. Von 2017 bis 2019 leitete er das Forschungsprojekt „IR-Bau“.



Dipl. -Ing. Nicole Conrad B. Sc.

Nicole Conrad studierte Architektur und Stadtplanung an der Universität Stuttgart sowie Psychologie an der Universität Konstanz. Sie arbeitet seit 2018 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Energieeffizientes Bauen der HTWG Konstanz und war bereits für die sozialwissenschaftliche Begleitforschung im Projekt „IR-Bau“ verantwortlich.



Niklas Bachmann

Niklas Bachmann ist Spezialist für Messtechnik, Datenmanagement und Datenauswertung. Er ist seit 2020 Mitarbeiter am Fachgebiet Energieeffizientes Bauen der HTWG Konstanz.

## Verzeichnisse

### Quellenverzeichnis

- BDEW. (10. Oktober 2023). *Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland*. Von <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/beheizungsstruktur-wohnungsbestand/> abgerufen
- BWP. (2024). *Zahlen & Daten*. Von <https://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/> abgerufen
- DENA. (2022). *dena-GEBÄUDEREPORT 2023*. (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Hrsg.) Berlin. Von <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-gebaeudereport-2023/> abgerufen
- Fraunhofer-ISE (2021): Julian Brandes, Markus Haun, Daniel Wrede, Patrick Jürgens, Christoph Kost, Hans-Martin Henning: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Update November 2021: Klimaneutralität 2045, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, November 2021
- Statista. (2023a). *Größe der Wohnfläche in Wohngebäuden in Deutschland in den Jahren von 1995 bis 2022*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70099/umfrage/wohnflaeche-in-wohngebaeuden-in-deutschland-seit-1994/> abgerufen
- Statista. (2023b). *Anzahl der Wohngebäude in Deutschland in den Jahren von 1995 bis 2022*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70094/umfrage/wohngebaeude-bestand-in-deutschland-seit-1994/> abgerufen
- Statista. (2023c). *Anzahl der Einfamilienhäuser in Deutschland in den Jahren von 2001 bis 2022*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/39010/umfrage/bestand-der-einfamilienhaeuser-in-deutschland-seit-2000/> abgerufen
- Umweltbundesamt. (02. April 2024a). *Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren> abgerufen
- Umweltbundesamt. (19. März 2024b). *Energieverbrauch privater Haushalte*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte> abgerufen

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: MFH in Darmstadt, Süd-West Ansicht	14
Abbildung 2: MFH in Darmstadt Luftbild mit PV-Anlage	14
Abbildung 3: MFH in Darmstadt Grundriss & thermische Hülle	15
Abbildung 4: MFH in Lauerz Ansicht Süd / West	17
Abbildung 5: MFH in Lauerz, Dachaufsicht	18
Abbildung 6: MFH in Lauerz Grundriss	19
Abbildung 7: Mikrohaus in Singen, Ansicht Süd-West	20
Abbildung 8: Mikrohaus in Singen Grundriss	21
Abbildung 9: Mikrohaus in Singen, Aufsicht Dach mit PV-Anlage	22
Abbildung 10: Bürogebäude in Teningen Ansicht Süd / West	23
Abbildung 11: Bürogebäude in Teningen, Dachaufsicht	24
Abbildung 12: Bürogebäude in Teningen, Grundriss	24
Abbildung 13: Büro und Werkstattgebäude, Ansicht Nord / West	25
Abbildung 14: Büro und Werkstattgebäude, Dachaufsicht	26
Abbildung 15: Grundriss-Skizze Büro und Werkstattgebäude	26
Abbildung 16: Verbrauch Wärme MFH K76 Darmstadt 2022 (nicht witterungsbereinigt)	29
Abbildung 17: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme MFH K76 Darmstadt 2022	29
Abbildung 18: Verbrauch und solare Deckung Wärme MFH K76 Darmstadt 2022	30
Abbildung 19: durchschnittliches Tageslastprofil HP 21/22 MFH K76 Darmstadt	30
Abbildung 20: Verbrauch Wärme MFH Lauerz 2022	32
Abbildung 21: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme MFH Lauerz	32
Abbildung 22: Verbrauch und solare Deckung Wärme MFH Lauerz	33
Abbildung 23: durchschnittliches Tageslastprofil HP 21/22 MFH Lauerz (CH)	33
Abbildung 24: Verbrauch Wärme Mikrohaus Singen	35
Abbildung 25: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme Mikrohaus Singen	35
Abbildung 26: Verbrauch und solare Deckung Wärme Mikrohaus Singen	36
Abbildung 27: Lastprofil HP 21/22 Mikrohaus Singen	36
Abbildung 28: Verbrauch Wärme Bürogebäude Teningen	38
Abbildung 29: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme Bürogebäude Teningen	38
Abbildung 30: Verbrauch und solare Deckung Wärme Bürogebäude Teningen	39
Abbildung 31: Lastprofil HP 21/22 Bürogebäude Teningen.	39
Abbildung 32: Verbrauch Wärme Betriebsgebäude Auerbach	41
Abbildung 33: Erzeugung PV und Eigennutzung Wärme Betriebsgebäude Auerbach	41

Abbildung 34: Verbrauch und solare Deckung Wärme Betriebsgebäude Auerbach	42
Abbildung 35: Lastprofil HP 21/22 Betriebsgebäude Auerbach	42
Abbildung 36: Konzeption Nutzerbefragung	48
Abbildung 37: Auszug - Onlinefragebogen	50
Abbildung 38: Auswertung Nutzerbefragung – Behaglichkeit Wohngebäude	51
Abbildung 39: Auswertung Nutzerbefragung – Behaglichkeit Bürogebäude	52
Abbildung 40: Auswertung Nutzerbefragung – Bedienbarkeit Wohngebäude	52
Abbildung 41: Auswertung Nutzerbefragung – Bedienbarkeit, Fa. Knöllner	53
Abbildung 42: Beispielhafte durchschnittliche Tages-Lastprofile von Wohngebäuden für elektrische Energie im Sommer und Winter	57
Abbildung 43: Typische monatliche Stromerträge bei PV-Anlagen pro kWp in Abhängigkeit der Orientierung (Simulation mit PV-SOL, Standort Würzburg)	60
Abbildung 44: Gemessene Tagesverbräuche der IR-Heizungen im MFH K76 (HP 2018/2019)	61
Abbildung 45: Beispielhafte thermische Speicherkapazität verschiedener Ansätze zur Lastverschiebung im Mikrohaus	62
Abbildung 46: Funktionsweise der Aktivierung von thermischer Speichermaße im Mikrohaus	63
Abbildung 47: Vergleich der Last- und Erzeugungsprofile im Mikrohaus ohne und mit Regelung	64
Abbildung 48: Stromverbrauch und Erzeugung im Mikrohaus Januar 2022	65
Abbildung 49: Stromverbrauch und Erzeugung im Mikrohaus Februar 2022	65
Abbildung 50: Anordnung der Temperatursensoren in der Bodenplatte im Mikrohaus auf drei Ebenen (oben / Mitte / unten)	66
Abbildung 51: Beispielhaftes Wochenprofil im November von PV-Ertrag und Stromverbrauch für die elektrische Fußbodenheizung im Hauptraum (Wohnzimmer) und dem Trinkwasserboiler im Mikrohaus (Heizperiode 2021/2022)	67
Abbildung 52: Beispielhaftes Wochenprofil im November der Temperaturen in der Fußbodenheizung (Oberflächentemperatur / Kerntemperatur / Temperatur unter der Dämmebene) sowie die Lufttemperatur im Mikrohaus (Heizperiode 2021/2022)	67
Abbildung 53: Beispielhaftes Wochenprofil im Januar von PV-Ertrag und Stromverbrauch für die elektrische Fußbodenheizung im Hauptraum (Wohnzimmer) und dem Trinkwasserboiler im Mikrohaus (Heizperiode 2021/2022)	68
Abbildung 54: Beispielhaftes Wochenprofil im Januar der Temperaturen in der Fußbodenheizung (Oberflächentemperatur / Kerntemperatur / Temperatur unter der Dämmebene) sowie die Lufttemperatur im Mikrohaus (Heizperiode 2021/2022)	68
Abbildung 55 Tageslastgang IR Heizung und PV-Erzeugung K76 (rot: Wohnung 6, blau: Mittelwert aller übrigen Wohnungen)	70
Abbildung 56: Temperaturverlauf Wohnung 6 über den Tag	70
Abbildung 57: Mittlerer Tageslastgang Durchlauferhitzer und Photovoltaik K76	71
Abbildung 58: Mittlerer Tageslastgang Elektroboiler und Photovoltaik Mikrohaus	71
Abbildung 59: Forschungsgebäude ECOLAR auf dem Campus der HTWG Konstanz	72

Abbildung 60: Neuer Laborraum (rot umrandet) im ECOLAR Laborgebäude, Ansicht Nord / West	73
Abbildung 61: Grundriss ECOLAR Laborgebäude	73
Abbildung 62: Einbau der elektrischen Fußbodenheizung und der Lehmballastplatten	74
Abbildung 63: fertig eingerichteter Laborraum	74
Abbildung 64: Grundriss Laborraum mit Position der IR-Heizungen Decke zentral, Decke dezentral und Wand.	76
Abbildung 65: Schnitt Laborraum mit Position der IR-Heizungen und der Temperatursensoren.	77
Abbildung 66: Aufstellung der mobilen Heizsysteme im Grundriss (IR-Stelen)	77
Abbildung 67: Position der Bauteiltemperatursensoren im Laborraum	79
Abbildung 68: Position der Bauteiltemperatursensoren im Boden	80
Abbildung 69: Darstellung Solltemperatur und Messzeitraum	82
Abbildung 70: Übersicht Diagramme Labor: Temperaturverlauf - 3d Globesonden – Histogramm – Temperatur Heizsystem	83
Abbildung 71: Anordnung und Bezeichnung der 27 Globesonden im Raum	83
Abbildung 72: IR-Decke Zentral, Temperaturverläufe	85
Abbildung 73: IR-Decke Zentral, räumliche Darstellung der gemessenen Globetemperaturen	85
Abbildung 74: IR-Decke zentral / Histogramm mittlere Globetemperaturen	86
Abbildung 75: IR-Decke zentral / Oberflächentemperaturen IR-Heizung	86
Abbildung 76: IR-Decke zentral / elektrische Leistung Heizelement	86
Abbildung 77: IR-Decke-dezentral / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren	88
Abbildung 78: IR-Decke-dezentral / räumliche Darstellung Globetemperaturen	88
Abbildung 79: IR-Decke-dezentral / Histogramm mittlere Globetemperaturen	89
Abbildung 80: IR-Decke-dezentral / Temperaturverlauf Oberflächentemperatur Heizelement	89
Abbildung 81: IR-Decke-dezentral / Leistung Heizelement	89
Abbildung 82: IR-Wand / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren	91
Abbildung 83: IR-Wand / räumliche Darstellung Globetemperaturen	91
Abbildung 84: IR-Wand / Histogramm mittlere Globetemperaturen	92
Abbildung 85: IR-Wand / Leistung Heizelement	92
Abbildung 86: IR-Wand / Verlauf Oberflächentemperatur Heizelement	92
Abbildung 87: Elektrische FBH / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren	94
Abbildung 88: Elektrische FBH / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren / erweiterter Messzeitraum	94
Abbildung 89: Elektrische FBH / Histogramm mittlere Globetemperaturen / erweiterter Messzeitraum	94
Abbildung 90: Elektrische FBH / Räumliche Darstellung Globetemperaturen / erweiterter Messzeitraum	95

Abbildung 91: Elektrische FBH / Verlauf Oberflächentemperatur Heizelement / erweiterter Messzeitraum	95
Abbildung 92: Elektrische FBH / Leistung Heizelement	95
Abbildung 93: Stele 2 / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren	97
Abbildung 94: Stele 2 / Räumliche Darstellung Globetemperaturen	97
Abbildung 95: Stele / Histogramm mittlere Globetemperaturen	98
Abbildung 96: Stele / Leistung Heizelemente	98
Abbildung 97: Radiator / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren	100
Abbildung 98: Radiator / Räumliche Darstellung Globetemperaturen	100
Abbildung 99: Radiator / Histogramm mittlere Globetemperaturen	101
Abbildung 100: Radiator / Leistung Heizelement	101
Abbildung 101: Konvektor / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren	103
Abbildung 102: Konvektor / Räumliche Darstellung Globetemperaturen	103
Abbildung 103: Konvektor / Histogramm mittlere Globetemperaturen	104
Abbildung 104: Konvektor / Leistung Heizelement	104
Abbildung 105: IR-Decke-dezentral PI-Regelung / Temperaturverlauf Globe und Temperatursensoren	108
Abbildung 106: IR-Decke-dezentral 2-Punkt-Regelung / Temperaturverlauf Globe und Luftsensoren	108
Abbildung 107: IR-Decke-dezentral PI-Regelung / räumliche Darstellung Globetemperaturen	109
Abbildung 108: IR-Decke-dezentral 2-Punkt-Regelung / räumliche Darstellung Globetemperaturen	109
Abbildung 109: IR-Decke-dezentral / Temperaturverlauf Oberflächentemperatur Heizelement	110
Abbildung 110: IR-Decke-dezentral-PI / Verlauf Oberflächentemperatur Heizelement	110
Abbildung 111: IR-Decke asymmetrisch / räumliche Darstellung Globetemperaturen	111
Abbildung 112: IR-Decke dezentral / räumliche Darstellung Globetemperaturen	111
Abbildung 113: IR-Decke-asymmetrisch / Verlauf Oberflächentemperatur Heizelement	112
Abbildung 114: IR-Decke-dezentral / Temperaturverlauf Oberflächentemperatur Heizelement	112
Abbildung 115: Globesonde im Schnitt mit Position der pt100 Oberflächentemperatursensoren	113
Abbildung 116: Temperaturverlauf Oberflächentemperatur Globesonde MMO	114
Abbildung 117: Verhältnis von Betriebstemperatur zu gemessener Oberflächentemperatur (Abstand vertikal 70 cm)	114
Abbildung 118: Aufheizverhalten der Variante IR Decke dezentral (vier Heizelemente, 2,2 kW) bei einer Erhöhung der Solltemperatur von 2 Kelvin (schwarz: Solltemperatur)	115
Abbildung 119: Aufheizverhalten der Variante Konvektor (elektr. 2 kW) bei einer Erhöhung der Solltemperatur von 2 Kelvin (schwarz: Solltemperatur)	115
Abbildung 120: Position der Tische für die Vergleichsmessung "Strahlungsschatten"	116

Abbildung 121: IR-Decke Zentral mit Tischen, räumliche Darstellung der gemessenen Globetemperaturen	117
Abbildung 122: IR-Decke Zentral ohne Tische, räumliche Darstellung der gemessenen Globetemperaturen	117
Abbildung 123: IR Decke zentral ohne Tisch, Temperaturverläufe	118
Abbildung 124: IR Decke zentral mit Tisch, Temperaturverläufe	118
Abbildung 125: Verbrauchswerte Typenhaus mit Luft- / Wasser-Wärmepumpe	122
Abbildung 126: Verbrauchswerte Typenhaus mit Stromdirektheizung	122
Abbildung 127: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach Jahresstromdifferenz zu WP	123
Abbildung 128: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach ausgeglichenem Jahressaldo	124
Abbildung 129: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach ausgeglichenem Jahressaldo inkl. Speicherverluste	125
Abbildung 130: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach gleichem Jahres-Netzbezug wie WP	126
Abbildung 131: Kennwerte Typenhaus mit Elektrodirektheizung, Dimensionierung PV-Ertrag nach gleichem Netzbezug im Januar wie WP	127
Abbildung 132: Vergleich der Mindestgröße an Photovoltaikleistung für das Mustergebäude unter optimalen Bedingungen bezogen auf die Wohnfläche. Zur Orientierung: 100 Wp entsprechen etwa einer Modulfläche von 0,6 m <sup>2</sup> .	128
Abbildung 133: Vergleich des Jahres-Netzbezugs für das Mustergebäude für Heizung und Trinkwassererwärmung	129
Abbildung 134: Vergleich der ergänzenden Überschussproduktion an Photovoltaikertrag für das Mustergebäude unter optimalen Bedingungen.	129
Abbildung 135: Vergleich des Jahressaldos im Strombezug für das Mustergebäude unter gleichwertiger Anrechnung der Überschussproduktion.	129
Abbildung 136: Zusätzlich zu installierende spezifische PV-Leistung in Abhängigkeit des Jahresheizwärmebedarfs	130
Abbildung 137: Zusätzlich zu installierende PV-Leistung in Abhängigkeit des Jahresheizwärmebedarfs und der Gebäudegröße beim Bilanzziel gleicher Reststrombezug übers Jahr wie WP	130
Abbildung 138: Zusätzlich zu installierende PV-Leistung in Abhängigkeit des Jahresheizwärmebedarfs und der Gebäudegröße beim Bilanzziel gleicher Reststrombezug im Januar	130
Abbildung 139: Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energie im deutschen Stromnetz seit 2002 (www.energy-charts-info)	132
Abbildung 140: Monatlicher Anteil der Photovoltaik an der Stromerzeugung im deutschen Stromnetz im Jahr 2023 (www.energy-charts-info)	132
Abbildung 141: Monatlicher Anteil der Windkraft an der Stromerzeugung im deutschen Stromnetz im Jahr 2023 (www.energy-charts-info)	133
Abbildung 142: Monatlicher Anteil der Erneuerbaren Energiequellen an der Stromerzeugung im deutschen Stromnetz im Jahr 2023 (www.energy-charts-info)	133

Abbildung 143: CO <sub>2</sub> -Bilanz für das Mustergebäude aus Abschnitt 5.1 bei voller und gleichwertiger Anrechnung der PV-Überschussproduktion	134
Abbildung 144 Mögliche Entwicklung der Strombereitstellung [Fraunhofer-ISE, 2021]	135

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Merkmale MFH K76	16
Tabelle 2: Merkmale MFH in Lauerz	19
Tabelle 3: Merkmale Mikrohaus in Singen	22
Tabelle 4: Merkmale Bürogebäude in Teningen	25
Tabelle 5: Merkmale Büro- und Werkstattgebäude	27
Tabelle 6: Zusammenfassung der Energiekennwerte der Pilotprojekte	43
Tabelle 7: Zusammenfassung der wichtigsten Kennwerte der Grundsysteme in der Messperiode	105
Tabelle 8: Vergleich maximale Leistung und Verbrauch in der Messperiode	106
Tabelle 9: Abschätzung der zusätzlich erforderlichen Stromerzeugungsmenge bei Substitution von Wärmepumpen durch Stromdirektheizungen	136