

Netzflexibler Wohnbau als Energiespeicher

für Windstrom-Spitzenlasten
im öffentlichen Stromnetz



Niederösterreich / Wien, März 2023

Forschungsvorhaben gefördert von der Wohnbauforschung der
niederösterreichischen Landesregierung, Kennzeichen F-2267



Netzflexibler Wohnbau als Energiespeicher für Windstrom-Spitzenlasten im öffentlichen Stromnetz

Wohnpark Wolfsbrunn

2453 Sommerein

Bauablauf

Baubeginn: 2018

Fertigstellung Bauphase 1 (Reihenhäuser): Herbst 2019

Fertigstellung Bauphase 2 (Wohnhaus): Frühjahr 2020

Projektteam

Bauträger: SÜDRAUM Gemeinnützige Wohnbaugesellschaft mbH, Ing. Jörg Hoffmann, M. Eng.

Architektur: AW Architekten ZT GmbH, Mag. art. Ralf Steiner

Bauteilaktivierung: FIN – Future is Now Kuster Energielösungen GmbH, Harald Kuster, vollSOLAR GmbH, DI(FH) Florian Ritsch

Haustechnik und Installation: Heizbär GesmbH, Harald Grabner

Mess-, Steuer- und Regelungstechnik: GRT Gebäude- und Regeltechnik GmbH, Ing. Florian Breithenthaler

Monitoring: ao. Univ.-Prof. i. R. DI Dr. techn. Klaus Kreč, mit Unterstützung von eNu (Ing. Josef Gansch, MSc), GRT GmbH (Ing. Florian Breithenthaler), EVN AG Energiewirtschaftliche Planung (DI Christian Lechner, MBA) und VÖZ (DI Sebastian Spaun)

Dissemination und Beratung: Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, DI Sebastian Spaun, DI Claudia Dankl

Autor des Endberichts: ao. Univ. Prof. i. R. DI Dr. techn. Klaus Kreč

Gefördert und unterstützt von

Amt der NÖ Landesregierung Wohnungsförderung / Wohnbauforschung

Gemeinde Sommerein

EVN AG

Landesinnung Bau Niederösterreich

BAU!MASSIV! – Forschungsinitiative Zukunftssicheres Bauen

Beton Dialog Österreich

Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie VÖZ



AW/ARCHITEKTEN



GRT

EVN
Energie. Wasser. Leben.



VÖZ

beton®
Werte für Generationen

BAU!MASSIV!



ABSTRACT

Der Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein am Leithagebirge besteht aus 14 Reihenhäusern und einem zweigeschossigen Gebäude mit 22 Wohnungen für junges und betreutes Wohnen. Eine Besonderheit des Wohnparks ist seine Energieversorgung: Alle Gebäude werden über bauteilaktivierte Betondecken im Sommer gekühlt und im Winter geheizt. Die Wärmeerzeugung wird mittels Sole-Wasser-Wärmepumpen in Verbindung mit Tiefensonden, deren Bohrpfähle bis in 100 Meter Tiefe reichen, bewerkstelligt. Im Sommer wird das Erdreich rund um die Tiefenbohrungen für eine passive Kühlung genutzt. Aufgrund der großen Registerflächen in den thermisch aktivierten Decken genügen Soletemperaturen im Bereich um 20 °C zur Bereitstellung der erforderliche Kühlleistung, als Energieaufwand fällt dafür nur der elektrische Strom für die Umwälzpumpe an.

Für die Beheizung war das Ziel, den Stromverbrauch der Wärmepumpen zu einem Großteil durch Überschussstrom aus dem naheliegenden Windpark zu decken. Anfang Oktober 2021 wurde das hierfür erforderliche Windsignal vom Energieversorger EVN bereitgestellt. Die Umstellung der Regelung des Wärmepumpenbetriebs auf den gezielten Einsatz von Windüberschussstrom erfolgte im Laufe des Oktober 2021.

Die Auswirkung des umgesetzten innovativen Energiekonzepts auf die thermische Behaglichkeit der Bewohner:innen einerseits und den Energieeinsatz andererseits wurde mittels der Erhebung und Auswertung einer Vielzahl an Messungen über einen Zeitraum von 2 Jahren untersucht. Dieses Monitoring wurde in der Zeit zwischen 1. August 2020 und 31. Juli 2022 durchgeführt. Der Fokus der Untersuchungen lag dabei auf der Analyse folgender Themen:

- Verwertung des Windsignals zur Nutzung von Windüberschussstrom
- Optimierung des Zusammenspiels zwischen der Stromlieferung aus Windparks, der Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen und der Wärmeverteilung durch die thermische Aktivierung von Betondecken
- Analyse des thermischen Komforts in den Wohnräumen im Jahresverlauf
- Individualität im Nutzungsverhalten in einem Mehrparteienhaus mit Bauteilaktivierung

Die Erfassung der von Stromzählern, Wärmemengenzählern und Temperatursensoren gemessenen Daten erfolgte in Abständen von teils 5 und teils 15 Minuten. Dadurch wurde eine sehr hohe Auflösung der Zeitverläufe erreicht sowie – vor dem Hintergrund der 2-jährigen Messreihe und der hohen Anzahl an registrierten Datenarten – auch ein sehr umfangreiches Datenpaket generiert. Die hohe zeitliche Auflösung erwies sich beim Aufspüren und Eliminieren von Fehlmessungen als hilfreich. Für die Auswertungen erwiesen sich die 15-Minuten-Werte als sinnvoll und ausreichend. Mit dem über 2 Jahre laufenden Monitoring wurde ermöglicht, das Funktionieren der Systeme zu überprüfen und zu dokumentieren, technische Probleme festzustellen und an ihrer Behebung zu arbeiten.

Wissenschaftliches Monitoring

Als wissenschaftliches Monitoring werden hier sehr detaillierte Untersuchungen bezeichnet, die dem Ziel dienen, zum einen gängige Berechnungsansätze in Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit zu testen. Zum anderen sollen Grundlagen für die Entwicklung neuer Berechnungsansätze, sowie für Planungsempfehlungen gewonnen werden.

An der Untersicht der thermisch aktivierten Decke in der Wohnküche von einem der Reihenhäuser wurden Sensoren zur Messung von Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur an zwei unterschiedlichen Stellen der Decke montiert. Die gemessenen Wärmestromdichten wurden in Verbindung mit den gemessenen Oberflächentemperaturen und der vom Raumfühler registrierten Temperatur dazu verwendet, auf Wärmeübergangskoeffizienten für die Deckenuntersicht rückzurechnen. Als Ergebnis dieser Detailuntersuchung zeigt sich, dass die Wärmeübergangskoeffizienten nicht nur stark ortsabhängig sind, sondern auch eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Differenz zwischen Oberflächen- und Raumtemperatur aufweisen. Die in Normberechnungen angesetzten temperaturunabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten liefern im Fall der untersuchten Wohnküche

nur für kleine Temperaturdifferenzen annähernd zutreffende Ergebnisse in Hinblick auf die Prognose der sich einstellenden Wärmestromdichten. Für größere Wärmestromdichten erweisen sich die normierten Wärmeübergangskoeffizienten als zu groß und liegen damit nicht auf der sicheren Seite.

Das Verständnis der Funktion der thermisch aktivierten Decken als Wärmetauscher ist insofern von großem Interesse als die Differenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur – die sog. Spreizung – als wesentliche Größe in die Regelung der Wärmepumpe eingeht. Um die thermischen Verhältnisse in der aktivierten Decke besser zu verstehen, wurde in zwei Reihenhäusern der Temperaturabfall des Heizmittels im Zuge der Durchströmung des Rohrregisters mittels Temperatursensoren gemessen. Zudem lieferte der am Verteiler eingebaute Wärmemengenzähler für den untersuchten Heizkreis ergänzend u. a. die Vorlauf- und die Rücklauftemperatur. Für den Heizfall im Tiefwinter fielen vorerst starke Schwankungen der Heizmitteltemperatur im Rohrregister auf. Als Grund für diese Schwankungen konnte ein ausgeprägtes Takten der Wärmepumpe ausgemacht werden. Es ist davon auszugehen, dass sich die Änderung der Regelung der Wärmepumpen mit dem Ziel der Umsetzung längerer Laufzeiten nicht nur in Hinblick auf die Lebensdauer des Geräts positiv auswirken wird, sondern auch die Energieeffizienz der Wärmepumpe spürbar steigern wird. Aufgrund der hohen Wärmeleit- und Wärmespeicherfähigkeit der Betondecken werden die beobachteten Schwankungen der Heizmitteltemperatur so stark ausgeglichen, dass sie an der Deckenunterseite kaum mehr messbar sind und damit für den thermischen Komfort im Raum keine Rolle spielen. Bemerkenswert war zudem, dass für die Temperatur des Heizmittels nach dem Durchfließen des Rohrregisters auf dem Weg vom Register zum Verteiler eine Erwärmung registriert wurde. Der Grund für diesen Effekt wurde in der Führung der Rohre zwischen Verteiler und Rohrregister festgemacht: Vor- und Rücklaufleitungen werden dort eng nebeneinander geführt, daher tritt eine thermische Kopplung auf, die die Vorlauftemperaturen senkt und die Rücklauftemperaturen anhebt. Eine Reduzierung dieser thermischen Kopplung mittels Planung anderer Rohrführung und/oder Dämmung der Rohre im Bereich des Verteilers birgt das Potential einer weiteren Erhöhung der Energieeffizienz des Gesamtsystems in sich.

Ergebnisse

Die Bauteilaktivierung erweist sich als äußerst robustes System, das in der im Wohnpark Wolfsbrunn umgesetzten Ausführung zum einen zu Jahresverläufen der vom Raumfühler registrierten Temperaturen führt, die von einer sehr hohen Temperaturkonstanz geprägt sind. Zum anderen stellen sich zwischen der vom Raumfühler registrierten Temperatur auf der einen Seite und den ebenso gemessenen Oberflächentemperaturen auf der anderen Seite nur kleine Unterschiede ein, was zu einer hohen thermischen Behaglichkeit führt. So war z. B. der gemessene Unterschied zwischen der Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke und der vom Raumfühler registrierten Temperatur in einer Wohnung des Mehrparteienhauses bei 90 Prozent der im Jahresverlauf registrierten Messwerten kleiner als 0,7 Kelvin.

Im Fall des Mehrparteienhauses ist es gelungen, durch die Speicherung von Energie in den massiven Gebäudeteilen ca. 80 % des während der Zeiten ohne Windüberschussstrom anfallenden Verbrauchs in die Zeiten mit Windüberschussstrom zu „verschieben“. Damit wird das Überangebot an Strom während windreicher Zeiten genutzt und der Stromverbrauch während Zeiten ohne Windüberschuss gezielt und deutlich spürbar reduziert.

Bei den Reihenhäusern konnte eine Auswirkung der Regelung nach dem Windsignal auf den Stromverbrauch nicht ausgemacht werden. Die für die Reihenhäuser umgesetzte Regelung der Wärmepumpe kann das Windsignal insofern nur ungenügend nutzen als sich aufgrund der engen Verquickung der Wärmebereitstellung für die Bauteilaktivierung und jener für die Warmwasserbereitung eine Abschaltung der Wärmepumpe während windarmer Zeiten als nicht möglich erweist. Dies zeigt zum einen, dass eine möglichst gute Entkopplung von Warmwasserbereitung und der Beheizung des Gebäudes angestrebt werden sollte. Zum anderen kann das Potential der Zwischenspeicherung von Energie nur dann gut genutzt werden, wenn die Haustechnikplanung von vornherein auf eine effektive Regelung der Wärmepumpe nach dem Windsignal abgestellt ist.

Potenzial für eine weitere Optimierung ist gegeben, zentral ist dabei das Regelungsverhalten der Wärmepumpen sowie die Wärmebereitstellung für die Warmwasserbereitung. Bei der Planung der Verlegung der Rohrleitungen der Bauteilaktivierung ist auf eine möglichst gute thermische Entkopplung von Vor- und Rücklaufleitungen im Bereich der Verteiler zu achten.

Der Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein ist Teil weiterführender Forschungs- und Innovationsprojekte, beispielsweise des Projekts „Hybrid LSC“, das Teil von Green Energy Lab und damit der FTI-Initiative Vorzeigeregion Energie ist. In diesem Projekt werden intelligente Steuerungsstrategien gesucht, die größtmögliche Flexibilität für das Energiesystem bereitstellen. Bürger:innen und Stakeholder als Teilnehmer:innen von Local Sustainable Communities („LSC“) werden dabei miteinbezogen. In Sommerein werden im Rahmen von „Hybrid LSC“ u. a. Befragungen der Bewohner:innen durchgeführt. Erste Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Untersuchungen liegen bereits vor, sind aber nicht Teil dieses Berichts.

Ausblick

Planer:innen und Bauherren haben eine große Verantwortung, nachhaltige und klimarelevante Gebäude zu planen und umzusetzen. Die Kombination des Energiespeichers Beton mit der Versorgung durch Windenergie konnte anhand des Wohnparks Wolfsbrunn mit Unterstützung der NÖ Wohnbauforschung sowie Vertreter:innen aus Wirtschaft, Industrie und Forschung in der Praxis getestet und analysiert werden. Die Ergebnisse ermöglichen es, weitere Optimierung bei der Regelung und der Auslegung des Systems vorzunehmen. Der Wohnpark Wolfsbrunn ist damit ein Wegweiser für klimainnovatives, qualitativ hochwertiges und zugleich leistbares Wohnen und ein weiterer Schritt in Richtung des standardmäßigen Einsatzes von thermischer Bauteilaktivierung im sozialen Wohnbau.

INHALT

1. Einleitung	3
2. Der Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein	5
2.1 Lage und Städtebauliches Konzept	5
2.2 Reihenhäuser	6
2.3 Wohnbau für JUNGES und BETREUTES Wohnen	6
2.4 Umsetzung.....	7
3. Energiekonzept	8
4. Messtechnische Begleitung	10
4.1 Wohnhaus.....	10
4.2 Reihenhäuser	12
5. Ergebnisse des Monitorings	15
5.1 Thermischer Komfort.....	15
5.1.1 Wohnhaus	16
5.1.2 Reihenhäuser	21
5.2 Stromverbrauch	28
5.2.1 Wohnhaus	28
5.2.1.1 Wärmepumpen.....	28
5.2.1.2 Heizpatronen	31
5.2.2 Reihenhäuser	32
5.3 Verwertung von Windüberschussstrom	34
5.3.1 Windsignal.....	34
5.3.2 Thermischer Komfort.....	35
5.3.2.1 Wohnhaus	37
5.3.2.2 Reihenhäuser	42
5.3.3 Stromverbrauch	46
5.3.3.1 Wohnhaus	46
5.3.3.2 Reihenhäuser	49
5.4 Wissenschaftliches Monitoring.....	53
5.4.1 Wärmestromdichte und Wärmeübergangskoeffizient	53
5.4.2 Das Rohrregister als Wärmetauscher	64
5.4.2.1 Mäanderförmige Verlegung	66
5.4.2.2 Schneckenförmige Verlegung.....	71

6. Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse	77
6.1 Thermischer Komfort	77
6.2 Strom- und Wärmeverbrauch	77
6.3 Ausnutzung von Windüberschussstrom	78
6.4 Optimierungspotentiale	79
7. Literaturverzeichnis	81
8. Anhänge	82
8.1 Stromverbrauch der Wärmepumpe im Wohnhaus von Oktober bis Dezember 2021	82
8.1.1 Oktober 2021	82
8.1.2 November 2021	84
8.1.3 Dezember 2021	86
8.2 Rückrechnung der Oberflächentemperatur des Fußbodens aus den Messwerten der Estrichtemperatur	90
8.3 Rechnerische Abschätzung der Temperaturabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten	91
8.4 Rückrechnung der Heizmitteltemperatur aus der Sensortemperatur	93
Abbildungsverzeichnis	97
Tabellenverzeichnis	100

1. Einleitung

Sowohl die bereits weltweit deutlich spürbaren Auswirkungen des Klimawandels als auch die Energiekrise erfordern auch im Bauwesen Lösungen, die energieeffektiv und zukunftsfähig sind. Der zunehmende Mangel an fossilen Brennstoffen und der hohe Ausstoß an Treibhausgasen bei deren Verbrennung verlangen nach einer raschen Umorientierung auf die ausschließliche Verwendung erneuerbarer Energien zur Konditionierung¹ von Gebäuden. Vor diesem Hintergrund hat sich im Laufe der letzten Jahrzehnte die Beheizung von Gebäuden mit elektrischer Energie von einem oft verpönten Ansatz zu einer modernen, energieeffektiven Maßnahme, die die Verwendung erneuerbarer Energien ermöglicht, gewandelt.

Die Verwendung von Strom zur Beheizung von Gebäuden ist allerdings nur dann effektiv, wenn zum einen der Strom für den Betrieb von Wärmepumpen mit einer möglichst hohen Jahresarbeitszahl verwendet wird. Zum anderen muss in heutigen Neubauten der Heizenergiebedarf so gering als möglich gehalten werden, um den Strombedarf mittels des Ertrags von Windparks und/oder Photovoltaikanlagen decken zu können.

Wärmepumpen sind nur dann genügend effektiv, wenn die Heizmitteltemperatur niedrig gehalten werden kann. Dies ist dann der Fall, wenn die Heizflächen groß sind, also mit sog. „Flächenheizungen“ gearbeitet wird. Eine Form der Flächenheizung ist die thermische Bauteilaktivierung, ihre Besonderheit: Die Wärme wird über vom Heizmittel durchflossene Rohrregister bereitgestellt, die in massive Bauteile eingebracht werden. Vor allem aus bautechnischen Überlegungen gewinnt die thermische Aktivierung von Betondecken stetig steigend an Bedeutung.

Betondecken stellen einen sehr guten Wärmespeicher mit hoher Wärmeleitfähigkeit dar. Dies bedeutet, dass Wärme aus dem Heizregister gut und in großer Menge aufgenommen werden kann, ohne dass sich die Decke zu stark erwärmt. Es liegt daher nahe, thermisch aktivierte Decken nicht nur zur Konditionierung von Innenräumen sondern auch als Energiespeicher zu verwenden.

Bekanntlich ist die Volatilität des Stromangebots aus erneuerbaren Quellen, wie aus Windparks oder Photovoltaikanlagen, stark ausgeprägt. Gebäude mit thermisch aktivierten Decken sollten somit aufgrund ihres hohen Wärmespeichervermögens einen Beitrag zum Ausgleich von Schwankungen im Stromangebot leisten können.

Im neu errichteten Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein am Leithagebirge (Niederösterreich) wurde das skizzierte Konzept der energieeffektiven, ganzjährigen Konditionierung von Gebäuden insofern in größerem Maßstab realisiert, als sowohl die Wärmeversorgung als auch die Kühlung eines Wohnhauses mit 22 Wohnungen, sowie von 14 Reihenhäusern allein mittels thermischer Aktivierung der Decken vorgenommen wird. Zum einen wird damit demonstriert, dass dieses Konzept auch im Rahmen des sozialen Wohnbaus angewandt werden kann. Zum anderen war es ein Ziel, den Großteil des Stromverbrauchs für die thermische Konditionierung des Wohnparks durch Überschussstrom aus dem naheliegenden Windpark zu decken.

Die Konditionierung mittels thermischer Aktivierung der Decken ist ein Konzept, das bereits in Gebäuden verschiedenster Größe und unterschiedlicher Nutzung erfolgreich umgesetzt wurde – siehe z. B. (1). Die Nutzung der Wärmespeicherfähigkeit der Decken zum Ausgleich von Spitzenlasten in der Stromerzeugung wird als interessanter Ansatz zwar diskutiert, wurde in der Baupraxis aber noch kaum umgesetzt. Dieses Projekt dient einerseits dazu, Erfahrungen in Hinblick auf das Potential der Nutzung von Windstrom-Spitzenlasten mit thermisch aktivierten Betondecken zu sammeln. Andererseits soll der thermische Komfort in derart beheizten und gekühlten Gebäuden messtechnisch erfasst und ausgewertet werden. Insbesondere soll die Langzeitbeobachtung Hinweise auf Verbesserungsmöglichkeiten liefern und der mangelnden Erfahrung – insbesondere in Hinblick auf die Regelung des Gesamtsystems – wirkungsvoll begegnen.

¹ Als „Konditionierung“ wird hier – einer in die Normen eingeführten Konvention folgend – die Haltung einer Vorzugstemperatur im Gebäude bezeichnet, die durch Heizung und Kühlung umgesetzt wird.

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein intensives Monitoring mittels Erhebung und Auswertung von Sensor-Daten über einen Beobachtungszeitraum von insgesamt 2 Jahren durchgeführt. Der vorliegende Bericht dokumentiert die wesentlichen Ergebnisse dieses Monitoring-Projekts.

2. Der Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein

Der Wohnpark Wolfsbrunn liegt am östlichen Ortsrand Sommereins am Fuße des Leithagebirges in Niederösterreich. Er umfasst einen Wohnbau für JUNGES und BETREUTES Wohnen sowie 4 Zeilen mit je 7 Reihenhäusern. Die 2019/2020 fertiggestellte erste Bauphase umfasst die Errichtung des Wohnbaus sowie der beiden südlichen Reihenhäuser-Zeilen. In einer zweiten Bauphase werden weitere 14 Reihenhäuser in 2 Zeilen errichtet.

2.1 Lage und Städtebauliches Konzept

Die Verkehrserschließung des Gebiets erfolgt ringförmig von außen in Form einer im Uhrzeigersinn gerichteten Einbahn, wodurch eine Minimierung des Durchzugsverkehrs sowie die Beruhigung des gesamten Wohngebiets erzielt wird. Die Hauptanknüpfungspunkte des bestehenden Straßennetzes an die Ringstraße sind die im Norden liegende Johannesgasse und die für den Wohnpark namensgebende Straße Wolfsbrunn.

Entlang der öffentlichen Verkehrswege (Ringstraße bzw. Verbindungsstraßen) werden für die Allgemeinheit nutzbare Stellplätze in Form von längs-gerichteten Parkplätzen geschaffen.

Das bereits vorhandene Radwegenetz, das bei der bestehenden Siedlung in der Süd-West-Ecke des Gebiets endet, wird in die Ringstraße miteingebunden und in dem neuen Siedlungsgebiet fortgeführt.

Der bestehende Grüngürtel wird im Süden des Gebiets fortgeführt und stellt eine Lärmschutzbarriere zur dahinter liegenden Landesstraße dar. Ebenso erfolgt in Richtung der ostseitig gelegenen landwirtschaftlichen Nutzung die Anordnung eines Grüngürtels.

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Einreichplan des Projekts.



Abb. 1: Lageplan des Wohnparks; Ausschnitt aus dem Einreichplan © AW Architekten

Das natürliche Gelände beschreibt im Planungsgebiet im Wesentlichen eine nördliche Hanglage. Zusätzlich fällt das Gelände noch von West nach Ost, wodurch insgesamt eine 2-seitig gekrümmte Bauplatz-Oberfläche entsteht.

Auf diese Besonderheit des Geländes reagiert das Konzept städtebaulich, indem das orthogonale Raster der vorhandenen Siedlungsstruktur verlassen wird und die Reihenhäuser unter Ausnutzung des Geländes fächerförmig – und dadurch optimiert nach Südwesten – ausgerichtet werden.

Die Staffelung erfolgt nicht nur in horizontaler, sondern – dem natürlichen Gelände folgend – auch in vertikaler Richtung. Die perfekte Geländeanpassung einhergehend mit einer höhenmäßig differenzierten Anordnung ist möglich durch die spezifische Kleingliedrigkeit der Reihenhäuser und erlaubt, bei der Errichtung der Einheiten mit minimalen Erdbewegungen auszukommen.

Der Wohnpark für JUNGES und BETREUTES Wohnen schließt das im Norden bestehende Siedlungsareal ab. Die im Detail kleingliedrig konzipierten Baukörper reihen sich auch hier dem Geländeverlauf folgend von Westen nach Osten. Innerhalb der Siedlungsstruktur entsteht zwischen den Baukörpern eine neue Mitte, die Kommunikation, Interaktion und Symbiosen zwischen jungen und älteren Bewohner:innen ermöglicht.

Die sowohl beim Typus der Reihenhäuser als auch bei den Geschossbauten des JUNGEN und BETREUTEN Wohnens zugrundeliegende Kleingliedrigkeit ermöglicht einerseits das Eingehen auf die individuellen Bedürfnisse der Bewohner:innen und schafft andererseits einen städtebaulich einheitlichen Komplex mit eigener Identität.

2.2 Reihenhäuser

Die in Massivbauweise ausgeführten und nach Süden orientierten Reihenhäuser besitzen eine (geförderte) Wohnnutzfläche von 106 m². Die gesamte Nutzfläche (inkl. Garage) beträgt 168 m². Der Zugang erfolgt von Norden. Die Einheiten umfassen ein Erdgeschoss, das den Hauptnutzungen Kochen, Essen und Wohnen vorbehalten ist sowie ein Obergeschoss, in dem sich die privaten Schlafzimmer sowie das Badezimmer befinden. Auf den Bau eines Kellergeschosses wird verzichtet. Im Erdgeschoss gibt es daher einen Keller-Ersatz in Form eines geräumigen Lagers sowie eines Technik-Raums, der an das Hauptgebäude baulich angebunden und wettergeschützt erreichbar ist.

Durch die Auffächerung der Einheiten entstehen an der südlich gelegenen Gartenseite sich voneinander wegdrehende, private, individuelle Freibereiche, deren Einsichtbarkeit vom Nachbargrundstück aus minimiert wird. Auf der Zugangsseite erleichtert das Überblicken der konkaven Seite des Fächers die Orientierung innerhalb der Reihenstruktur.

Durch das Verschieben des Obergeschosses gegenüber dem Erdgeschoss werden überdachte Bereiche sowie ein natürlicher Sonnenschutz für die Südwest-Terrasse bzw. den nordöstlichen Zugangsbereich geschaffen. Die Stirnseiten des Obergeschosses zeigen Sonnenschutzelemente in Form von semi-transparenten Lochblechfassaden, die – in Segmente geteilt – mittels einer einfachen Konstruktion mechanisch offenbar sind.

Jede Einheit verfügt über zwei überdachte Stellplätze in einer Garage.

2.3 Wohnbau für JUNGES und BETREUTES Wohnen

Der Wohnbau für JUNGES und BETREUTES Wohnen ist konzeptioniert als Baukörper, der sich der bestehenden Hanglage anpasst. Die in Summe 22 Wohneinheiten sind untergebracht in einem höhenversetzten zweigeschossigen Baukörper. Die Anlage wird gegliedert durch einen zentralen Eingangsbereich, der als barrierefreie Erschließung für das gesamte Bauwerk dient.

Das Abstellen der KFZ erfolgt einerseits auf den an den Außenseiten der Anlage angeordneten Stellplätzen, die direkt von der Ringstraße aus anfahrbar sind, sowie auf einem offenen, halbgeschossig eingegrabenen Parkdeck unterhalb des Baukörpers.

Der Haupteingang wird flankiert von einem Aufenthaltsraum, der direkt in Verbindung mit einer nordwestseitig gelegenen Terrasse und einem Kinderspielfeld steht, um das Zusammentreffen zwischen Alt und Jung, zwischen Besucher:innen und Bewohner:innen an einem zentralen Punkt möglich zu machen.

Die vertikale Erschließung wird über ein zentrales Stiegenhaus mit Aufzug barrierefrei ermöglicht. Die zwischen 59 und 64 m² großen 2-Zimmer-Wohnungen selbst sind ebenfalls durchgängig barrierefrei. Die acht dem betreuten Wohnen zuzurechnenden Wohneinheiten sind zudem mit rollstuhlgerechten Sanitäreinheiten ausgestattet.

Alle Einheiten verfügen über Terrassen oder Balkone, die mit Vordach und einem semitransparenten, verschiebbaren Sonnenschutz aus gestalterisch ansprechenden Lochblech-Elementen ausgestattet sind. Erdgeschosswohnungen erhalten außerdem einen Eigengartenanteil.

Im halbgeschossig eingegrabenen Parkdeck werden den Bewohnern 24 wettergeschützte, überdachte Stellplätze zur Verfügung gestellt. Der Garage zugeordnet liegt ein überdachter, versperrbarer Müllraum, der sowohl über das zentrale Stiegenhaus als auch über die Abfahrtsrampe erreichbar ist.

Hinweis: In diesem Bericht wird das Gebäude für JUNGES und BETREUTES Wohnen generell verkürzt als „Wohnhaus“ bezeichnet.

2.4 Umsetzung

Der Baubeginn des Wohnparks Wolfsbrunn erfolgte im Juni 2018. Die Fertigstellung und der Bezug der Reihenhäuser erfolgten im Herbst 2019, der Bauteil für das Generationenwohnen wurde im Frühjahr 2020 bezogen. Die folgende Abbildung gibt einen Eindruck des Bauprojekts nach dessen Fertigstellung.



Abb. 2: Wohnpark Wolfsbrunn, im Vordergrund der Wohnbau für JUNGES und BETREUTES Wohnen vor den 14 Reihenhäusern, im Hintergrund ein Windpark (Bild: SÜDRAUM)

Die Ausführung von thermisch aktivierten Bauteilen ist bislang im sozialen, geförderten Wohnbau nicht „State-of-the-Art“. Da die Thematik in Zeiten des globalen Klimawandels und der erschwerten Zugänglichkeit natürlicher Ressourcen aber höchst aktuell und relevant ist, tragen Planer:innen und Bauherren hier auch eine große soziale Verantwortung, nachhaltige und klimarelevante Planungsmaßnahmen zu setzen. Gemeinsam mit anderen Fachplaner:innen sowie Vertreter:innen der Industrie und Forschung und unterstützt von der NÖ Wohnbauforschung wurde ein zukunftsweisendes Konzept erstellt und mit der SÜDRAUM eine gemeinnützige Wohnbaugenossenschaft gefunden, mit der dieses Vorreiter-Projekt umgesetzt werden konnte.

Mit der Errichtung des Wohnparks Wolfsbrunn wurde nicht nur ein Zeichen in puncto zukunftsweisender, nachhaltiger Gebäudetechnologie gesetzt. Das Projekt soll auch ein Vorzeigemodell für andere Regionen und gemeinnützige Bauträger sein und somit ein Wegweiser für klimainnovatives, qualitativ hochwertiges und zugleich leistbares Wohnen. Zudem ist die Realisierung des Projekts ein weiterer Schritt in Richtung des standardmäßigen Einsatzes von thermischer Bauteilaktivierung im sozialen Wohnbau.

3. Energiekonzept

Die ganzjährige Konditionierung des Wohnhauses und aller Reihenhäuser wird allein mittels elektrischen Stroms sichergestellt. Für jedes Gebäude sorgt eine Sole-Wasser Wärmepumpe für die Beheizung. Hierbei wird die Sole im Primärkreis der Wärmepumpe mittels Leitung über Tiefenbohrungen erwärmt, also Erdwärme genutzt. Die Bohrpfähle reichen bis in 70 Meter Tiefe. Da auch jedes Reihenhaus über eine eigene Tiefenbohrung und eine eigene Wärmepumpe verfügt, sind die Reihenhäuser damit in Hinblick auf die Wärmeerzeugung voneinander unabhängig.

Während sommerlicher Hitzeperioden werden die Tiefenbohrungen für eine passive Kühlung genutzt. Die Sole wird durch die Bohrpfähle tief ins Erdreich geführt und kühlt sich ab. Aufgrund der großen Registerflächen in den thermisch aktivierten Decken genügen bereits Soletemperaturen im Bereich um 20 °C, um die erforderliche Kühlleistung bereitzustellen. Als Energieaufwand für diese Art der Kühlung wird allein der elektrische Strom für die Umwälzpumpe verwendet.

Die Wärmeverteilung in allen Gebäuden wird generell mittels thermischer Aktivierung der Betondecken sichergestellt. Die Herstellung der Decken erfolgte im ersten Schritt mittels Verlegung von 5 cm dicken Elementdecken – dies sind im Werk vorgefertigte, bewehrte Betonplatten. Auf diese Betonfertigteile wurden Kunststoffrohre mit einem Außendurchmesser von 17 mm verlegt – siehe beispielhaft die folgende Abbildung.



Abb. 3: Auf den Elementdecken verlegte Rohrleitungen der thermischen Bauteilaktivierung (rot) im Bereich der Reihenhäuser

Nach Verlegung der Rohrregister für die thermische Bauteilaktivierung, der Leitungen für die Sensoren, von Lüftungsleitungen und sonstigen erforderlichen Einbauten wurde der Aufbeton eingebracht und damit die jeweilige Decke fertiggestellt. Natürlich standen die Leitungen der Rohrregister während des Betonierens unter Druck, um auf etwaige Leckagen während des Betonier-Vorgangs sofort aufmerksam zu werden.

Die thermische Aktivierung der Decken fällt in die Kategorie der Flächenheizungen und ist aufgrund der niedrigen erforderlichen Heizmitteltemperaturen sehr gut auf die Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen abgestimmt. Im Kühlfall sorgen die sehr großen Registerflächen für erforderliche Kühlmitteltemperaturen, die ungewohnt hoch liegen und somit für eine passive Kühlung bestens geeignet sind.

Die intendierte Nutzung von erneuerbaren Energien für die Beheizung der Gebäude soll im Fall des Wohnparks Wolfsbrunn dadurch umgesetzt werden, dass vorrangig Überschussstrom aus der Windenergienutzung verwendet wird.

In den Reihenhäusern dient die Wärmepumpe sowohl der Bereitstellung der Wärme für die Beheizung des Gebäudes als auch der Deckung des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung.

Im Fall des Wohnhauses ist dieser Ansatz insofern nicht sinnvoll, als aufgrund der dort großen Leitungslängen die Warmwassertemperaturen aus hygienischen Gründen sehr hoch sein müssen. Die zentrale Wärmepumpe sorgt nur für eine Vorerwärmung des Wassers auf etwas über 40 °C. Im Warmwasserspeicher wird dieses Wasser mittels Elektropatronen auf über 60 °C erhitzt und dann in die Zirkulationsleitungen geschickt.

4. Messtechnische Begleitung

Im Zuge der Errichtung des Wohnparks wurden neben ohnehin notwendigen Messgeräten, wie Elektrozählern und Raumthermostaten, weitere Messgeräte zur Erfassung des Verhaltens der haustechnischen Anlagen verbaut. Neben einer Vielzahl von Temperatursensoren sind in diesem Zusammenhang vor allem die Wärmemengenzähler zu nennen.

Die Messwerte werden laufend erhoben und dienen zum einen der Regelung und Überwachung des haustechnischen Gesamtsystems in jedem der Gebäude. Zum anderen wurde ein Teil der zur Verfügung stehenden Daten auf einen eigenen Server gespielt und damit für die in diesem Projekt vorgesehenen Analysen zur Verfügung gestellt. Das Monitoring wird seit Juli 2020 laufend durchgeführt, sodass Auffälligkeiten und Fehler rückgemeldet, analysiert und behoben werden konnten. Diese Hinweise wurden auch für die laufende Optimierung des Gesamtsystems genutzt. Natürlich dient das Monitoring auch der Dokumentation des Langzeitverhaltens der haustechnischen Anlagen. Der Fokus liegt dabei auf dem thermischen Komfort in den Gebäuden und dem Stromverbrauch der Wärmepumpen unter besonderer Berücksichtigung der Ausnutzung von Windüberschussstrom.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die im Rahmen des Monitorings ausgewerteten Messdaten gegeben.

4.1 Wohnhaus

Die Wärmeerzeugung im Wohnhaus wird durch ein System aus Sensoren überwacht, deren Messwerte mittels Internet-Zugriff zu jeder Zeit abgerufen werden können. Darüber hinaus ist es möglich, auch Regelungseinstellungen des Systems durch externen Zugriff zu verändern. Automatisch generierte Warnmeldungen helfen zudem, Auffälligkeiten oder Fehler im Wärmeerzeugungssystem des Wohnhauses rasch zu erkennen und sicher zu lokalisieren.

Die folgende Abbildung zeigt einen Überblick über das Wärmeerzeugungssystem und die gemessenen Werte in einer Form, wie sie vom Computer abrufbar ist.

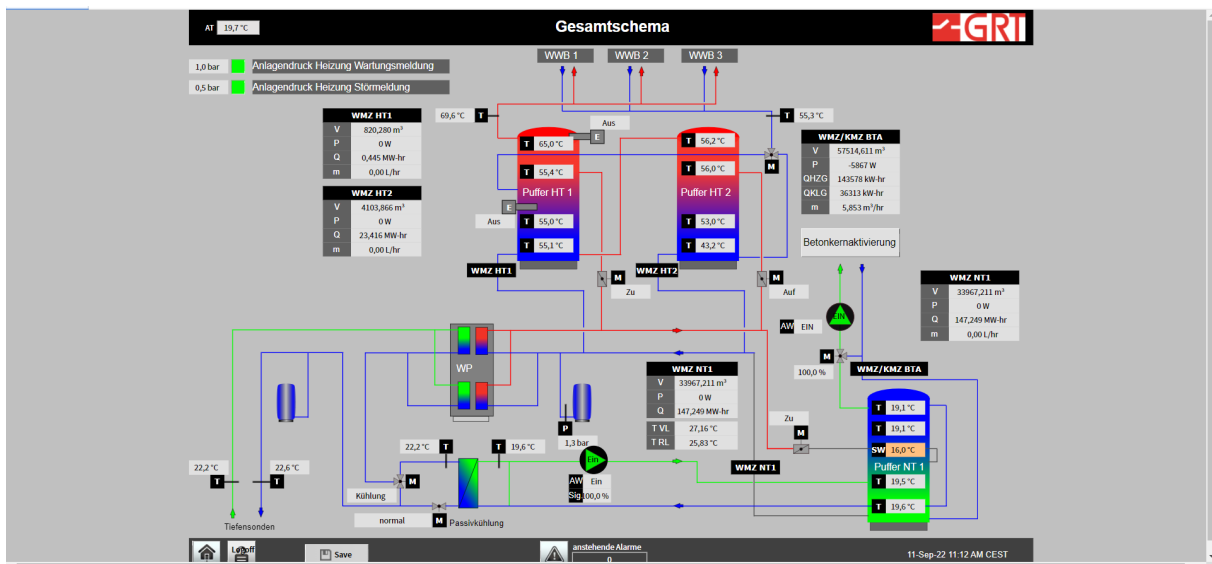


Abb. 4: Bildschirm-Bild zum Gesamtschema des Wärmeerzeugungssystems für das Wohnhaus mit einer Übersicht der erhobenen Messwerte © GRT

Neben der Vielzahl an Sensoren zur Überwachung des Wärmeerzeugungssystems wurden im Zuge der Errichtung des Gebäudes Temperaturfühler in die Decken eingebaut und dort einbetoniert, die zur Regelung benötigt und in der Folge als „Kerntemperaturfühler“ bezeichnet werden. Diese Fühler befinden sich in den Decken aller 22 Wohnungen und von zwei Räumen mit Sondernutzung („Aufenthalts“ und „Betreuereinheit“).

Zwei ausgesuchte Wohnungen werden insofern genauer betrachtet, als neben den Werten der jeweiligen Kerntemperaturfühler auch die von den Raumthermostaten registrierten Temperaturen und die Temperatur der Deckenuntersicht aufgezeichnet und analysiert werden. Die beiden Wohnungen sind in etwa baugleich und unterscheiden sich in baulicher Hinsicht nur dadurch, dass die eine an die Nord- und die andere an die Südfassade angrenzt.

Für das hier dokumentierte Monitoring wurden Messwerte verwendet, die teils in 5-minütigen und teils in ¼-stündigen Abständen aufgezeichnet, gespeichert und täglich auf einen eigenen Server gespielt wurden. Im Rahmen des Monitorings wurden die Tagesdateien regelmäßig vom Server ausgelesen, die Daten einer Plausibilitätsprüfung unterworfen und – soweit notwendig – korrigiert oder gelöscht. Daraufhin wurden die Tagesdateien zu Zeitreihen mit Daten in ¼-stündigen Abständen umgerechnet. Diese Dateien liefern die Information über Monate, Heiz- und Kühlsaisonen sowie über die gesamte Dauer des Monitorings und liegen allen folgenden Analysen und Darstellungen zugrunde.

Die folgende Tabelle listet die für das Wohnhaus ausgewählten und im Zuge des Monitorings verwerteten Messgrößen grob zusammengefasst auf.

	gemessene Größe	Anmerkungen
Temperatursensoren	Außenlufttemperatur	
	Temperatur Raumfühler	in der nord- und südseitigen Wohnung
	Betonkerntemperatur	in der nord- und südseitigen Wohnung
	Oberflächentemperatur Deckenuntersicht	in der nord- und südseitigen Wohnung
	Vorlauftemperatur Warmwasser	

	Rücklauftemperatur Warmwasser	
Stromzähler	Stromverbrauch Wärmepumpe	enthält auch den Hilfsstrom für die Umwälzpumpen
	Stromverbrauch Warm- wasser: Heizpatrone 1	im Warmwasserspeicher HT1
	Stromverbrauch Warm- wasser: Heizpatrone 2	im Warmwasserspeicher HT1
Wärmemengenzähler	Wärmemenge / Zu- und Abflusstemperatur / Durchfluss	Position zwischen Wärmepumpe und Niedertemperaturspeicher NT
		Position zwischen Wärmepumpe und Warmwasserspeicher HT2
		Position zwischen Nieder- temperaturspeicher NT und der Ver- teilung zu den Registern der Bauteilaktivierung
		Position zwischen Verteilung und den Rohrregistern der Wohnung an der Nordfassade
		Position zwischen Verteilung und den Rohrregistern der Wohnung an der Südfassade

Tab. 1: Wohnhaus: Übersicht über die im Monitoring verwendeten Daten

Die Wärmemengenzähler registrieren neben den Temperaturen des zu- und abfließenden Heizmittels den Durchfluss, woraus sich die jeweils aktuelle Stellung des Regelventils ablesen lässt. Zudem werden als redundante Information die aktuelle Wärmeleistung sowie der Stand des Wärmemengenzählers angegeben.

Natürlich ist auch ein Signal in Hinblick auf die Situation des Stromangebots aus dem Windpark („Windsignal“) notwendig, um die zentrale Thematik des Monitorings abarbeiten zu können. Dieses Signal wurde vom Stromanbieter generiert und geht sowohl in die Regelung der Wärmepumpen als auch in die Daten des Monitorings ein.

4.2 Reihenhäuser

In allen 14 Reihenhäusern stehen die Daten der von den Raumfühlern in den Wohnküchen im Erdgeschoss registrierten Temperaturen zur Auswertung zur Verfügung. Die Wohnküchen befinden sich jeweils im Erdgeschoss und sind mittels großflächiger Fenster und Fenstertüren nach Süden hin geöffnet.

Zwei Reihenhäuser wurden ausgewählt und für ein sehr detailliertes Monitoring ausgerüstet. Auch hier wird der Fokus auf die Wohnküche im Erdgeschoss gelegt. Neben dem Raumfühler geben weitere Temperatursensoren Aufschluss über die sich einstellende Temperaturverteilung innerhalb der thermisch aktivierten Decke. Zudem liefert ein an der Oberfläche des Estrichs eingelassener Sensor Hinweise zur Oberflächentemperatur des Fußbodens.

Der Schwerpunkt des Monitorings in den beiden Reihenhäusern liegt auf einer detaillierten Untersuchung des thermischen Verhaltens des Heizregisters 6. Im Gegensatz zu den beiden anderen Heizregistern in der Decke der Wohnküche wird die Wärmezufuhr in das Heizregister 6 durch den Raumthermostat geregelt. Die folgende Abbildung zeigt eine Schemaskizze über die in der Decke der Wohnküche von Reihnhaus RH_M einbetonierten Rohrregister und die in der Decke befindlichen Temperatursensoren.

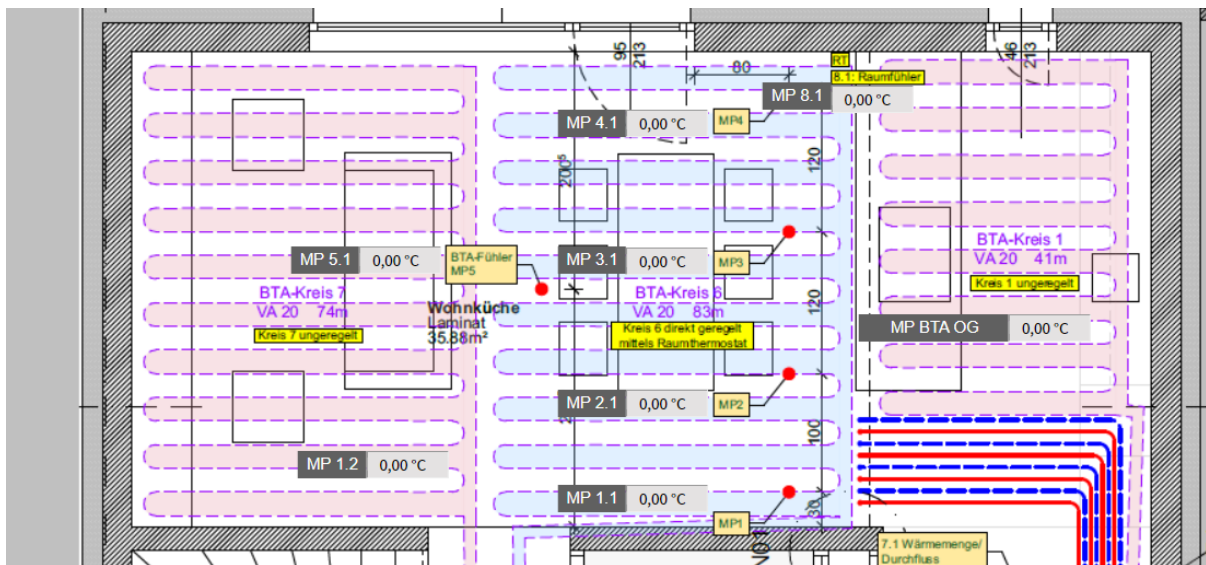


Abb. 5: Reihenhaus RH_M: Schemaskizze der Rohrregister in der Decke der Wohnküche im EG und der Positionen der Temperatursensoren; Bildschirmbild des Überwachungssystems © GRT

Der besonders interessierende Heizkreis 6 ist in Abb. 5 hellblau hinterlegt. Die roten Punkte stellen die Positionen der Temperatursensoren dar. Vier dieser Sensoren liegen direkt am Registerrohr an und sind in Abb. 5 als nahezu äquidistante Punktreihe im Bereich des rechten Rands von Heizkreis 6 erkennbar. Aus den Werten dieser Sensoren – sie werden nachfolgend verkürzt als „Rohrtemperaturen“ bezeichnet – kann auf die Temperatur des Heizmittels rückgeschlossen werden, wodurch eine Aussage über die Abkühlung des Heizmittels beim Durchfließen des Rohrregisters erhalten werden kann. Eine genauere Beschreibung dieses Messansatzes ist in Abschnitt 5.4.2 „Das Rohrregister als Wärmetauscher“ als Teil der Beschreibung des wissenschaftlichen Monitorings zu finden.

Der fünfte Temperatursensor liegt in etwa in Raummitte und registriert die sog. „Kerntemperatur“ der Betondecke. Die Werte dieses Sensors werden nicht nur im Rahmen des Monitorings verarbeitet, sondern stellen auch einen wichtigen Parameter für die Regelung der Wärmezufuhr in die Decke dar.

In Reihenhaus RH_M wurden zusätzlich zwei Wärmefluss-Sensoren an der Deckenuntersicht aufgeklebt. Diese Sensoren messen sowohl die Wärmestromdichte, d. h. den flächenbezogenen Wärmestrom, als auch die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht. Die Position dieser Sensoren liegt jeweils direkt unterhalb des Sensors für die „Rohrtemperatur“ und somit nahezu unterhalb des beheizten oder gekühlten Rohrs. Die Wärmestromdichten werden in der Nähe der Innenwand (unterster Punkt MP1 der Punktreihe in Abb. 5) und in der Nähe von Außenwand und Fenstertür (oberster Punkt MP4 der Punktreihe in Abb. 5) gemessen. Diese Messergebnisse sollen Aufschluss über die Wärmetransportvorgänge an der Deckenuntersicht und deren Beschreibung im Rahmen von Berechnungsansätzen liefern. Genauere Informationen dazu sind in Abschnitt 5.4.1 „Wärmestromdichte und Wärmeübergangskoeffizient“ zu finden.

Die folgende Abbildung zeigt die entsprechende Schemaskizze für Reihenhaus RH_S.

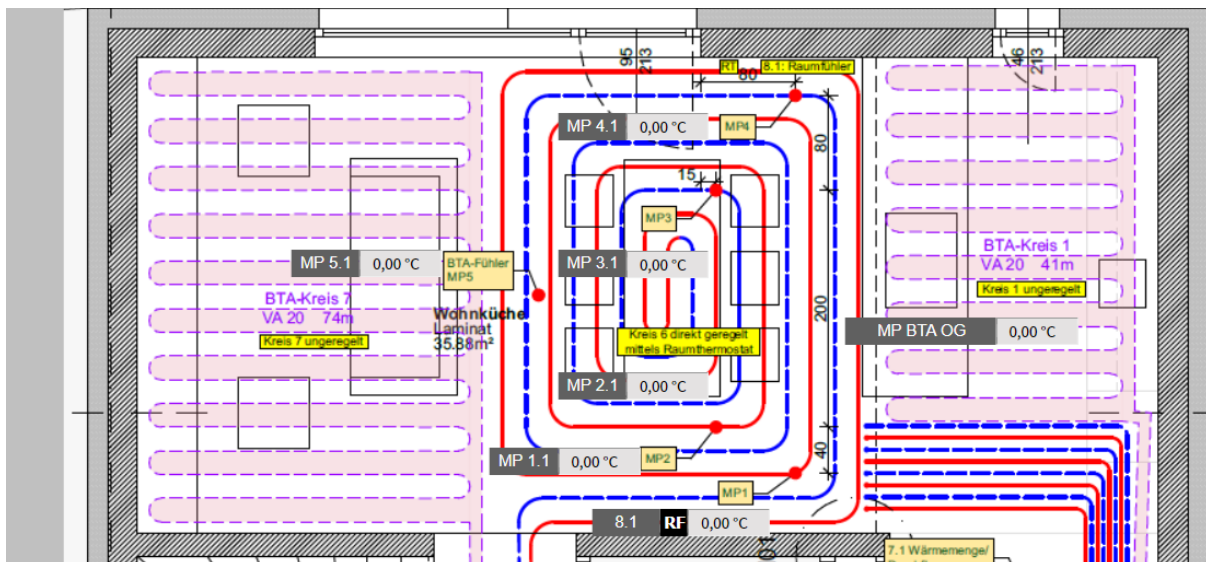


Abb. 6: Reihenhause RH_S: Schemaskizze der Rohrregister in der Decke der Wohnküche im EG und der Positionen der Temperatursensoren; Bildschirmbild des Überwachungssystems © GRT

Ersichtlich unterscheidet sich das Heizregister 6 in Reihenhause RH_S von jenem in Reihenhause RH_M darin, dass die Verlegung der Rohre nicht mäanderförmig, sondern schneckenförmig erfolgte.

Anmerkung: Die im Folgenden verwendeten Bezeichnungen „RH_M“ und „RH_S“ sollen intuitiv auf die Art der Rohrverlegung in Form von Mäandern bzw. Schnecke verweisen verweisen.

Auch in Reihenhause RH_S werden vier Rohrtemperaturen und die Kerntemperatur der Betondecke gemessen. Die Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht wird nur an einer Stelle in der Nähe der Innenwand (MP1 in Abb. 6) gemessen.

Die folgende Tabelle listet die für die Reihenhäuser ausgewählten und im Zuge des Monitorings verwerteten Messgrößen grob zusammengefasst auf.

	gemessene Größe	Anmerkungen
Temperatursensoren	Temperatur Raumfühler	Wohnküche in allen Reihenhäusern
	Betonkerntemperatur	in RH_M und RH_S
	Oberflächentemperatur Deckenuntersicht	Position MP1 und MP4 in RH_M; Position MP1 in RH_S
	Temperatur Estrichoberfläche	Position in Raummitte der Wohnküche von RH_M und RH_S
	Rohrtemperaturen	Position MP1, MP2, MP3 und MP4 in RH_M und RH_S
Wärmestrom-Sensor	Wärmestromdichte und Temperatur	Position Deckenuntersicht bei MP1 und MP4 in RH_M
Stromzähler	Stromverbrauch Wärmepumpe	Summe aus Wärmeerzeugung, Warmwasserbereitung und Hilfsstrom für die Pumpe
Wärmemengenzähler	Wärmemenge / Zu- und Abflusstemperatur / Durchfluss	Position zwischen Wärmepumpe und Heizkreis 6 in RH_M und RH_S

Tab. 2: Reihenhäuser: Übersicht über die im Monitoring verwendeten Daten

Zu beachten ist, dass die beiden Wärmemengenzähler nicht die von der Wärmepumpe erzeugte Wärme messen, sondern nur jenen Anteil der Wärme, die dem geregelten Heizkreis 6 in der Decke der Wohnküche zukommt.

5. Ergebnisse des Monitorings

Für das Monitoring relevante und weiter verarbeitbare Daten liegen seit 13. Juli 2020 vor. Da im Zuge der Auswertung der Daten immer wieder monatliche Werte von besonderem Interesse sind, wurden dem hier beschriebenen Monitoring Daten vom 1. August 2020 bis inklusive 31. Juli 2022 zugrunde gelegt. Das Zeitintervall für die Datenerfassung und -auswertung hat somit eine Länge von zwei Jahren. Im Fall, dass Daten nur in einem kürzeren Zeitintervall zur Verfügung standen, wird dies in der Folge explizit angeführt. Datenlücken, wie sie in Folge von Ausfällen der Messsensoren und von Schwierigkeiten bei der Datenübertragung auftraten, sind durch Lücken im jeweilig gezeigten Kurvenverlauf erkennbar.

Die Aufzeichnung von Messdaten erfolgte im zeitlichen Abstand von 5 Minuten. Die Analyse der Daten zeigt jedoch, dass die Daten der Stromzähler, alle Daten der Wärmemengenzähler sowie die Aufzeichnung der Außenlufttemperatur im Abstand von 15 Minuten aufgenommen wurden. Um eine Konsistenz zu erreichen, wurden alle Messdaten auf 15-Minuten-Werte umgerechnet und diese Datenbasis den weiteren Analysen zugrunde gelegt.

Die vorliegende, sehr hohe Zeitauflösung führt in Zusammenspiel mit der großen Zahl an verschiedenen Sensoren und der sehr langen Beobachtungsdauer zu einer extrem großen Datenmenge. Diese Zeitauflösung erscheint vor dem Hintergrund der bei thermischer Aktivierung eher langsam ablaufenden Vorgänge vorerst nur störend und nicht weiter argumentierbar zu sein. Im Zuge der Datensichtung erwies sich die hohe Zeitauflösung aber insofern als hilfreich, da fehlerhafte Daten, wie z. B. kurzzeitige Temperatursprünge leicht und zweifelsfrei erkannt und eliminiert werden konnten.

Die erhobenen Daten wurden täglich in einem vereinbarten Format auf einen Server gespielt, auf den mit einer Zugangsberechtigung zugegriffen werden kann. Im Zuge der Auswertung wurden in einem ersten Schritt Tagesdaten zu Datensätzen, die jeweils eine Kalenderwoche abdecken, zusammengespielt. Im Zuge dieses Zusammenspiels wurden Fehler in der Datenstruktur, wie fehlende oder doppelte Datenzeilen gesucht, erkannt und behoben. Im zweiten Schritt erfolgten eine Plausibilitätsprüfung der Daten und die Elimination von fehlerhaften Daten. Obwohl sich diese Arbeitsschritte als zumeist aufwändig herausstellten, wurden sie konsequent abgearbeitet, da fehlerhafte Messdaten vor allem bei nachfolgenden statistischen Auswertungen verfälschte Ergebnisse liefern, die im Nachhinein kaum mehr erkannt werden können.

In weiteren Arbeitsschritten wurden die Wochendateien zu Monatsdateien und diese in der Folge zu Jahresdateien und Dateien, die den gesamten Beobachtungszeitraum von zwei Jahren abdecken, zusammengefügt. Diese Dateien bilden die Grundlage für alle in der Folge gezeigten und diskutierten Ergebnisse des Monitorings.

5.1 Thermischer Komfort

Die Frage des thermischen Komforts im Wohnhaus und in den Reihenhäusern hat für das Monitoring insofern große Bedeutung als Konzepte in Hinblick auf den sorgsam Umgang mit Energie, die Vermeidung fossiler Energieträger und Zukunftsfähigkeit nur dann erfolgreich sein werden, wenn sie gleichzeitig zumindest für den gewohnten Komfort – besser aber für eine Komfortverbesserung – im Vergleich zu konventionellen Planungsentwürfen sorgen und damit von den Nutzer:innen mitgetragen werden.

Aufgrund des Messkonzepts stehen allein die von Temperatursensoren gemessenen Werte für eine Beurteilung des thermischen Komforts zur Verfügung. In diesem Zusammenhang sind vor allem die von den Raumtemperaturfühlern angezeigten Werte von Interesse.

Um den Umfang der Daten einzugrenzen und damit die Übersicht zu wahren, werden im Wohnhaus nur die Raumfühlertemperaturen für zwei ausgewählte Wohnungen ausgewertet und analysiert.

Bei den Reihenhäusern werden hingegen alle Häuser insofern betrachtet, als die von den Temperatursensoren registrierten Werte jeweils in der Wohnküche im EG ausgewertet und gezeigt werden. Diese bei 14 Häusern aufwändige Vorgangsweise macht Sinn, da die Reihenhäuser baugleich und nahezu gleich orientiert sind. Unterschiedliche Ergebnisse zeigen somit den Einfluss des

Nutzer:innen-Verhaltens in Hinblick auf die Einstellung von Vorzugstemperaturen, aber auch in Hinblick auf das Lüftungsverhalten und den Einsatz der Verschattungselemente.

Bei zweien der 14 Reihenhäuser – sie seien in der Folge RH_M und RH_S genannt – können aufgrund des gezielten Einbaus weiterer Sensoren weiterreichende Erkenntnisse gewonnen werden. In Zusammenhang mit dem thermischen Komfort können aufgrund der Messung der Oberflächentemperatur der Deckenunterseite der thermisch aktivierten Decke in der Wohnküche (EG) und von einem Sensor unterhalb des Fußbodenbelags Erkenntnisse über die im Raum auftretende Temperaturschichtung erhalten werden.

Neben dem thermischen Komfort während der Heizsaison und jenem während sommerlicher Hitzeperioden interessieren natürlich auch die thermischen Verhältnisse innerhalb der Gebäude in ihrem zeitlichen Verlauf über die gesamte Dauer des Monitorings. An den Beginn sollen hier deshalb die Auswertungen der Temperaturmessungen von August 2020 bis einschließlich Juli 2022 gestellt werden.

5.1.1 Wohnhaus

Im Wohnhaus wurden von den 22 Wohnungen nur zwei einem genaueren Monitoring unterworfen. Die beiden Wohnungen unterscheiden sich in Hinblick auf Geometrie und Bauweise lediglich darin, dass die eine süd- und die andere nordorientiert ist.

Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der von den Raumfühlern in den beiden Wohnungen registrierten Temperaturen über die gesamte Zeitspanne des Monitorings.

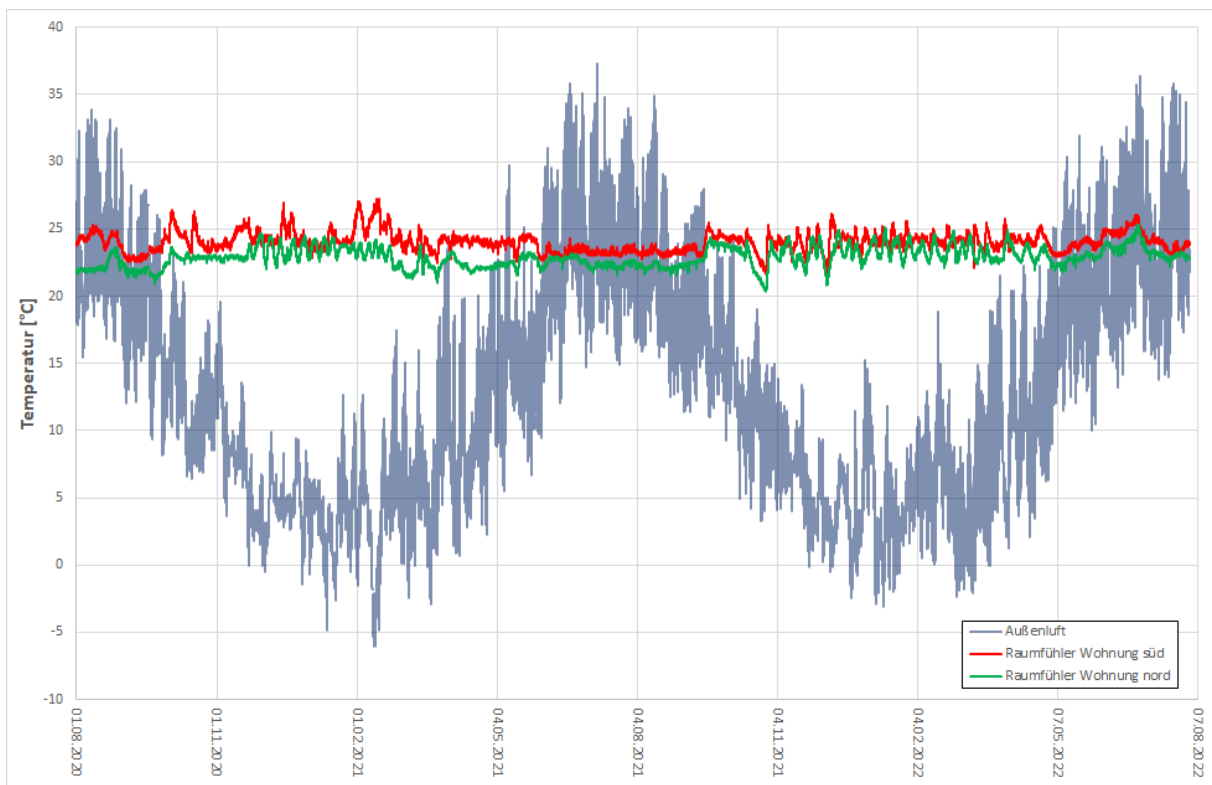


Abb. 7: Wohnhaus: Zeitlicher Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen von August 2020 bis Juli 2022 sowie Temperatur der Außenluft

Es zeigt sich, dass die von den Raumfühlern in den beiden Wohnungen registrierten Temperaturen während des gesamten Beobachtungszeitraums nur in einem relativ schmalen Temperaturintervall schwanken. Eine Korrelation zwischen der Außenlufttemperatur und den Innenlufttemperaturen ist nicht auszumachen.

Der über den gesamten Beobachtungszeitraum von zwei Jahren gebildete Mittelwert der vom Raumfühler gemessenen Temperatur liegt in der südseitig gelegenen Wohnung bei 24,1 °C. Der entsprechende Mittelwert für die nordseitige Wohnung liegt mit 22,9 °C deutlich niedriger.

Anmerkung: Dieser Unterschied darf nicht nur auf die Orientierung der Wohnungen zurückgeführt werden. Wie eine Befragung der Bewohner:innen zeigte, wurde in der nordseitig gelegenen Wohnung versucht, mittels Regelung am Thermostat die Raumtemperatur niedrig zu halten.

Die absoluten Minima der Raumtemperatur wurden in beiden Wohnungen während der Heizsaison 2021/22 erreicht. In der nordseitig gelegenen Wohnung tritt das absolute Minimum der vom Raumfühler registrierten Temperatur am 27. Oktober 2021 mit 20,4 °C auf. In der südseitig gelegenen mit 21,2 °C am 6. Dezember etwas später. Eine genauere Analyse zeigt, dass sich der Temperaturabfall in beiden Fällen zweifelsfrei aufgrund von lange unbemerkt gebliebenen Ausfällen der Wärmepumpe und dem daraus resultierenden Ausfall der Wärmeversorgung eingestellt hat. Eine detaillierte Schilderung kann im Anhang 8.1 nachgelesen werden.

Die absoluten Maxima der Raumtemperatur in der südseitig gelegenen Wohnung treten während der Heizsaison 2020/21 auf und sind offenkundig auf Schwierigkeiten bei der Regelung bzw. der Thermostateinstellung zurückzuführen. Ein Blick auf die Heizsaison 2021/22 zeigt, dass diese Schwierigkeiten offenbar behoben wurden.

In der nordseitig gelegenen Wohnung wird das absolute Maximum der Temperatur am 28. Juni 2022 mit 25,3 °C erreicht. Ein Blick auf den rechten Rand von Abb. 7 zeigt, dass im Juni in beiden Wohnungen die Raumtemperatur langsam ansteigt. Dies war nicht auf die im Juni 2022 aufgetretene, extreme Hitzeperiode zurückzuführen, sondern ergab sich aus dem Umstand, dass die Kühlflüssigkeit aufgrund eines geschlossenen Regelungsventils nicht in die Rohrregister der Wohnungen gelangen konnte, womit alle Wohnungen in dieser Zeit ungekühlt blieben. Die Behebung dieses Fehlers führte zu dem in Abb. 7 gut sichtbaren Abfallen der Raumtemperaturen.

Das thermische Verhalten der beiden Wohnungen während des gesamten Beobachtungszeitraums kann komprimierter und leichter interpretierbar dargestellt werden, wenn die vom Raumfühler registrierten Temperaturen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur als Punktwolke dargestellt werden. Die folgende Abbildung zeigt eine solche Darstellung für die nordorientierte Wohnung, wobei alle ¼-stündlichen Werte in die Punktwolke aufgenommen wurden.

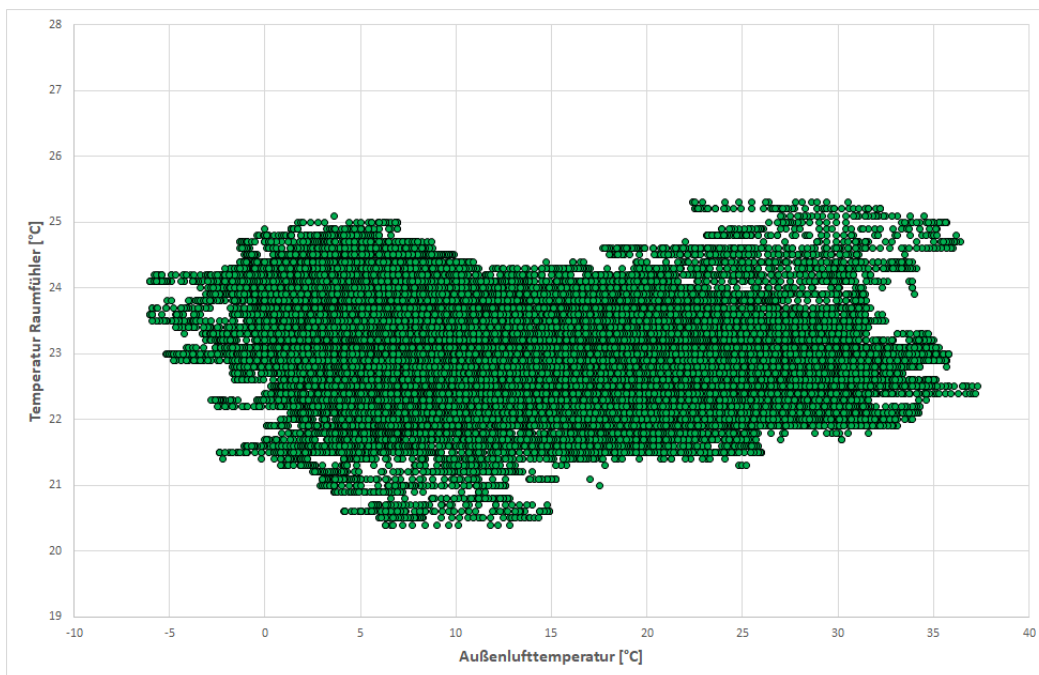


Abb. 8: Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die nordorientierte Wohnung

90 % aller im gesamten Beobachtungszeitraum vom Raumfühler registrierten Temperaturen liegen zwischen 21,8 °C und 24,2 °C. Das solcherart definierte Temperaturband ist somit mit 2,4 K unerwartet schmal.

Anmerkung: Die Darstellung in Abb. 8 lässt keine Rückschlüsse auf die Häufigkeitsverteilung zu. Die obigen Aussagen zum Temperaturband wurde aus einer Detailuntersuchung unter Verwendung statistischer Methoden abgeleitet.

Zudem fällt auf, dass innerhalb des Beobachtungszeitraums von 2 Jahren kein einziger Wert registriert wurde, der als zu kalt oder zu warm interpretiert werden könnte.

Die etwas tieferen Temperaturen bei Außenlufttemperaturen zwischen ca. 5 und 15 °C können – wie bereits vermerkt – Ausfällen der Wärmepumpen im Oktober und November 2021 zugeordnet werden. Die etwas über 25 °C liegenden Raumtemperaturen bei höheren Außenlufttemperaturen ergeben sich aufgrund der angesprochenen Schwierigkeiten mit dem Regelungsventil im Juni 2022.

Die folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperatur von der Außenlufttemperatur für die südseitig gelegene Wohnung.

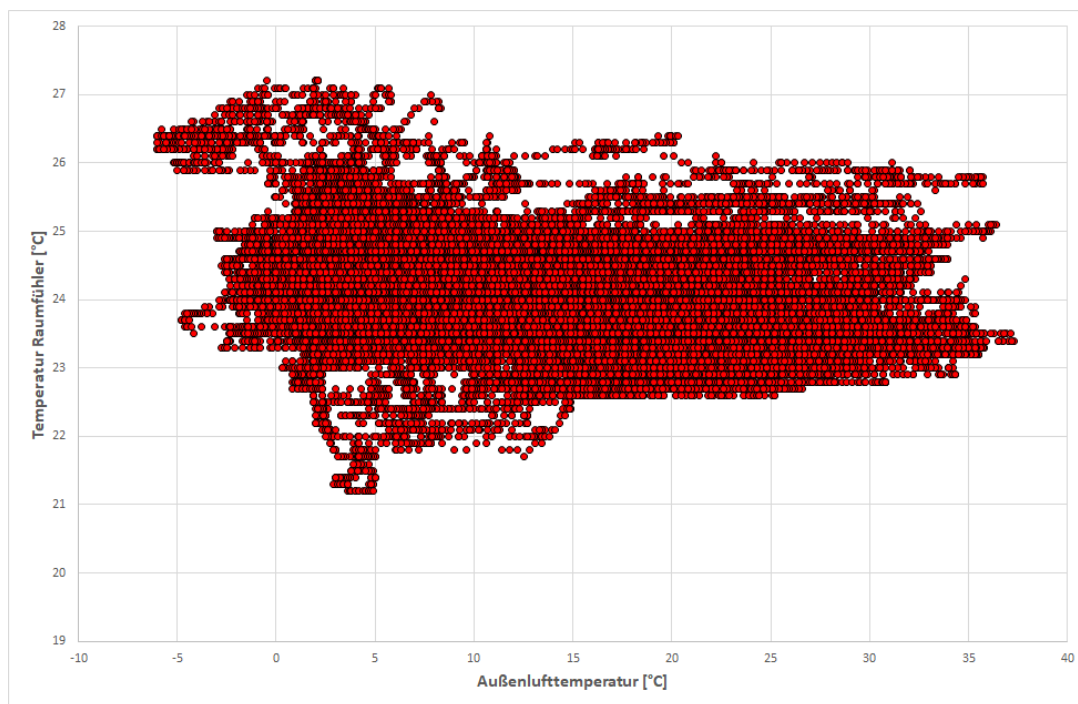


Abb. 9: Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die südorientierte Wohnung

Auch hier zeigt sich ein zu Abb. 8 ähnliches Bild. Zwar liegt die Punktwolke ca. 1,0 K höher als jene von Abb. 8; das Temperaturband, in dem sich 90 % der Messwerte befinden, beträgt ebenfalls 2,4 K und reicht von 22,8 °C bis 25,2 °C. Die kühleren Temperaturen lassen sich auch hier mit den Ausfällen der Wärmepumpe im Oktober und November 2021 begründen. Die höchsten Temperaturen wurde in der südseitig gelegenen Wohnung bei tiefen Außentemperaturen registriert und sind der Heizsaison 2020/21 zuzuordnen – siehe Abb. 7.

Neben der „Raumtemperatur“, die hier mit der vom Raumfühler gemessenen Temperatur gleichgesetzt wird, beeinflusst natürlich auch die Temperaturverteilung im Raum den thermischen Komfort. Um einen groben Eindruck zu den sich im Raum einstellenden Temperaturen zu gewinnen, wurden in den beiden Wohnungen neben der Temperatur des Raumfühlers auch die Oberflächentemperatur an der Deckenuntersicht gemessen. Die folgende Abbildung zeigt die Raumtemperatur und die

Oberflächentemperatur der Decke in der südseitig orientierten Wohnung über den gesamten Beobachtungszeitraum.

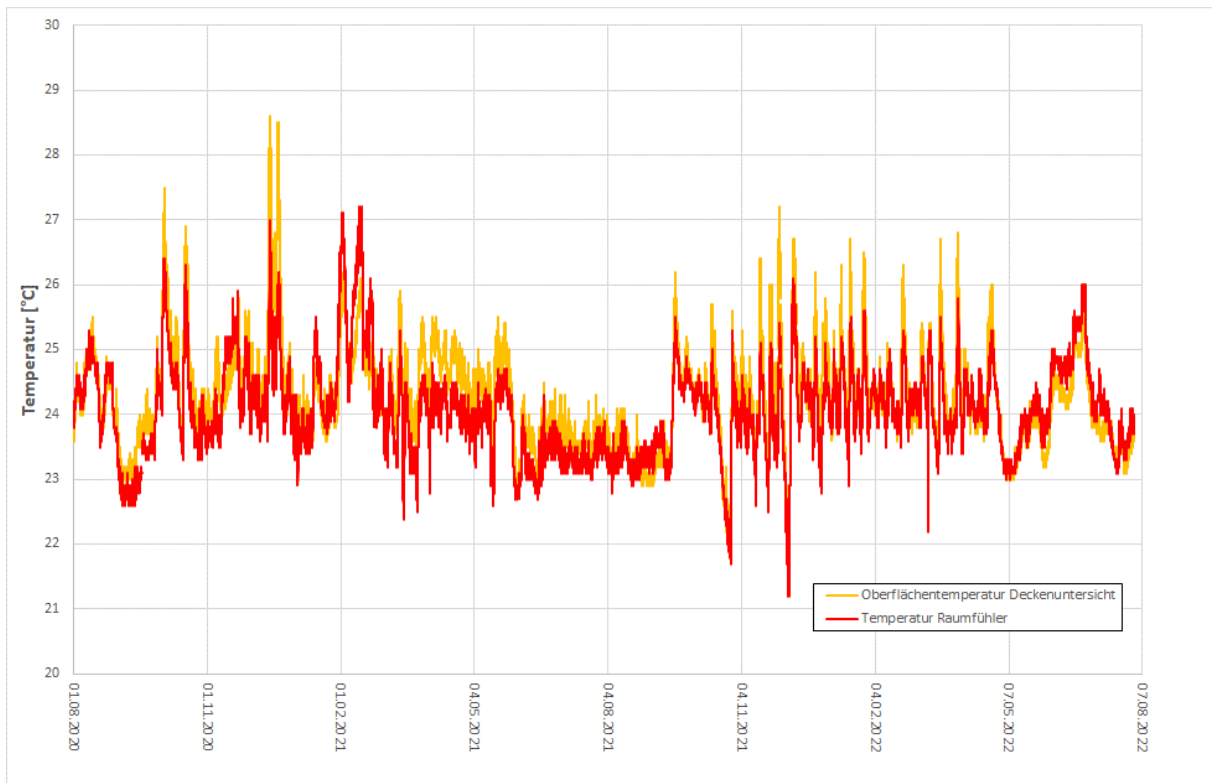


Abb. 10: Südseitige Wohnung: zeitlicher Verlauf der Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur

Wie Abb. 10 zeigt, liegen die gemessenen Oberflächentemperaturen an der Deckenuntersicht und die zum gleichen Zeitpunkt vom Raumfühler registrierten Temperaturen nahe beieinander. Die Darstellung im Zeitbereich erlaubt es allerdings nicht, fundierte Aussagen zur Temperaturverteilung zu treffen. Es ist daher notwendig, die Differenz zwischen Oberflächentemperatur und Raumtemperatur zu errechnen und die so erhaltenen Werte einer statistischen Analyse zu unterwerfen. Das Ergebnis einer solchen Analyse ist in folgender Abbildung anhand eines Histogramms dargestellt.

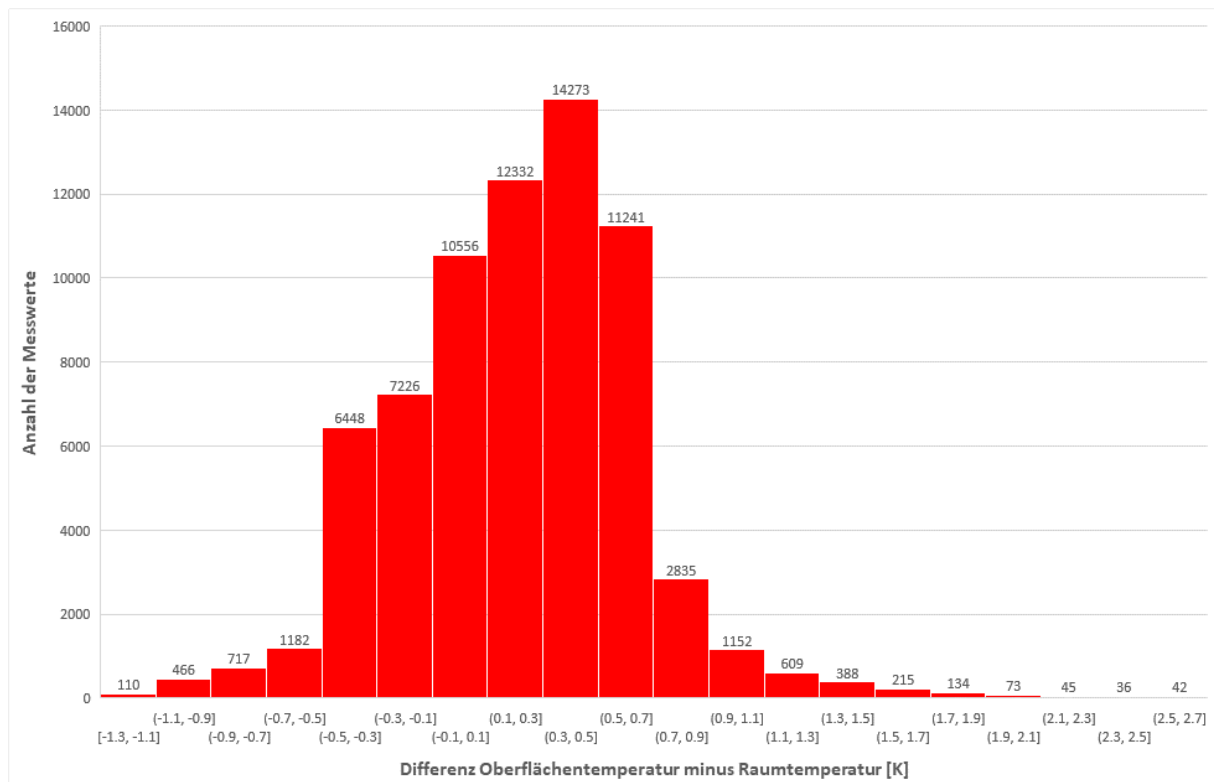


Abb. 11: Südseitige Wohnung: Histogramm der Differenz von Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur für den gesamten Beobachtungszeitraum

Es zeigt sich, dass die errechneten Temperaturdifferenzen sowohl negative als auch positive Werte annehmen. Zwischen einer Temperaturdifferenz von $-0,7$ K, d. h. einer kühleren Decke im Kühlfall und $+0,7$ K, d. h. der erwärmten Decke im Heizfall, liegen bereits 90 % aller Messwerte.

Als wichtiges Ergebnis der Analyse stellt sich somit heraus, dass im Beobachtungszeitraum von zwei Jahren die Unterschiede zwischen Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke und der Raumtemperatur überwiegend kleiner als $0,7$ K sind.

Größere Unterschiede ergeben sich im Kühlfall nur selten. Das Maximum der Abweichung von der Raumtemperatur stellt sich mit $-1,3$ K ein.

Im Heizfall ist die gemessene Oberflächentemperatur bis zu maximal $2,6$ K höher als die vom Raumfühler registrierte Temperatur. Die Verteilung in Abb. 11 zeigt aber, dass solche Situationen sehr seltene Ausnahmen darstellen.

5.1.2 Reihenhäuser

Die Untersuchung der thermischen Verhältnisse in den Reihenhäusern ist generell auf die Wohnküche im Erdgeschoss fokussiert. Die vom Raumfühler registrierten Temperaturen stehen in den zwei genauer untersuchten Reihenhäusern RH_M und RH_S über den gesamten Beobachtungszeitraum von zwei Jahren zur Verfügung. Die folgende Abbildung zeigt die registrierten Temperaturen vor dem Hintergrund des zeitlichen Verlaufs der Außenlufttemperatur.

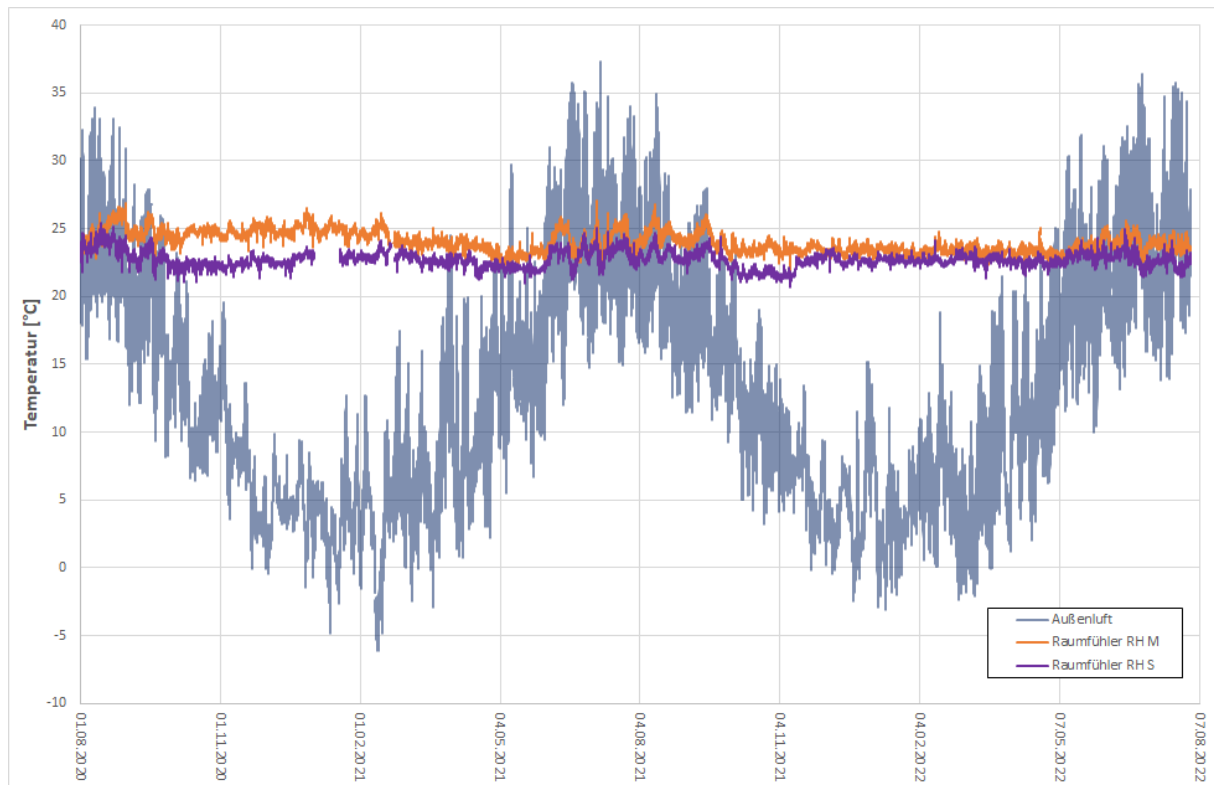


Abb. 12: Reihenhäuser RH_M und RH_S: Zeitlicher Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen und Verlauf der Außentemperaturen von August 2020 bis Juli 2022

Auch für die Wohnküchen der untersuchten Reihenhäuser zeigt sich deutlich, dass die Raumtemperatur ganzjährig nur wenig schwankt und von den Jahreszeiten nahezu unabhängig ist. Die registrierten Temperaturen sind im ersten Jahr in Reihnhaus RH_M deutlich höher als im Reihnhaus RH_S. Im zweiten Jahr gleichen sich die beiden Temperaturverläufe an. Die über beide Jahre gemittelte Raumtemperatur liegt in der Wohnküche des Reihenhauses RH_M bei 24,0 °C. Der entsprechende Mittelwert liegt beim Reihnhaus RH_S mit 22,7 °C deutlich niedriger. Es zeigt sich somit, dass Nutzerwünsche in Hinblick auf die Solltemperatur durch entsprechende Einstellungen an der Wärmepumpe durch das System erfüllt werden.

Wie bereits bei den beiden Wohnungen im Wohnhaus soll auch für die Wohnküchen der beiden Reihenhäuser die Analyse insofern vertieft werden, als die Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von den zur gleichen Zeit registrierten Außenlufttemperaturen untersucht wird. Zudem geben statistische Auswertungen Auskunft über die Streuung der Messwerte.

Die folgende Abbildung zeigt die Punktwolke der vom Raumfühler in der Wohnküche von Reihnhaus RH_M registrierten Temperaturen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur.

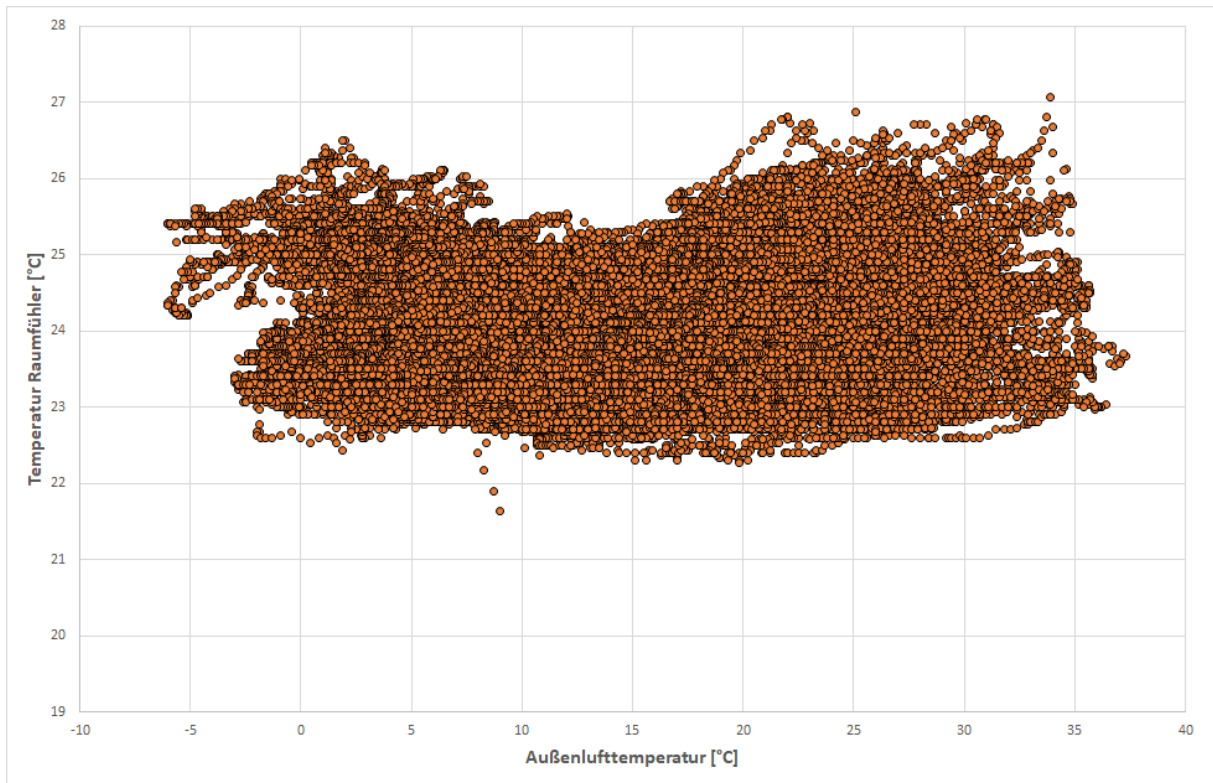


Abb. 13: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_M*

Der Vergleich mit Abb. 8 und Abb. 9 zeigt vorerst, dass hier offenbar höhere Raumtemperaturen im Sommer auftreten. Allerdings wird die von der ÖNORM B8110-3 (2) über lange Jahre festgesetzte Obergrenze der Temperatur von 27,0 °C nur von einem einzigen Messwert geringfügig überschritten. Die derzeit gültige Obergrenze der sommerlichen Raumtemperatur nach der OIB-Richtlinie 6:2019 (3) liegt für den Standort Sommerein bei 29,1 °C und wird bei weitem nicht erreicht.

Die statistische Auswertung führt zur Aussage, dass 90 % aller vom Raumfühler registrierten Temperaturen in einem Temperaturband zwischen 22,9 °C und 25,3 °C liegen. Die Breite des Temperaturbandes liegt somit in der gleichen Größenordnung wie jene für die beiden Wohnungen im Wohnhaus.

Die folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der vom Raumfühler in der Wohnküche von Reihenhaus RH_S registrierten Temperaturen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur.

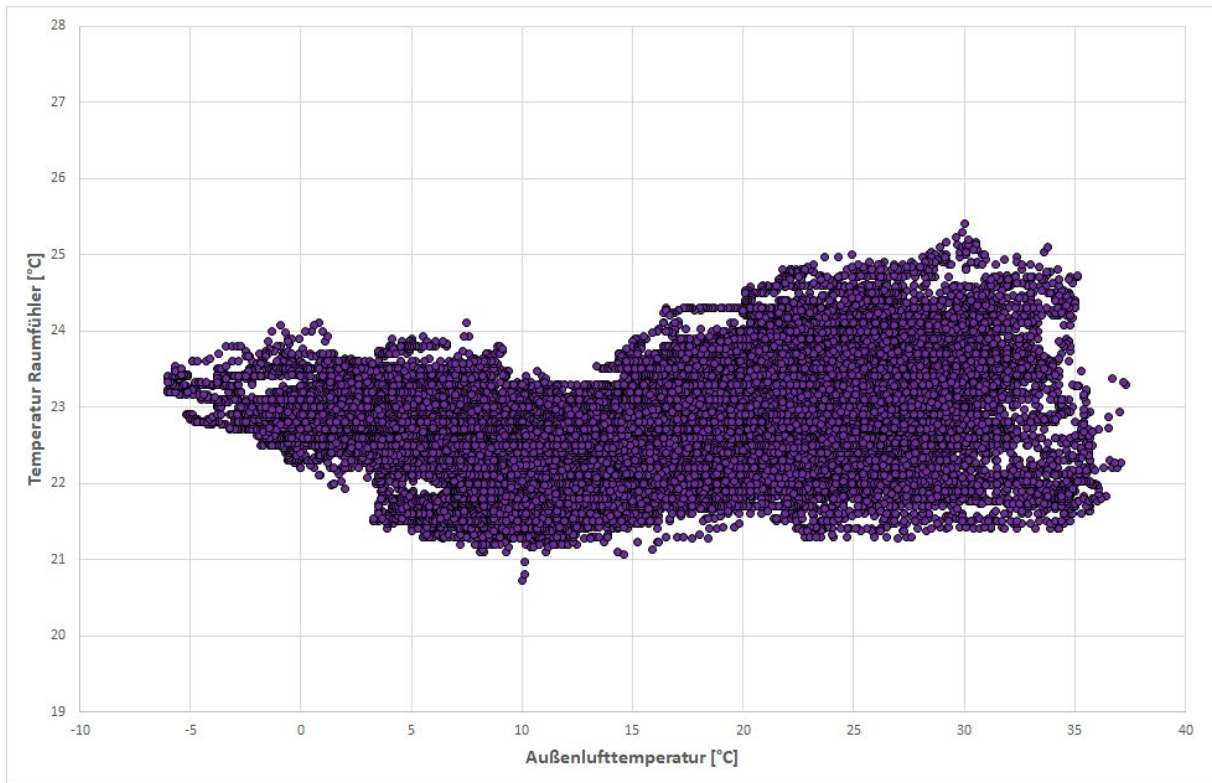


Abb. 14: Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_S

Ersichtlich ist die Streuung der vom Raumfühler registrierten Temperaturen deutlich kleiner als bei Reihenhaus RH_M. Lediglich bei hohen Außenlufttemperaturen – also im Sommer – wird das Temperaturband breiter. Dennoch wird auch im Hochsommer eine Raumtemperatur von 25 °C nur in ganz seltenen Fällen geringfügig überschritten.

90 % aller vom Raumfühler in der Wohnküche von RH_S registrierten Temperaturen liegen in einem Temperaturband zwischen 21,8 °C und 23,7 °C. Die Breite des Temperaturbandes liegt damit bei 1,9 K und ist mit Abstand von allen bisher untersuchten Räumen am schmalsten. Somit zeigt sich, dass mit dem im Wohnpark Wolfsbrunn umgesetzten Konzept der Konditionierung von Gebäuden die Temperaturkonstanz selbst über 2 Jahre extrem hochgehalten werden kann.

Natürlich sind für die Reihenhäuser auch die sich in den Wohnküchen einstellenden Temperaturverteilungen von Interesse. In Reihenhaus RH_M wurden neben der durch den Raumfühler gemessenen Raumtemperatur auch die Oberflächentemperatur an zwei Stellen der Deckenuntersicht sowie die Temperatur an der Oberseite des Estrichs im Fußboden durch Temperatursensoren ermittelt.

Da von der Estrichtemperatur in guter Näherung auf die Oberflächentemperatur des Fußbodens rückgeschlossen werden kann (Näheres dazu siehe Anhang 8.2), stehen somit neben der vom Raumfühler registrierten Temperatur auch die Oberflächentemperaturen von thermisch aktivierter Decke und vom Fußboden zur Verfügung. Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf dieser drei Größen über den gesamten Beobachtungszeitraum.

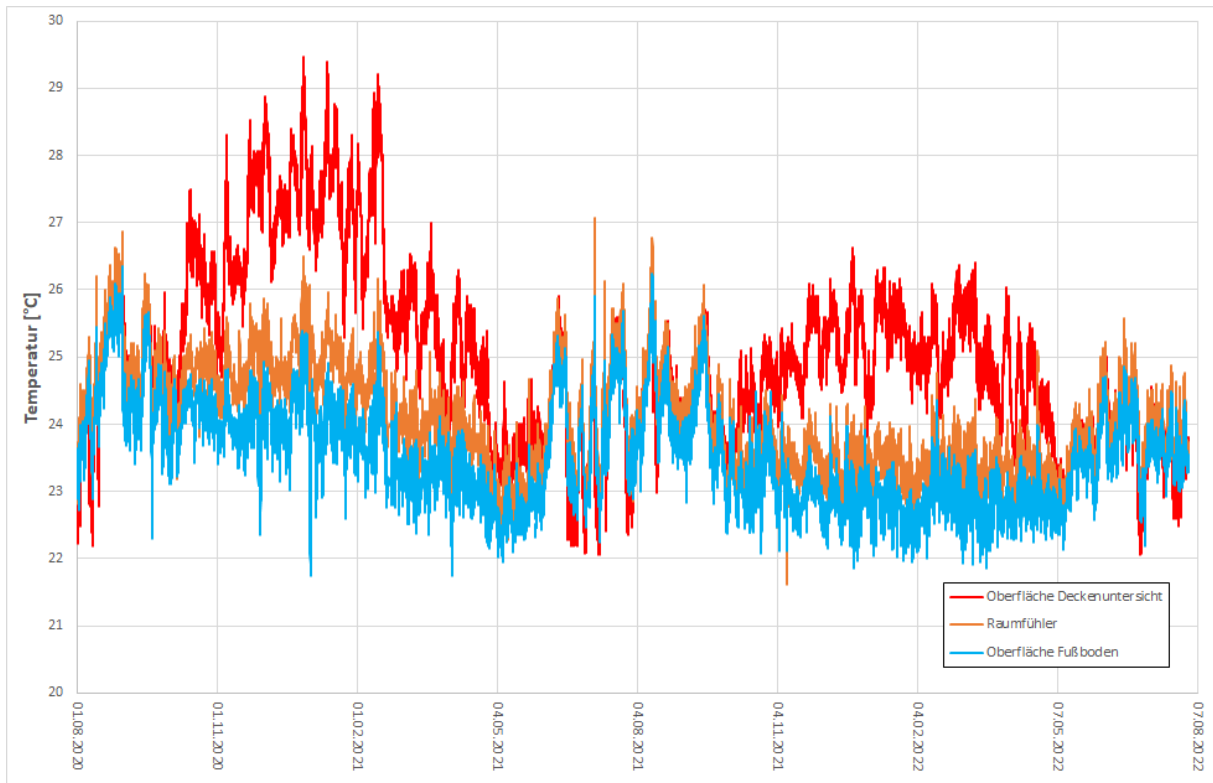


Abb. 15: Reihenhaus RH_M: zeitlicher Verlauf der Oberflächentemperaturen der Deckenuntersicht und des Fußbodens, sowie der vom Raumfühler registrierten Temperatur

Es ist unmittelbar erkennbar, dass unter sommerlichen Verhältnissen die Differenzen zwischen den drei untersuchten Temperaturverläufen sehr klein werden. In den beiden Heizsaisonen steigt die Oberflächentemperatur der Untersicht der beheizten Decke hingegen deutlich über die Raumtemperatur und die Oberflächentemperatur des Fußbodens an. Es zeigt sich, dass die im Vergleich zur Heizsaison 2021/22 höheren Raumtemperaturen der Heizsaison 2020/21 den deutlich höheren Temperaturen an der Deckenuntersicht geschuldet sind.

Abb. 15 zeigt u. a., dass die Temperatur des unbeheizten, direkt an das Erdreich angrenzenden Fußbodens hoch ist. Der Wert von 22 °C wird im Beobachtungszeitraum nur sehr selten geringfügig unterschritten. Dieser vorerst überraschende Effekt lässt sich durch die aufgrund des Strahlungsaustauschs sehr starke thermische Kopplung zwischen beheizter Decke und Fußboden schlüssig erklären.

Eine tiefere Analyse des zeitlichen Verlaufs der Differenz zwischen den Oberflächentemperaturen von Decke und Fußboden führt zu dem in der folgenden Abbildung gezeigten Histogramm.

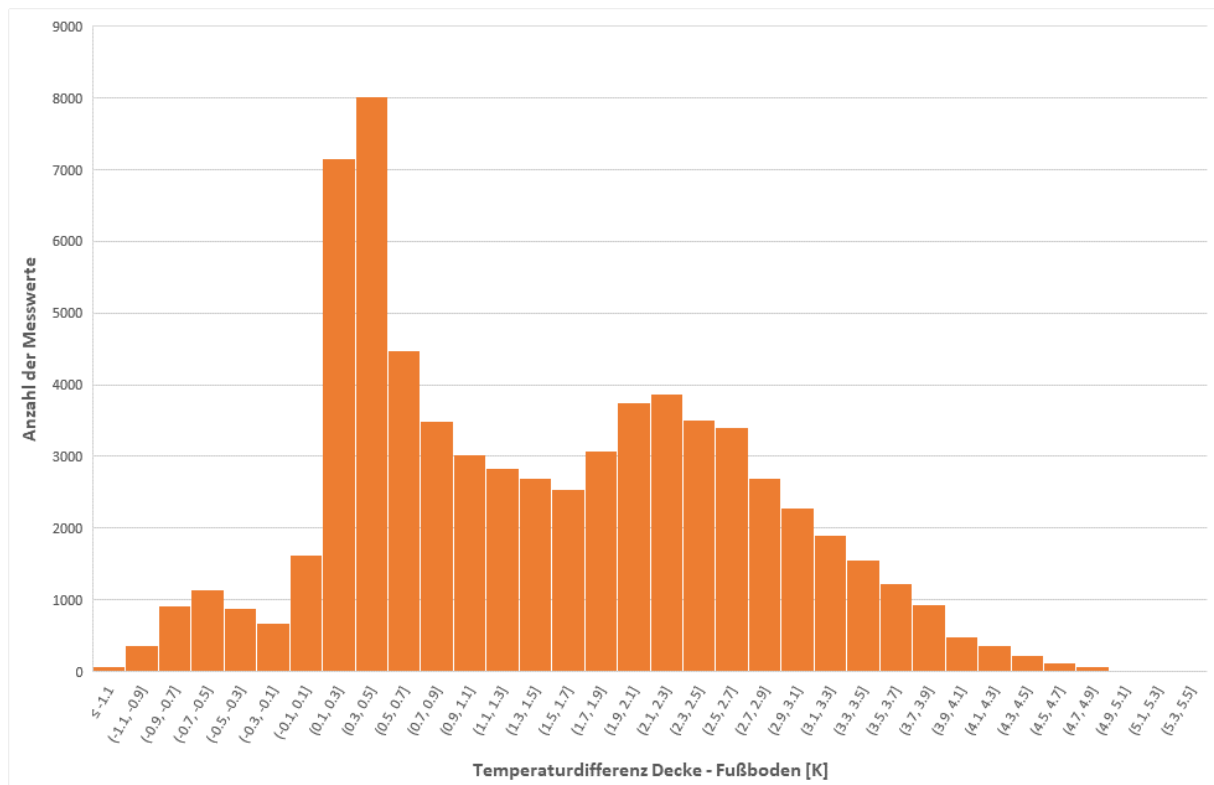


Abb. 16: Reihenhaus RH_M: Histogramm der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der Oberflächentemperatur des Fußbodens für den gesamten Beobachtungszeitraum

Ersichtlich ergibt sich für die untersuchte Temperaturdifferenz eine zweigipflige Verteilung. Den ersten Gipfel bildet das absolute Maximum, das in der Klasse zwischen +0,3 bis +0,5 K zu liegen kommt. Für dieses Maximum dürften die Zeiträume außerhalb der beiden Heizsaisonen – also jenen Zeiten, in denen die thermische Aktivierung nicht in Betrieb ist – verantwortlich sein. Die Temperatur der Deckenuntersicht liegt zu diesen Zeiten also meist etwas über jener des Fußbodens.

Das zweite Maximum liegt in der Klasse zwischen 2,1 und 2,3 K und weist auf die mittleren Verhältnisse in den beiden Heizsaisonen hin. Während der Heizsaisonen nimmt die Differenz zwischen der Temperatur der Deckenuntersicht und der Fußbodentemperatur Werte bis zu maximal ca. 4,0 K an. Nur sehr wenige Werte sind größer als 4,0 K. Ein Temperaturunterschied von 5,0 K wird zu keinem einzigen Zeitpunkt erreicht.

Die Werte der vom Raumfühler in der Wohnküche gemessenen Temperatur liegen ab dem 5. Juli 2021 für alle 14 Reihenhäuser vor. Eine Auswertung dieser Werte ist insofern interessant, als die Reihenhäuser baugleich und nahezu gleich orientiert sind. Unterschiede in den Temperaturverläufen sollten somit auf Einflüsse der Nutzer:innen, wie Einstellung der Solltemperatur, Anzahl der Bewohner:innen, Lüftungsgewohnheiten oder die Art der Verwendung der Verschattungseinrichtungen im Sommer zurückzuführen sein.

Die folgende Abbildung zeigt die Raumtemperaturverläufe in den Wohnküchen aller Reihenhäuser von Juli 2021 bis einschließlich Juli 2022.

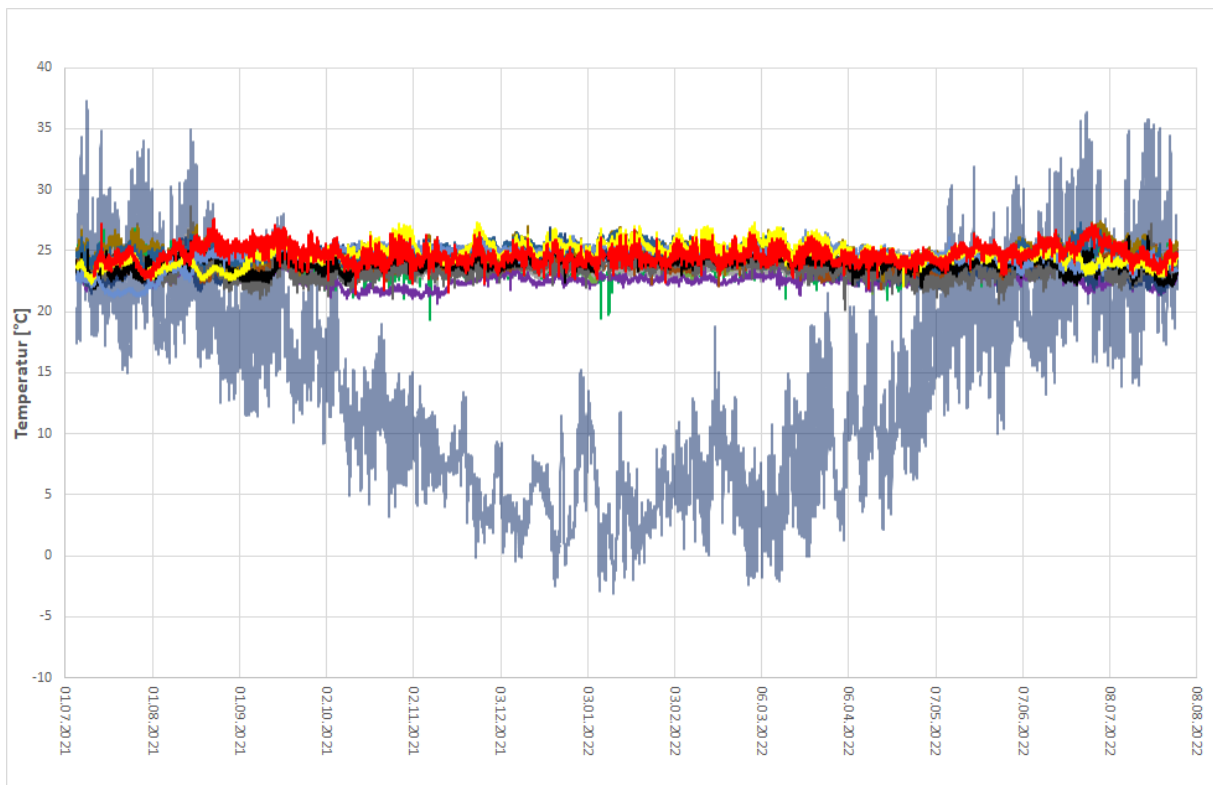


Abb. 17: Zeitlicher Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen von Juli 2021 bis Juli 2022 für alle 14 Reihenhäuser

Obzwar die Temperaturverläufe in obiger Abbildung aufgrund der hohen Anzahl von Linien nicht mehr voneinander unterschieden werden können, zeigt sich doch deutlich, dass in allen Reihenhäusern die Temperaturkonstanz über das ganze Jahr ausgeprägt ist. Die Jahresverläufe der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen befinden sich größtenteils in einem Temperaturband zwischen 21,5 °C und 26,0 °C.

Die über den gesamten Beobachtungszeitraum von über einem Jahr gemittelten Werte der vom Raumfühler registrierten Temperatur schwanken zwischen 22,7 °C und 25,1 °C. Dies zeigt, dass die von den jeweiligen Bewohner:innen des Reihenhauses individuell regelbaren Vorzugstemperaturen deutlichen Einfluss auf die sich tatsächlich einstellenden Temperaturverläufe haben.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Temperaturverläufe in drei aufgrund von detaillierteren Analysen ausgewählten Reihenhäusern.

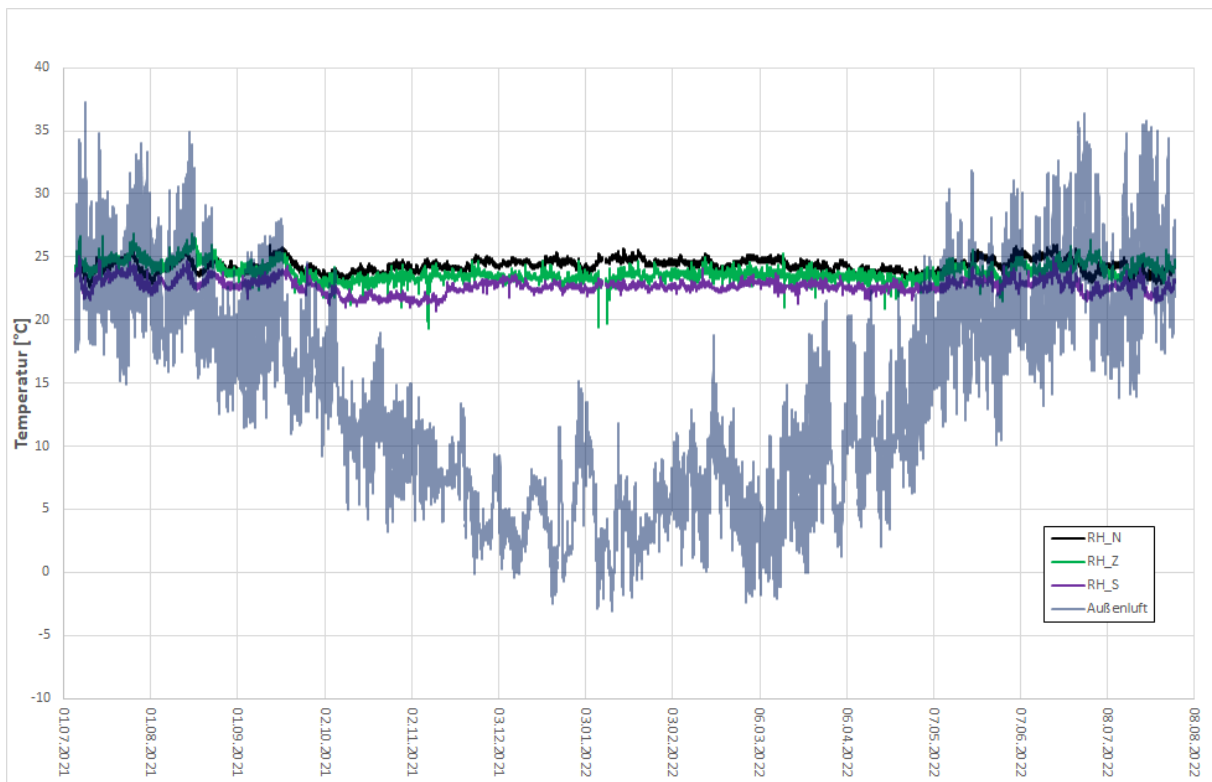


Abb. 18: Zeitlicher Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen von Juli 2021 bis Juli 2022 für drei ausgewählte Reihenhäuser

Der Temperaturverlauf von Reihenhaus RH_S (lila Kurve in Abb. 18) wurde nicht nur ausgewählt, um die Verbindung zu den beiden detaillierter untersuchten Reihenhäusern herzustellen, sondern auch aufgrund des Umstands, dass es sich um das Reihenhaus mit dem niedrigsten 2-Jahresmittelwert der Raumtemperatur in der Wohnküche (22,7 °C) handelt.

Das Reihenhaus RH_Z (grüne Kurve in Abb. 18) wurde herausgegriffen, da sich dort in der Wohnküche im Winter die in Bezug auf alle Reihenhäuser absolut tiefsten Raumtemperaturen einstellen. Diese kommen dreimal unter 20 °C zu liegen (Minimalwert: 19,4 °C am 7. November 2021). Eine Analyse der nadelförmigen Spitzen nach unten zeigt, dass es sich immer nur um kurzzeitige Temperatursprünge nach unten handelt. Es liegt nahe, diese als Folge ausgeprägten Stoßlüftens zu interpretieren. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Raumtemperatur nach diesen Temperaturabsenkungen jeweils innerhalb von ca. einer Viertelstunde zu ihrem Normalwert zurückkehrt.

Der Temperaturverlauf in Reihenhaus RH_N (schwarze Kurve in Abb. 18) ist insofern interessant, als er mit einem absoluten Minimalwert von 22,6 °C und einem absoluten Maximalwert von 26,0 °C die kleinste Schwankung während des Beobachtungszeitraums aufweist. Eine genauere Analyse zeigt, dass 90 % aller registrierten Werte in diesem Reihenhaus zwischen 23,5 °C und 25,1 °C, also in einem mit 1,6 K Breite extrem schmalen Temperaturband liegen.

5.2 Stromverbrauch

Bei der Untersuchung des Stromverbrauchs des Wohnparks ist vorerst zwischen jenem des Wohnhauses und jenen der Reihenhäuser zu unterscheiden. Beim Wohnhaus kommt zum Stromverbrauch der Wärmepumpen noch der Stromverbrauch der Heizpatronen hinzu, da die erforderlichen hohen Warmwassertemperaturen mittels Nachheizung unter Verwendung elektrischer Heizpatronen bewerkstelligt werden. Bei den Reihenhäusern wird hingegen sowohl die Beheizung als auch die Warmwasserbereitung zur Gänze von der Wärmepumpe übernommen.

Der aufgrund der Nutzung durch Beleuchtung und Geräte entstehende zusätzliche Stromverbrauch spielt im Rahmen dieser Untersuchung keine Rolle und wird nicht weiter behandelt.

In der Folge werden die gemessenen Stromverbräuche für das Wohnhaus und für die Reihenhäuser gesondert dokumentiert, wobei aus Gründen der Wahrung der Übersichtlichkeit nur Monatssummen der jeweiligen Verbräuche dargestellt und analysiert werden.

5.2.1 Wohnhaus

Die Wärmepumpen im Wohnhaus sind hauptsächlich für die Wärmeversorgung der 22 Wohnungen mittels Bauteilaktivierung zuständig. Ein Teil der von den Wärmepumpen erzeugten Wärme wird aber auch für die Warmwasserbereitung verwendet. Der Stromverbrauch der Wärmepumpen ist mittels ¼-stündigen Zählerständen dokumentiert.

5.2.1.1 Wärmepumpen

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die während des Monitoring-Zeitraums erfassten Stromverbräuche der Wärmepumpen. Neben dem eigentlichen Verbrauch der Wärmepumpen ist hier auch der Hilfsstromverbrauch für die Pumpen inkludiert.

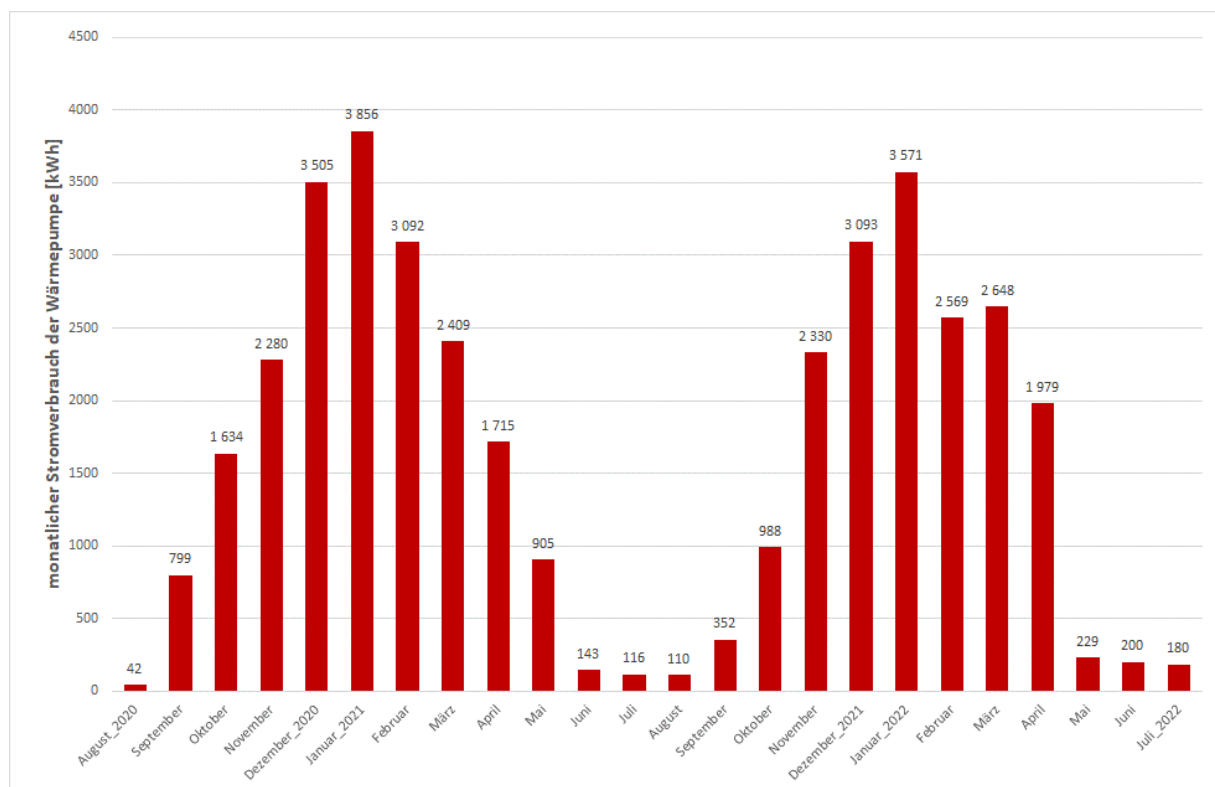


Abb. 19: Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpe im Wohnhaus

Es wird nicht nur der Stromverbrauch der Wärmepumpe, sondern auch die von der Wärmepumpe erzeugte Wärme mittels Wärmemengenzähler registriert. Ein Teil der Wärme wird für die Beheizung mittels Bauteilaktivierung verwendet, der Rest kommt der Warmwassererzeugung zu.

Werte für den Wärmemengenzähler der Bauteilaktivierung liegen ab 1. Januar 2021 vor. Die ab diesem Zeitpunkt registrierten Wärmemengen sind – getrennt nach Bauteilaktivierung und Warmwasserbereitung – in folgender Abbildung dargestellt.

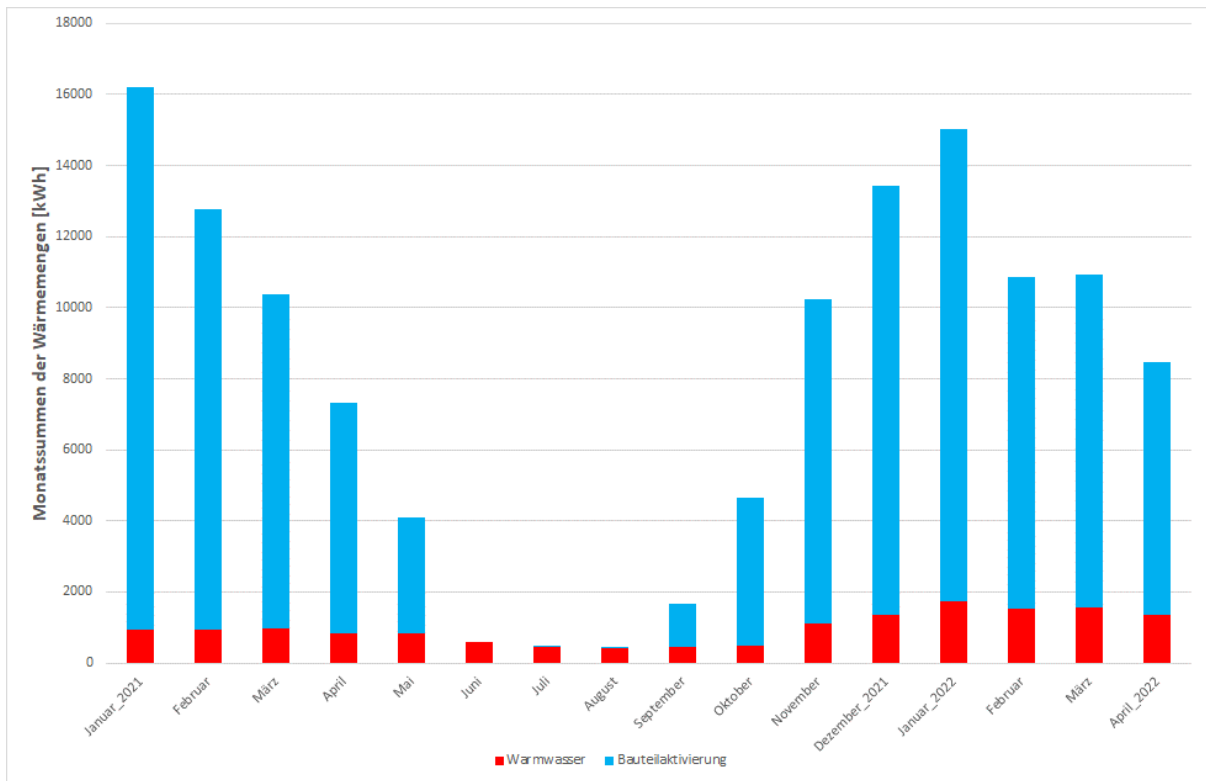


Abb. 20: Monatssummen der von den Wärmepumpen im Wohnhaus erzeugten Wärme

Ersichtlich wird der Großteil der von den Wärmepumpen erzeugten Wärmemenge in den Heizsaisonen für die thermische Bauteilaktivierung verwendet. Zwischen Januar und April 2021 werden etwas weniger als 10 % der erzeugten Wärmemenge für die Warmwasserbereitung verwendet. In der Heizsaison 2021/22 steigt dieser Anteil auf 12,5 % an.

Natürlich kann aus Stromverbräuchen der Wärmepumpen und den von diesen erzeugten Wärmemengen auf Arbeitszahlen zurückgerechnet werden. Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis dieser Berechnungen für den Zeitraum von Anfang Januar 2021 bis Ende Juli 2022.

Monat	Arbeitszahl
Januar 2021	4,20
Februar	4,13
März	4,31
April	4,27
Mai	4,54
Juni	4,04
Juli	3,97
August	3,84
September	4,75
Oktober	4,72
November	4,40
Dezember 2021	4,35
Januar 2022	4,22
Februar	4,23
März	4,13
April	4,28
Mai	3,28
Juni	3,31
Juli 2022	3,44

Tab. 3: Monatliche Arbeitszahlen der Wärmepumpen im Wohnhaus

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe im Wohnhaus errechnet sich für das Jahr 2021 zu 4,30 und liegt damit in einem für Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Tiefenbohrung zu erwartenden Bereich.

5.2.1.2 Heizpatronen

Wie Abb. 20 zeigt, spielt die Warmwasserbereitung für das Wohnhaus in Hinblick auf die Verteilung der von den Wärmepumpen erzeugten Wärme nur eine untergeordnete Rolle. Dies darf aber nicht zum Trugschluss führen, dass der Stromverbrauch für die Warmwasserbereitung sehr klein ist. Das Warmwasser wird zwei Speichern entnommen, zirkuliert durch das Wohnhaus und ist wegen der großen Leitungslängen aufgrund hygienischer Überlegungen und Vorschriften hoch temperiert. Die Temperierung der Warmwasserspeicher erfolgt nur zum Teil über die Wärmepumpen. Die erforderliche Warmwassertemperatur von 60 °C und darüber wird durch Nachheizung mittels zweier Heizpatronen erreicht. Die folgende Abbildung zeigt die Monatsmittelwerte des für die Nachheizung erforderlichen Wärmeverbrauchs im Verhältnis zu der von den Wärmepumpen gelieferten Wärmemengen.

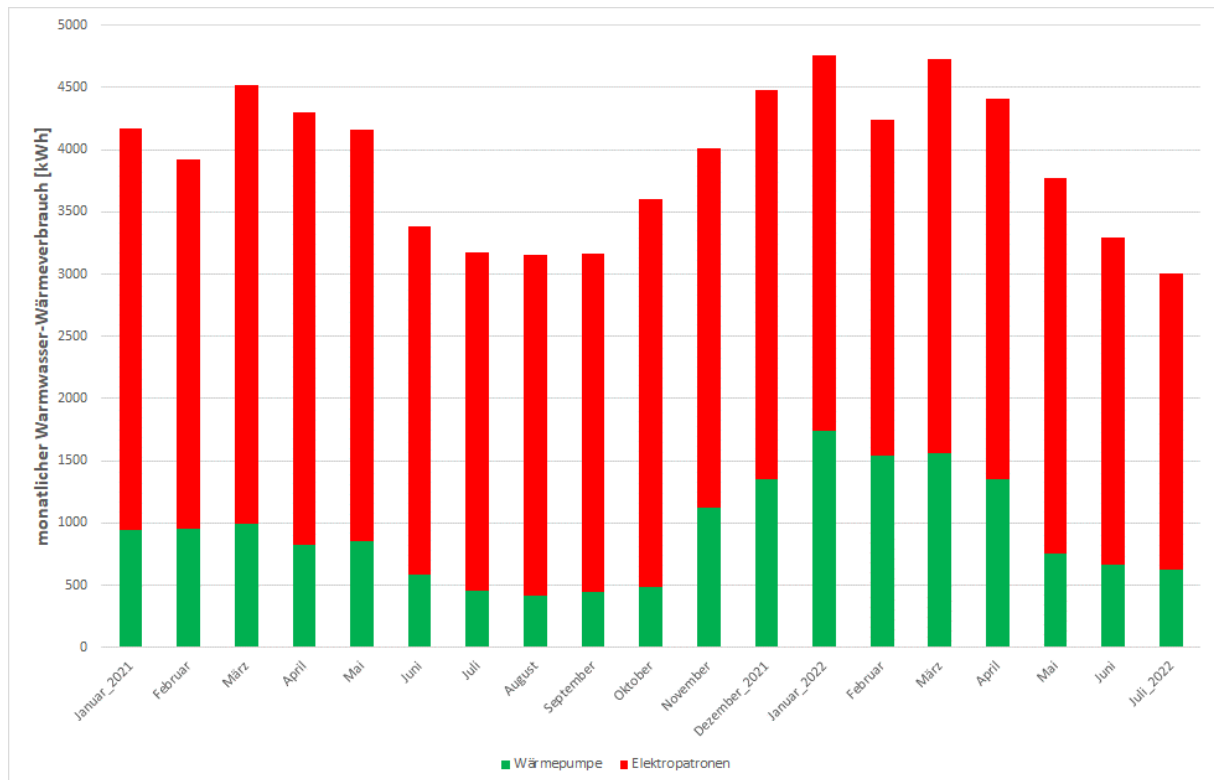


Abb. 21: Monatssummen der für die Warmwasserbereitung im Wohnhaus verbrauchten Wärme

Es zeigt sich, dass die Warmwasserbereitung zum Großteil mittels direkter Beheizung der Speicher durch die Elektropatronen erfolgt. Anfang des Jahres 2021 liegt der Anteil der durch die Wärmepumpen gelieferten Wärmemengen an der gesamten für die Warmwasserbereitung verbrauchten Wärme etwas über 20 %, sinkt im Sommer 2021 auf unter 15 %, steigt während der Heizsaison 2021/22 auf über 30 % an und liegt von Mai bis Juli 2021 wieder bei etwa 20 %.

5.2.2 Reihenhäuser

In den Reihenhäusern deckt die Wärmepumpe sowohl den Heizwärmebedarf als auch den Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung ab. Der in folgender Abbildung dargestellte monatliche Stromverbrauch der Wärmepumpen in den Reihenhäusern RH_M und RH_S stellt somit die Summe von Heizwärme- und Warmwasserwärmeverbrauch dar.

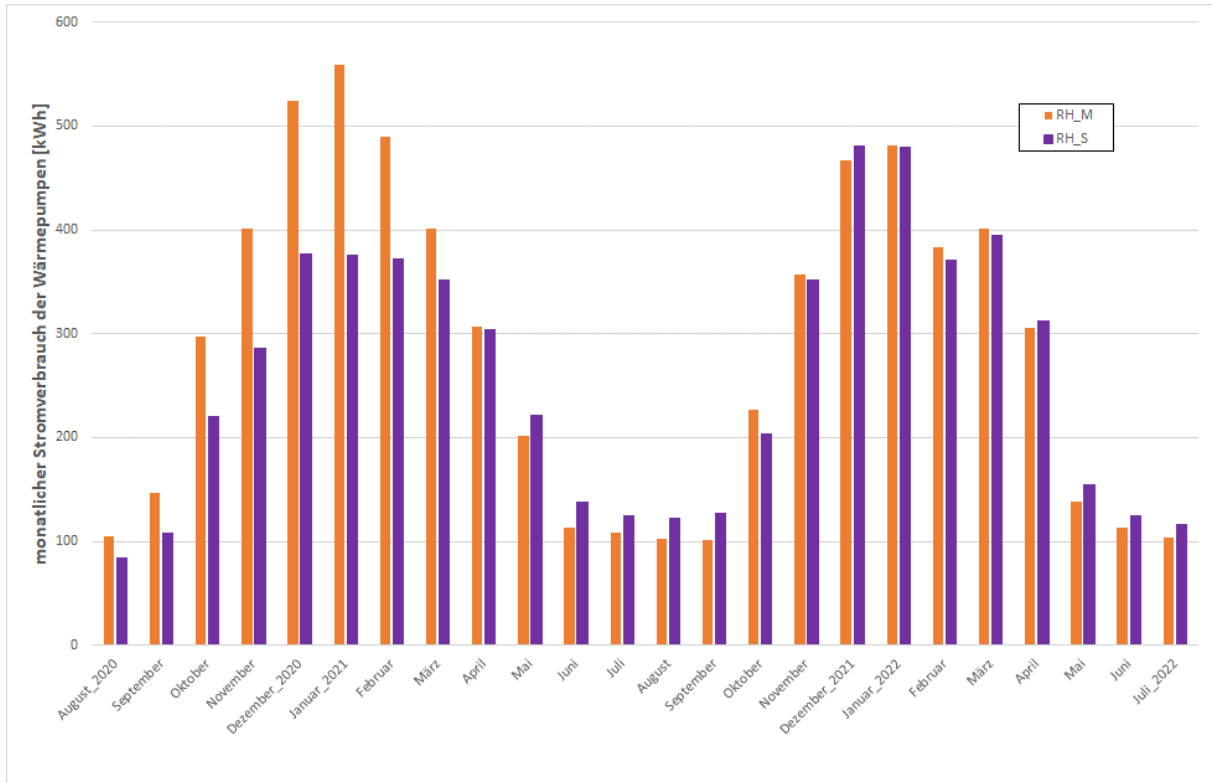


Abb. 22: Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpen in den Reihenhäusern RH_M und RH_S

Auffallend ist, dass der Stromverbrauch von RH_M in der Heizsaison 2020/21 im Vergleich zu RH_S stark erhöht ist, während er in der folgenden Heizsaison 2021/22 sich an jenen von RH_S angleicht. Eine Erklärung für diesen ausgeprägten Effekt liefert ein Blick auf Abb. 12. Ersichtlich war die Solltemperatur in Reihenhause RH_M in der Heizsaison 2020/21 deutlich höher eingestellt als in der darauffolgenden Heizsaison. In nachstehender Tabelle ist der über die jeweilige Heizsaison gemittelte Wert der Raumtemperatur in der Wohnküche dem Stromverbrauch während der Heizsaison gegenübergestellt. Als Länge der Heizsaison wird hierbei das Zeitintervall von 1. Oktober bis einschließlich 30. April des Folgejahrs festgelegt.

	Temperaturmittel [°C]		Stromverbrauch [kWh]	
	RH M	RH S	RH M	RH S
Heizsaison 2020/21	24,5	22,7	2979	2286
Heizsaison 2021/22	23,4	22,5	2620	2593

Tab. 4: Temperaturmittelwerte über die Heizsaison im Vergleich zum entsprechenden Stromverbrauch

Während im Reihenhause RH_M die Reduktion der mittleren Raumtemperatur über die Heizsaison um 1,1 K eine Verringerung des Stromverbrauchs der Wärmepumpe um ca. 12 % mit sich brachte, steigt der entsprechende Stromverbrauch in RH_S bei nahezu gleicher mittlerer Temperatur um ca. 13 %. Das Heizsaison-Mittel der Außenlufttemperatur steigt von 6,9 °C in der Heizsaison 2020/21 auf 7,4 °C in

der Heizsaison 2021/22 an. Um diese Ergebnisse besser einordnen zu können, soll im Folgenden der Vergleich zwischen den Stromverbräuchen der Reihenhäuser RH_M und RH_S vertieft behandelt werden.

Ein unmittelbarer Vergleich zwischen den Stromverbräuchen der Wärmepumpen in Reihenhaus RH_M und Reihenhaus RH_S ist nur dann schlüssig, wenn die gemessenen Raumtemperaturen entweder gleich oder zumindest ähnlich sind. Eine Analyse der Monatsmittelwerte der vom Raumfühler in der Wohnküche registrierten Temperaturen während der Heizsaison 2021/22 führt zum Ergebnis, dass der Monat Dezember 2021 für diesen Vergleich geeignet erscheint. In folgender Tabelle sind die Monatsmittelwerte der vom Raumfühler gemessenen Temperatur dem registrierten monatlichen Stromverbrauch der Wärmepumpe gegenübergestellt.

Reihenhaus	Raumtemperatur [°C]	Stromverbrauch WP [kWh]
RH M	23,4	466
RH S	22,8	481

Tab. 5: Monatsmittelwerte der Temperatur und monatlicher Stromverbrauch der Wärmepumpe für Dezember 2021

Obwohl der Monatsmittelwert der Raumtemperatur in der Wohnküche in Reihenhaus RH_S um 0,6 K niedriger ist als in Reihenhaus RH_M ist der monatliche Stromverbrauch der Wärmepumpe in Reihenhaus RH_S etwas höher. Bei diesem Vergleich ist jedoch zu beachten, dass zum einen nur die Temperatur in der Wohnküche zum Vergleich vorliegt, der Stromverbrauch der Wärmepumpe sich aber auf das ganze Haus bezieht. Zum anderen ist zu bedenken, dass die Wärmepumpe auch die Warmwasserbereitung zur Gänze übernimmt. Über den Warmwasserverbrauch liegen aber keine Informationen vor.

Interessant ist in diesem Zusammenhang zu untersuchen, wie die Temperaturen und Stromverbräuche der Wärmepumpen auf alle 14 derzeit errichteten Reihenhäuser verteilt sind. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis einer solchen Analyse für den Dezember 2021.

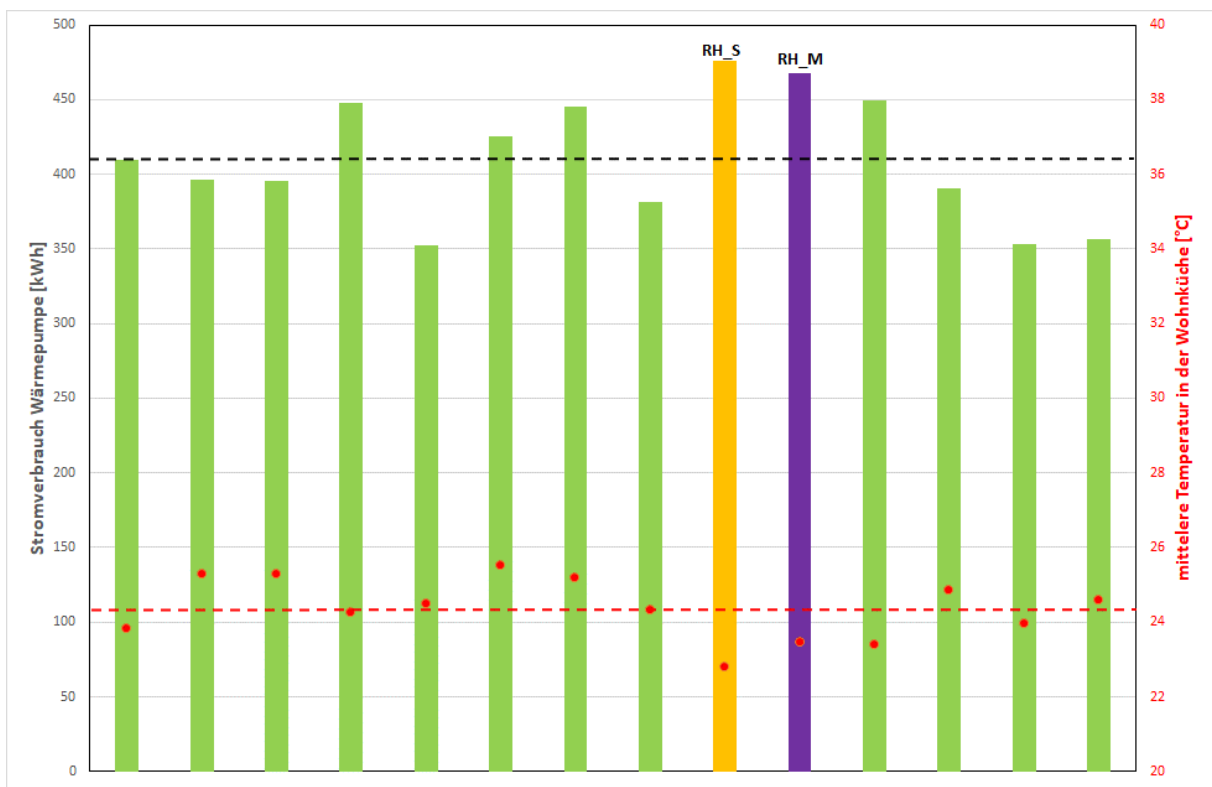


Abb. 23: Registrierte Stromverbräuche der Wärmepumpen und Monatsmittelwerte der Raumtemperatur in der Wohnküche im Dezember 2021 für alle Reihenhäuser

Zum einen zeigt sich, dass die Stromverbräuche der Wärmepumpen für die beiden besonders genau untersuchten Reihenhäuser RH_M und RH_S deutlich (ca. 15 %) über dem über alle Reihenhäuser gebildeten Mittelwert (schwarz gestrichelte Linie in Abb. 23) liegen. Zum anderen liegt der Monatsmittelwert der in der Wohnküche vom Raumfühler registrierten Temperatur tiefer als bei fast allen anderen Reihenhäusern. Die Wohnküche von Reihnhaus RH_S weist mit einem Dezembermittelwert von 22,8 °C den absolut niedrigsten Wert aller Reihenhäuser auf. Der über alle Reihenhäuser gemittelte Wert der Raumtemperatur in der Wohnküche liegt bei 24,4 °C (rot gestrichelte Linie in Abb. 23).

Zudem fällt auf, dass sich keine Korrelation zwischen den in den Wohnküchen registrierten Raumtemperaturen und den Stromverbräuchen der Wärmepumpen herstellen lässt. Die um den Mittelwert von 411 kWh schwankenden Stromverbräuche werden neben den Temperaturen im jeweils gesamten Haus von der Regelung der Wärmepumpe und der Nutzung des Gebäudes bestimmt. Die Nutzungseinflüsse sind vielfältig. Neben der Anzahl der Bewohner:innen und deren täglichen Anwesenheitszeiten spielen z. B. die eingestellten Solltemperaturen, das Lüftungsverhalten und der Warmwasserverbrauch eine tragende Rolle. Da die Reihenhäuser gleicher Bauart und nahezu gleich orientiert sind, kann angenommen werden, dass die in Abb. 23 gezeigten Schwankungen (ca. $\pm 15\%$ um den Mittelwert) in den gemessenen Stromverbräuche überwiegend auf die Nutzungseinflüsse zurückgeführt werden können.

5.3 Verwertung von Windüberschussstrom

Bei der Beheizung von Gebäuden mittels thermischer Bauteilaktivierung der Betondecken bietet es sich an, die große Wärmespeicherfähigkeit der massiven Decken dazu zu nutzen, Energie in Form von Wärme zwischenspeichern und somit für einen Ausgleich zwischen Zeiten von zu hohem Stromangebot und solchen von fehlendem Stromangebot zu sorgen. Hier wird dieser Mechanismus ausschließlich am Beispiel des hoch volatilen Angebots an Windstrom untersucht.

Die Wärmezeugung durch die Wärmepumpen und die Wärmezufuhr in die thermisch aktivierten Decken soll vornehmlich dann erfolgen, wenn aufgrund hoher Windgeschwindigkeiten ein Überschuss an dem in den Windparks erzeugten Windstrom anfällt. In Zeiten mit sehr kleinem Angebot an Windstrom sollen die Wärmepumpen hingegen tunlichst stillstehen und die Beheizung der Wohnungen des Gebäudes ausschließlich über die Auskühlung der aufgeheizten Decken sichergestellt werden.

Die für einen solchen Wärmepumpenbetrieb notwendige Steuerung muss natürlich auf ein Signal zugreifen können, das Zeiträume mit Windstromüberschuss von solchen ohne großem Windstromangebot zu unterscheiden gestattet.

5.3.1 Windsignal

Das Windsignal wird vom Energieversorger bereitgestellt und liegt seit 4. Oktober 2021 durchgehend vor. Nach einer Testphase im Frühjahr 2021 wurde aufgrund der gesammelten Erfahrungen festgelegt, dass die Dauer eines gleichlautenden Signals (1 für Windüberschussstrom und 0 für „Normalstrom“) die Länge von einer Stunde nicht unterschreiten sollte. Zudem wird vereinbart, dass das Signal „Windüberschussstrom“ dann zu schalten ist, wenn die Einspeisung der Windkraftwerke in die Regelzone der Austrian Power Grid (APG) einen Schwellenwert von 500 MW überschreitet. Da das Windsignal natürlich vorab erzeugt werden muss, fußen die vom Energieversorger entwickelten Algorithmen zur Erzeugung des Windsignals auf Prognosedaten der APG.

Die folgende Abbildung stellt beispielhaft die Stromerzeugungskurve der Windkraftwerke dem an den Wohnpark Wolfsbrunn gelieferten Windsignal für die 46. Kalenderwoche 2021 gegenüber.

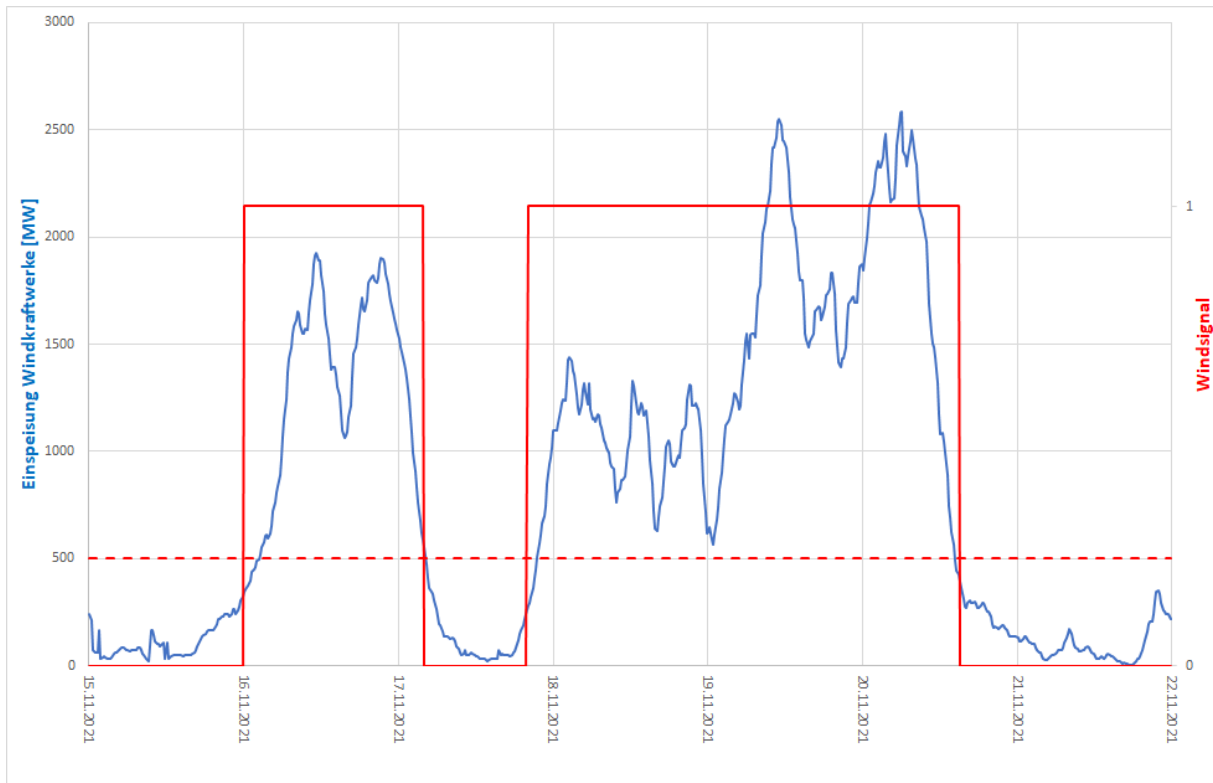


Abb. 24: Verlauf des Windsignals im Vergleich zur durch die Windkraftwerke in der Regelzone des APG erzeugten Windstroms für die Kalenderwoche 46 des Jahres 2021

Bei der Interpretation der Abb. 24 ist zu beachten, dass es sich bei der blauen Kurve um die Stromerzeugung der Windkraftwerke handelt und nicht um prognostizierte Werte. Es zeigt sich somit, dass zum einen die Prognose-Werte der APG genau genug sind und das vom Energieversorger generierte Windsignal die Situation der Windstromerzeugung sehr gut zu beschreiben vermag.

5.3.2 Thermischer Komfort

Die Ergebnisse der Untersuchungen in Hinblick auf den thermischen Komfort im Wohnhaus und in den Reihenhäusern wurden für den gesamten Beobachtungszeitraum bereits in Kapitel 5.1 dargestellt.

Eine Detailuntersuchung für die beiden erfassten Heizsaisonen ist insofern interessant und notwendig, als die Heizungsregelung in der Heizsaison 2020/21 noch nach einer Solltemperatur, also konventionell ohne Berücksichtigung eines Windsignals erfolgte. Erst in der folgenden Heizsaison 2021/22 lag ein Windsignal vor, nach dem die Regelung der Wärmepumpe in Hinblick auf die Zwischenspeicherung von Windüberschussstrom umgestellt wurde. Es ist damit von besonderem Interesse zu untersuchen, wie sich diese grundlegende Änderung in der Regelung der Wärmezufuhr auf den thermischen Komfort auswirkt.

Einem Vergleich der Heizsaisonen 2020/21 und 2021/22 muss natürlich eine Gegenüberstellung der außenklimatischen Bedingungen vorangestellt werden. In der folgenden Abbildung wird der zeitliche Verlauf der am Gebäudestandort registrierten Außenlufttemperatur in der Heizsaison 2020/21 mit jener der Heizsaison 2021/22 verglichen.

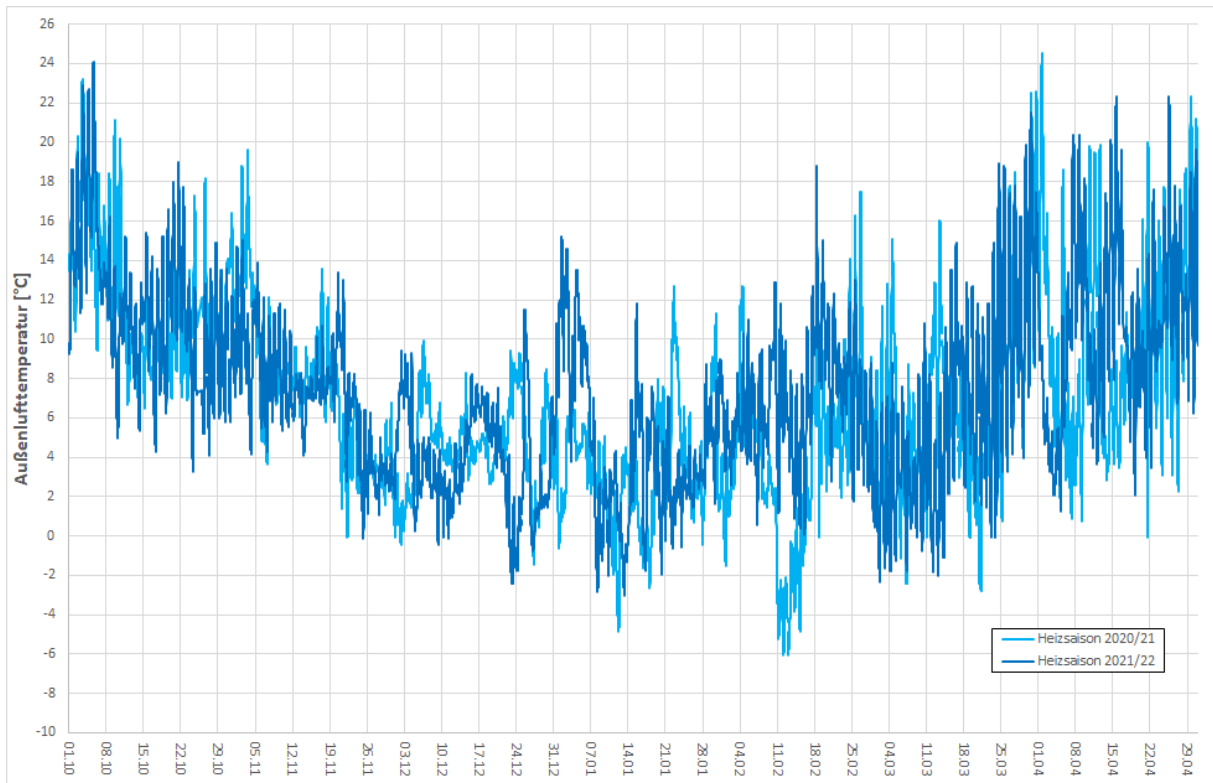


Abb. 25: Vergleich der Verläufe der Außenlufttemperatur zwischen der Heizsaison 2020/21 und der Heizsaison 2021/22

Auf den ersten Blick scheinen die Temperaturverläufe in den beiden Heizsaisons sehr ähnlich zu sein. Dieser Eindruck wird auch insofern gestützt, als der Mittelwert der Außenlufttemperatur über die Heizsaison 2020/21 mit $6,9\text{ °C}$ nur um $0,5\text{ K}$ tiefer liegt als jener für die Heizsaison 2021/22 ($7,4\text{ °C}$).

Bei genauerem Hinsehen zeigt sich allerdings, dass in der Heizsaison 2021/22 ausgeprägte Kälteperioden fehlen. Das absolute Minimum wird im Januar 2022 mit $-3,0\text{ °C}$ erreicht. Die Heizsaison 2020/21 weist hingegen im Februar 2021 eine Kälteperiode mit einer Folge von Eistagen mit Temperaturen zwischen -2 und -6 °C auf.

Da die Regelung der Betriebsweise der Wärmepumpen für das Wohnhaus und die Reihenhäuser deutlich unterschiedlich umgesetzt wurde, werden in der Folge das Wohnhaus und die Reihenhäuser gesondert besprochen.

5.3.2.1 Wohnhaus

Im Wohnhaus erfolgt die Regelung der Betriebsweise der Wärmepumpen über die Definition eines Temperaturbands für die sog. „Kerntemperaturfühler“. Diese Fühler existieren für alle 22 Wohnungen und geben Aufschluss über die Temperaturen innerhalb der Betondecke. Grob gesagt wird Wärmenachschub mittels Anlaufens der Wärmepumpen – unabhängig vom anstehenden Windsignal – jeweils dann geordert, wenn die Betonkerntemperatur einen Grenzwert von 24,0 °C unterschreitet. Um eine Überhitzung der Betondecken zu vermeiden, steht dem unteren Grenzwert ein oberer Grenzwert von 28,5 °C gegenüber, bei dessen Überschreitung die Wärmezufuhr in die Decken sofort unterbunden wird.

Anmerkung: Der obere Grenzwert der Betonkerntemperatur wurde während des gesamten Beobachtungszeitraums bei weitem nicht erreicht.

Die folgende Abbildung zeigt die Gegenüberstellung der vom Raumfühler in der nordseitig gelegenen Wohnung registrierten Temperaturen für die beiden untersuchten Heizsaisonen.

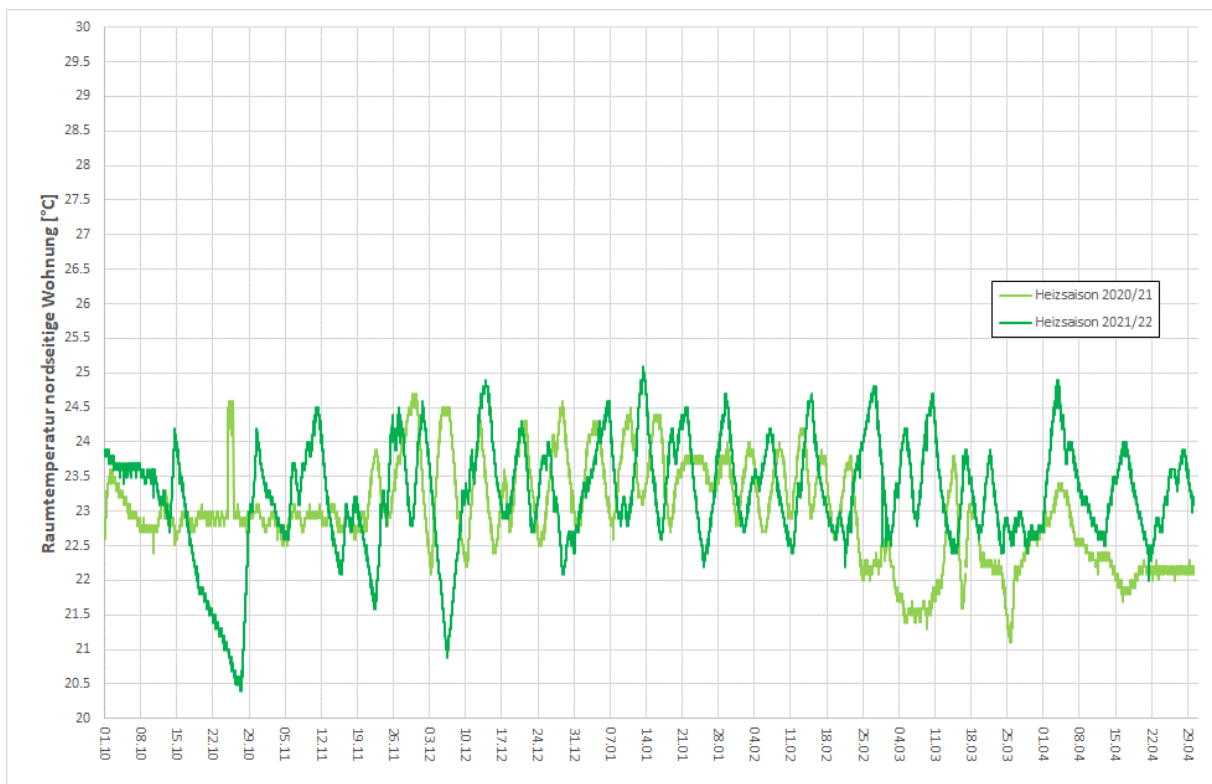


Abb. 26: Zeitlicher Verlauf der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden betrachteten Heizsaisonen in der nordseitig gelegenen Wohnung

Es zeigt sich, dass der Verlauf der Raumtemperatur der an der Nordfassade gelegenen Wohnung in den beiden betrachteten Heizsaisonen ähnlich ist. Für die Heizsaison 2021/22 fallen die ausgeprägten Spitzen zu niedrigeren Temperaturen Ende Oktober, im November und Anfang Dezember 2021 (dunkelgrüne Linie in Abb. 26) auf. Die detaillierte Analyse dieser Temperaturverläufe in Anhang 8.1 zeigt, dass diese Spitzen nach unten auf längere Ausfälle der Wärmepumpe und das damit verbundene Fehlen der Wärmeversorgung zurückgeführt werden können.

Die Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperatur von der Außentemperatur in der nordseitig gelegenen Wohnung ist für die untersuchten Heizsaisonen in den beiden folgenden Abbildungen dargestellt.

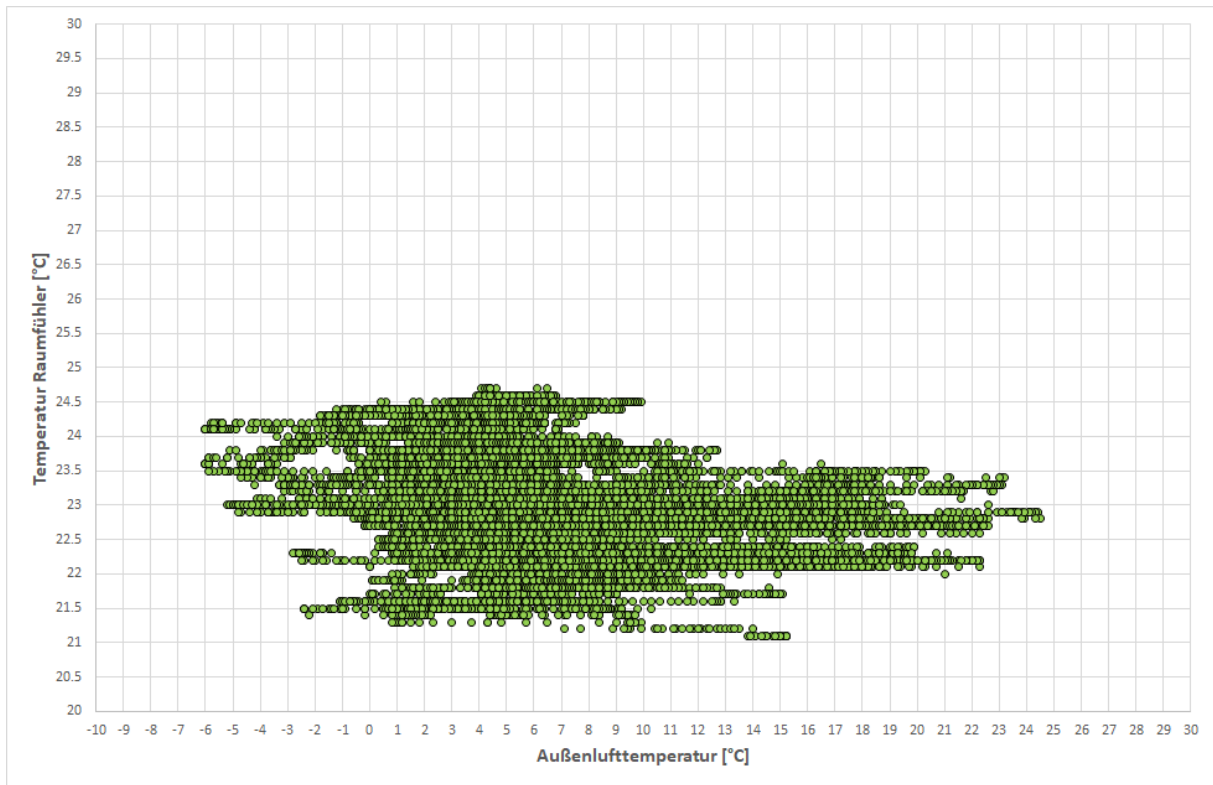


Abb. 27: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die nordseitig orientierte Wohnung; Heizsaison 2020/21*

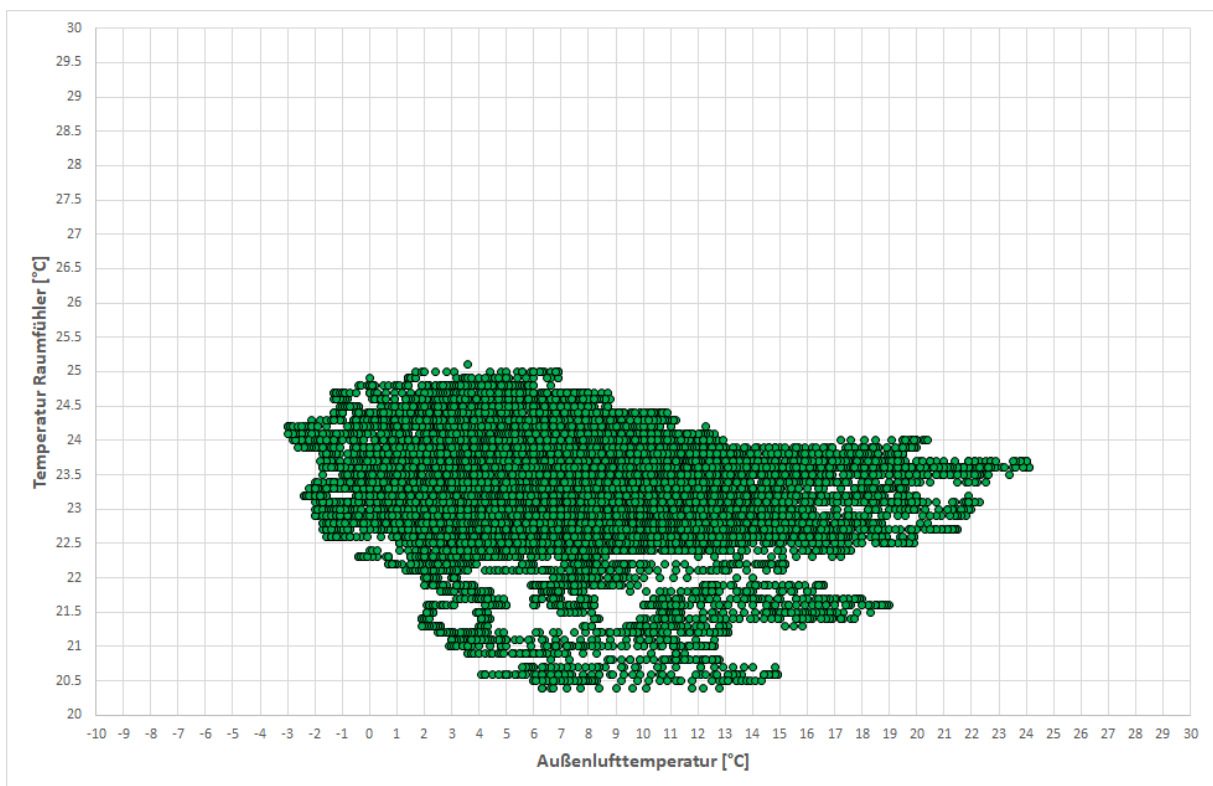


Abb. 28: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die nordseitig orientierte Wohnung; Heizsaison 2021/22*

Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, dass die Regelung der Wärmepumpen nach dem Windsignal in der Heizsaison 2021/22 zum vereinzelt auftreten von etwas niedrigeren

Raumtemperaturen führt (siehe Abb. 28). Diese knapp über 20 °C liegenden Temperaturen traten offensichtlich während herbstlicher Außenlufttemperaturen auf und können somit den Ausfällen der Wärmepumpe im Oktober, November und Dezember 2021 zugeordnet werden.

Die Auswertung der Verteilung der Raumtemperatur mit statistischen Methoden führt für die Heizsaison 2020/21 zu folgenden Aussagen: Der Heizsaison-Mittelwert der Raumtemperatur beträgt 23,0 °C. 90 % der registrierten Werte liegen zwischen 21,9 und 24,3 °C. Die Breite des Temperaturbands ist mit 2,4 K eher klein.

Der Mittelwert der Raumtemperatur über die folgende Heizsaison 2021/22 liegt mit 23,2 °C nur unerheblich höher. Das Temperaturband mit 90 % der registrierten Werte ist nun zwischen 21,7°C und 24,3 °C aufgespannt und hat damit mit 2,6 K eine etwas größere Breite.

Die folgende Abbildung zeigt die Zeitverläufe der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden Heizsaisonen für die südseitig orientierte Wohnung.

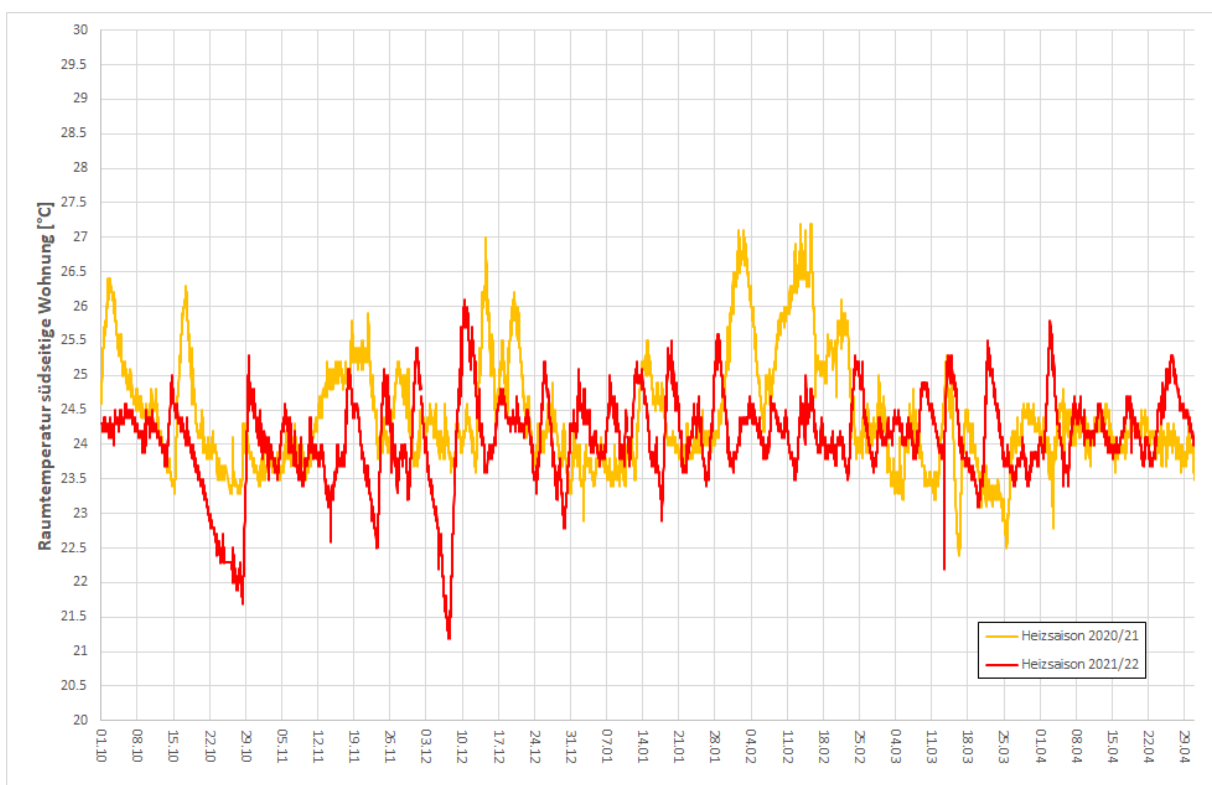


Abb. 29: Zeitlicher Verlauf der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden betrachteten Heizsaisonen in der südseitig gelegenen Wohnung

Der Vergleich der beiden Temperaturverläufe zeigt deutlich, dass in der ersten Heizsaison 2020/21 offenbar insofern Probleme in der Regelung der Raumtemperatur aufgetreten sind, als die Raumtemperatur mehrfach Spitzen mit sehr hohen Werten aufweist. Diese Problematik scheint in der folgenden Heizsaison 2021/22 behoben zu sein. Die Temperaturabfälle im Oktober und Dezember 2021 sind natürlich auch hier auf den Ausfall der Wärmeversorgung zurückzuführen.

In den folgenden beiden Abbildungen wird die Abhängigkeit der vom Raumfühler in der südseitig gelegenen Wohnung registrierten Temperaturen von den Außentemperaturen für die untersuchten Heizsaisonen gezeigt.

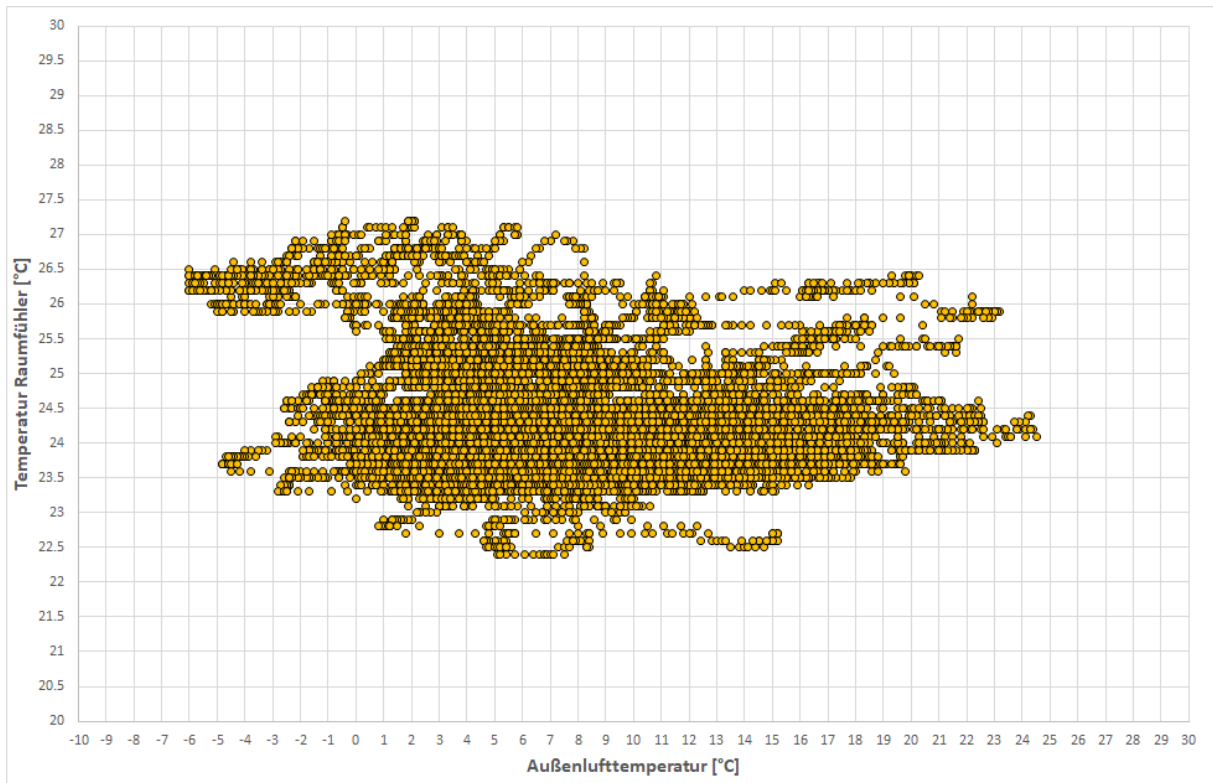


Abb. 30: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die südseitig orientierte Wohnung; Heizsaison 2020/21*

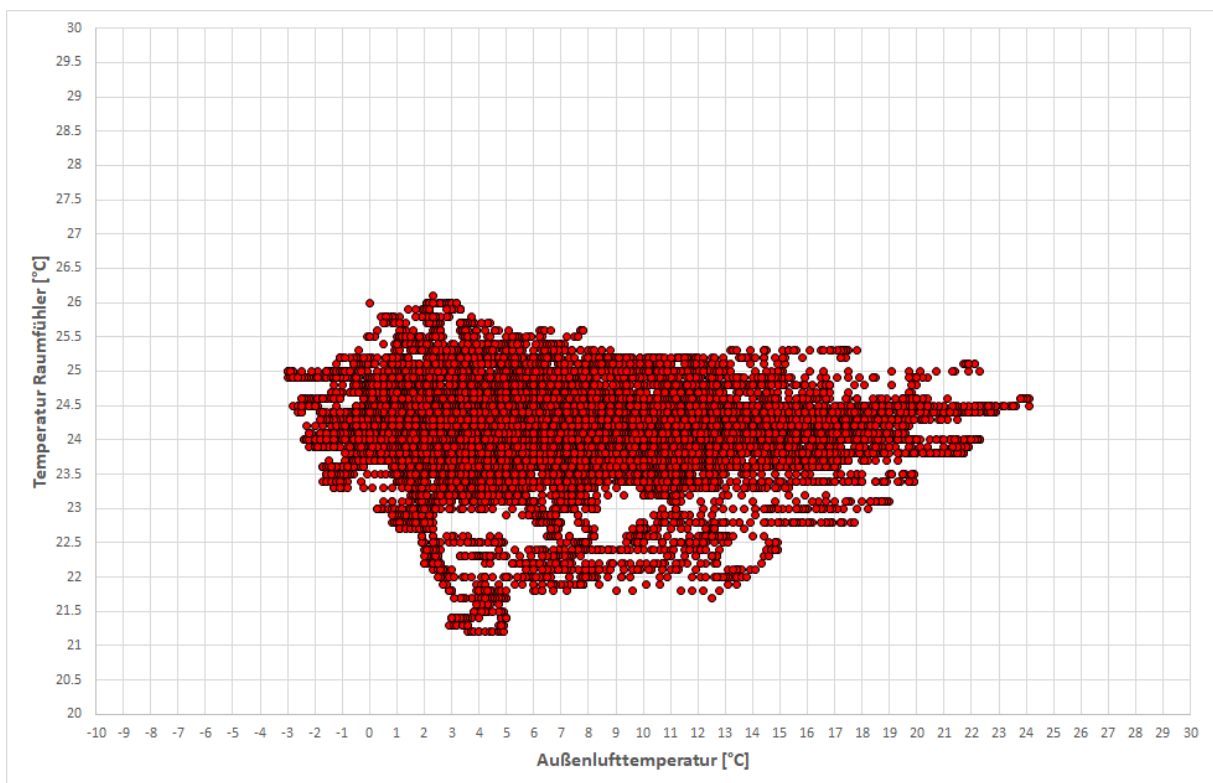


Abb. 31: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die südseitig orientierte Wohnung; Heizsaison 2021/22*

Die hohen Temperaturen in der Heizsaison 2020/21 (Abb. 30) treten bevorzugt bei tiefen Außenlufttemperaturen und somit im Tiefwinter auf. Auch hier zeigen sich die Anlaufschwierigkeiten

bei der Heizungsregelung, die sich in Abb. 29 aufgrund der Spitzen im Temperaturverlauf auch zeitlich zuordnen lassen.

Der Mittelwert der Raumfühlertemperatur über die Heizsaison 2021/22 liegt für die südseitig orientiert Wohnung bei 24,1 °C und für die nordseitig orientierte Wohnung bei 23,2 °C. Die Solltemperaturen in diesen beiden Wohnungen unterscheiden sich somit nur geringfügig von denen der vorhergehenden Heizsaison 2020/21.

In der Heizsaison 2021/22 (Abb. 31) liegen die maximalen Temperaturen bei knapp über 26 °C – also in einem moderaten Bereich. Die vereinzelt auftretenden tieferen Temperaturen sind natürlich auch hier auf die Ausfälle der Wärmepumpe zurückzuführen.

Die Heizsaison-Mittelwerte liegen in der südseitig orientierten Wohnung bei 24,4 °C in der Heizsaison 2020/21 und bei 24,1 °C in der folgenden Heizsaison 2021/22. 90 % der registrierten Werte liegen in der Heizsaison 2020/21 zwischen 23,2 °C und 25,7 °C. Die Breite des dadurch definierten Temperaturbands von 2,5 K unterscheidet sich kaum von den entsprechenden, für die nordseitige Wohnung erhobenen Werte.

In der Heizsaison 2021/22 liegen 90 % der Werte der Raumtemperatur zwischen 23,2 °C und 25,2 °C. Die Vermeidung von zu hohen Werten der Raumtemperatur hat somit auch zu einer erheblichen Verkleinerung der Breite des Temperaturbands auf 2,0 K geführt.

Zusammenfassend kann für die beiden Wohnungen im Wohnhaus festgehalten werden, dass in Hinblick auf die Veränderung der Regelung des Heizsystems von der Vorgabe einer Solltemperatur (Heizsaison 2020/21) auf die Vorgabe eines Temperaturbands (Heizsaison 2021/22) keinerlei negative Auswirkungen auf die thermischen Verhältnisse in den Wohnungen während der Heizsaison ausgemacht werden konnten.

5.3.2.2 Reihenhäuser

In den Reihenhäusern wird das Windsignal insofern berücksichtigt, als während der Zeiten mit Windüberschuss die Heizkurve derart verändert wird, dass die Rohrregister mit erhöhter Wärmezufuhr versorgt werden. Eine zu starke Abweichung von der von den Nutzer:innen eingestellten Solltemperatur wird auch in den Reihenhäusern über die Auswertung der von den „Kerntemperaturfühlern“ gelieferten Werte verhindert. Der Unterschied zu der im Wohnhaus umgesetzten Regelung besteht darin, dass kein Band der Solltemperatur für die Kerntemperaturen definiert ist und dass die Wärmepumpe auch während windarmer Zeiten trotz genügend warmer thermisch aktivierter Decken anlaufen darf. Zum Teil ist diese Regelungsstrategie dem Umstand geschuldet, dass die Wärmepumpe auch die gesamte Warmwasserbereitung übernimmt.

Die folgende Abbildung zeigt die Gegenüberstellung der in den beiden untersuchten Heizsaisons vom Raumfühler in der Wohnküche des Reihenhauses RH_M (Rohrregister mäanderförmig) registrierten Temperaturen.

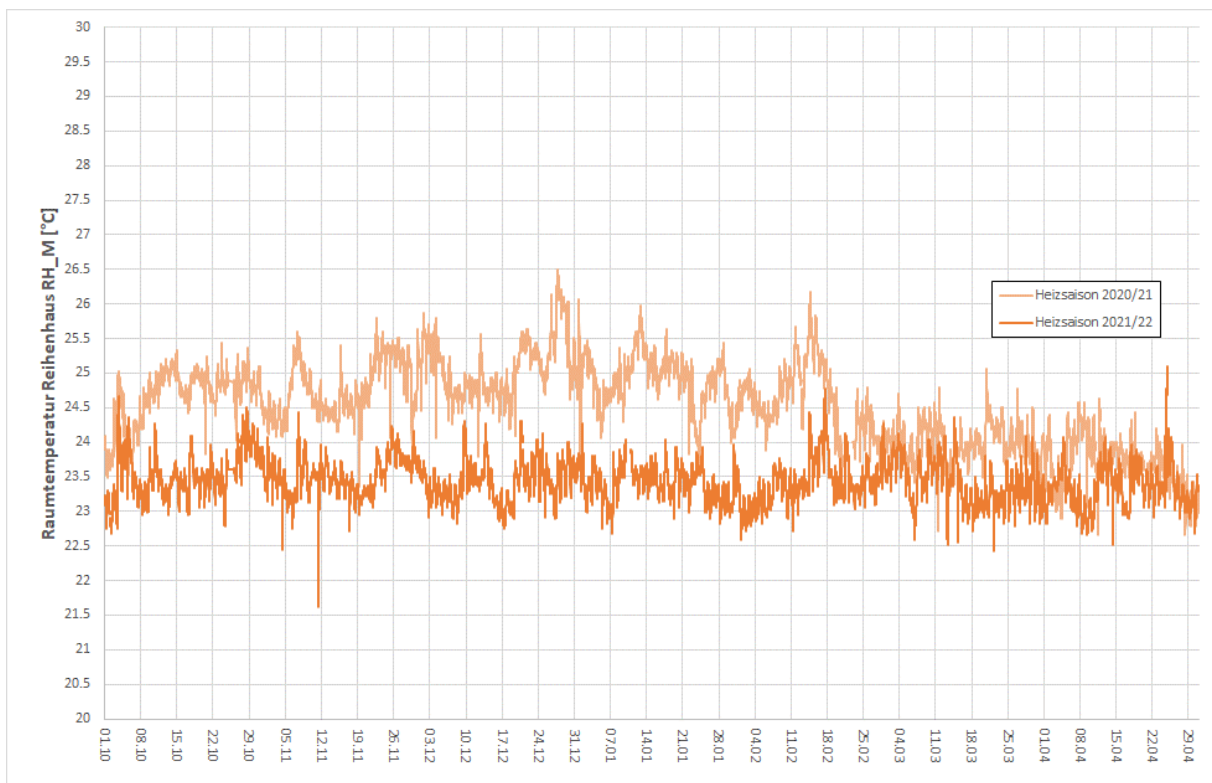


Abb. 32: Zeitlicher Verlauf der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden betrachteten Heizsaisons in der Wohnküche des Reihenhauses RH_M

Es zeigt sich, dass offenkundig die in der Heizsaison 2020/21 eher hoch eingestellte Solltemperatur Mitte Februar 2021 um ca. 1,0 K reduziert und diese Einstellung in der folgenden Heizsaison 2021/22 beibehalten wurde. Das absolute Minimum der Raumtemperatur wird am Vormittag des 10. November 2021 mit 21,6 °C erreicht und zeigt sich in Abb. 32 als nadelförmige Spitze nach unten. Eine Analyse des Temperaturverlaufs zu dieser Zeit lässt vermuten, dass der Grund für den Temperaturabfall in einer ca. halbstündigen Stoßlüftung begründet ist. Die damit verbundene Temperaturabsenkung von ca. 1,5 K ist innerhalb einer Viertelstunde wieder behoben.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Abhängigkeit der registrierten Raumtemperaturwerte von der Außenlufttemperatur.

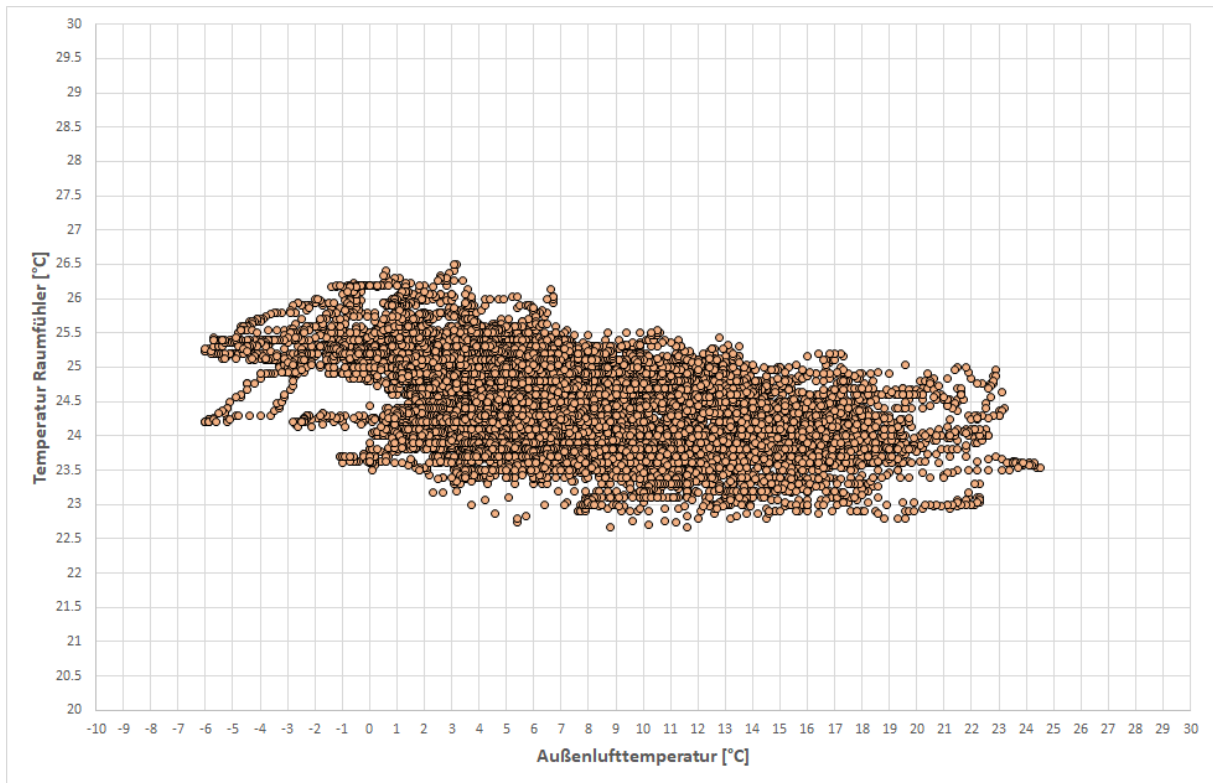


Abb. 33: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_M; Heizsaison 2020/21*

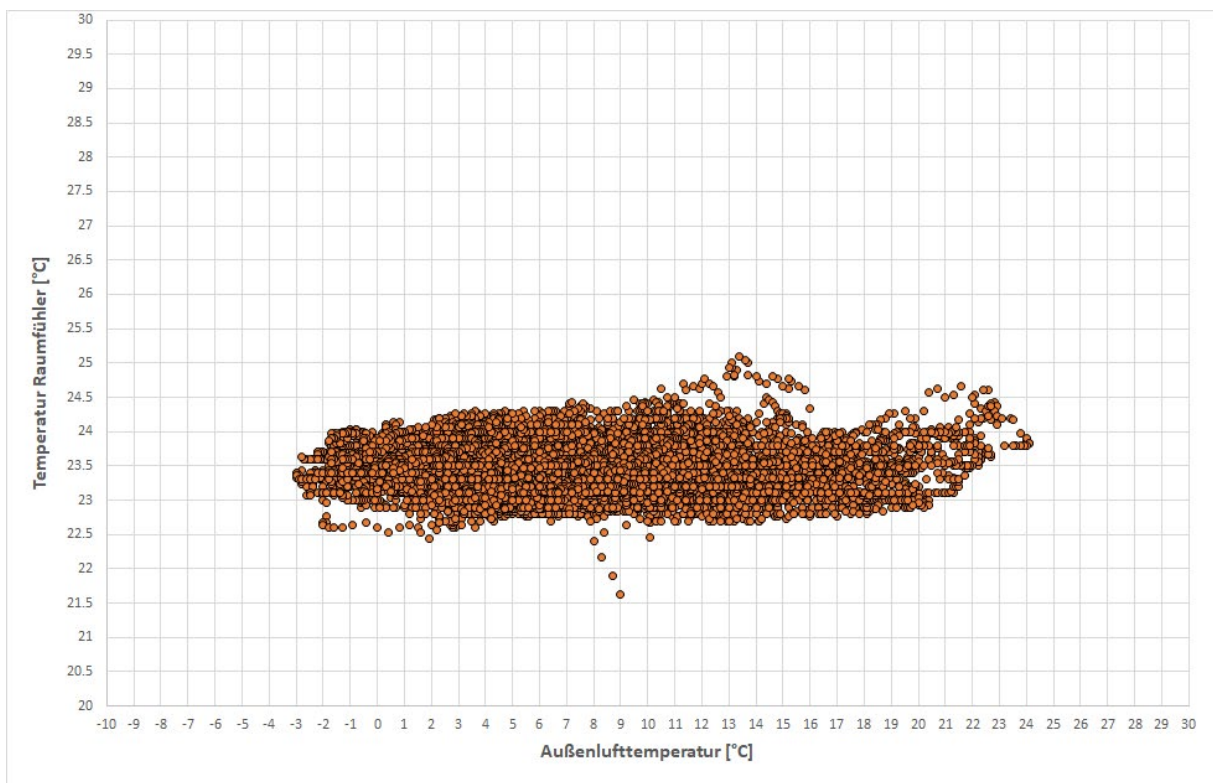


Abb. 34: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_M; Heizsaison 2021/22*

Die Punktwolke in Abb. 33 zeigt bei tieferen Außentemperaturen eine Tendenz zu höheren Raumtemperaturen. Dies ist offenkundig eine Auswirkung der bis Mitte Februar 2021 sehr hoch eingestellten Solltemperatur.

Die Heizsaison 2021/22 (Abb. 34) ist hingegen von einer extrem hohen Konstanz der vom Raumfühler registrierten Temperaturen geprägt.

Der Heizsaison-Mittelwert der Raumtemperatur in der Heizsaison 2020/21 liegt mit 24,6 °C ziemlich hoch. 90 % der registrierten Werte liegen dabei zwischen 23,5 und 25,4 °C und damit in einem Temperaturband von 1,9 K Breite.

In der folgenden Heizsaison 2021/22 ist der Mittelwert über die Heizsaison mittels Absenkung der Solltemperatur (siehe Abb. 32) mit 23,4 °C deutlich niedriger. Das Temperaturband, in dem 90 % der Temperaturwerte liegen ist nun zwischen 22,9 und 23,9 °C aufgespannt und hat mit 1,0 K eine auffallend geringe Breite.

In der folgenden Abbildung wird die Gegenüberstellung der vom Raumfühler in der Wohnküche registrierten Temperaturen für das Reihenhaus RH_S (Rohrregister schneckenförmig) während der beiden Heizsaisonen gezeigt.

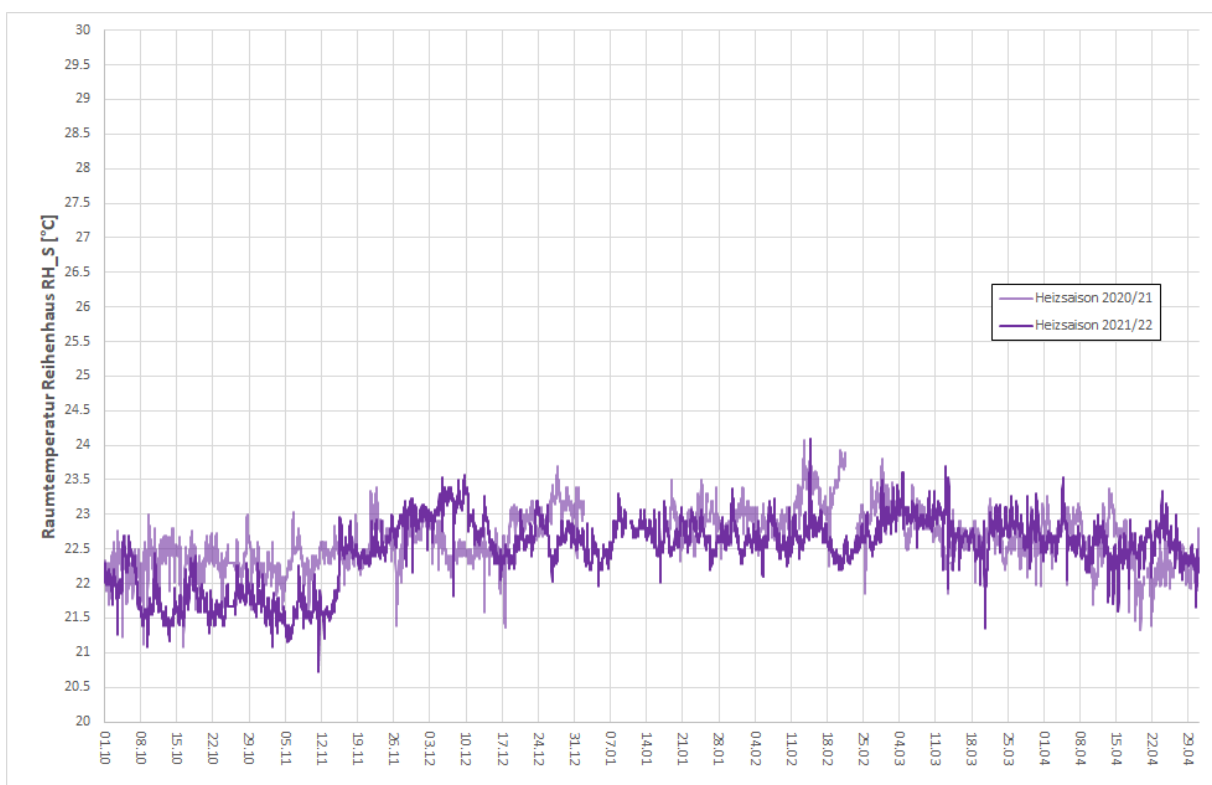


Abb. 35: Zeitlicher Verlauf der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden betrachteten Heizsaisonen in der Wohnküche des Reihenhauses RH_S

Die Temperaturverläufe in den beiden Heizsaisonen erweisen sich bei Reihenhaus RH_S als sehr ähnlich. In den folgenden beiden Abbildungen ist die Abhängigkeit der vom Raumfühler in der Wohnküche registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die beiden Heizsaisonen dargestellt.

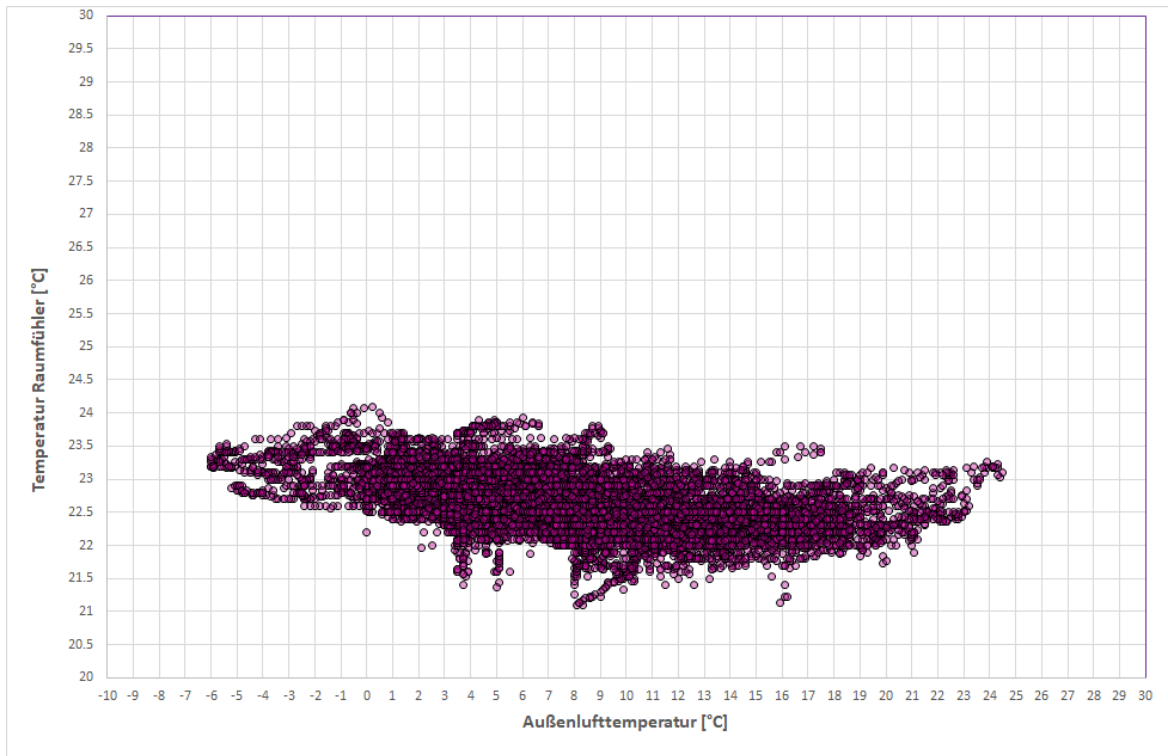


Abb. 36: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_S; Heizsaison 2020/21*

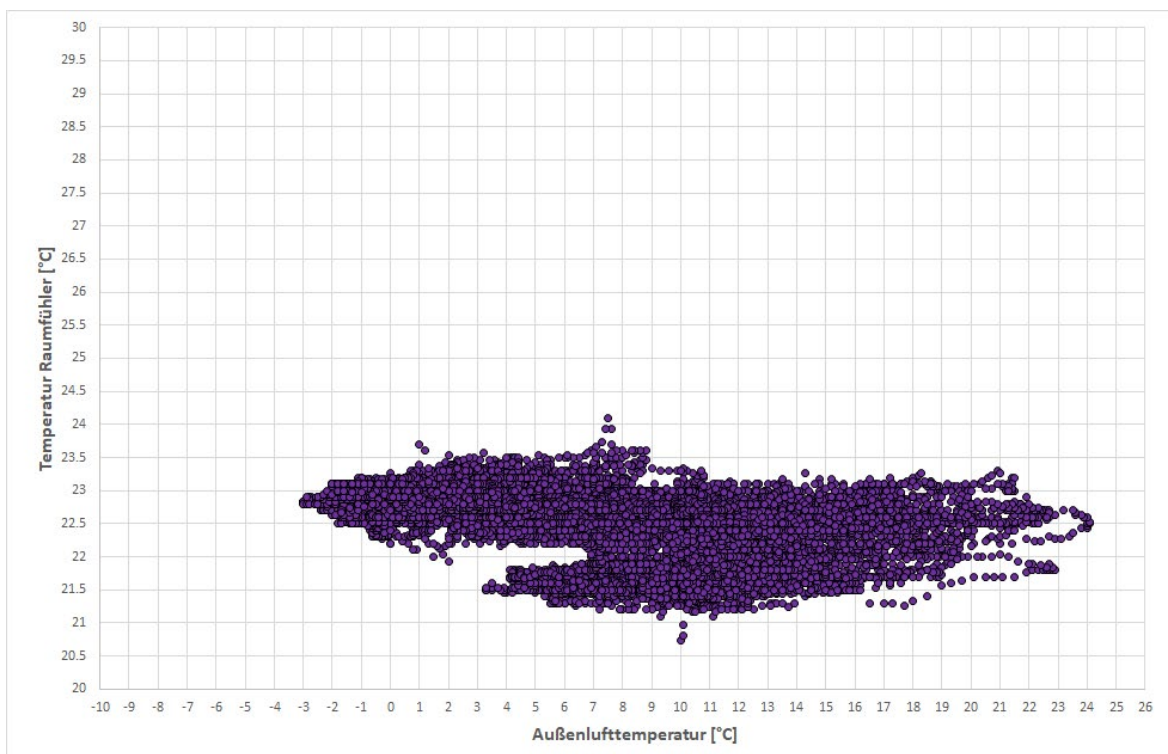


Abb. 37: *Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_S; Heizsaison 2021/22*

Die über die Heizsaison gebildeten Mittelwerte der vom Raumfühler registrierten Temperaturen liegen mit 22,7 °C in der Heizsaison 2020/21 und 22,5 °C in der Heizsaison 2021/22 sehr nahe beieinander. Die Breite des Temperaturbands, innerhalb dessen 90 % der registrierten Werte liegen, ist für die Heizsaison 2020/21 mit 1,3 K (Werte zwischen 22,1 und 23,4 °C) etwas kleiner als jene für die Heizsaison 2021/22 mit 1,6 K (Werte zwischen 21,5 und 23,1 °C).

5.3.3 Stromverbrauch

In der Folge wird der Stromverbrauch der Wärmepumpen für die Heizsaison 2021/22 analysiert und die Verteilung des Verbrauchs auf Zeiten mit Windüberschussstrom und solche ohne Windüberschuss („Normalstrom“) vertieft behandelt.

Da die auf das Windsignal abgestimmte Regelung der Wärmepumpen für das Wohnhaus auf der einen Seite und die Reihenhäuser auf der anderen Seite verschieden umgesetzt wurde, werden in der Folge das Wohnhaus und die Reihenhäuser gesondert besprochen.

5.3.3.1 Wohnhaus

Im Wohnhaus werden für jede Wohnung neben den von den Raumfühlern registrierten Temperaturen auch sog. „Betonkerntemperaturen“ registriert und ausgewertet. Die Betonkerntemperaturen werden von Fühlern gemessen, die in der Mitte zwischen je 2 Rohren des einbetonierten Rohrregisters positioniert und in etwa 5 cm über der Ebene des Registers situiert sind. Neben dem Windsignal wird für die Regelung des Wärmepumpenbetriebs insofern auch auf die Betonkerntemperaturen zurückgegriffen, als der Mittelwert von Kerntemperaturfühlern von vier verschiedenen Wohnungen gebildet und als Signal für die Temperatur der Betondecken interpretiert wird. Wie bereits angesprochen, laufen die Wärmepumpen an, sobald dieses Signal während der Heizsaison den Grenzwert von 24,0 °C unterschreitet. Ist dies nicht der Fall, so wird je nach der Stellung des Windsignals entschieden, ob – im Fall von Windüberschussstrom – Wärme erzeugt und den Betondecken zugeführt wird oder ob – im Fall der Zeiten ohne Windüberschussstrom – die Wärmepumpen stillstehen.

Anfang Oktober 2021 wurde das Windsignal vom Energieversorger bereitgestellt und die Regelung des Wärmepumpenbetriebs auf die gezielte Nutzung von Windüberschussstrom umgestellt. Seither wird registriert, zu welchen Zeiten die Wärmepumpe läuft und wieviel Strom von dieser verbraucht wird. Als Ergebnis einer diesbezüglichen Analyse zeigt die folgende Abbildung den Stromverbrauch der Wärmepumpen aufgesplittet auf Zeiten mit Windüberschuss („Windstrom“) und solche ohne Windüberschuss („Normalstrom“).

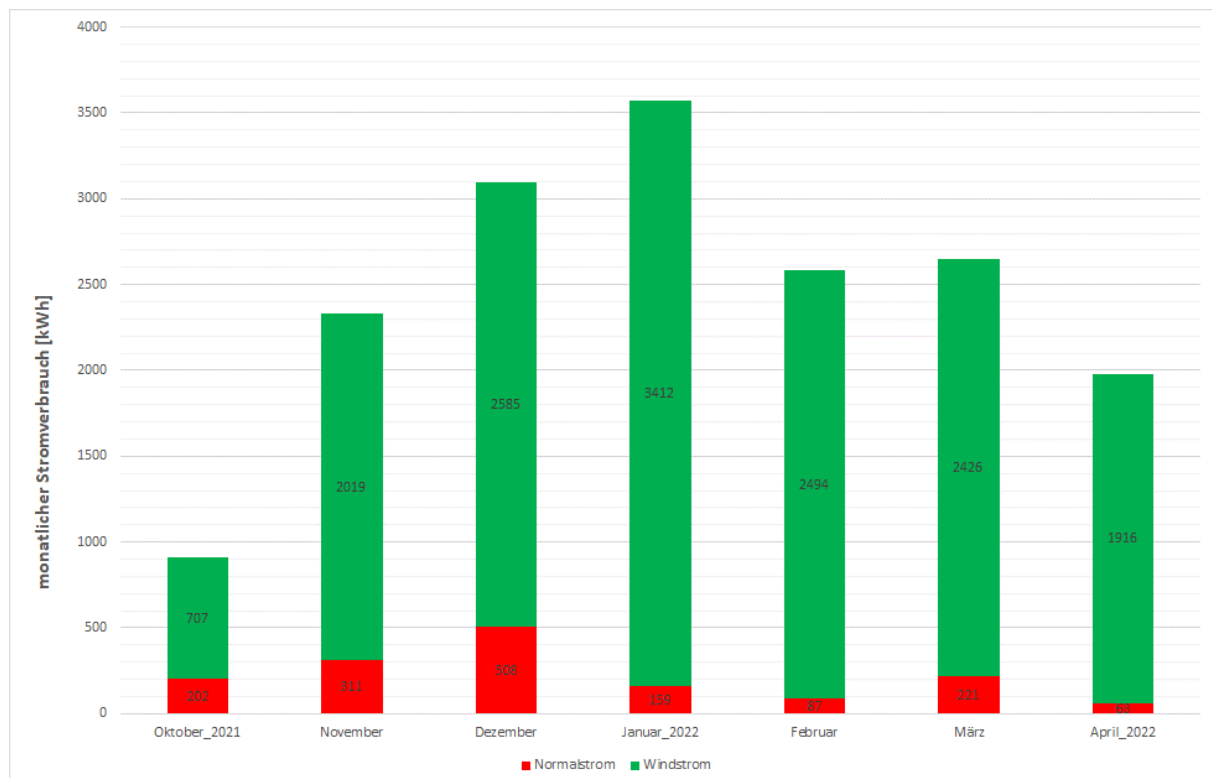


Abb. 38: Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpen im Wohnhaus für die Heizsaison 2021/22

Es zeigt sich, dass der Stromverbrauch der Wärmepumpen im Wohnhaus zum überwiegenden Teil durch Windüberschussstrom gedeckt wurde. In folgender Tabelle wird der Prozentsatz u der als Windstrom verbrauchten Strommenge E_{Wind} der gesamten von den Wärmepumpen verbrauchten Strommenge

$E_{gesamt} = E_{Wind} + E_{normal}$ gegenübergestellt.

	Prozentsatz u [%]	Prozentsatz v [%]
Oktober 2021	77,8	64,8
November	86,7	59,3
Dezember 2021	83,6	67,8
Januar 2022	95,5	79,0
Februar	96,8	85,0
März	91,7	57,3
April 2022	96,8	68,9

Tab. 6: *prozentueller Anteil u des Windstromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch der Wärmepumpe im Wohnhaus und Anteil v der Zeiten mit Windüberschuss am Gesamtzeitraum; Heizsaison 2021/22*

Die in Abb. 38 gezeigten Stromverbräuche können insofern fehlinterpretiert werden, als das Ergebnis der Regelung der Wärmepumpen nach dem Windsignal von der Dauer der Zeiten mit Windüberschussstrom im jeweiligen Monat überlagert ist. Wie Tab. 6 zeigt, schwankt die monatliche Dauer der Zeiten mit Windüberschuss – ausgedrückt durch den Prozentsatz v – während der Heizsaison 2021/22 erheblich. Es ist daher angezeigt zu versuchen, den Einfluss der Dauer des monatlichen Angebots an Windüberschussstrom aus dem Ergebnis zu eliminieren.

Zu diesem Zweck wird von dem fiktiven Ansatz einer den ganzen Monat gleichförmig durchlaufenden Wärmepumpe ausgegangen, der Stromverbrauch also über den ganzen Monat konstant angenommen. Ersichtlich ergibt sich der Stromverbrauch während der Zeiten ohne Windüberschuss unter dieser Annahme zu

$$E_{fiktiv} = E_{gesamt} \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right) \quad , \quad <1>$$

wobei der Prozentsatz v der Tab. 6 zu entnehmen ist. In folgender Abbildung sind die nach Gleichung <1> errechneten Werte des fiktiven monatlichen Stromverbrauchs während der Zeiten ohne Windüberschuss hell in den Hintergrund gerückt dargestellt und den gemessenen Verbräuchen gegenübergestellt, die in Abb. 38 als „Normalstrom“ bezeichnet sind.

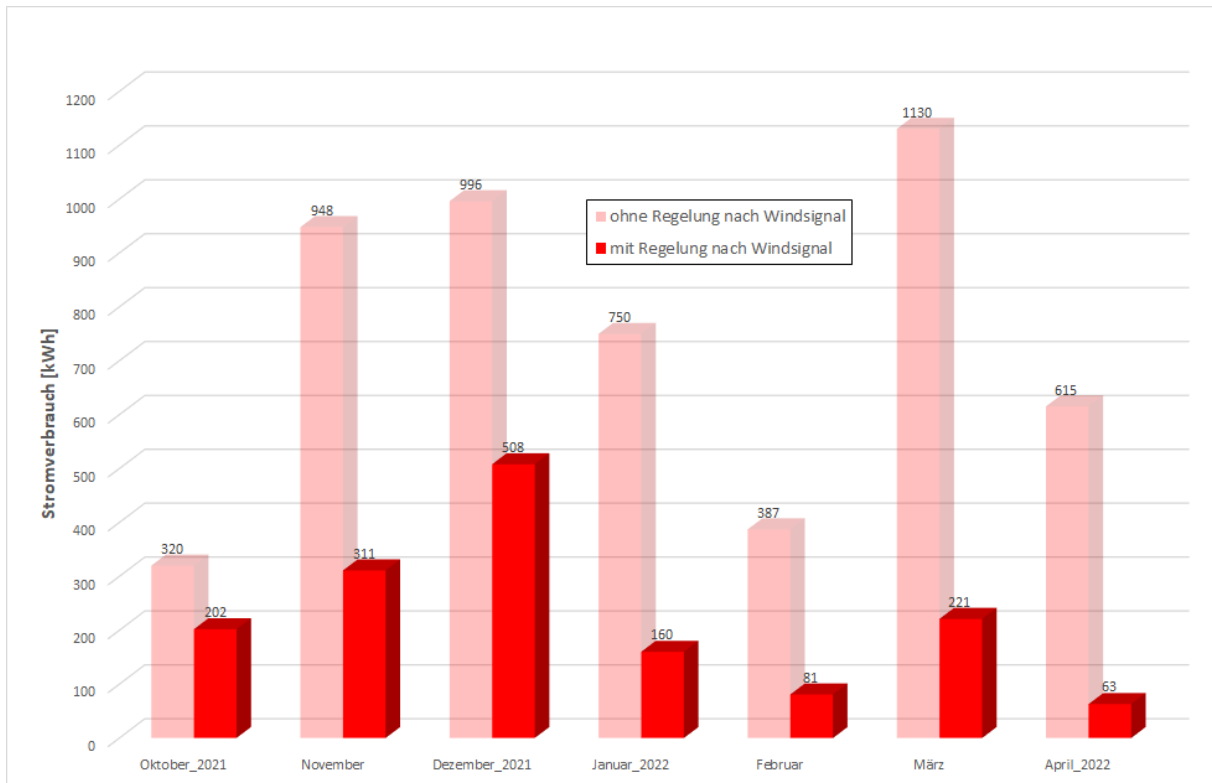


Abb. 39: Wohnhaus: Vergleich der in Zeiten ohne Windüberschuss gemessenen monatlichen Stromverbräuche („Normalstrom“) mit den entsprechenden Stromverbräuchen bei durchlaufender Wärmepumpe

In folgender Tabelle sind die Verhältnisse aus den gemessenen „Normalstromverbräuchen“ E_{normal} den nach Gleichung <1> ermittelten fiktiven Monatsverbräuchen E_{fiktiv} als Prozentsätze w gemäß

$$w = \frac{E_{normal}}{E_{fiktiv}} \cdot 100 \quad <2>$$

gegenübergestellt.

	Prozentsatz w [%]
Oktober 2021	(63,1)
November	32,8
Dezember 2021	51,0
Januar 2022	21,3
Februar	20,9
März	19,6
April 2022	10,2

Tab. 7: prozentueller Anteil w des Normalstromverbrauchs am fiktiven Verbrauch ohne Windstromregelung

Je kleiner der prozentuelle Anteil w ist, desto effektiver arbeitet die nach dem Windsignal ausgerichtete Regelung der Wärmepumpen.

Gemäß Tab. 7 unterscheiden sich die Ergebnisse für die Monate im Jahr 2021 stark von jenen des Jahres 2022. Von Oktober bis Dezember 2021 ist die Ausnutzung des Windüberschussstroms deutlich ineffektiver als in den folgenden Monaten des Jahres 2022. Die Gründe für diesen stark ausgeprägten Effekt wurden in detaillierten Analysen zu den Stromverbräuchen der Wärmepumpen im Wohnhaus gefunden. Diese Erkenntnisse sind im Folgenden kurz skizziert und im Anhang 8.1 detailliert festgehalten.

Der Anteil w liegt im Oktober 2021 sehr hoch, was zum einen auf die erst im Laufe des Monats erfolgte Umstellung der Regelung auf das Windsignal zurückzuführen ist. Zum anderen ist der Oktober 2021 insofern nicht repräsentativ, als die Wärmepumpen ab 14.10.21 ausgefallen sind, was erst bei einer routinemäßigen Wartung am 27.10.21 entdeckt wurde. Wie die in Anhang 8.1 zusammengefasste Analyse zeigt, lässt der Stromverbrauch der Wärmepumpen im Oktober 2021 keinerlei Rückschluss auf das Funktionieren der Wärmepumpenregelung nach dem Windsignal zu. Der Prozentsatz w ist aus diesem Grund in Tab. 7 in Klammern gesetzt.

Im November 2021 sinkt der Prozentsatz w auf 32,8 % (siehe Tab. 7), ist aber dennoch höher als die für die Monate des Jahres 2022 rückgerechneten Werte. Grund dafür ist das Auftreten einer mit 4,5 Tagen Dauer doch sehr langen windarmen Zeit in der Monatsmitte – siehe Anhang 8.1. Während dieser Zeit kühlten die Decken so weit aus, dass zur Wahrung des thermischen Komforts auch trotz des Fehlens von Windüberschussstrom nachgeheizt werden musste.

Der zu hohe Wert des Prozentsatzes w für Dezember 2021 (51 %) lässt sich auf Ausfälle der Wärmepumpen am Anfang und am Ende des Monats zurückführen – siehe Anhang 8.1. Diese Ausfälle verursachten jeweils eine Absenkung der in den Betondecken gemessenen Kerntemperaturen, was in der Folge zu dem Erfordernis einer Nachheizung führte. Nach dem Anlaufen der Wärmepumpen wird diese Nachheizung auch während Zeiten ohne Windüberschuss nicht unterbrochen, solange die zur Wärmepumpen-Regelung herangezogenen mittleren Kerntemperaturen die Untergrenze von 24 °C nicht überschritten haben. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass der thermische Komfort in den Wohnungen auch durch den mehrfachen Ausfall der Wärmepumpen nicht negativ beeinflusst wurde.

Erst mit Anfang 2022 waren alle störenden Einflüsse auf die Laufzeiten der Wärmepumpen behoben. Dies führte ersichtlich dazu, dass der Anteil w in die Gegend von 20 % absinkt und nahezu unabhängig vom jeweilig vorliegenden Angebot an Windüberschussstrom blieb. Lediglich in der Übergangszeit (siehe April 2022 in Tab. 7) wird w mit 10,2 % noch deutlich kleiner. Dies ist insofern plausibel, als die Unterbrechung der Wärmeversorgung der Betondecken während windarmer Zeiten bei kleiner werdendem Heizwärmebedarf immer leichter umsetzbar wird.

Es ist somit gelungen, den Verbrauch an „Normalstrom“ auf ca. 1/5 jenes Verbrauchs zu reduzieren, der bei gleichmäßig durchlaufender Wärmepumpe zu erwarten wäre. Anders ausgedrückt heißt dies, dass ca. 80 % des während der Zeiten ohne Windüberschussstrom anfallenden Verbrauchs in die Zeiten mit Windüberschussstrom „verschoben“ werden konnten. Damit wird einerseits das Überangebot an Strom während windreicher Zeiten genutzt. Andererseits wird der Stromverbrauch während Zeiten ohne Windüberschuss gezielt und deutlich spürbar reduziert.

5.3.3.2 Reihenhäuser

Bei den Reihenhäusern wird das Windsignal nur insofern berücksichtigt, als zu Zeiten mit Windüberschuss der Wärmetransport in die Rohrregister der Bauteilaktivierung erhöht wird. Im Gegensatz zum Wohnhaus wird in windarmen Zeiten die Wärmeerzeugung durch die Wärmepumpe auch dann nicht gesperrt, wenn die thermisch aktivierten Decken warm genug sind, um eine hinreichende Beheizung der Räume des Reihenhauses zu gewährleisten.

Generell ist zu beachten, dass die Wärmepumpe in den Reihenhäusern nicht nur die Wärmeversorgung, sondern auch die Erzeugung der Wärme für die Warmwasserbereitung zur Gänze übernimmt.

Die folgende Abbildung zeigt die Monatssummen des Stromverbrauchs des Reihenhauses RH_M für die Heizsaison 2021/22, wobei zwischen dem Verbrauch zu windarmen Zeiten („Normalstrom“) und solchem während Zeiten von Windüberschuss („Windstrom“) unterschieden wird.

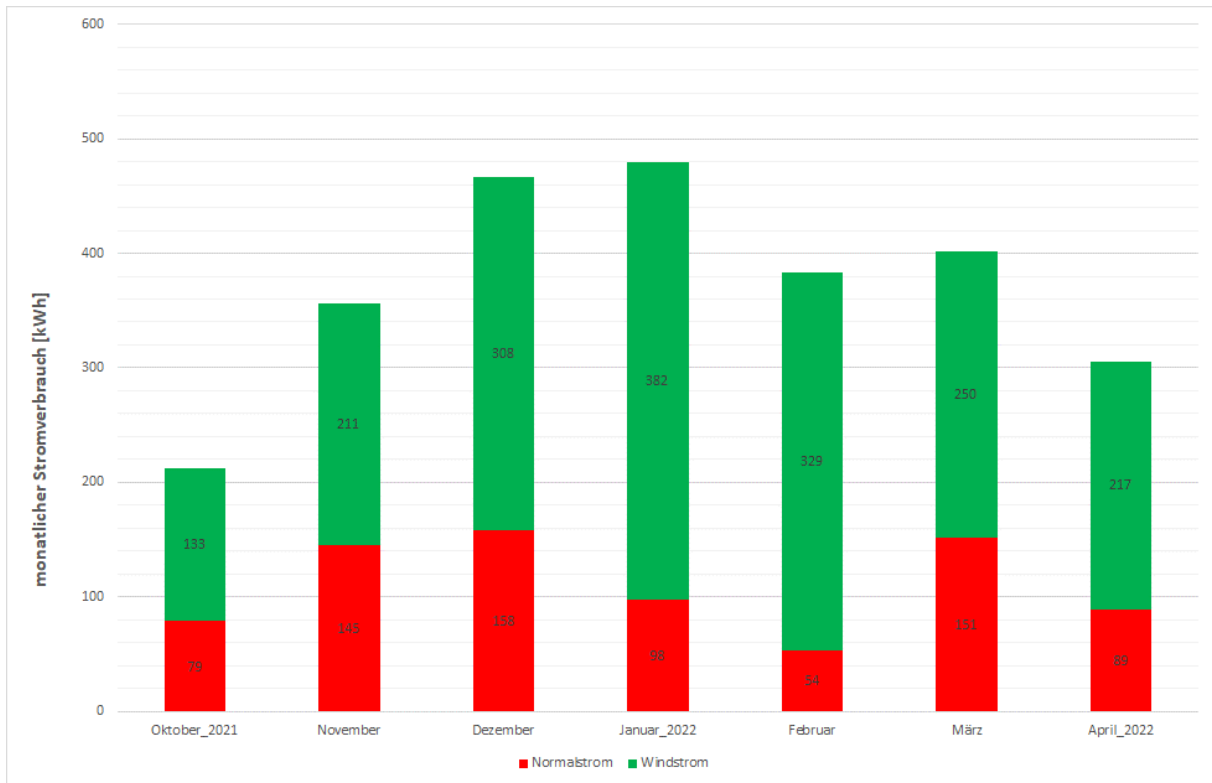


Abb. 40: Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpe in Reihenhaus RH_M für die Heizsaison 2021/22

Die in Abb. 40 dargestellte monatliche Aufteilung zwischen Wind- und Normalstrom ist in folgender Tabelle als Prozentsatz u wiedergegeben.

	Prozentsatz u [%]	Prozentsatz v [%]
Oktober 2021	62,9	64,8
November	59,3	59,3
Dezember 2021	66,1	67,8
Januar 2022	79,6	79,0
Februar	86,0	85,0
März	62,3	57,3
April 2022	70,8	68,9

Tab. 8: prozentueller Anteil u des Windstromverbrauch am Gesamtstromverbrauch der Wärmepumpe im Reihenhaus RH_M und Anteil v der Zeiten mit Windüberschuss am Gesamtzeitraum; Heizsaison 2021/22

Ersichtlich unterscheiden sich bei Reihenhaus RH_M die Prozentsätze u und v nur unwesentlich. Dies ist ein erster Hinweis darauf, dass die in den Reihenhäusern umgesetzte Regelung nach dem Windsignal keine Wirkung in Hinsicht auf die gezielte Ausnutzung von Windüberschussstrom hat. In folgender Abbildung wird dieser Umstand mittels Gegenüberstellung des „fiktiven“ Stromverbrauchs der Wärmepumpe gemäß Gleichung <1> und dem tatsächlich während windarmer Zeiten gemessenen Stromverbrauch untermauert.

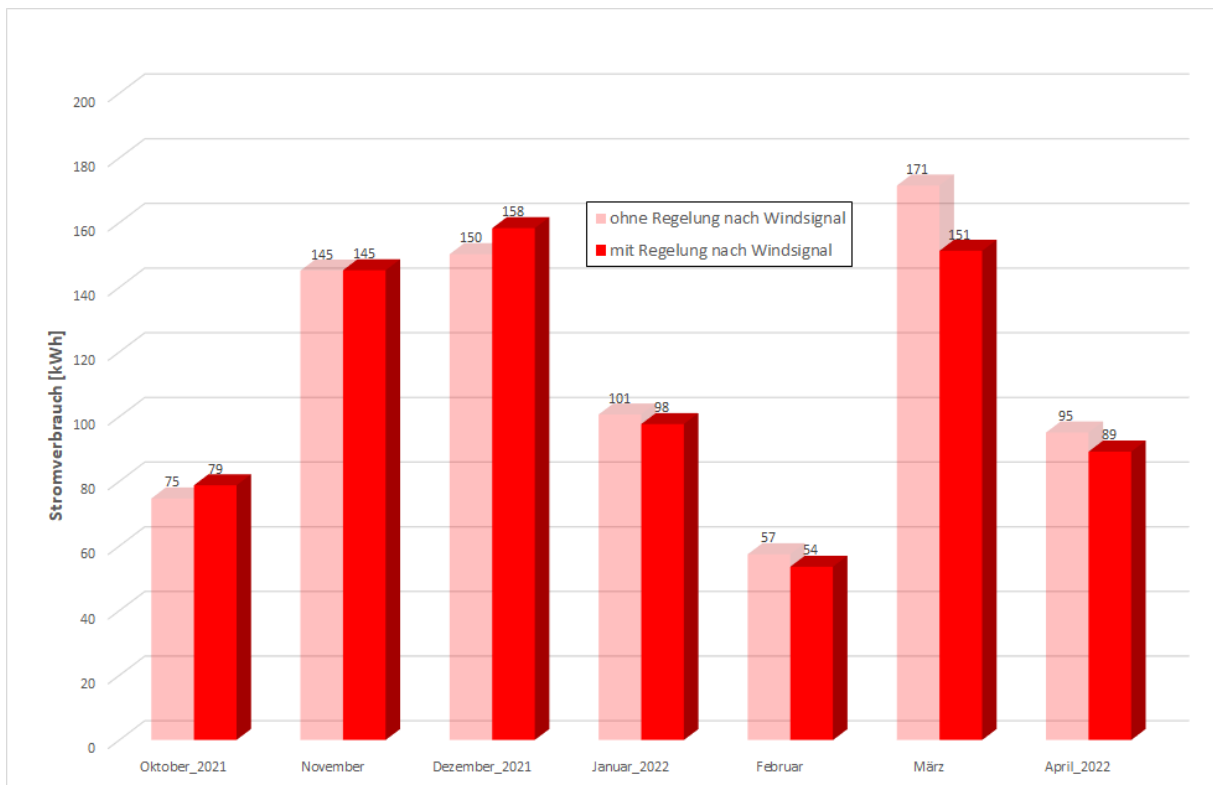


Abb. 41: Reihenhaus RH_M: Vergleich der in Zeiten ohne Windüberschuss gemessenen monatlichen Stromverbräuche („Normalstrom“) mit den entsprechenden Stromverbräuchen bei durchlaufender Wärmepumpe

Die Regelung nach dem Windsignal hat bei Reihenhaus RH_M keine erkennbare Auswirkung auf die intendierte Verschiebung des Stromverbrauchs von windarmen Zeiten in Zeiten mit Windüberschuss.

Die folgenden Darstellungen zeigen die Ergebnisse der Analysen für das Reihenhaus RH_S.

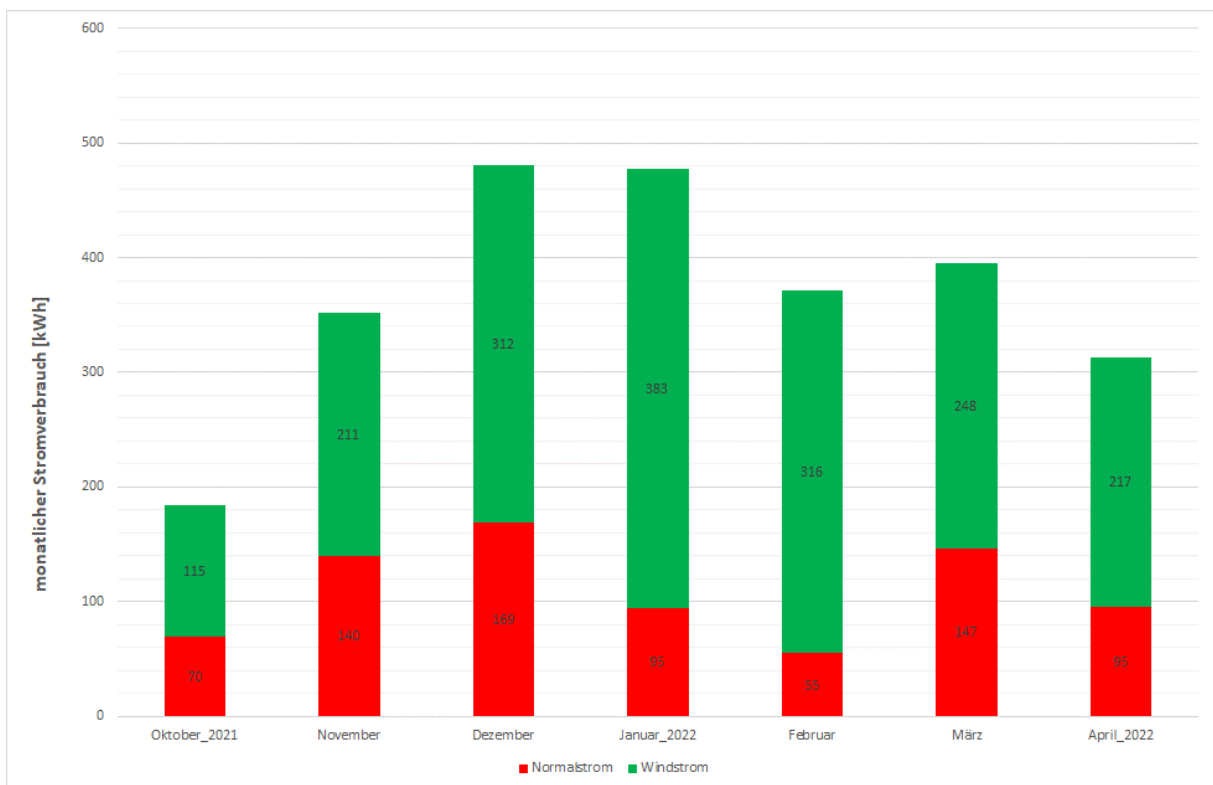


Abb. 42: Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpe in Reihenhaus RH_S für die Heizsaison 2021/22

In folgender Tabelle sind die prozentuellen Anteile u und v für das Reihenhäuser RH_S aufgelistet.

	Prozentsatz u [%]	Prozentsatz v [%]
Oktober_2021	62,3	64,8
November	60,1	59,3
Dezember_2021	64,9	67,8
Januar_2022	80,2	79,0
Februar	85,2	85,0
März	62,8	57,3
April_2022	69,5	68,9

Tab. 9: *prozentueller Anteil u des Windstromverbrauch am Gesamtstromverbrauch der Wärmepumpe im Reihenhäuser RH_S und Anteil v der Zeiten mit Windüberschuss am Gesamtzeitraum; Heizsaison 2021/22*

Es zeigt sich ein zu Tab. 8 für Reihenhäuser RH_M ähnliches Bild, was auch von folgender Abbildung untermauert wird.

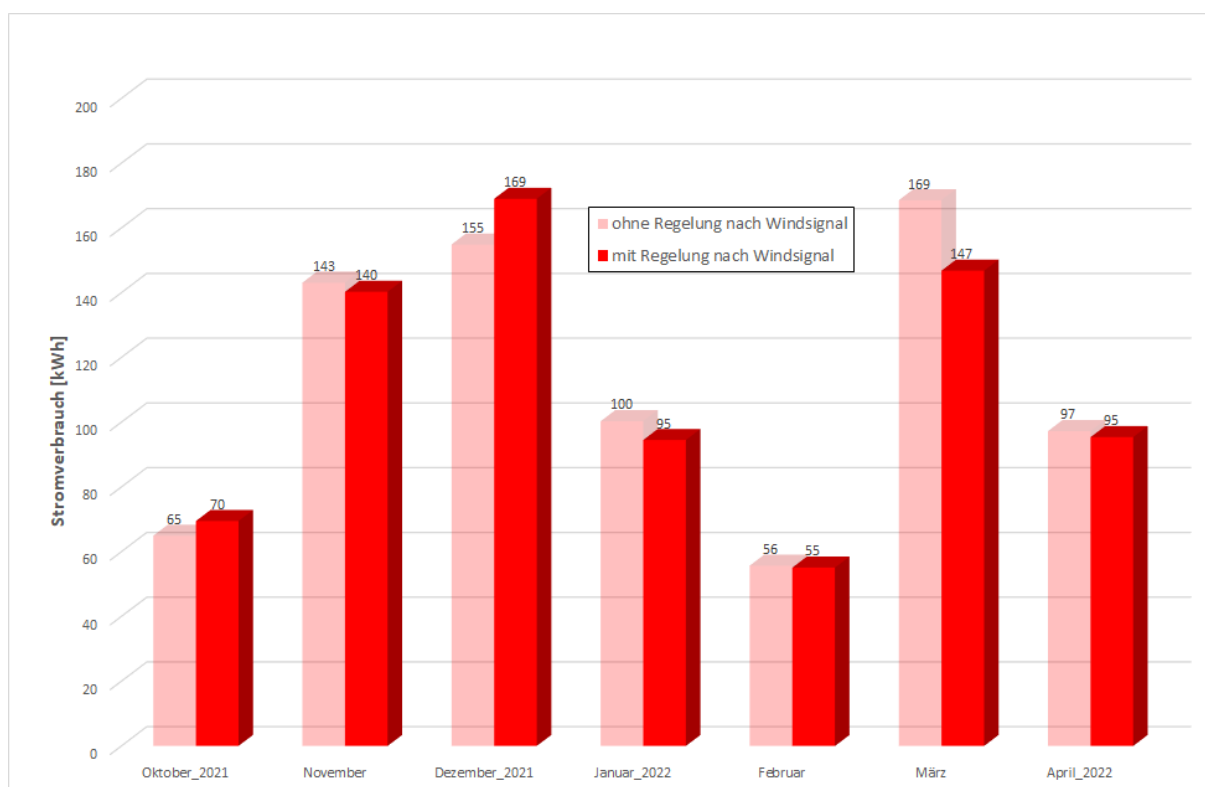


Abb. 43: *Reihenhäuser RH_S: Vergleich der in Zeiten ohne Windüberschuss gemessenen monatlichen Stromverbräuche („Normalstrom“) mit den entsprechenden Stromverbräuchen bei durchlaufender Wärmepumpe*

Die Aufteilung des Stromverbrauchs zwischen windarmen Zeiten und Zeiten mit Windüberschuss unterscheidet sich für die untersuchten Reihenhäuser kaum. Bei beiden Reihenhäusern kann eine Auswirkung der Regelung nach dem Windsignal auf den Stromverbrauch nicht ausgemacht werden.

Um zu ergründen, ob die beiden genauer untersuchten Reihenhäuser RH_M und RH_S in Hinblick auf die Regelung nach dem Windsignal eine Ausnahme bilden oder ob das Regelungsverhalten der Wärmepumpe für alle 14 Reihenhäuser zutrifft, wird die Detailuntersuchung in Hinblick auf die Ausnutzung von Windüberschussstrom auf alle Reihenhäuser ausgedehnt. Als Ergebnis dieser Untersuchung ist in folgender Abbildung der gemessene monatliche Stromverbrauch der Wärmepumpe für alle Reihenhäuser dem fiktiven, sich bei durchlaufender Wärmepumpe ergebenden Stromverbrauch für den Monat Dezember 2021 gegenübergestellt.

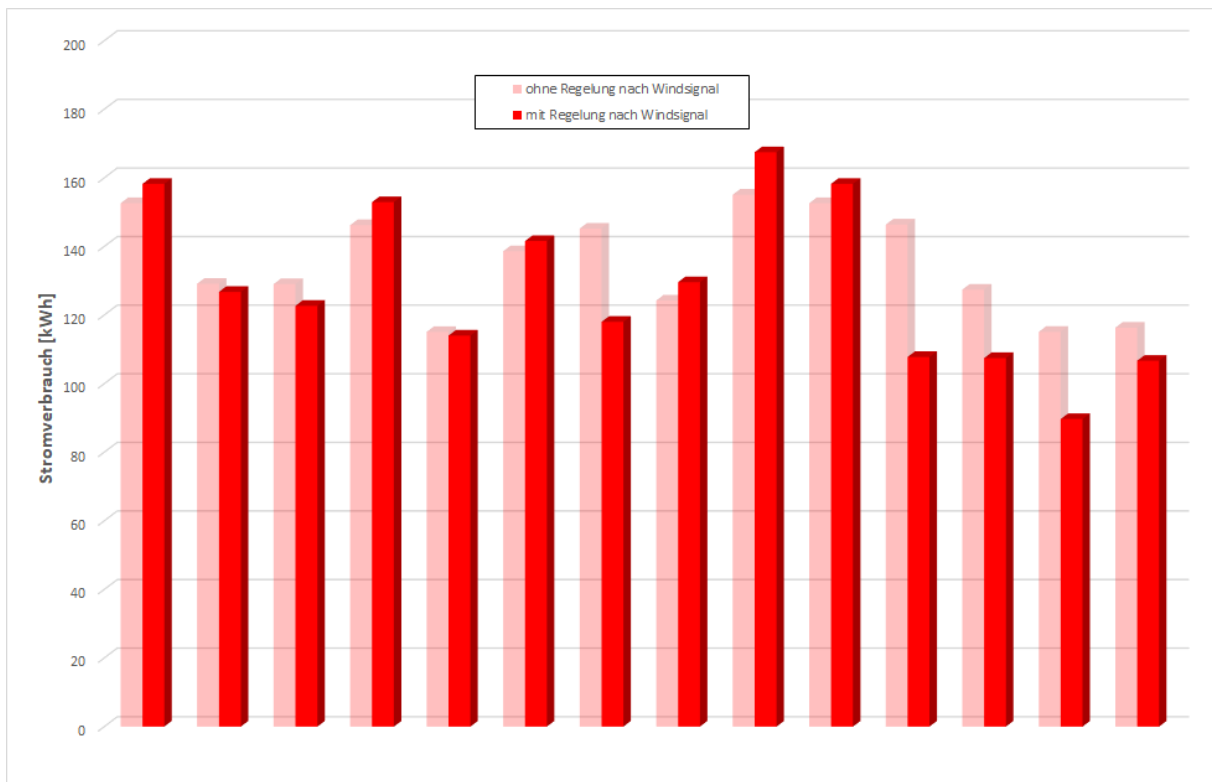


Abb. 44: Vergleich der in Zeiten ohne Windüberschuss gemessenen monatlichen Stromverbräuche („Normalstrom“) mit den entsprechenden Stromverbräuchen bei durchlaufender Wärmepumpe aller 14 Reihenhäuser; Dezember 2021

Offenkundig trifft die für die beiden Reihenhäuser RH_M und RH_S getroffene Aussage, wonach eine Auswirkung der Regelung der Wärmepumpe nach dem Windsignal auf den Stromverbrauch nicht erkennbar ist, auf fast alle Reihenhäuser zu. Eine genauere Sichtung der Zeitverläufe der elektrischen Leistungsaufnahmen der Wärmepumpen führte zu dem Ergebnis, dass weder in Zeiten mit Windüberschuss ein erhöhter Stromverbrauch zu verzeichnen ist noch in windarmen Zeiten ein Rückgang des Stromverbrauchs auftritt. Dies gilt für alle Reihenhäuser.

Es zeigt sich somit, dass im Gegensatz zum Wohnhaus bei den Reihenhäusern das gesetzte Ziel einer Ausnutzung der thermischen Bauteilaktivierung als Energiespeicher zum Ausgleich von Schwankungen des Stromangebots nicht erreicht wird.

5.4 Wissenschaftliches Monitoring

Im Zuge eines Monitorings können zum einen das Funktionieren eines Systems überprüft und dokumentiert werden sowie Hinweise zur Behebung von Systemfehlern gegeben und damit Optimierungen durchgeführt werden. Zum anderen bietet sich die Chance, Berechnungsansätze und Berechnungsparameter insofern zu überprüfen, als rechnerische Prognosen mit den in der gebauten Praxis gemessenen Daten verglichen werden. Vereinfachend werden in der Folge solche Überprüfungen als „wissenschaftliches Monitoring“ bezeichnet.

5.4.1 Wärmestromdichte und Wärmeübergangskoeffizient

Für die Auslegung einer thermisch aktivierten Decke ist die Kenntnis des im Heizbetrieb zu erwartenden flächenbezogenen Wärmestroms von besonderer Bedeutung. Diese Größe kann mittels Berechnung des mehrdimensional ablaufenden Wärmestroms durch die beheizte Decke mit hoher Genauigkeit berechnet werden. Die solchen „Wärmebrückenberechnungen“ zugrunde liegenden theoretischen Grundlagen fußen auf dem Fourier'schen Wärmestromansatz, der als bestens abgesichert angesehen werden kann.

Unsicher sind bei solchen Berechnungen lediglich die als Eingabegrößen eingehenden Wärmeübergangskoeffizienten α . Im zumeist verwendeten vereinfachten Modell wird ein „gesamter“ Wärmeübergangskoeffizient angesetzt (siehe z. B. (4)), der die Einflüsse des Wärmestroms aufgrund des Austauschs von Wärmestrahlung und jene aufgrund des konvektiven Austauschs mit der Raumluft in sich vereinigt. Dieser Wärmeübergangskoeffizient hängt sicherlich von der Raumgeometrie, den Temperaturen aller Oberflächen, der Oberflächenrauigkeit und der Lufttemperatur ab und ist somit in fast allen Fällen nicht eindeutig festlegbar. Dem gegenüber steht die Tatsache, dass die den Berechnungen zugrunde zu legenden Wärmeübergangskoeffizienten oder deren Reziprok-Werte – die Wärmeübergangswiderstände – genormt sind. So ist für beheizte Decken gemäß ÖNORM EN ISO 1264-5:2009 (5) ein Wert von $\alpha = 6,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ vorgeschrieben. In der ÖNORM EN ISO 6946:2018

(4) wird für den Wärmeübergangswiderstand ein Wert von $R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ und somit ein Wärmeübergangskoeffizient von $\alpha = 5,88 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ für die Decke bei nach unten gerichteten Wärmestrom angesetzt. Bereits diese Diskrepanz zeigt die Unsicherheit in Hinblick auf eine zutreffende Beschreibung der Wärmeabgabe an der Untersicht einer beheizten Decke.

Die sehr komplexe Problematik des Wärmeübergangs zwischen einem Bauteil und der an diesen Bauteil angrenzenden Luft wurde bereits durch Newton mit dem Ansatz

$$q = \alpha \cdot (\Theta_s - \Theta_u) \quad \langle 3 \rangle$$

insofern entschärft, als postuliert wird, dass der Wärmeübergangskoeffizient α konstant – also auch unabhängig von den anliegenden Temperaturen – ist. Die Wärmestromdichte – also der flächenbezogene Wärmestrom - q wird demnach proportional zur Differenz zwischen der Oberflächentemperatur Θ_s und der „Raumtemperatur“ Θ_u ² angesetzt. Als Proportionalitätsfaktor tritt der Wärmeübergangskoeffizient α auf.

Hier soll versucht werden, aufgrund von Messungen auf den Wärmeübergangskoeffizienten α rückzurechnen. Zum einen soll damit untersucht werden, inwieweit der Ansatz $\langle 3 \rangle$ für eine zutreffende Beschreibung der im Fall eines gebauten und genutzten Wohnraums gegebenen thermischen Verhältnisse geeignet ist. Zum anderen interessiert, inwieweit die in Normen zu findenden Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten für den Fall einer thermisch aktivierten Decke zutreffen.

Als „Raumtemperatur“ Θ_u wird im Normalfall im Rahmen der Anwendung des Ansatzes $\langle 3 \rangle$ eine „Solltemperatur“ eingesetzt. Hier wird angenommen, dass diese Solltemperatur mit der vom Raumfühler gemessenen Temperatur gut übereinstimmt.

Im Reihenhaus RH_M wurden an die Decke der Wohnküche zwei Sensoren geklebt, die sowohl die Oberflächentemperatur der Decke Θ_s als auch (am gleichen Ort) die Wärmestromdichte q messen.

Die Messpunkte werden in der Folge mit MP_1 und MP_4 bezeichnet. Ihre Lage an der Deckenuntersicht ist in folgender Abbildung markiert.

² Der in (8) eingeführten Konvention folgend, wird die Raumtemperatur im Raum unter der thermisch aktivierten Decke mit dem Index u und jene im Raum oberhalb dieser Decke mit dem Index o gekennzeichnet.

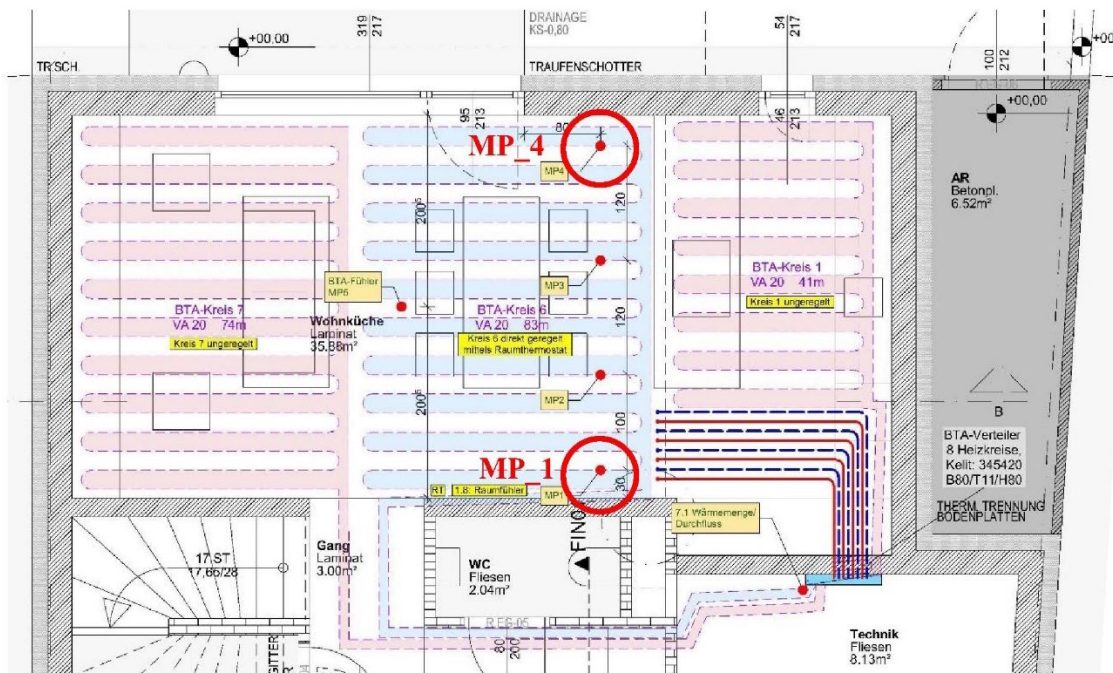


Abb. 45: Skizze der Lage der Messfühler für den Wärmestrom an der Deckenuntersicht der Wohnküche von Reihenhaus RH_M

Der Messfühler am Punkt MP_4 liegt in unmittelbarer Nähe der nahezu südorientierten Außenwand. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Messwerte durch die inneren Oberflächentemperaturen der Außenwand und der Fenstertür stark beeinflusst werden.

Der Messfühler am Punkt MP_1 liegt hingegen in der Nähe der Trennwand zwischen Wohnküche und WC und sollte die Einflüsse der im Winter kühleren Außenbauteile kaum registrieren. Dominierend für die Messergebnisse dieses Fühlers ist sicherlich der Wärmefluss zwischen der Deckenuntersicht und dem Fußboden.

Die folgende Abbildung zeigt die Deckenuntersicht im Bereich des Messpunktes MP_1 mit dem aufgeklebten Wärmestromsensor und einer benachbarten Lüftungsöffnung.

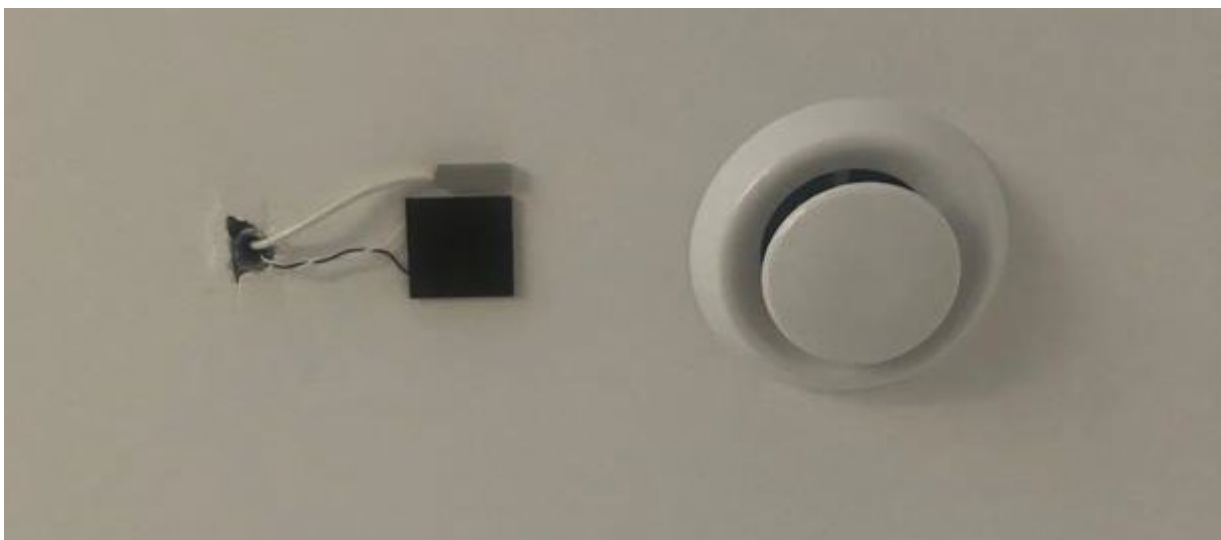


Abb. 46: Sensor für die Messung von Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur am Messpunkt MP_1 der Deckenuntersicht in der Wohnküche des Reihenhauses RH_M

Da auch die Temperatur des Raumfühlers Θ_u registriert wird, kann der Wärmeübergangskoeffizient α für jeden der beiden Fühler gemäß

$$\alpha = \frac{q}{\Theta_s - \Theta_u} = \frac{q}{\Delta\Theta} \quad <4>$$

rückgerechnet werden.

Da die beiden Temperaturen Θ_s und Θ_u nur auf eine Nachkommastelle genau vorliegen, ergibt sich gemäß Gleichung <4> aber das Problem, dass mit kleiner werdenden Temperaturdifferenzen $\Delta\Theta$ die Unsicherheit in Hinblick auf das Ergebnis α immer größer wird. Im Grenzfall verschwindender Temperaturdifferenz bleibt α unbestimmt.

Dem skizzierten Problem wird auf zweierlei Art begegnet. Zum einen wird Gleichung <4> nur zu Zeitpunkten ausgewertet, an denen die Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ groß ist. Dies ist nur an Zeitpunkten während des Heizbetriebs im Tiefwinter verlässlich gegeben.

Beispielhaft ist in folgender Abbildung diese Temperaturdifferenz unter Verwendung der Oberflächentemperatur an Messpunkt MP_1 dargestellt.

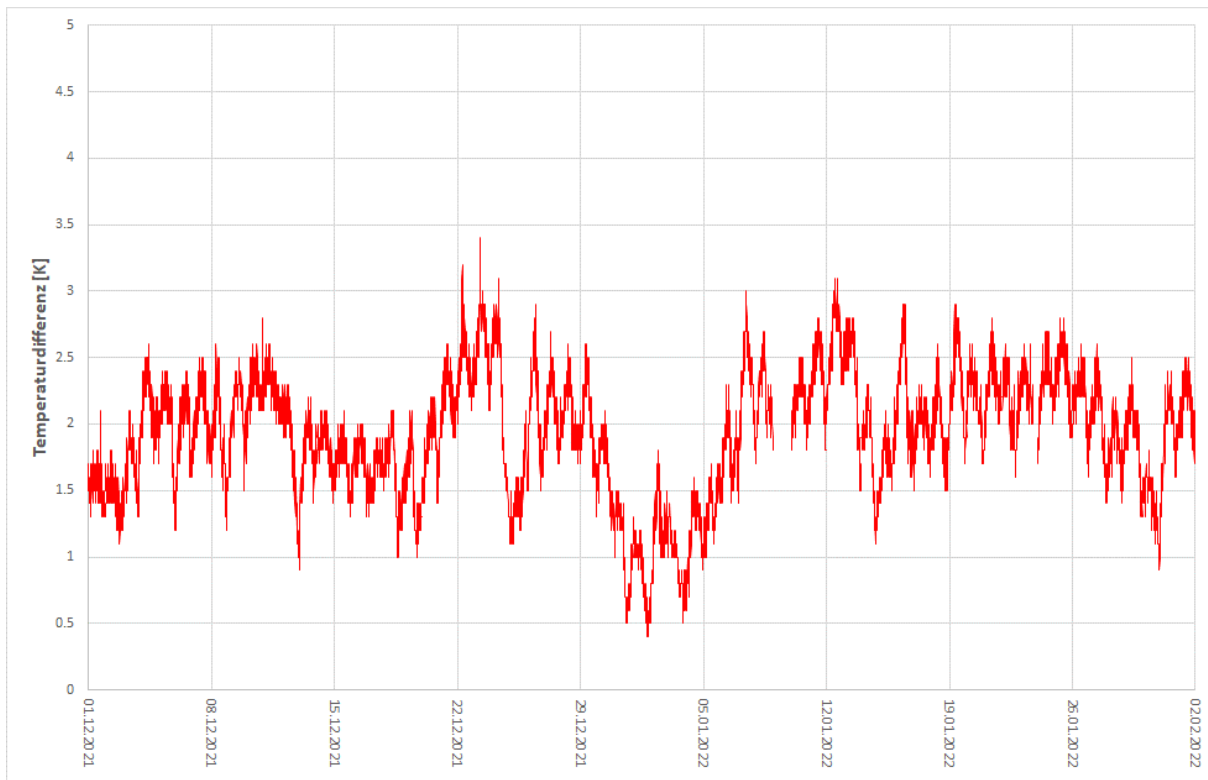


Abb. 47: Zeitlicher Verlauf der Differenz zwischen Oberflächentemperatur der Decke am Messpunkt MP_1 und der vom Raumfühler registrierten Temperatur für den Zeitraum von Dezember 2021 bis Anfang Februar 2022

Ersichtlich zeigt die in obiger Abbildung dargestellt Temperaturdifferenz deutliche Schwankungen um einen Mittelwert von 1,9 °C.

Die am gleichen Punkt MP_1 gemessene Wärmestromdichte zeigt die folgende Abbildung.

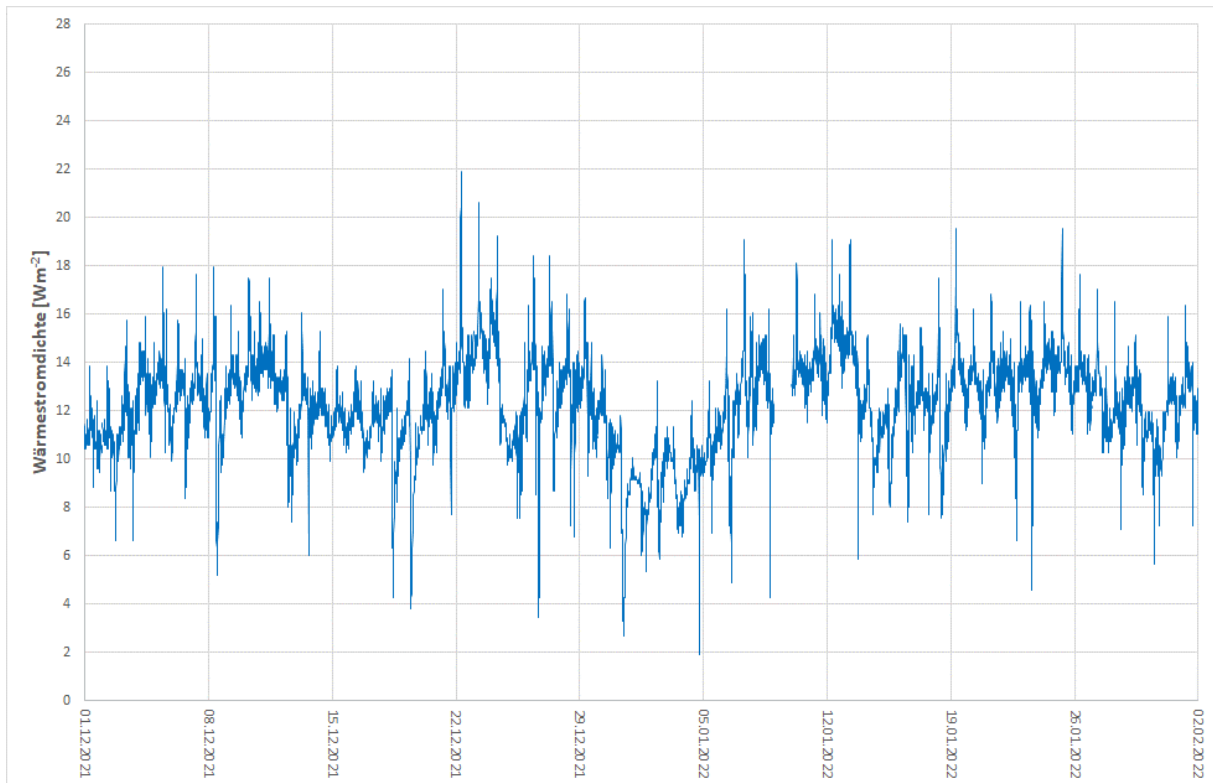


Abb. 48: Zeitlicher Verlauf der am Messpunkt MP_1 gemessenen Wärmestromdichte für den Zeitraum von Dezember 2021 bis Anfang Februar 2022

Die am Messpunkt MP_1 gemessene Wärmestromdichte schwankt um einen Mittelwert von $12,1 \text{ Wm}^{-2}$. Beim Vergleich von Abb. 47 und Abb. 48 fällt der sehr ähnliche zeitliche Verlauf auf, was vorerst die nach Gleichung <3> getroffene Annahme der Proportionalität zwischen Wärmestromdichte und Temperaturdifferenz stützt.

In rechnerischen Abschätzungen – wie z. B. der Erstellung von Energieausweisen – wird die Beziehung <3> auf zeitliche Mittelwerte angewandt. Als Zeitintervall für solche Mittelungen hat sich der Zeitraum eines Monats eingebürgert. Es liegt daher nahe, vorerst die Rückrechnung auf den Wärmeübergangskoeffizienten α gemäß Gleichung <4> auf Monatsmittelwerte zu beziehen. Als Monate mit genügend großer Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ werden hier der Dezember 2021 und der darauffolgende Januar 2022 herangezogen.

Die folgende Tabelle zeigt die als Eingangsdaten auftretenden, aus den Messwerten rückgerechneten Monatsmittelwerte und die daraus folgenden Wärmeübergangskoeffizienten für die Deckenuntersicht.

	Ort	Θ_s [°C]	Θ_u [°C]	$\Delta\Theta$ [K]	q [Wm^{-2}]	α [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]
Dezember 2021	MP 1	25,34	23,44	1,90	12,09	6,36
Januar 2022	MP 1	25,32	23,38	1,94	12,16	6,27
Dezember 2021	MP 4	26,20	23,44	2,76	13,78	4,99
Januar 2022	MP 4	26,16	23,44	2,72	13,96	5,13

Tab. 10: Monatsmittelwerte der Wärmeübergangskoeffizienten für zwei verschiedene Punkte an der Untersicht der thermisch aktivierten Decke

Zum einen zeigt sich, dass die rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten für die beiden betrachteten Monate der Heizsaison 2021/22 im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit gut

übereinstimmen. Zum anderen wird deutlich, dass die Wärmeübergangskoeffizienten sehr stark von der Lage des Messfühlers abhängen.

Im Bereich des Messfühlers MP_1, der an der Decke weitab von der Außenwand mit den Fenstertüren positioniert ist, ergibt sich der aus den Messwerten rückgerechnete Wärmeübergangskoeffizient (gerundet) zu $\alpha = 6,3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und liegt damit etwas unter dem in der ÖNORM EN ISO 1264-5:2009 (5) vorgeschriebenen Wert von $\alpha = 6,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Da im Rahmen der Messungen neben der Temperatur der Deckenuntersicht am Messpunkt MP_1 auch eine Abschätzung der Oberflächentemperatur des Fußbodens (siehe dazu Anhang 8.2) vorliegt, ist eine grobe Abschätzung des Wärmestroms aufgrund des Strahlungsaustauschs zwischen thermisch aktivierter Decke und Fußboden möglich. Die simplifizierende Annahme eines Strahlungsaustauschs zwischen zwei parallelen Ebenen führt für Dezember 2021 auf eine Wärmestromdichte von $q = 11,79 \text{ Wm}^{-2}$ und in der Folge auf einen Wärmeübergangskoeffizienten von $\alpha = 6,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Bereits diese grobe Abschätzung führt deutlich vor Augen, dass im hinteren Bereich der Wohnküche der Wärmetransport von der thermisch aktivierten Decke in den Raum überwiegend auf den Wärmetransport durch Wärmestrahlung zurückgeführt werden kann. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der konvektive Austausch zwischen Deckenuntersicht und Raumluft dort nur eine vernachlässigbare Rolle spielen kann. Diese Erkenntnis ist insofern beachtlich, als sich in unmittelbarer Nähe des Fühlers am Ort MP_1 eine Lüftungsöffnung befindet – siehe Abb. 46.

Der im Bereich der Außenwand und der Fenstertür befindliche Messfühler am Ort MP_4 liefert deutlich höhere Oberflächentemperaturen (siehe Tab. 10: MP_4) und führt auf Wärmeübergangskoeffizienten, die mit (gerundet) $\alpha = 5,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ sehr viel kleiner sind als jene von MP_1. Die höheren Oberflächentemperaturen sind darauf zurückzuführen, dass das von der Wärmepumpe kommende Rohr des Registers direkt an die Außenwand geführt wurde, um dort das Auftreten von zu tiefen Temperaturen zu verhindern. Die Temperatur des Heizmittels im Bereich des Fühlers MP_4 ist somit deutlich höher als jene im Bereich des Fühlers MP_1 – siehe auch den folgenden Abschnitt. Ein Vergleich mit der aufgrund des Strahlungsaustauschs zu erwartenden Wärmestromdichte macht für den Bereich des Messpunkts MP_4 insofern keinen Sinn, als davon ausgegangen werden muss, dass der Strahlungsaustausch zwischen Deckenuntersicht und Außenwand mit Fenstertür den Wärmetransport stark beeinflusst. Zu den inneren Oberflächentemperaturen von Außenwand und Fenstertür liegen aber keine Informationen vor.

Dem Problem der für die Auswertung der Messwerte gemäß Gleichung <4> hinderlichen Ungenauigkeit steht der Umstand gegenüber, dass die Messwerte in 5-Minuten-Abständen über lange Zeiträume vorliegen, womit eine sehr große Anzahl von Messungen zur Verfügung steht. Es liegt daher nahe, die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α von der jeweils zwischen der Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der Temperatur des Raumfühlers bestehenden Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ genauer zu untersuchen. Natürlich muss für eine solche Untersuchung auf statistische Methoden zurückgegriffen werden. Die dabei eingeschlagene Vorgangsweise ist in Anhang 8.3 skizziert.

Die errechnete Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α von der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ ist für den Messpunkt MP_1 in folgender Abbildung dargestellt.

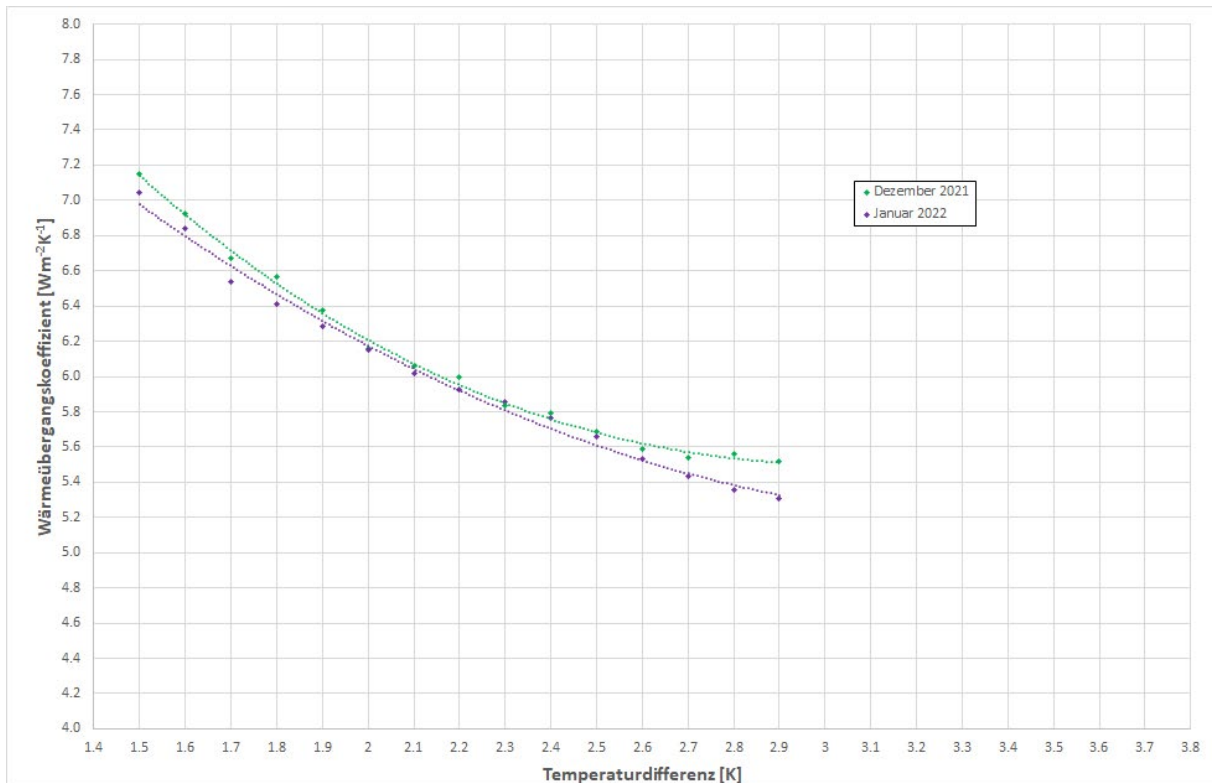


Abb. 49: Abhängigkeit des für Messpunkt MP_1 rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten von der Differenz zwischen der Temperatur an der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur $\Delta\Theta$; Auswertungen für Dezember 2021 und Januar 2022

Die Auswertung der rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten α für die thermisch aktivierte Decke führt zu dem Erkenntnis, dass diese eine deutliche Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ aufweisen. Mit ansteigender Temperaturdifferenz fällt der Wert für den Wärmeübergangskoeffizienten α deutlich ab. Die Abhängigkeit des rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten α von der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ stimmt für die beiden betrachteten Monate im Bereich von $\Delta\Theta = 1,9$ K bis $\Delta\Theta = 2,3$ K sehr gut überein. Ein Grund dafür ist offenkundig, dass diese Temperaturdifferenzen in beiden Monaten sehr oft vorkommen und die Größe der für die statistische Auswertung zur Verfügung stehenden Stichproben ausreichend groß ist. Im Gegensatz dazu kommen Temperaturdifferenzen größer als 2,9 K zu selten vor (siehe Abb. 47), sodass eine Auswertung aufgrund zu kleiner Stichproben nicht sinnvoll ist. Bei Temperaturdifferenzen kleiner als 1,5 K werden die Verteilungen für eine sinnvolle Auswertung zu breit, da gemäß Gleichung <4> die Genauigkeit mit kleiner werdender Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ rasch abnimmt.

Anzumerken ist, dass sich der gemäß Tab. 10 für den Messpunkt MP_1 aus den Monatsmittelwerten rückgerechnete Wert von $\alpha = 6,3$ Wm⁻²K⁻¹ für die mittlere monatliche Temperaturdifferenz von $\Delta\Theta = 1,9$ K auch aus Abb. 49 herauslesen lässt. Die beiden Berechnungsansätze führen somit zu nahezu übereinstimmenden Ergebnissen.

Die folgende Abbildung zeigt die für den nahe der Außenwand positionierten Messpunkt MP_4 ermittelten Temperaturdifferenzen.

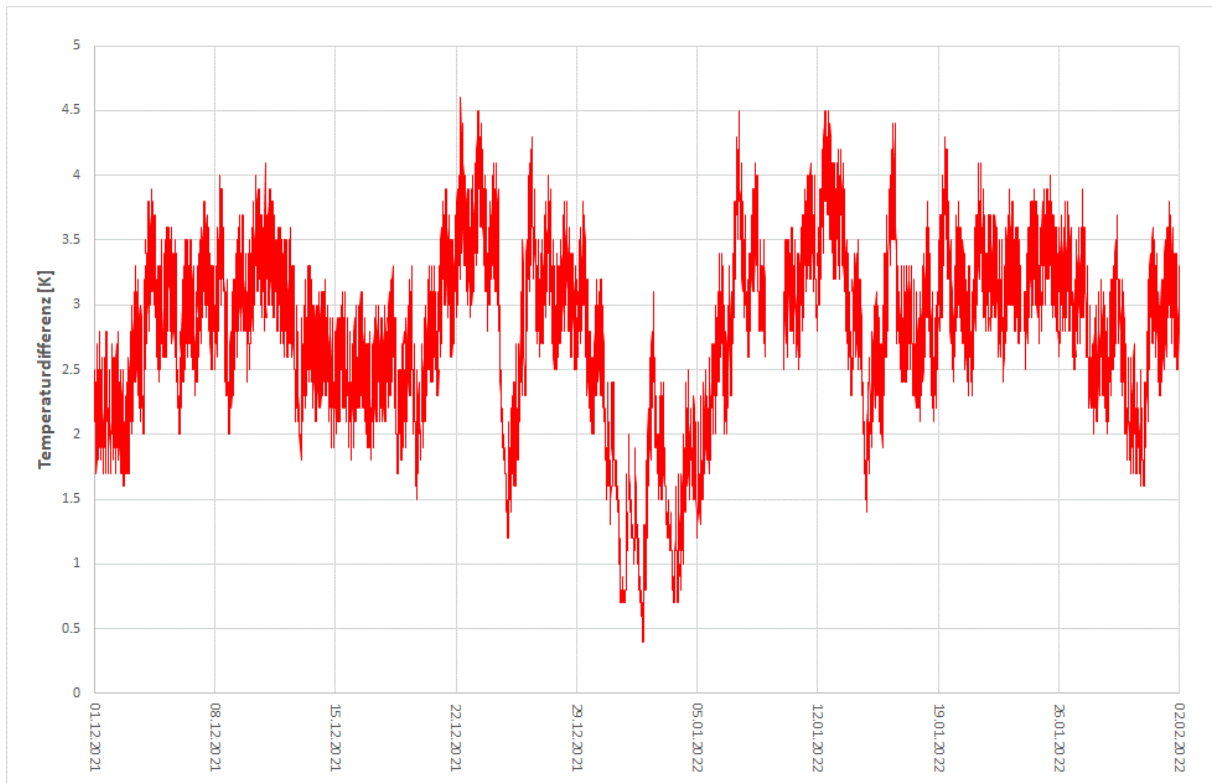


Abb. 50: Zeitlicher Verlauf der Differenz zwischen Oberflächentemperatur der Decke am Messpunkt **MP_4** und der vom Raumfühler registrierten Temperatur für den Zeitraum von Dezember 2020 bis Anfang Februar 2021

Im Vergleich zu Abb. 47 ergeben sich ausgeprägtere und kurzzeitigere Schwankungen der Differenz zwischen Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der Temperatur des Raumfühlers. Zudem liegt der Mittelwert des zeitlichen Verlaufs mit 2,8 K deutlich höher als jener von Messpunkt MP_1 (1,9 K). Die tendenziell höheren Werte der Temperaturdifferenz bei Messpunkt MP_4 sind insofern plausibel, als die Vorlaufleitung des Registers an die Außenwand gezogen wurde, um einem zu starken Auskühlen der Bauteile in der Kante zwischen Außenwand und Decke entgegenzuwirken. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Fluidtemperatur bei Messpunkt MP_4 höher liegt als bei Messpunkt MP_1, was natürlich auch eine höhere Oberflächentemperatur bewirkt.

Die Rückrechnung des Wärmeübergangskoeffizienten unter Zugriff auf die Monatsmittelwerte führt mit $\alpha = 5,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ auf einen sehr niedrigen Wert von α – siehe Tab. 10. Natürlich führt auch das Ergebnis der statistischen Auswertungen zu niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten – siehe die folgende Abbildung.

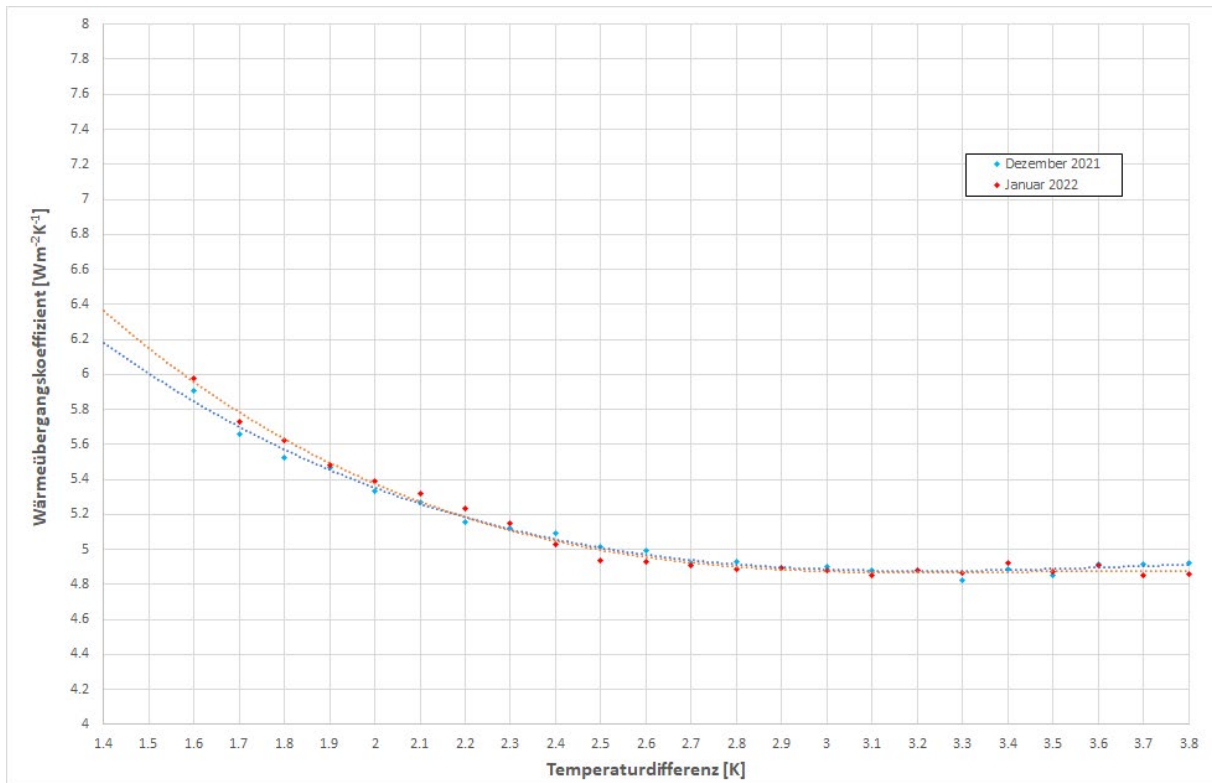


Abb. 51: Abhängigkeit des für Messpunkt MP_4 rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten von der Differenz zwischen der Temperatur an der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur; Datenbasis: Dez. 21 und Jan. 22

Es zeigt sich, dass die für diskrete Werte der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ errechneten Werte für die beiden betrachteten Monate gut übereinstimmen. Da im Bereich des Punktes MP_4 höhere Temperaturdifferenzen mit großer Häufigkeit vorkommen, ist nicht nur das Kleiner-Werden von α mit größer werdender Temperaturdifferenz gut sichtbar. Es zeigt sich zudem, dass bei großen Temperaturdifferenzen der Wärmeübergangskoeffizient einem Grenzwert zustrebt. Ab und über $\Delta\Theta = 2,7 \text{ K}$ liegt der rückgerechnete Wert des Wärmeübergangskoeffizienten (gerundet) konstant bei $\alpha = 4,9 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Im Randbereich zwischen Decke und Außenwand ergeben sich aufgrund der deutlich höheren Oberflächentemperaturen und der daraus resultierenden größeren Werte der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ relativ kleine Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten α .

Abschließend führt die folgende Abbildung die Ergebnisse für beide Messpunkte in einem Diagramm zusammen.

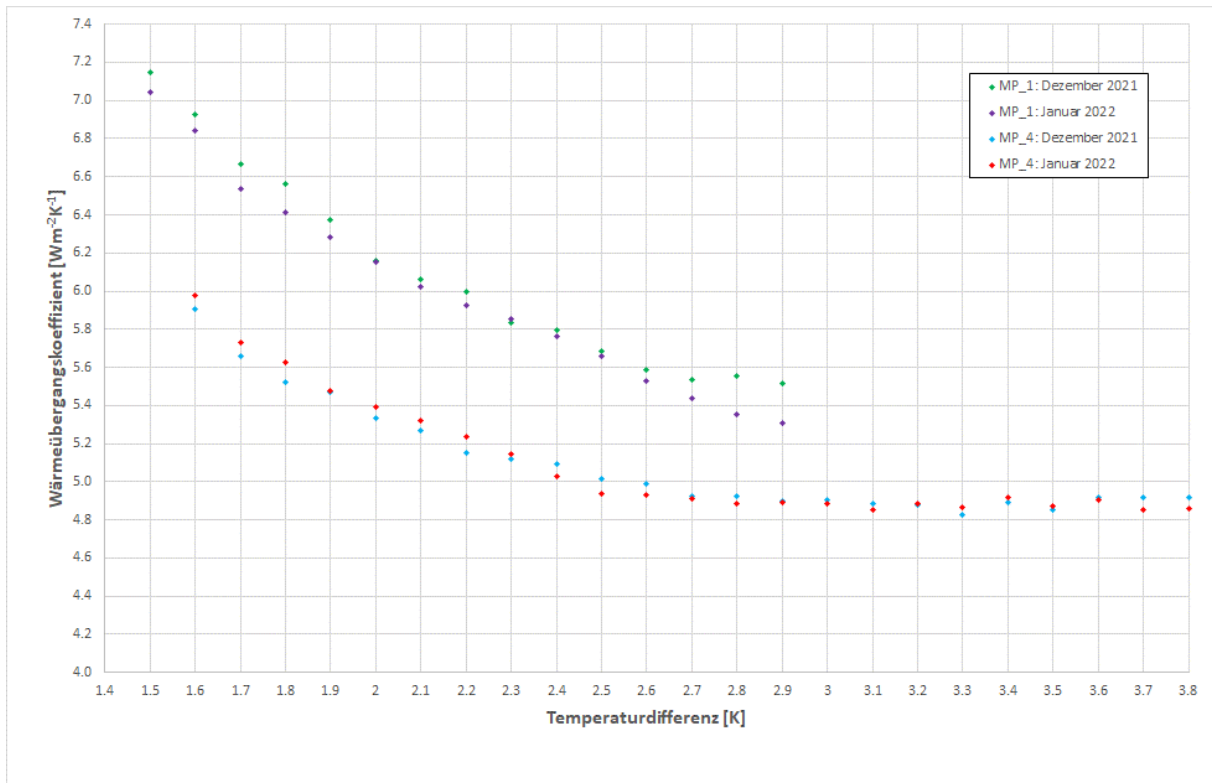


Abb. 52: Abhängigkeit der rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten für die Deckenuntersicht von der Differenz zwischen der Temperatur an der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur; Datenbasis: Dezember 2021 und Januar 2022

Die aus den Messergebnissen rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten zeigen für die beiden an der Untersicht der thermisch aktivierten Decke ausgewählten Punkte einen qualitativ ähnlichen Verlauf. Der Wärmeübergangskoeffizient nimmt mit zunehmender Differenz zwischen der Temperatur der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur ab. Eine Vergleichsrechnung unter Zugrundelegung des simplifizierten Modells eines Strahlungsaustauschs zwischen zwei parallelen Ebenen führt für den Punkt MP_1 auf einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf. Dies stützt die Erkenntnis, dass der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Deckenuntersicht und Fußboden für die Bereiche der Decke weit abseits der Außenbauteile der dominierende Wärmetransportmechanismus sein muss.

Zusammenfassend stellt sich heraus, dass sowohl die Wärmestromdichte als auch der aus dieser rückgerechnete Wärmeübergangskoeffizient eine deutliche Ortsabhängigkeit aufweisen. Der Ansatz eines konstanten, also sowohl von den Temperaturen als auch von der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ unabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten stellt sich zudem als Grobnäherung heraus. Für die hier untersuchte Wohnküche scheint der Norm-Wärmeübergangskoeffizient nach ÖNORM EN ISO 1264-5:2009 (5) mit $\alpha = 6,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ zu hoch angesetzt zu sein.

Die in Abb. 52 gezeigten Verläufe können mit Polynomen 2. und 3. Grades mit hoher Genauigkeit approximiert werden. Damit besteht die Möglichkeit, den Verlauf der Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ durch Anwendung von Gleichung <3> mit einem von $\Delta\Theta$ abhängigen Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen und das Ergebnis der Prognose mit entsprechenden, aber normgemäßen und somit konstanten α -Werten gegenüber zu stellen. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung.

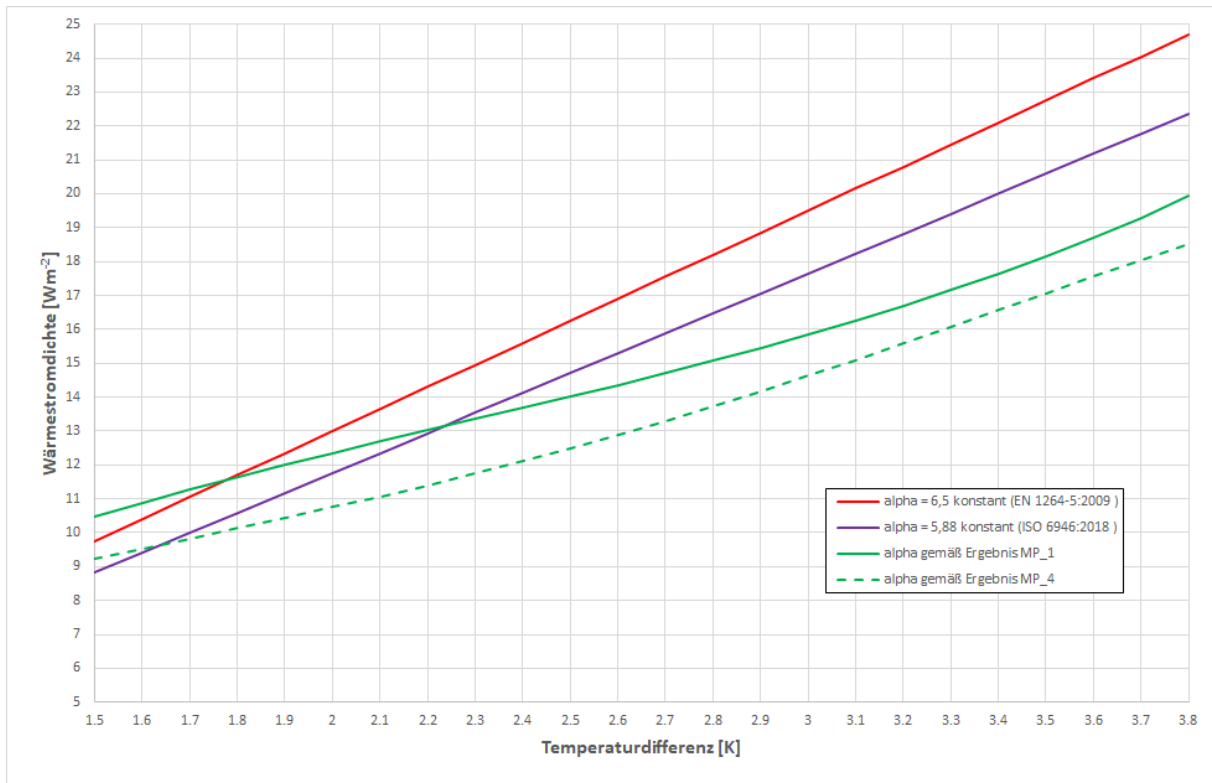


Abb. 53: Abhängigkeit der Wärmestromdichte von der Differenz $\Delta\Theta$ der Temperatur der Deckenuntersicht und der Raumtemperatur

Zum einen zeigt sich, dass bei größeren Temperaturdifferenzen beide Normansätze insofern nicht auf der sicheren Seite liegen, als sich die errechneten Wärmestromdichten deutlich zu hoch ergeben. Im Bereich um $\Delta\Theta = 2,3$ K liegen die unter Verwendung der ÖNORM EN ISO 6946:2018 ($\alpha = 5,88$ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, lila Linie in Abb. 53) errechneten Wärmestromdichten nahe bei jenen, die sich für die Deckenuntersicht um den Punkt MP_1 (grüne, durchgezogene Linie in Abb. 53) ergeben. Wird angenommen, dass dieser Deckenbereich für den größten Teil der thermisch aktivierten Decke repräsentativ ist, so kann unter Berücksichtigung des Umstands, dass Temperaturdifferenzen im Bereich um 2,0 K in den untersuchten Wintermonaten gehäuft auftreten, erwartet werden, dass ein konstanter Norm-Wärmeübergangskoeffizient von $5,88$ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ nach ÖNORM EN ISO 6946:2018 zu einer brauchbaren Näherung für die Wärmeabgabe der gesamten Decke führt.

Bei der Interpretation dieses Ergebnisses muss beachtet werden, dass aufgrund der Dominanz des langwelligigen Strahlungsaustauschs als Wärmetransportmechanismus die sich für die Decke ergebende mittlere Wärmestromdichte stark von der Raumgeometrie, den Bauteilaufbauten und den Bauteiloberflächen abhängt. Die Empfehlung für die Verwendung des Wärmeübergangskoeffizienten nach ÖNORM EN ISO 6946:2018 (4) kann daher nur auf die untersuchte Wohnküche angewandt werden und darf nicht unhinterfragt auf andere Räume und/oder Gebäude angewandt werden.

5.4.2 Das Rohrregister als Wärmetauscher

Wie bereits angesprochen, kann die Berechnung der Wärmeabgabeleistung eines Rohres des Registers mittels eines „Wärmebrückenprogramms“ erfolgen. Als Eingabegröße in eine solche Berechnung geht u. a. die „Rohrtemperatur“, d. h. die Temperatur der Flüssigkeit im Rohr, ein. Das Rohrregister wird aber von Flüssigkeit durchströmt, gibt im Heizfall die Wärme an die Betondecke ab und wird im Zuge der Durchströmung auskühlen. Es ist daher anzunehmen, dass die Rohrtemperatur auch bei konstanter Durchströmung in dem Sinn ortsabhängig sein wird, als entlang des Rohres eine Temperaturabnahme zu erwarten ist.

Bei einem stationären, also zeitunabhängigen Berechnungsansatz, wird als Rohrtemperatur eine angenommene, mittlere Temperatur des Rohrregisters angesetzt. Dieser Mittelwert kann abgeschätzt werden, wenn sowohl die Vorlauf- als auch die Rücklauftemperatur bekannt sind.

Es ist daher von Interesse, die Vorlauf- und Rücklauftemperatur in ihrem Zeitverlauf zu registrieren. Aus diesem Grund wurden in den Reihenhäusern RH_M und RH_S beim Verteiler in die Versorgungsleitung für den Heizkreis 6 als Gegenstand des Interesses ein Wärmemengenzähler eingebaut, der u. a. diese beiden Temperaturen und den Durchfluss misst. Die folgende Abbildung zeigt den Wärmemengenzähler für Heizkreis 6 im eingebauten Zustand.



Abb. 54: Bild des Verteilers mit eingebautem Wärmemengenzähler in Reihenhause RH_M

Um das thermische Verhalten einer thermisch aktivierten Decke in ihrer Funktion als Wärmetauscher besser zu verstehen, wurde zudem versucht, Informationen über die Temperatur des Heizmittels an verschiedenen Punkten des Rohrregisters zu erhalten. Zu diesem Zweck wurden Temperatursensoren in Metallhülsen geschoben und diese Hülsen nach der Verlegung des Rohrregisters an vorher festgelegten Stellen in direkten Kontakt mit dem Rohr gebracht. Die folgende Abbildung zeigt diese auf der Baustelle umgesetzte Messanordnung.



Abb. 55: Reihenhaus RH_M: Vermessung der genauen Position des in der Metallhülse befindlichen Temperatursensors für die Bestimmung der Temperatur des Heizmittels.

Der Temperatursensor wird in guter Näherung die Temperatur an der äußeren Oberfläche des Registerrohres (rotes Rohr in Abb. 55) messen. Die Temperatur des Heizmittels kann daraufhin rechnerisch abgeschätzt werden – siehe Anhang 8.3.

Die Veränderung der Temperatur des Heizmittels wird an 4 Punkten in größeren, in Richtung der Rohrachsen gemessenen Abständen auf die skizzierte Weise in ihrem zeitlichen Verlauf ermittelt. Um den Einfluss der Verlegungsart auf das thermische Verhalten des Rohrregisters zu erfassen, wurden im Reihenhaus RH_M die Rohre des Registers in Mäandern verlegt. Im Reihenhaus RH_S wurde das Register von dem besonders untersuchten Heizkreis 6 in der Decke der Wohnküche in Schneckenform verlegt. Alle anderen Register in Reihenhaus RH_S wurden – wie in sämtlichen anderen Reihenhäusern – mäanderförmig verlegt.

5.4.2.1 Mäanderförmige Verlegung

Die Verlegung der Rohre in Mäandern ist sehr einfach und hat sich wohl daher als übliche Form der Verlegung etabliert. Die folgende Abbildung zeigt das Register des Heizkreises 6 in der Decke der Wohnküche von Reihenhaus RH_M als Beispiel für eine mäanderförmige Verlegung.



Abb. 56: Mäanderförmig verlegtes Register des Heizkreises 6 in der Decke der Wohnküche von Reihenhaus RH_M

Das Rohrregister wurde derart verlegt, dass die vom Verteiler kommende Flüssigkeit zuerst zur Außenwand (links in Abb. 56) geführt wird und dann in Mäandern bis zur anderen Seite der Decke fließt. In Abb. 56 ist die Strömungsrichtung mit einem roten Pfeil gekennzeichnet.

Die Temperatur des Heizmittels wurde in ihrem zeitlichen Verlauf mit der in Abb. 55 gezeigten Messanordnung an 4 Stellen des Rohrregisters gemessen. In folgender Abbildung sind die Orte dieser Messungen im Verlegeplan hervorgehoben.

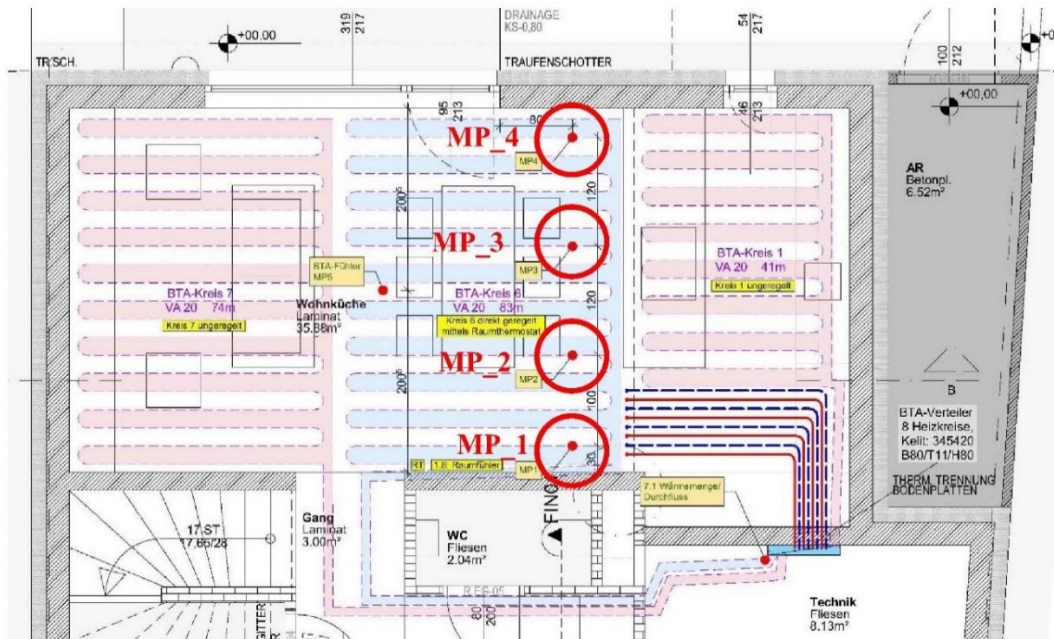


Abb. 57: Reihenhaus RH_M: Lage der Messanordnungen zur Bestimmung der Temperatur des Heizmittels

Die Temperatursensoren wurden entlang einer Linie senkrecht zur Außenwand in etwa gleichen Abständen positioniert. Die Abstände der Messpunkte, gemessen längs der Rohrachsen, liegen zwischen 9,8 m (Abstand zwischen MP_2 und MP_1) und 13,9 m (Abstand zwischen MP_4 und MP_3).

Für die Auswertung der Messergebnisse wird der Zeitraum vom 1. November 2021 bis einschließlich 28. Februar 2022 – also 4 Monate im Tiefwinter – herangezogen. Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der aus den Messungen zurückgerechneten Heizmitteltemperaturen sowie die Vorlauf- und die Rücklauf-temperaturen über das betrachtete Zeitintervall.

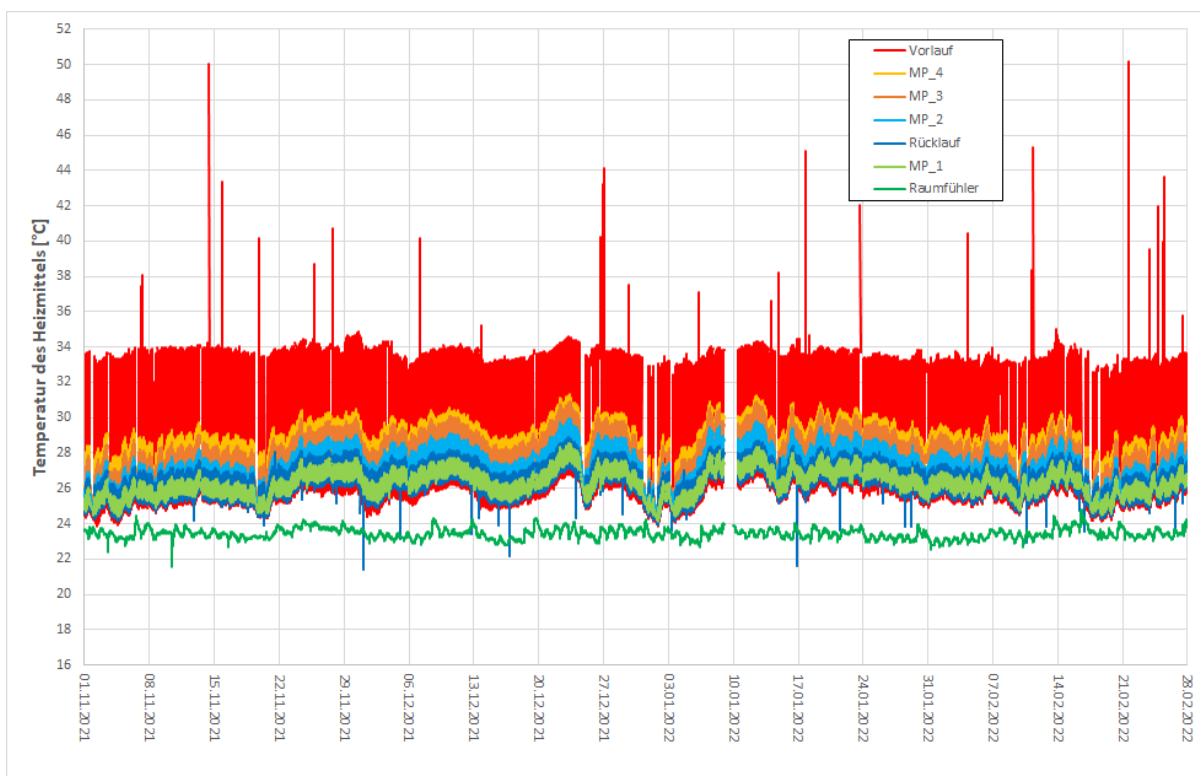


Abb. 58: Reihenhaus RH_M: zeitlicher Verlauf der Heizmitteltemperaturen vom 1. November 2021 bis 28. Februar 2022

Es zeigt sich, dass zwischen der Vorlauftemperatur und der für den Messpunkt MP_4 errechneten Temperatur die weitaus größte Differenz auftritt. Die Vorlauftemperatur erreicht offensichtlich im Normalfall Maximalwerte um 34 °C. Nach genauerer Analyse lässt sich sagen, dass die vereinzelt auftretenden Spitzen der Vorlauftemperatur keine Fehlmessungen sind, sondern tatsächlich auftraten. Die bis zu 50 °C hohen Spitzen dürften im Umstand damit begründet sein, dass die Wärmepumpe nicht nur die Beheizung, sondern auch die Warmwasserbereitung zur Gänze übernimmt und offenkundig – selten aber doch – hoch temperiertes Wasser aus der Warmwasserbereitung in den Verteiler der thermischen Bauteilaktivierung gelangt.

Auffällig ist, dass in Abb. 58 die Temperaturverläufe als Flächen und nicht als Linien – wie z. B. die vom Raumfühler registrierte Temperatur (unterste grüne Linie in Abb. 58) – erscheinen. Grund hierfür ist, dass sämtliche Heizmitteltemperaturen sehr stark schwanken. Wie groß diese Schwankung ist, kann an der Vorlauftemperatur, die oft die niedrigste Temperatur ist und sich in Abb. 58 als schmaler, roter Rand unterhalb der flächenhaften Verläufe abzeichnet, abgeschätzt werden. Um den Grund für die starken Schwankungen aufzuspüren, wird im Folgenden ein einziger Tag betrachtet. Gewählt wird der 12. Januar 2022, der am Ende einer Kälteperiode liegt und durch hohen Heizwärmebedarf gekennzeichnet ist. An diesem Tag ist aufgrund durchgehend starken Winds die Beheizung ununterbrochen freigegeben. Die folgende Abbildung zeigt die ermittelten Heizmitteltemperaturen am 12. Januar 2022.

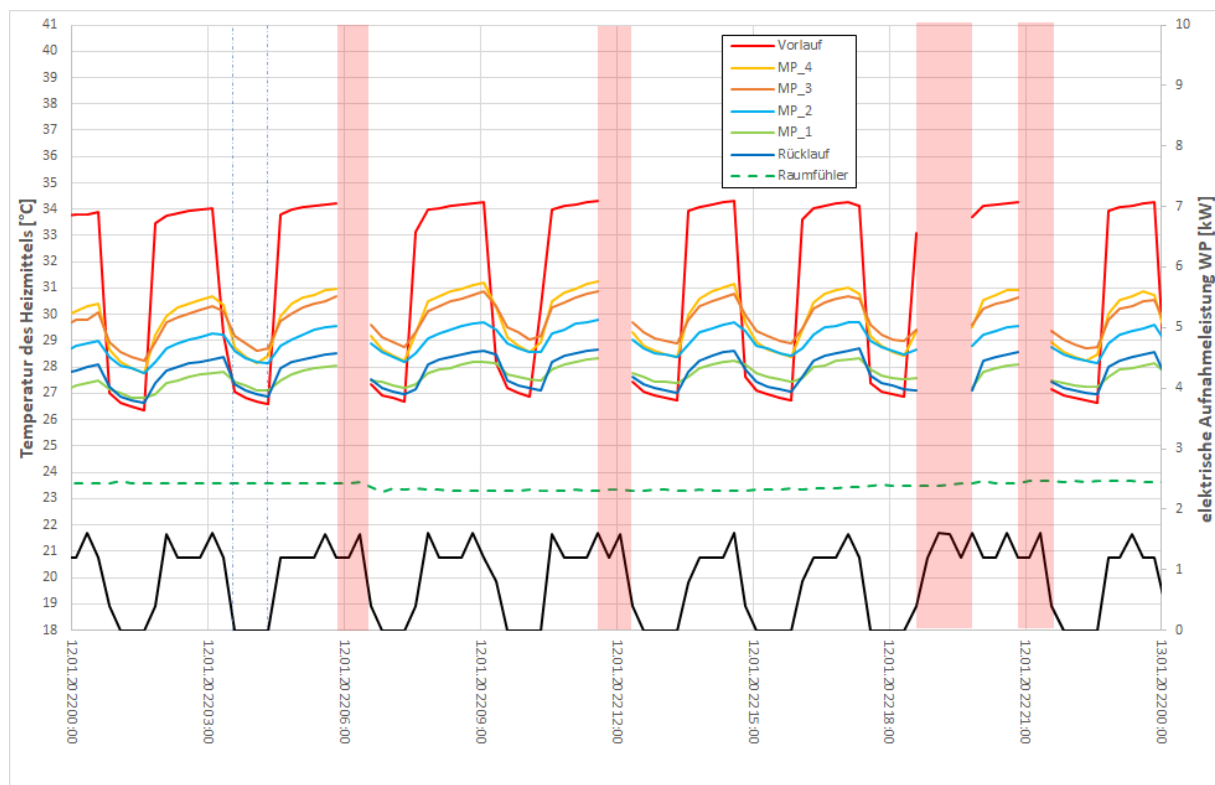


Abb. 59: Reihenhaus RH_M: zeitlicher Verlauf der Heizmitteltemperaturen und der elektrischen Aufnahmeleistung der Wärmepumpe am 12. Januar 2022

Ersichtlich sind die starken Schwankungen der Heizmitteltemperaturen auf das Takten der Wärmepumpe zurückzuführen. Um dies deutlich zu zeigen, ist die elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpe (schwarze Linie in Abb. 59; Größenachse rechts) in die Abbildung aufgenommen. Es zeigt sich, dass der starke Abfall der Vorlauftemperatur (rote Linie in Abb. 59) zeitlich mit dem Abschalten der Wärmepumpe korreliert.

Die Laufzeit der Wärmepumpe schwankt zwischen 1,5 und 2,0 Stunden, wobei rasch eine Vorlauftemperatur von ca. 34,0 °C erreicht wird. Nach jedem Abschalten der Wärmepumpe vergeht 1 Stunde bis zum Neustart. In dieser Zeit fällt die Vorlauftemperatur auf knapp unter 27,0 °C.

Die ausgeprägte Schwankung der Vorlauftemperatur wirkt sich auf alle gemessenen Heizmitteltemperaturen im Rohrregister aus, da das Regelventil für den Heizkreis 6 auch bei abgeschalteter Wärmepumpe geöffnet war.

Anmerkung: In den hellrot hinterlegten Zeitintervallen in Abb. 59 war das Regelventil für den Heizkreis 6 geschlossen (kein Durchfluss durch das Rohrregister). Eine Auswertung der Heizmitteltemperaturen zu diesen Zeiten wäre irreführend und ist daher unterblieben.

Zur tiefer gehenden Diskussion der in Abb. 59 gezeigten Verläufe erscheint eine numerische Zusatzinformation hilfreich. In folgender Tabelle sind die Mittelwerte und die Schwankungen der in Abb. 59 dargestellten Temperaturverläufe aufgelistet. Als Schwankung wird hierbei die Differenz zwischen absolutem Maximum und absoluten Minimum verstanden.

Temperatur	Mittelwert [°C]	Schwankung [K]
Vorlauf	31,0	7,9
MP 4	29,8	3,5
MP 3	29,8	2,7
MP 2	29,0	2,0
MP 1	27,7	1,5
Rücklauf	27,8	2,1

Tab. 11: Reihenhaus RH_M: Temperaturen des Heizmittels an verschiedenen Stellen des Registers von Heizkreis 6 am 12. Januar 2022

Die Auswertung von Tab. 11 führt zu folgenden, zum Teil unerwarteten Erkenntnissen:

1. Zwischen dem Messpunkt MP_4 in der Nähe der Außenwand und dem um 1,2 m in Richtung der Raummitte verschobenen Messpunkt MP_3 bleibt der Tagesmittelwert der Heizmitteltemperatur in etwa gleich, obwohl die Länge der mäanderförmig verlegten Rohre zwischen diesen beiden Punkten mit 13,9 m groß ist. Ein Blick auf Abb. 59 zeigt jedoch, dass sich bei laufender Wärmepumpe sehr wohl eine – wenn auch sehr kleine – Temperaturabnahme (Größenordnung 0,2 K) von MP_4 auf MP_3 einstellt. Da bei stillstehender Wärmepumpe die Temperatur von MP_4 aufgrund der Lage an der Außenwand stärker abfällt als jene von MP_3, führt das Tagesmittel beider Temperaturverläufe auf (gerundet) den gleichen Wert.

2. Von MP_3 bis MP_2 kühlt das Heizmittel im Schnitt um 0,8 K ab. Die Rohrlänge zwischen diesen beiden Messpunkten beträgt 10,8 m. Der entsprechende Temperaturabfall zwischen MP_2 und MP_1 beträgt 1,3 K bei einer Rohrlänge von 9,8 m. Es zeigt sich somit, dass der Temperaturabfall des Heizmittels mit in Durchströmungsrichtung gemessener, zunehmender Rohrlänge größer wird.

Dieses Ergebnis ist erstaunlich, da bei einem Wärmetauscher üblicherweise von einem mit der Rohrlänge exponentiell abnehmenden Temperaturverlauf ausgegangen wird. Es zeigt sich somit, dass einfache Berechnungsansätze im Fall der untersuchten Wohnküche zu falschen Prognosen in Hinblick auf die bei vorgegebener Vorlauftemperatur zu erwartende Rücklauftemperatur führen würden.

3. Zudem fällt auf, dass der Tagesmittelwert der am Verteiler gemessenen Rücklauftemperatur (siehe dazu Abb. 54) etwas größer ist als jener am Messpunkt MP_1. Das Heizmittel wird auf dem Weg zwischen dem Rohrregister und dem Verteiler etwas erwärmt. Auch die Schwankung der Rücklauftemperatur ist deutlich größer als die am Messpunkt MP_1 gemessene. Abb. 59 zeigt zudem, dass bei laufender Wärmepumpe die Rücklauftemperatur deutlich größer ist als die am Messpunkt MP_1 gemessene Heizmitteltemperatur. Die Differenz zwischen Rücklauftemperatur und der Temperatur an Messpunkt MP_1 bei laufender Wärmepumpe liegt

im Bereich von ca. + 0,3 K. Bei stillstehender Wärmepumpe und niedrigen Vorlauftemperaturen fällt hingegen die Rücklauftemperatur unter die am Punkt MP_1 gemessene Temperatur.

Es besteht somit der Verdacht, dass die Rücklauftemperatur von der Vorlauftemperatur unmittelbar beeinflusst wird. Auch das Ansteigen der Schwankungen der Rücklauftemperatur im Vergleich zu jenen am Messpunkt MP_1 stützt eine solche Annahme.

Eine Erklärung für diesen Effekt liefert die Rohrführung zwischen dem Verteiler und den Heizkreisen. Die folgende Abbildung zeigt ein Baustellenfoto, das die Einbausituation im Bereich der Decke über dem Verteiler im Erdgeschoss verdeutlicht.

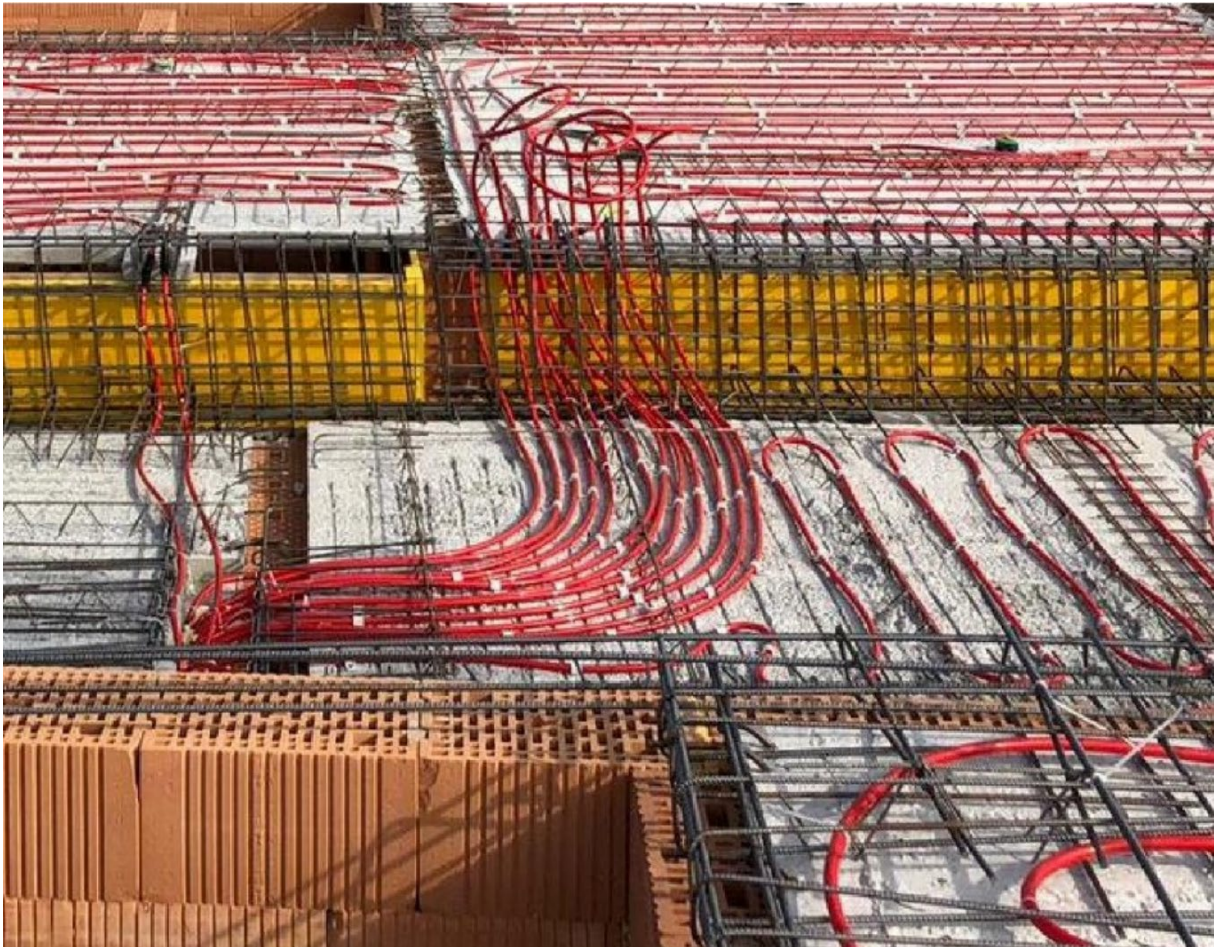


Abb. 60: Rohrführung von Vorlauf- und Rücklaufleitungen im Bereich des Verteilers; Decke über der Wohnküche eines Reihenhauses

Die Rohre sämtlicher, auf die Decken des Erdgeschosses verlegten 8 Heizkreise werden in engem Abstand der Deckenöffnung zum Verteiler zugeführt. Hierbei handelt es sich sowohl um Vorlauf- als auch um Rücklaufrohre. Da der im Zuge der Fertigstellung aufgebraachte Aufbeton eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweist, ist aufgrund des geringen Rohrabstands von einer sehr starken thermischen Kopplung zwischen den Rohren in diesem Bereich auszugehen.

Anmerkung: Im Fall des hier untersuchten Heizkreises 6 ist die Situation eng nebeneinander liegender Vor- und Rücklaufleitungen über eine Länge von ca. 3,0 m gegeben.

Die angenommene unmittelbare Beeinflussung der Rücklauftemperatur durch die Vorlauftemperatur ist somit plausibel.

Die Differenz zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur – die sog. „Spreizung“ – ist eine wesentliche Größe, die u. a. die Regelung der Wärmepumpe beeinflusst. Wie schon aus Abb. 59 zu entnehmen, ist

auch die Spreizung starken Schwankungen unterworfen und nimmt in den Zeiten der stillstehenden Wärmepumpe auch negative Werte an. Die Darstellung der Spreizung über längere Zeiträume ist aus diesem Grund wenig aussagekräftig und führt auf ein der Abb. 58 ähnliches Bild. Mehr Aussagekraft hat hingegen das in folgender Abbildung gezeigte Histogramm. Dieses ist Ergebnis einer Auszählung über die Monate Dezember 2021 und Januar 2022.

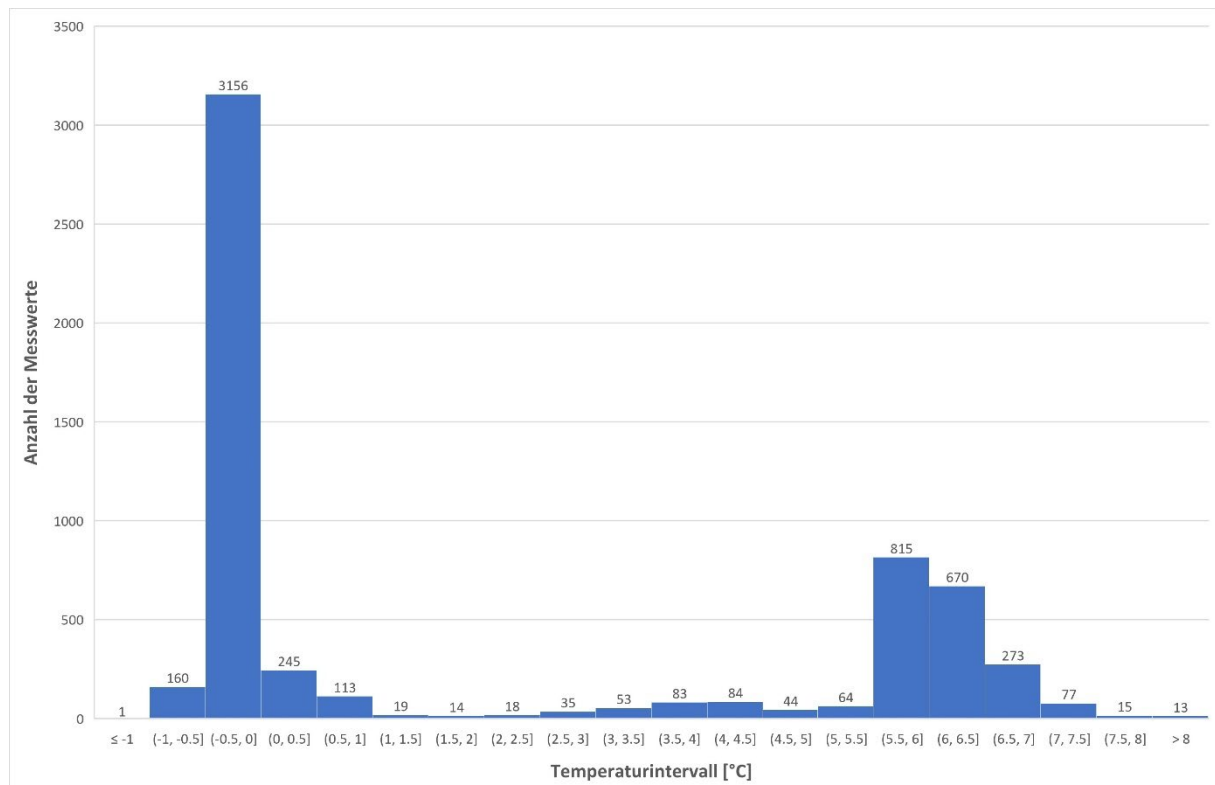


Abb. 61: Reihenhaus RH_M: Histogramm der gemessenen Spreizung für das Zeitintervall zwischen 1. Dezember 2021 und 31. Januar 2022

Das absolute Maximum der in Abb. 61 gezeigten zweigipfligen Verteilung liegt bei Spreizungen im Bereich zwischen 0,0 und -0,5 K. Dies bedeutet, dass sehr oft die Rücklauftemperatur höher ist als die Vorlauftemperatur, was eine – wenn auch geringe – Kühlwirkung signalisiert. Wie in Abb. 59 beispielhaft gezeigt, tritt diese Situation immer dann auf, wenn die Wärmepumpe nicht in Betrieb und gleichzeitig das Regelventil zu Heizkreis 6 offen ist, das Rohrregister also durchströmt wird.

Das zweite Maximum liegt im Temperaturbereich zwischen 5,5 und 6,0 K und zeigt die Situation im Fall der laufenden Wärmepumpe. Häufig treten in dieser Situation Spreizungen zwischen 5,5 und 7,0 K auf. Wie aus Abb. 59 zu entnehmen, kommen größere Spreizungen vornehmlich bei tiefen Außentemperaturen und damit verbundenem hohem Heizwärmebedarf vor.

5.4.2.2 Schneckenförmige Verlegung

Alternativ zur mäanderförmigen Verlegung kann das Rohrregister auch in Schneckenform verlegt werden. Das Besondere an dieser Art der Verlegung ist, dass alternierend Rohre mit höher temperiertem Heizmittel und solche mit niedriger temperiertem Heizmittel direkt benachbart sind. Im Gegensatz zur mäanderförmigen Verlegung ist bei der schneckenförmigen Verlegung aufgrund der größeren Temperaturunterschiede zwischen benachbarten Rohren damit zu rechnen, dass im Rohrregister ein horizontaler Wärmefluss, also ein Wärmeaustausch zwischen den Rohren eine nicht vernachlässigbare Rolle spielt. Die folgende Abbildung zeigt das schneckenförmig verlegte Rohrregister auf der Decke über der Wohnküche im Reihenhaus RH_S.



Abb. 62: Schneckenförmig verlegtes Register des Heizkreises 6 in der Decke der Wohnküche von Reihenhaus RH_S

Auch im Reihenhaus RH_S wurde beim Rohrregister des Heizkreises 6 in der Decke über der Wohnküche die Temperatur an 4 verschiedenen Stellen gemessen. Die Messmethode ist hierbei mit der in Abb. 55 gezeigten identisch. Es werden auch hier die Messpunkte von MP_4 bis MP_1 durchnummeriert, wobei – wie auch bei Reihenhaus RH_M – der Messpunkt MP_4 dem Vorlaufstrang des Verteilers am nächsten liegt. Die Messpunkte sind äquidistant mit einem Abstand von 9,8 m verteilt

Wie schon bei Reihenhaus RH_M wird für die Auswertung der Messergebnisse der Zeitraum vom 1. November 2021 bis einschließlich 28. Februar 2022 herangezogen. Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der aus den Messungen zurückgerechneten Heizmitteltemperaturen sowie die Vorlauf- und die Rücklauf-temperatur über das betrachtete Zeitintervall.

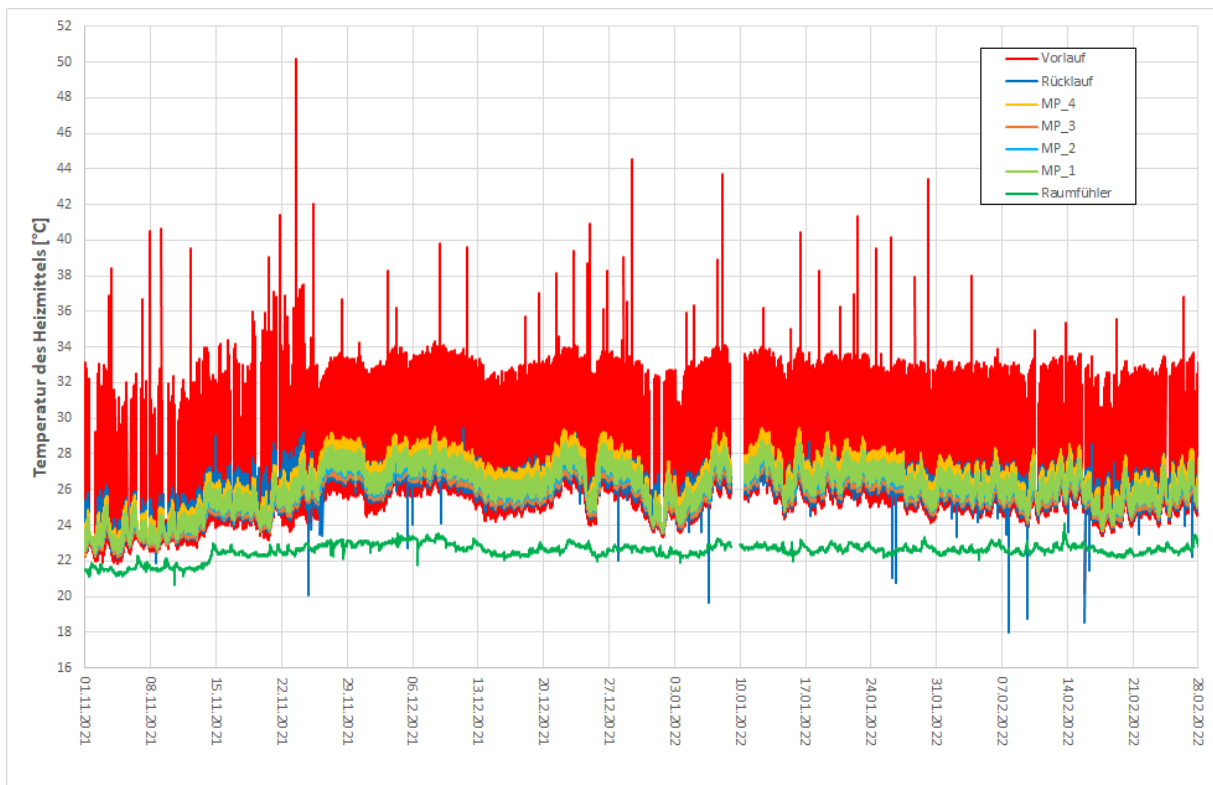


Abb. 63: Reihenhaus RH_S: zeitlicher Verlauf der Heizmitteltemperaturen vom 1. November 2021 bis 28. Februar 2022

Wie bei Reihenhaus RH_M zeigen sich die Messergebnisse für die Heizmitteltemperaturen in Abb. 63 als Flächen, die auf kurzzeitige Schwankungen der jeweiligen Temperaturen zurückgeführt werden können. Beim Vergleich mit Abb. 58 fällt aber bereits in dieser Darstellung auf, dass die Amplituden der Schwankungen für die Messpunkte MP_1 bis MP_4 deutlich kleiner sind als bei Reihenhaus RH_M. Die Rücklauftemperatur (dunkelblaue Linien in Abb. 63) liegt im Bereich der für die im Rohrregister ermittelten Messwerte und wird in Abb. 63 von diesen nahezu überdeckt. Die Spitzen der Rücklauftemperatur zu niedrigeren Temperaturen rühren von Temperaturabfällen der Vorlauftemperatur her, sind also keine Messfehler.

Die Spitzen in der Vorlauftemperatur zu sehr hohen Temperaturwerten (rote Linien in Abb. 63) erweisen sich als real und sind – wie bei Reihenhaus RH_M – auf den Umstand zurückzuführen, dass die Wärmepumpe neben der Erwärmung des Heizmittels auch für die Warmwasserbereitung zuständig ist.

Wie bei Reihenhaus RH_M wird im Folgenden die Ursache der Schwankungen mittels detaillierter Betrachtung der Temperaturverläufe am 12. Januar 2022 genauer analysiert – siehe die folgende Abbildung.

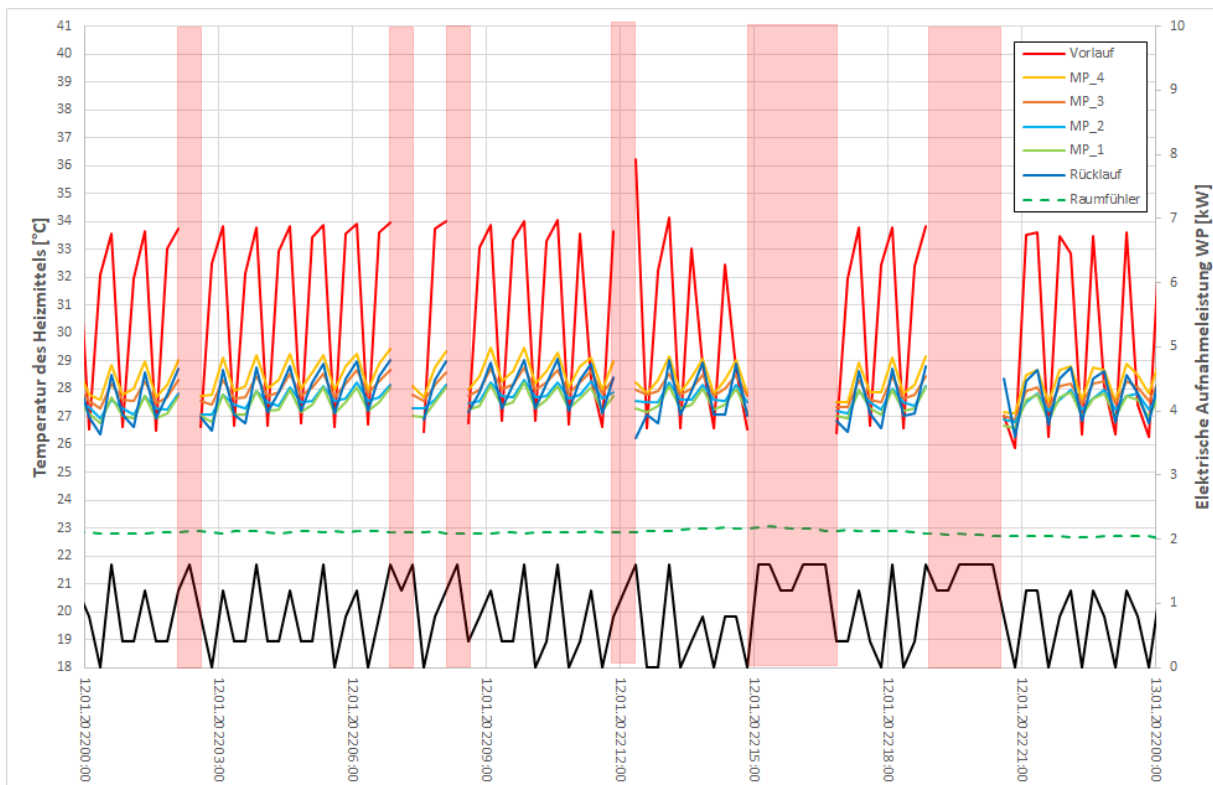


Abb. 64: Reihenhaus RH_S: zeitlicher Verlauf der Heizmitteltemperaturen und der elektrischen Aufnahmeleistung der Wärmepumpe am 12. Januar 2022

Auch bei Reihenhaus RH_S kann als Ursache der Temperaturschwankungen die Betriebsweise der Wärmepumpe ausgemacht werden. Die stark schwankende Stromaufnahmeleistung der Wärmepumpe (schwarze Linie in Abb. 64) weist auf ein Takten hin, das – im Gegensatz zum entsprechenden Ergebnis von Reihenhaus RH_M (siehe Abb. 59) – nicht von länger dauernden Stillstandszeiten der Wärmepumpe unterbrochen wird.

Die Vorlauftemperatur (rote Linie in Abb. 64) fällt nach einem Anstieg auf zumeist 34 °C aufgrund des Abschaltens der Wärmepumpe wieder steil auf ca. 27 °C ab, um danach aufgrund des Anspringens der Wärmepumpe sofort wieder steil anzusteigen.

Das Schwanken der Vorlauftemperatur schlägt natürlich auch auf die zeitlichen Verläufe der am Rohrregister gemessenen Heizmitteltemperaturen (MP_4 bis MP_1) und der Rücklauftemperatur durch. Die folgende Tabelle zeigt die für den 12. Januar 2022 ermittelten Tagesmittelwerte und die Tagesschwankungen, wobei – wie in Tab. 11 – die Schwankung als Differenz zwischen dem absoluten Tagesmaximum und dem absoluten Tagesminimum zu verstehen ist.

Temperatur	Mittelwert [°C]	Schwankung [K]
Vorlauf	30,6	10,4
MP 4	28,4	2,3
MP 3	28,0	1,9
MP 2	27,5	1,5
MP 1	27,4	1,7
Rücklauf	27,8	2,8

Tab. 12: Reihenhaus RH_S: Temperaturen des Heizmittels an verschiedenen Stellen des Registers von Heizkreis 6 am 12. Januar 2022

Die schneckenförmige Verlegung bewirkt zum einen, dass die Abkühlung des Heizmittels beim Durchfließen des Registers deutlich langsamer erfolgt als bei mäanderförmiger Verlegung. Die Temperaturdifferenz zwischen MP_4 und MP_1 beträgt 1,0 K, wobei diese beiden Messpunkte einen Abstand, gemessen längs der Rohrachse von 29,4 m haben. Bei mäanderförmiger Verlegung lag die entsprechende Temperaturdifferenz bei 2,1 K mit einem Abstand von 34,5 m (siehe Tab. 11). Zudem fällt auf, dass die bei den Messpunkten MP_4 bis MP_2 registrierten Tagesschwankungen der Temperatur deutlich kleiner sind als jene in Reihenhaus RH_M.

Auch bei schneckenförmiger Verlegung zeigt sich der Effekt, dass der Tagesmittelwert der Rücklauftemperatur etwas höher ist als jener von MP_1. Zudem steigt die Tagesschwankung im Vergleich zu der am Messpunkt MP_1 ermittelten stark an. Auch hier erscheint die Erklärung einer starken thermischen Kopplung zwischen Vorlauf- und Rücklaufleitung im Bereich zwischen Register und Verteiler (Rohrverlegung siehe Abb. 60) plausibel.

In Hinblick auf die Spreizung wird auch in Reihenhaus RH_S auf eine statistische Untersuchung der zwischen 1. Dezember 2021 und 31. Januar 2022 gemessenen Werte der Vorlauf- und der Rücklauftemperatur zurückgegriffen. Das Histogramm in folgender Abbildung zeigt das Ergebnis dieser Analyse.

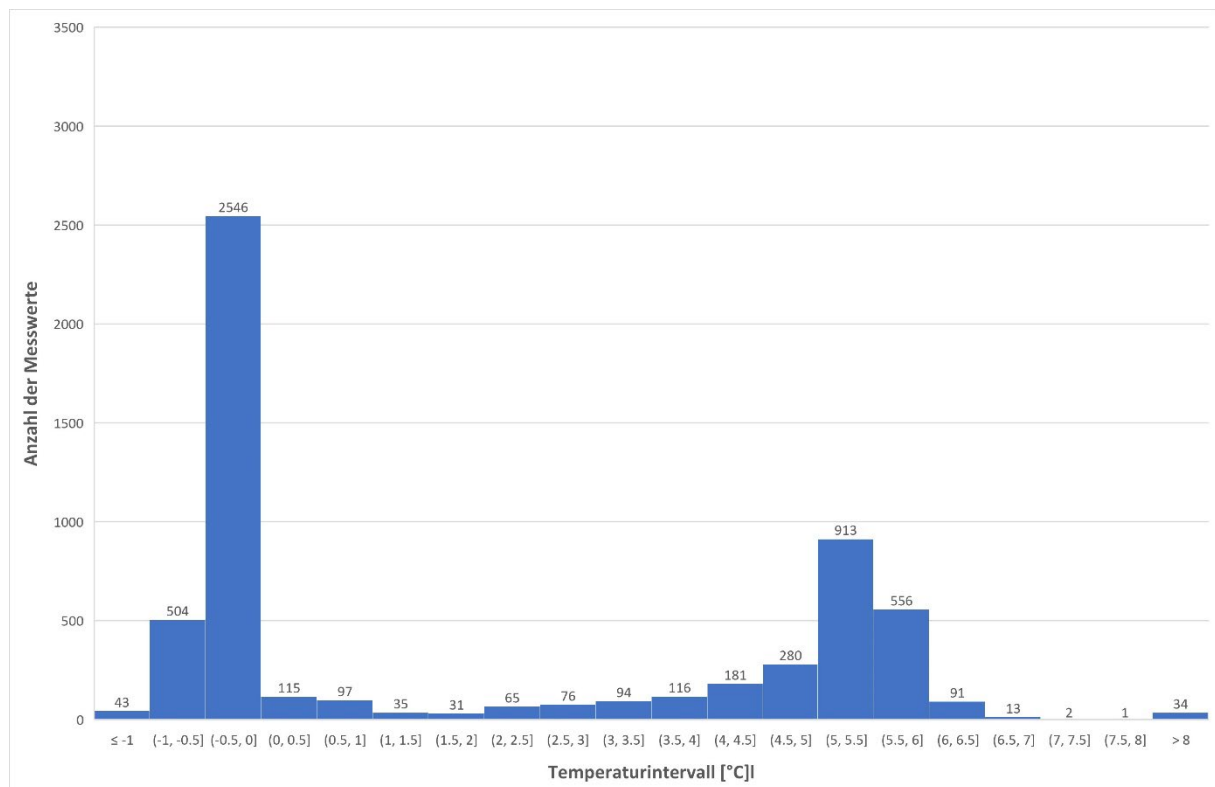


Abb. 65 Reihenhaus RH_S: Histogramm der gemessenen Spreizung für das Zeitintervall zwischen 1. Dezember 2021 und 31. Januar 2022

Im Vergleich zum entsprechenden Ergebnis bei mäanderförmiger Rohrverlegung (siehe Abb. 61) zeigt sich, dass

1. das Maximum der Verteilung bei Spreizungen zwischen -0,5 und 0,0 K kleiner geworden ist. Spreizungen mit Werten unter -0,5 K treten allerdings häufiger auf. Die Situation, dass etwas kühler temperiertes Heizmittel durch das erwärmte Rohrregister geschickt wird, trifft somit auch hier häufig zu.
2. das zweite Maximum in der Klasse zwischen 5,0 und 5,5 K liegt. Im Tiefwinter ist nach diesen Ergebnissen die Spreizung bei mäanderförmiger Verlegung im Schnitt ca. 0,5 K größer als bei schneckenförmiger Verlegung.

Nun soll kurz auf die bei den beiden untersuchten Reihenhäusern erkennbare Regelung der Wärmepumpe eingegangen werden. Das häufige Takten der Wärmepumpe im Tiefwinter, das bei Reihnhaus RH_S (siehe Abb. 64) besonders auffällt, aber auch bei Reihnhaus RH_M (Abb. 58) deutlich sichtbar ist, ist nicht nur in Hinsicht auf die Lebensdauer der Wärmepumpe bedenklich, sondern beeinträchtigt auch die Effektivität der Wärmeerzeugung. Bei länger durchlaufender Wärmepumpe kann zum einen die gleiche Wärmemenge bei einem niedrigeren Maximum der Vorlauftemperatur für das Rohrregister bereitgestellt werden. Dies lässt erwarten, dass die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ansteigt. Zum anderen wird der bei stehender Wärmepumpe auftretende Kühleffekt, der dadurch entsteht, dass durch die Umwälzpumpe etwas kühleres Wasser durch das wärmere Heizregister geleitet wird, seltener auftreten oder vermieden. Es zeigt sich somit, dass in Hinblick auf die Regelung der Wärmepumpe noch Optimierungspotential besteht.

Abschließend sei angemerkt, dass die gemessenen Temperaturschwankungen im Rohrregister aufgrund der hohen Wärmespeicherfähigkeit der thermisch aktivierten Betondecke im Raum weder mess- noch spürbar sind (siehe den Temperaturverlauf des Raumfühlers in Abb. 59 und Abb. 64).

6. Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse

Die Auswertung der über den Zeitraum von 2 Jahren gesammelten Messergebnisse im Wohnhaus (Wohnbau für JUNGES und BETREUTES Wohnen) und den Reihenhäusern führt auf folgende, wichtige Erkenntnisse:

6.1 Thermischer Komfort

Aussagen zum thermischen Komfort wurden mittels Messung und Auswertung der von den Raumfühlern in zwei ausgesuchten Wohnungen des Wohnhauses sowie in den Wohnküchen aller 14 Reihenhäusern gemessenen Temperaturen gewonnen. Zusammenfassend ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Der zeitliche Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen zeigt über den Zeitraum von 2 Jahren nur sehr kleine Schwankungen. Dies gilt sowohl für die beiden im Wohnhaus untersuchten Wohnungen als auch für die Wohnküchen aller 14 Reihenhäuser. Zum einen ist dies ein Zeichen von hohem thermischen Komfort. Zum anderen registrierten die Raumtemperaturfühler in keinem der 16 untersuchten Räume und zu keinem Zeitpunkt Temperaturen, die in Hinsicht auf den thermischen Komfort als problematisch angesehen werden müssten. Unter Berücksichtigung der sehr hohen Zeitauflösung von 5 Minuten zeigt dies, dass sich das System aus massiver Bauweise und thermisch aktivierten Decken insofern als äußerst robust erweist, als die Temperaturkonstanz durch Nutzer:innen-Einflüsse, wie z. B. starkes Fensterlüften oder unzweckmäßiger Verwendung der Verschattungseinrichtungen, nicht wesentlich gestört werden kann.
- Die Messung der Oberflächentemperatur an der Untersicht der thermisch aktivierten Decke in den beiden Räumen des Wohnhauses führt zum Ergebnis, dass während des gesamten Monitoring-Zeitraums der Betrag der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur und der vom Raumfühler registrierten Temperatur für 90% der Messwerte kleiner oder gleich 0,7 K war. Dies bedeutet, dass sowohl während des Heizmodus im Winter als auch des Kühlmodus im Zuge von sommerlichen Hitzeperioden keine ausgeprägten Temperaturunterschiede in Hinblick auf die inneren Oberflächentemperaturen der raumumschließenden Bauteile auftreten.
- Eine vertiefende Untersuchung der sich bei Heizbetrieb im Raum einstellenden Temperaturschichtung wurde durch zusätzliche Messung der Temperatur unterhalb des Bodenbelags und Rückrechnung auf die Oberflächentemperatur des Fußbodens in der Wohnküche eines Reihenhauses durchgeführt. Eine statistische Untersuchung der während des Monitoring-Zeitraums erhobenen Daten führt zum Ergebnis, dass die Differenz zwischen den Oberflächentemperaturen der thermisch aktivierten Decke und dem erdanliegendem Fußboden in der überwiegenden Zahl der Messungen im Bereich um 2,2 K liegt und Werte bis zu 4,0 K auftreten. Über den Messzeitraum von 2 Heizsaisonen waren alle registrierten Temperaturdifferenzen kleiner als 5,0 K. Dies zeigt, dass die sich im Zuge der thermischen Aktivierung der Decke im Raum einstellende Temperaturschichtung klein bleibt und keine negativen Auswirkungen auf den thermischen Komfort hat.
- Die im Wohnhaus während der Heizsaison 2021/22 zur Nutzung von Windüberschussstrom umgesetzte Heizungsregelung hat in Hinsicht auf den thermischen Komfort im Vergleich zur Heizsaison 2020/21 mit konventioneller Regelung keine messbaren Auswirkungen auf den thermischen Komfort in den Wohnungen.

6.2 Strom- und Wärmeverbrauch

Aussagen zum Verbrauch von Strom für die Wärmepumpen wurden über die Auswertung der Stände von eigens dafür installierten Elektrozählern gewonnen. Da die Zählerstände in 15-Minuten-Intervallen vorliegen, ist auch der zeitliche Verlauf des Stromverbrauchs in hoher Auflösung bekannt. Der Wärmeverbrauch wurde über Wärmemengenzähler gemessen, die in 15-Minuten-Intervallen neben den

Wärmemengen auch Informationen über die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie den Durchfluss liefern. Aus diesen Messungen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Im Wohnhaus ist der direkte Vergleich zwischen der Stromaufnahme der Wärmepumpe und der Summe der von ihr abgegebenen Wärmemengen möglich. Für die Arbeitszahl der Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdwärmenutzung über Tiefenbohrungen ergibt sich aus diesen Messungen für das Jahr 2021 die Jahresarbeitszahl von 4,3, wobei die Wärmepumpe für die Wärmebereitstellung der thermischen Aktivierung der Decke zur Gänze und für die Warmwasserbereitung zum Teil verantwortlich ist.
- Die Stromverbräuche der Wärmepumpen in allen Reihenhäusern wurden für den Monat Dezember 2021 verglichen. Bei den Reihenhäusern sorgt die Wärmepumpe neben der Heizwärmeversorgung zur Gänze für die Wärmebereitstellung zur Warmwasserbereitung. Es stellt sich heraus, dass der im Dezember 2021 gemessene Stromverbrauch der Sole-Wasser-Wärmepumpen um einen über alle 14 Reihenhäuser gebildeten Mittelwert von 411 kWh schwankt, wobei eine Schwankungsbreite von ca. $\pm 15\%$ auftritt. Diese Schwankungen dürften auf Einflüsse der Nutzer:innen zurückzuführen sein. Allerdings fällt in diesem Zusammenhang auf, dass keine Korrelation zwischen Stromverbrauch der Wärmepumpe auf der einen Seite und Raumtemperatur auf der anderen Seite hergestellt werden kann.
- Für die Berechnung der Wärmeabgabeleistung einer thermisch aktivierten Decke ist u. a. die Kenntnis des an der Deckenuntersicht anzusetzenden Wärmeübergangskoeffizienten erforderlich. Die Auswertung der an der Deckenuntersicht der Wohnküche eines Reihenhauses gemessenen Wärmestromdichten und Oberflächentemperaturen führt im Zuge der Rückrechnung von Wärmeübergangskoeffizienten zum Ergebnis, dass zum einen dieser Koeffizient eine deutliche Abhängigkeit von der Differenz zwischen Oberflächentemperatur und Raumtemperatur zeigt. Zum anderen erweist sich der konstante, also auch temperaturunabhängige Norm-Wert nach ÖNORM EN ISO 1264-5:2009 (5) im Fall der untersuchten Wohnküche als zu hoch und liegt damit nicht auf der sicheren Seite.

6.3 Ausnutzung von Windüberschussstrom

Die Auswirkung der Umstellung der Regelung der Wärmepumpen auf eine gezielte Ausnutzung von Windüberschussstrom war insofern gut nachvollziehbar, als in der Heizsaison 2020/21 die Regelung konventionell und erst in der nächsten Heizsaison 2021/22 nach einem Windsignal erfolgte, das zwischen Zeiten mit Windüberschuss und windarmen Zeiten zu unterscheiden gestattet. Im Zuge der Auswertung des zeitlichen Verlaufs des Stromverbrauchs der Wärmepumpen kann damit der Stromverbrauch während windarmer Zeiten dem bei Windüberschuss registrierten Verbrauch gegenübergestellt werden. Diese Analysen führen zu folgenden Ergebnissen:

- Beim Wohnhaus wird das Windsignal dazu verwendet, dass bei Windüberschuss die thermisch aktivierten Decken gezielt mit Wärme versorgt werden. In windarmen Zeiten steht die Wärmepumpe still. Lediglich bei zu starker Auskühlung der Decken wird auch in windarmen Zeiten zur Wahrung des thermischen Komforts nachgeheizt. Die bei konventioneller Regelung wirksame Solltemperatur wird in diesem Fall durch die Vorgabe eines Temperaturbandes, innerhalb dessen die Temperatur in der thermisch aktivierten Decke schwanken darf, ersetzt. Diese Art der Regelung stellt sich als sehr effektiv heraus. Nach der Behebung von Schwierigkeiten mit der Wärmepumpe in den Monaten Oktober bis Dezember 2021 zeigt sich, dass in den Monaten Januar bis April 2022 während der windarmen Zeiten lediglich ca. 20% jenes Stromverbrauchs registriert wurden, der bei durchlaufendem Betrieb der Wärmepumpe zu erwarten wäre. Der restliche, für die Wärmeerzeugung notwendige Stromverbrauch fällt in die Zeiten mit Windüberschussstrom.
- Bei den Reihenhäusern erwies sich die beim Wohnhaus angewandte Regelungsstrategie als nicht umsetzbar. An deren Stelle wurde versucht, während der Zeiten mit Windüberschussstrom die Heizkurve derart zu verändern, dass den thermisch aktivierten Decken vermehrt Wärme zugeführt wird. Die Abschaltung der Wärmepumpen während windarmer Zeiten wurde vermieden, um die

Warmwasserbereitung nicht zu gefährden. Die Messungen zeigen allerdings, dass diese Art der Regelung zu keiner erkennbaren Ausnutzung von Windüberschussstrom führt. Dieses Ergebnis trifft auf sämtliche Reihenhäuser zu.

Am Beispiel des Wohnhauses zeigt sich somit, dass die intendierte Verwendung von massiv gebauten Gebäuden mit thermisch aktivierten Decken als Energiespeicher zur Glättung hoch volatilen Stromangebots möglich und hoch effektiv ist. Vom Beispiel der Reihenhäuser kann abgeleitet werden, dass diese besondere Eigenschaft in Hinblick auf die Zwischenspeicherung von Energie in Form von Wärme nur dann ausgenutzt werden kann, wenn die haustechnische Planung von vornherein darauf abgestimmt wird.

6.4 Optimierungspotentiale

Die Analysen der Vielzahl an Messergebnissen dokumentiert nicht nur das Verhalten der Gebäude des Wohnparks in Hinblick auf thermischem Komfort und Energieeinsatz, sondern zeigt auch Schwachstellen auf, deren Behebung eine weitere Effektivitätssteigerung des Gesamtsystems versprechen.

Sowohl beim Wohnhaus als auch bei den Reihenhäusern scheint die Problematik der Wärmebereitstellung für die Warmwasserversorgung nicht befriedigend gelöst zu sein.

- Beim Wohnhaus wird ein Teil der für die Warmwasserbereitung benötigten Wärme durch die Wärmepumpe bereitgestellt. Dies ist insofern effektiv, als die Wärmepumpe mit Arbeitszahlen im Bereich von 4,0 arbeitet. Die aus hygienischen Gründen erforderliche Nacherwärmung erfolgt allerdings mittels Heizpatronen im zentralen Warmwasserspeicher. Die Messungen zeigen, dass der Stromverbrauch der Heizpatronen ein Vielfaches des für die Warmwasserbereitung aufgewendeten Verbrauchs der Wärmepumpe ausmacht. Der hohe Energieverbrauch kann damit begründet werden, dass das hoch erhitze Warmwasser durch ausgedehnte Zirkulationsleitungen geschickt wird und dabei sicherlich nur zu einem kleinen Teil der eigentlichen Bestimmung – der Warmwassernutzung – beiträgt.
- Bei den Reihenhäusern übernimmt die Wärmepumpe die Wärmebereitstellung für die Warmwasserbereitung zur Gänze. Damit wird zwar die für das Wohnhaus aufgezeigte Problematik vermieden. An den registrierten Vorlauftemperaturen zeigt sich allerdings, dass eine strenge Trennung von Warmwasserbereitung und Wärmebereitstellung für die thermische Aktivierung der Decke nicht gelungen ist. Die enge Kopplung zwischen Warmwasserbereitung und Beheizung des Gebäudes scheint auch die gezielte Ausnutzung von Windüberschussstrom zu torpedieren.

Die sinnvolle Planung der Wärmebereitstellung für die Warmwasserbereitung trägt ein großes Potential für eine gezielte Verkleinerung des Stromverbrauchs in sich. Zudem scheint eine strikte Trennung von Warmwasserbereitung und Beheizung Voraussetzung für den Einsatz der Gebäude als Energiespeicher zum Ausgleich von Stromangebots-Schwankungen zu sein.

Die Auswertung der Temperaturen des Heizmittels im Verteiler und an bestimmten Stellen des Rohrregisters lieferte im Fall der Reihenhäuser Hinweise auf das Regelungsverhalten der Wärmepumpen und zeigten folgende Optimierungspotentiale in Hinblick auf die Wärmeversorgung der thermisch aktivierten Decken auf.

- Im Tiefwinter ist die Laufzeit der Wärmepumpen durch ausgeprägtes Takten gekennzeichnet. Dies ist zum einen in Hinblick auf die Lebensdauer der Wärmepumpen bedenklich. Zum anderen führt dies auch zu unnötig hohem Stromverbrauch. Die Obergrenze der Heizmitteltemperatur liegt beim derzeit gefundenen Taktbetrieb bei ca. 34 °C. Bei einer deutlichen Verlängerung der Laufzeiten der Wärmepumpe lässt sich diese Obergrenze bei gleichbleibenden an die Rohrregister gelieferte Wärmemengen absenken. Eine solche Umstellung sollte mit einer merkbaren Anhebung der Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe und damit einer Verbesserung der Effektivität der Wärmeerzeugung einhergehen.
- Die Auswertung der Temperaturen im Rohrregister war insofern aufschlussreich, als sich herausstellte, dass die Temperatur des Heizmittels nach Durchfließen des Registers niedriger war

als die am Verteiler gemessene Rücklauftemperatur. Dies bedeutet, dass das Heizmittel am Weg vom Rohrregister zum Verteiler erwärmt wird. Dieser Effekt beeinträchtigt zum einen die Effektivität der thermischen Aktivierung der Decke. Zum anderen wird durch die Veränderung der Spreizung auch die Regelung der Wärmepumpe beeinflusst.

Als Grund für diesen unerwünschten Effekt lässt sich die Art der Verlegung der Rohre zwischen Register und Verteiler ausmachen. Offensichtlich liegen auf dieser Strecke Vorlauf- und Rücklaufleitungen eng nebeneinander. Dies führt dazu, dass im Fall des Heizbetriebs die Vorlaufleitungen bereits nach Verlassen des Verteilers Wärme an die benachbarten Rücklaufleitungen abgeben, sich dabei abkühlen und gleichzeitig die Rücklauftemperatur erhöhen. Dieser am Beispiel zweier Reihenhäuser nachgewiesene Effekt ist zwar nicht ausgeprägt, aber auch nicht vernachlässigbar. Abhilfe kann durch bewusste Planung der Rohrführung im Bereich zwischen Registern und Verteiler und/oder Wärmedämmung von sehr nahe nebeneinander liegenden Rohren mit stark unterschiedlichen Heizmitteltemperaturen geschaffen werden.

Grundsätzlich erscheint eine intensive Befassung mit dem Regelungsverhalten der Wärmepumpen ein hohes Optimierungspotential in Hinblick auf Stromeinsparung und auf die gezielte Ausnutzung von Windüberschussstrom zu beinhalten.

7. Literaturverzeichnis

1. **Friembichler, F., Handler, S., Kreč, K. & Kuster, H.** *Energiespeicher Beton – Thermische Bauteilaktivierung – Planungsleitfaden Einfamilien- und Reihenhäuser*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. 2016, Bd. 9/2016.
2. **ÖNorm B8110-3, Wärmeschutz im Hochbau, Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung**, Ausgabe März 2012.
3. **OIB Richtlinie 6, Energieeinsparung und Wärmeschutz**, Ausgabe April 2019.
4. **ÖNorm EN ISO 6946, Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren**, Ausgabe Februar 2018.
5. **ÖNorm EN ISO 1264-5, Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 5: Heiz- und Kühlflächen in Fußböden, Decken und Wänden – Bestimmung der Wärmeleistung und Kühlleistung**, 2009.
6. **Kreč, K.**, *Zur Wärmespeicherung in Baukonstruktionen*, Gesundheits-Ingenieur. 114, Heft 1, 11-18, 1993.
7. **AnTherm, V 10.137.1, Programmpaket zur Analyse des thermische Verhaltens von Baukonstruktionen mit Wärmebrücken**, Wien : © Kornicki, M., 2020.
8. **Kreč, K.**, *Energiespeicher Beton, 2. Auflage*, Wien : in Auftrag der Vereinigung Österreichischer Zementwerke und ZEMENT+BETON Handels- und Werbeges.m.b.H, 2019.

8. Anhänge

In den folgenden Anhängen werden zum einen die Ergebnisse sehr detaillierter Untersuchungen dokumentiert. Zum anderen werden Berechnungsansätze, die im Rahmen der Auswertungen entwickelt wurden, dokumentiert.

8.1 Stromverbrauch der Wärmepumpe im Wohnhaus von Oktober bis Dezember 2021

Das Ergebnis der Analyse der Regelung der Wärmepumpen im Wohnhaus nach dem Windsignal zeigt einen deutlichen Unterschied zwischen dem Zeitraum von Oktober bis Dezember 2021 und den restlichen Monaten der Heizsaison 2021/22 (Januar bis April 2022). Da die Regelung in den ersten Monaten des Jahres 2022 deutlich effektiver ist als in den Monaten der Heizsaison des Jahres 2021, erscheint es lohnend, die zeitlichen Verläufe der elektrischen Aufnahmeleistung der Wärmepumpen in den Monaten Oktober bis Dezember 2021 genauer zu analysieren, um die Gründe für die schlechteren Ergebnisse in diesen Zeiträumen herauszufinden.

Im Folgenden wird sowohl der aus dem Stromverbrauch der Wärmepumpen abgeleitete Zeitverlauf der elektrischen Aufnahmeleistung als auch die sich in den beiden detailliert untersuchten Wohnungen ergebenden Temperaturverläufe dargestellt und diskutiert.

8.1.1 Oktober 2021

Im Oktober 2021 liegt der Prozentsatz W bei 63,1% und ist damit etwa dreimal so groß, wie die für die Monate Jänner bis März 2022 ermittelten. Dies signalisiert, dass die Regelung der Wärmepumpe nach dem Windsignal nur ungenügend funktioniert. Die folgende Analyse dient dem Auffinden des Grunds für dieses unbefriedigende Verhalten.

Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Leistungsaufnahme der Wärmepumpen im Wohnhaus im Oktober 2021.

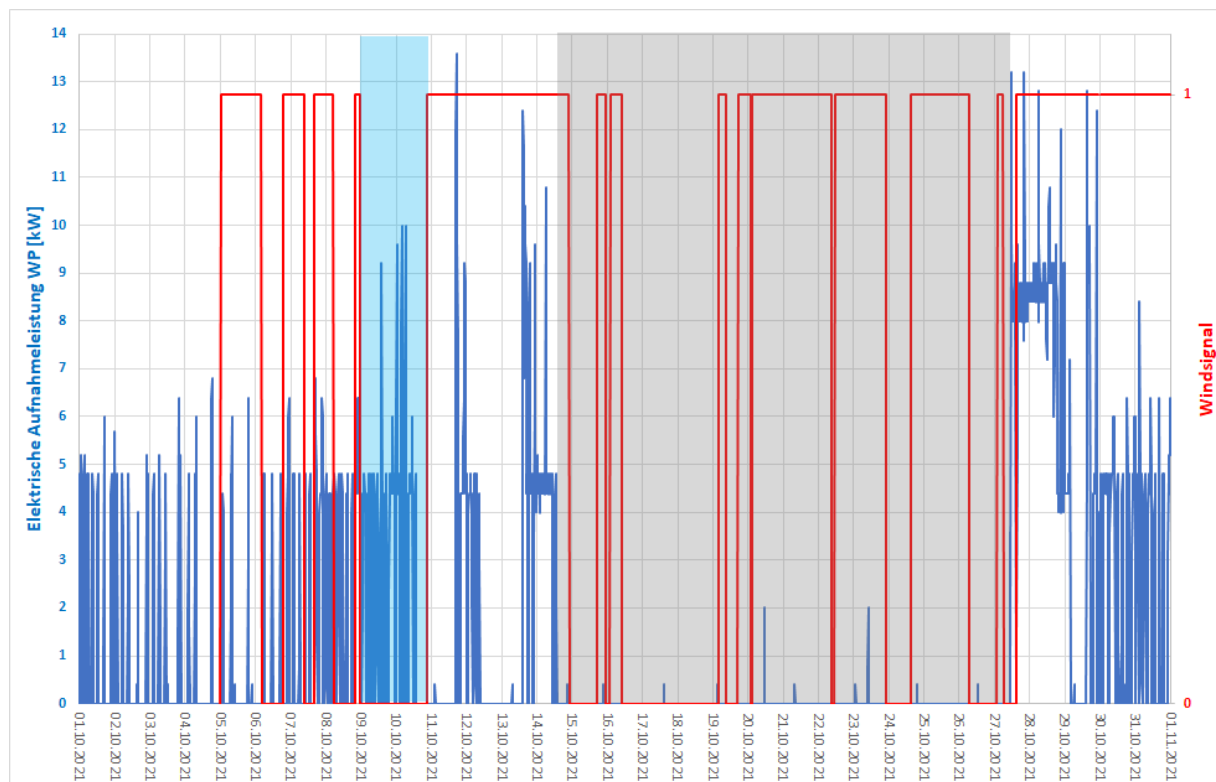


Abb. A 1: Elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Oktober 2021

Ersichtlich war der Oktober 2021 von einem sehr langen Ausfall der Wärmepumpen geprägt. Um die Interpretation der Abb. A 1 und der nachfolgenden Abbildung zu erleichtern, werden die Zeiträume solcher Ausfälle jeweils grau hinterlegt hervorgehoben.

Der Ausfall der Wärmepumpen erfolgte am 14. Oktober zu Mittag und wurde erst am 27. Oktober im Zuge einer routinemäßigen Wartung entdeckt. Die Dauer des Ausfalls ist mit 309 Stunden, oder annähernd 13 Tagen sehr groß. Die dadurch hervorgerufene Auskühlung der Decken wird mittels intensiver Beheizung ab dem 27. Oktober behoben. Da diese Nachheizung in einen Zeitraum mit Windüberschuss fällt, beeinflusst der Ausfall der Wärmepumpen die untersuchte Effektivität der Regelung nicht negativ.

Der Grund für den vergleichsweise hohen Stromverbrauch während windarmer Zeiten ist offensichtlich im Verhalten der Wärmepumpen in der ersten Oktoberhälfte gegeben. In Abb. A 1 und den entsprechenden nachfolgenden Abbildungen sind jene Zeiträume hellblau hinterlegt gekennzeichnet, die den Stromverbrauch während windarmer Zeiten wesentlich beeinflussen.

Das Windsignal liegt erst ab 5. Oktober 2021 verwertbar vor. Die Regelung der Wärmepumpen nach dem Windsignal wurde aber erst zu Monatsmitte umgesetzt. In der in Abb. A 1 gekennzeichneten windarmen Zeit am 9. und 10. Oktober (Dauer: 46 Stunden) verbrauchen die Wärmepumpen 120 kWh Strom. Dies sind bereits 59 % der gesamten in windarmen Zeiten im Oktober verbrauchten Stroms (202 kWh).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der zeitliche Verlauf des Stromverbrauchs der Wärmepumpen im Oktober 2021 keinerlei Rückschlüsse auf den Einfluss der Wärmepumpenregelung in Abhängigkeit vom Windsignal zulässt.

Der 13 Tage andauernde Ausfall der Wärmepumpen kann jedoch dazu genutzt werden, um Eindrücke zum Auskühlverhalten der beiden untersuchten Wohnungen zu erhalten. Die folgende Abbildung zeigt die von den Raumfühlern in den süd- und nordorientierten Wohnungen im Oktober 2021 registrierten Temperaturen.

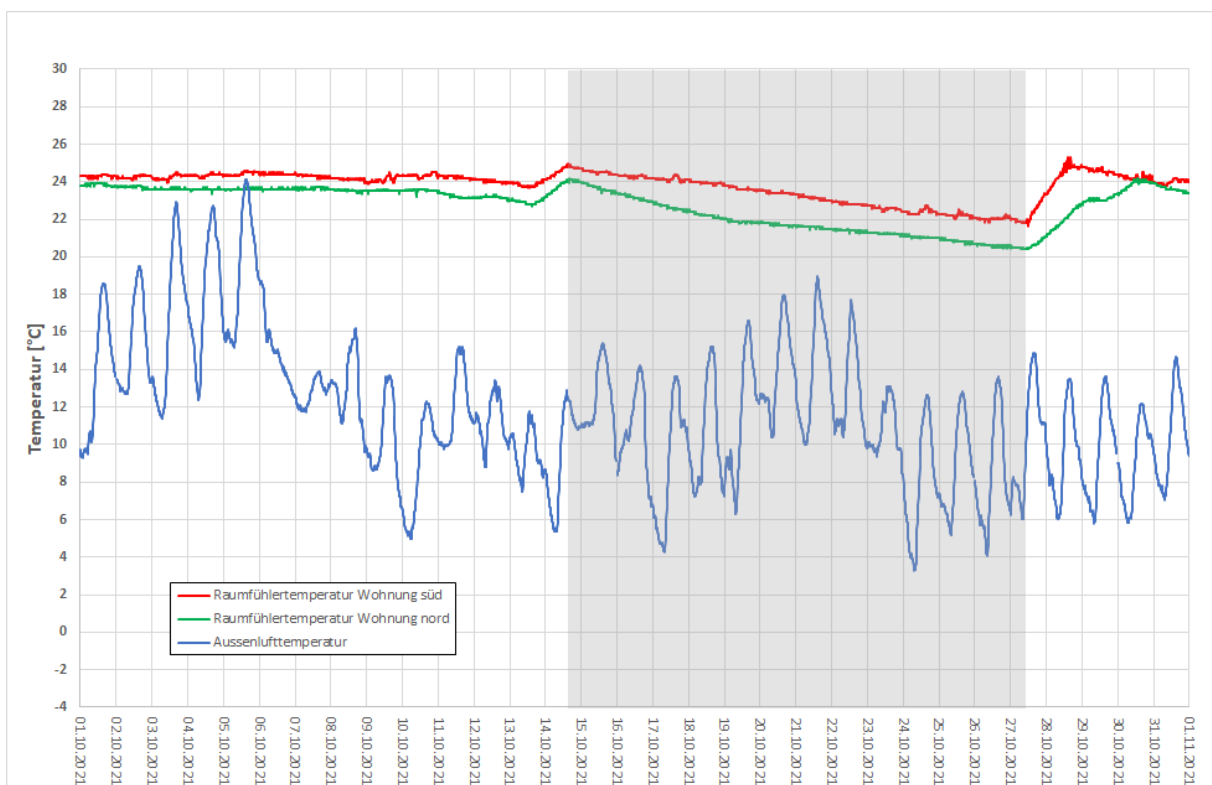


Abb. A 2: Registrierte Temperaturen im Oktober 2021

Zum einen zeigt Abb. A 2 die hohe Temperaturkonstanz in den beiden Wohnungen. Die Tageschwankungen der Außenlufttemperatur wirken sich offensichtlich nicht auf die von den Raumfühlern registrierten Temperaturen aus. Der Ausfall der Wärmepumpen bewirkt offensichtlich eine sehr langsam fortschreitende Abkühlung der Wohnungen. Der Temperaturabfall erweist sich in beiden Wohnungen als nahezu linear und ist in der nordorientierten Wohnung etwas stärker ausgeprägt. In der südorientierten Wohnung fällt die Raumtemperatur während des Ausfalls der Wärmepumpen von 24,8 °C auf 21,9 °C ab. Dies führt auf eine Abkühlung von ca. 0,2 K/Tag. Die Raumtemperatur in der nordorientierten Wohnung fällt im gleichen Zeitraum von 24,0 °C auf 20,5 °C ab, was einer täglichen Abkühlung von ca. 0,3 K entspricht.

Anmerkung: Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass der lange Ausfall der Wärmepumpen im Oktober 2021 zu keiner Reklamation durch Bewohner:innen der 22 Wohnungen geführt hat. Auf der einen Seite zeigt dies, dass die sehr langsam vor sich gehende Auskühlung offenkundig zu keinem drastischen Verlust des gefühlten thermischen Komforts geführt hat. Auf der anderen Seite ist anzumerken, dass die Warmwasserbereitung in dieser Zeit automatisch zu 100 % von den Heizpatronen im Warmwasserspeicher übernommen wurde, was somit auch in dieser Hinsicht zu keinem Komfortverlust geführt hat.

8.1.2 November 2021

Im November 2021 liegt der Prozentsatz w bei 32,8 % und ist damit etwas größer als die für die Monate Jänner bis März 2022 ermittelten ($w \approx 20\%$). In folgender Analyse wird versucht, die Gründe für dieses etwas ungünstigere Regelungsverhalten auszumachen.

Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der Leistungsaufnahme der Wärmepumpen im Wohnhaus im November 2021.

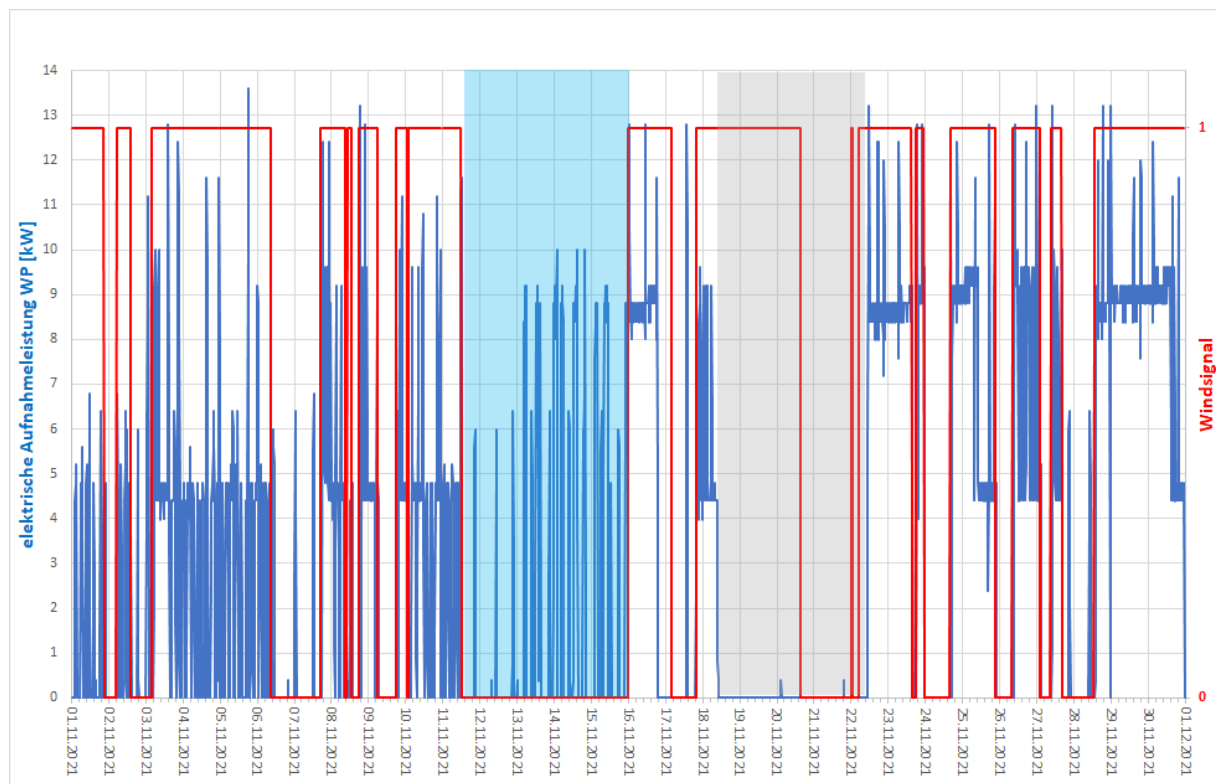


Abb. A 3 Elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; November 2021

Als Grund für den 4-tägigen Ausfall der Wärmepumpe im Zeitraum vom 18. bis 22. November (grau hinterlegtes Zeitintervall in Abb. A 3) wurde die Verarbeitung eines irrtümlich an die Wärmepumpe gelieferten Sperrsignals ausgemacht. Um solche störenden Einflüsse auszuschalten, wurde in der Folge die Regelung derart geändert, dass Sperrsignale von den Wärmepumpen grundsätzlich ignoriert werden. Abb. A 3 zeigt aber auch, dass die am 23. November beginnende Zeit mit Windüberschuss dazu genutzt wurde, um die Decken wieder aufzuheizen. Dies bewirkt u. a., dass in der am 24.11.21 folgenden, windarmen Zeit die Wärmepumpen nicht in Betrieb gehen.

In der windarmen Zeit zwischen 11. und 15. November (blau hinterlegt in Abb. A 3) gehen die Wärmepumpen hingegen in Betrieb. Dieses 108-stündige Zeitintervall ist offenkundig dafür verantwortlich, dass der Stromverbrauch während windarmer Zeiten im November deutlich höher ist als in den Monaten Januar bis April 2022.

Die folgende Abbildung zeigt die Wärmeabgabeleistung der Wärmepumpen im Zeitraum zwischen 9. und 19. November, wobei zwischen der thermischen Bauteilaktivierung und der Warmwasserbereitung unterschieden wird.

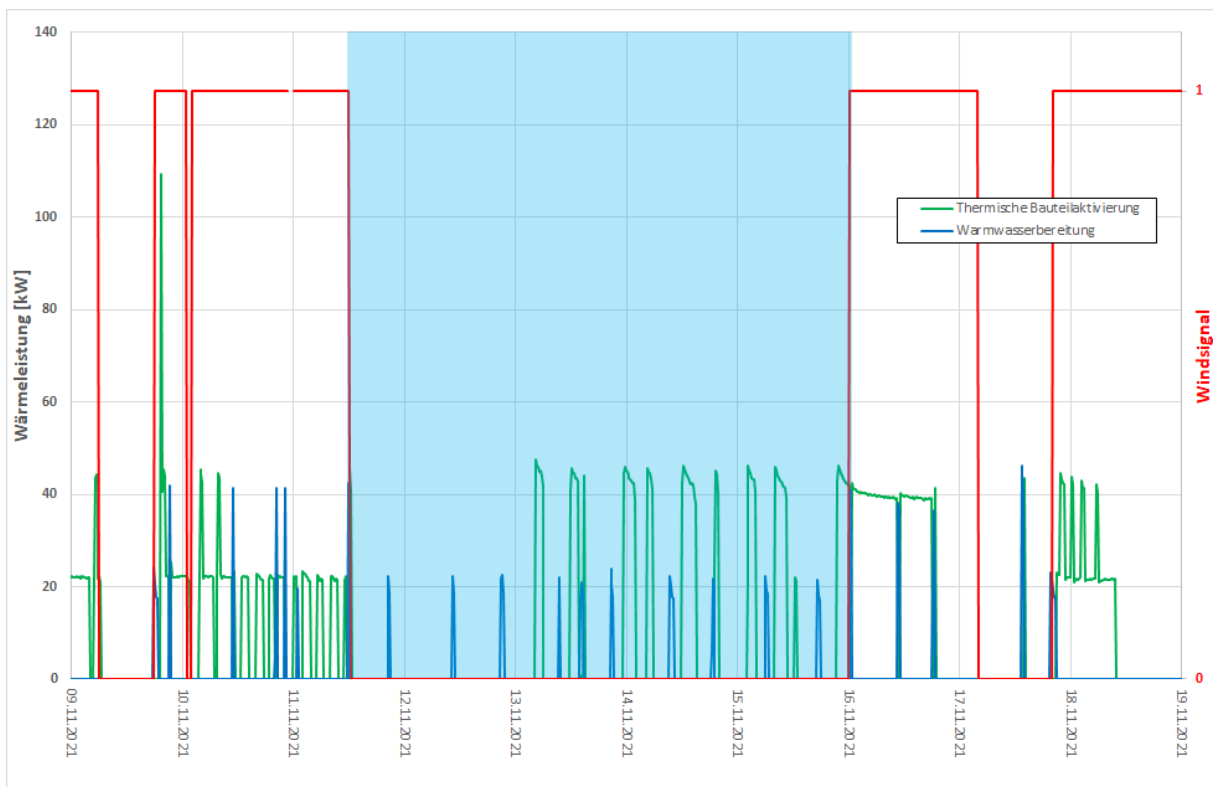


Abb. A 4: Wärmeabgabeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Anfang November 2021

Ersichtlich wird nur ein relativ kleiner Teil der erzeugten Wärme für die Warmwasserbereitung verwendet. Am Beginn der windarmen Zeit (am 11. und 12. November) springen die Wärmepumpen nur jeweils kurz für die Warmwasserbereitung an. Ab dem 13. November ist die mittlere Kerntemperatur der Decken so weit abgekühlt, dass die Wärmepumpen zwecks Vermeidung der Unterschreitung der minimalen Kerntemperatur von 24 °C zu Heizzwecken anspringen. Die in der hier analysierten windarmen Zeit zwischen dem 11. und 15. November von den Wärmepumpen abgegebene Wärmemenge beläuft sich auf 984 kWh und zeichnet damit für 71 % der im gesamten Monat während windarmer Zeiten verbrauchten Wärmemenge (1380 kWh) verantwortlich.

Es stellt sich somit heraus, dass das 4,5 Tage dauernde Zeitintervall ohne Windüberschussstrom der Grund für die etwas schlechtere Bilanz im November 2021 ist. Generell zeigt sich, dass die Regelung der Wärmepumpen nach dem Windsignal im November 2021 insofern gut funktioniert, als einerseits in

windarmen Zeiten die Wärmepumpen nur selten anspringen. Andererseits zeigt die Detailanalyse, dass ein zu starkes Auskühlen der thermisch aktivierten Decken während windarmer Zeiten verlässlich verhindert wird.

8.1.3 Dezember 2021

Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus im Dezember 2021.

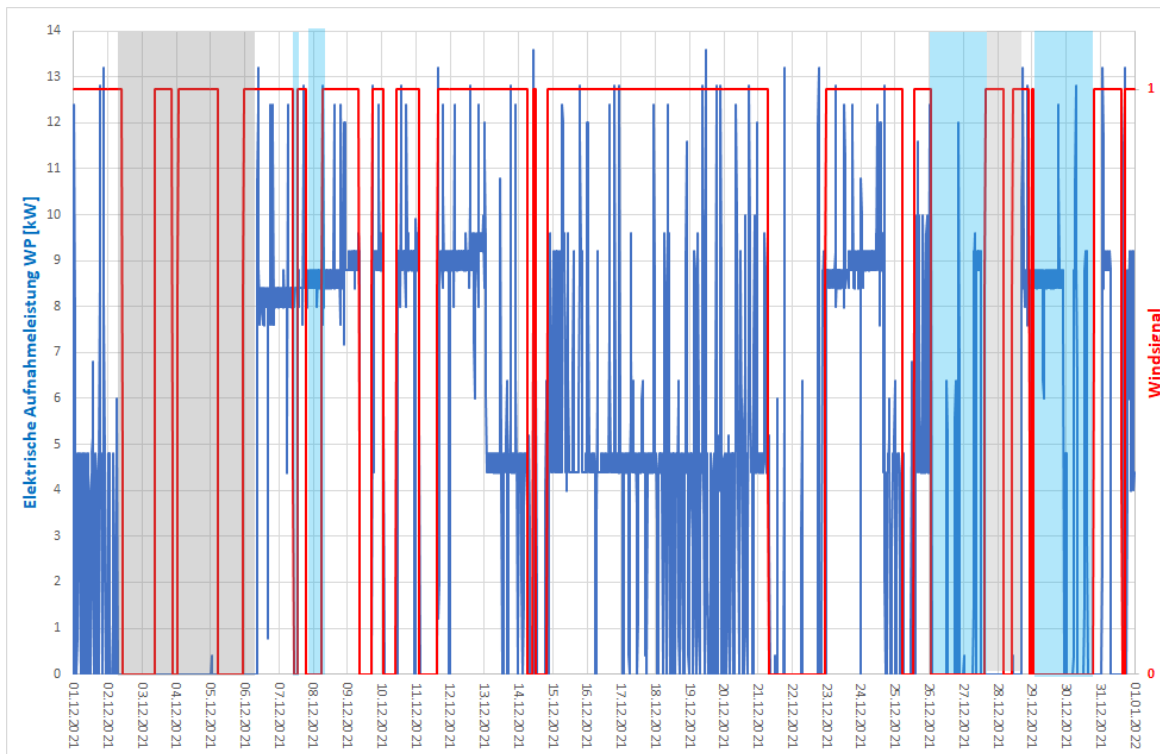


Abb. A 5 Elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Dezember 2021

Am Monatsanfang stand die Wärmepumpe vom 2. Dezember bis Anfang des 6. Dezember still (graue Fläche in Abb. A 5). Es handelt sich dabei um einen Ausfall der Wärmepumpen von ca. 100 Stunden, also einer Dauer von über 4 Tagen. In der Folge wird die notwendige Wiederaufheizung auch während der windarmen Zeiten nicht unterbrochen, solange die mittlere Kerntemperatur unterhalb der Grenze von 24 °C liegt. Die folgende Abbildung zeigt diese Situation im Detail.

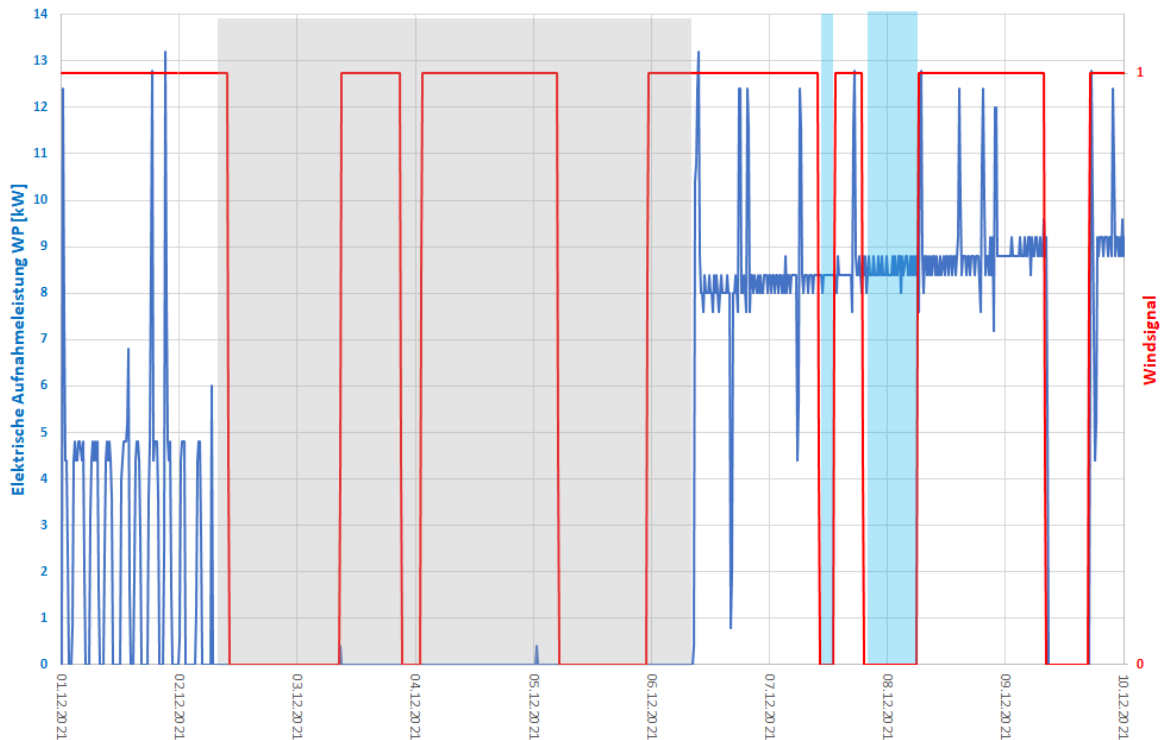


Abb. A 6: Elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal;
Detail von Abb. A 4 für Anfang Dezember 2021

Es zeigt sich, dass in den beiden relativ kurzen windarmen Zeitintervallen am 7. und 8. Dezember (blau hinterlegt in Abb. A 6) die Wärmepumpen mit hoher Leistung laufen. Dies ist offenkundig zur Aufrechterhaltung der minimalen mittleren Kerntemperatur von 24 °C notwendig.

Ein weiterer Aufschluss kann erzielt werden, wenn die Wärmeabgabeleistungen der Wärmepumpen getrennt nach jener für die Warmwasserbereitung und jener für die Erwärmung der Heizregister in den Decken analysiert werden. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis solch' einer Analyse für den Zeitraum zwischen 1. und 10. Dezember 2021.

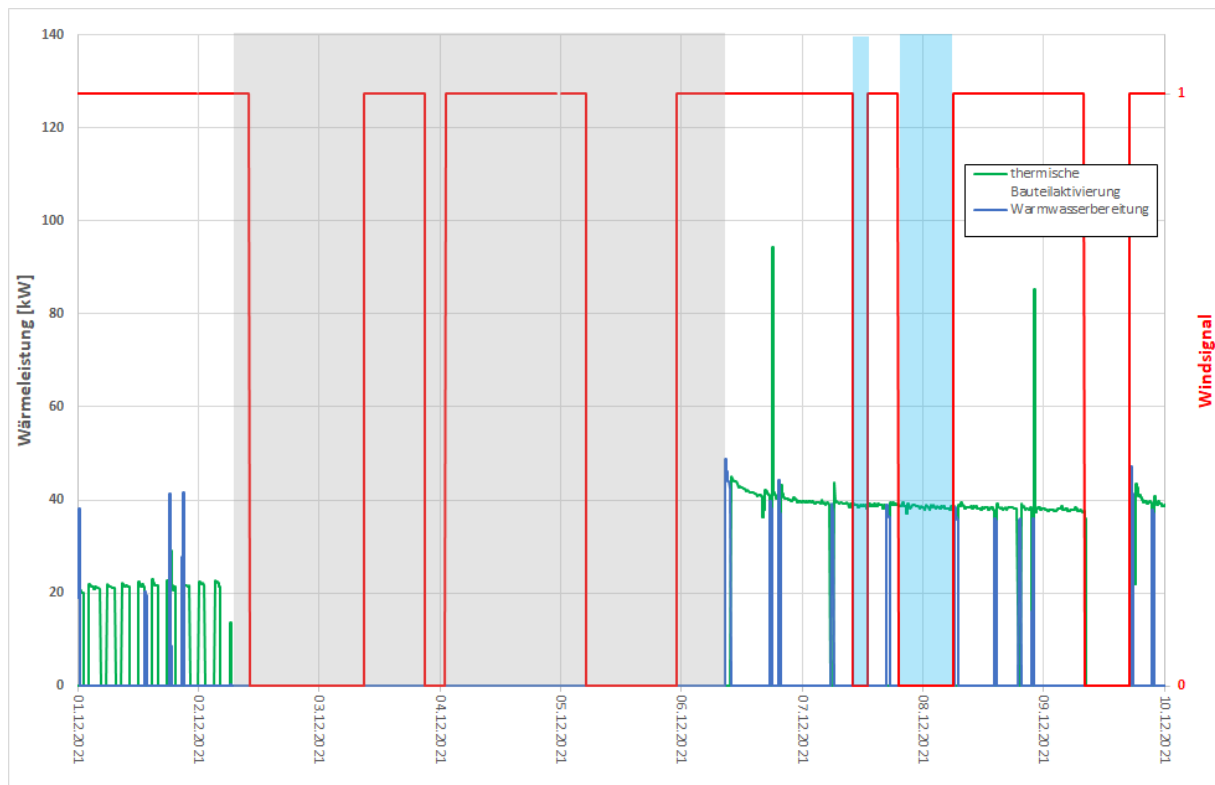


Abb. A 7: Wärmeabgabeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Anfang Dezember 2021

Wie schon im November 2021 zeigt sich, dass für die Warmwasserbereitung nur relativ wenig der von den Wärmepumpen abgegebenen Wärmemengen verwendet wird. In den windarmen Zeiten am 7. und 8. Dezember liefern die Wärmepumpen ausschließlich Wärme an die thermische Bauteilaktivierung. Der Grund für dieses Verhalten ist offenkundig mit dem mehrtägigen Ausfall der Wärmepumpen (graue Fläche in Abb. A 7) gegeben.

Die folgende Abbildung zeigt die Wärmeabgabeleistung der Wärmepumpen am Ende des Monats.

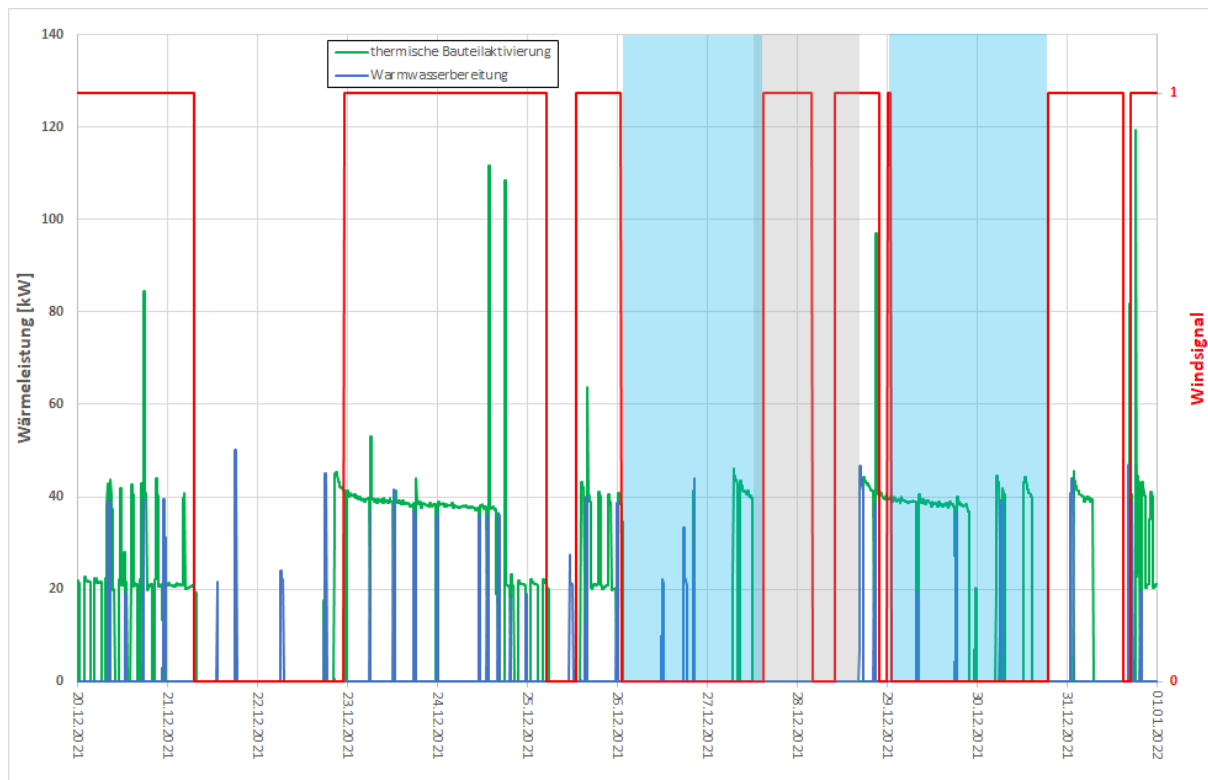


Abb. A 8: Wärmeabgabeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Ende Dezember 2021 (blau hinterlegt: windarme Zeiten, grau hinterlegt: Ausfall der Wärmepumpe)

In der windarmen Zeit vom 26. bis 27. Dezember (blau hinterlegtes linkes Feld in Abb. A 8) zeigt sich ein zu Abb. A 4 (Anfang November) sehr ähnliches Verhalten. Nach anfänglichen Wärmeabgaben für die Warmwasserbereitung muss nach 32 Stunden Wärme in die Rohrregister geliefert werden, um die Kerntemperaturen nicht zu tief absinken zu lassen.

Unmittelbar anschließend tritt am 27. Dezember ein neuerlicher Ausfall der Wärmepumpen auf. Dieser 14-stündige Ausfall bewirkt offensichtlich einen hohen Nachheizbedarf, der sich in der windarmen Zeit zwischen 29. und 30. Dezember (blau hinterlegtes rechtes Feld in Abb. A 8) fortsetzt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die vergleichsweise schlechte Ausnutzung des Windüberschussstroms im Dezember 2021 hauptsächlich auf die Ausfälle der Wärmepumpen am Monatsanfang und am Monatsende zurückgeführt werden kann.

8.2 Rückrechnung der Oberflächentemperatur des Fußbodens aus den Messwerten der Estrichtemperatur

In den beiden Reihenhäusern RH_M und RH_S befindet sich in der Wohnküche jeweils ein Temperatursensor an der Oberfläche des Estrichs. Für die Auswertungen von Interesse ist die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Deckenuntersicht und jener der Fußbodenoberfläche. Es ergibt sich daraus das Erfordernis, aus dem vorliegenden Messwert an der Estrichoberfläche auf die Oberflächentemperatur des Fußbodens rückzurechnen.

Für diese rechnerische Abschätzung wird ein quasistationäres Modell herangezogen, da davon ausgegangen werden kann, dass Wärmespeicherungseffekte aufgrund der vernachlässigbaren Wärmespeicherfähigkeit des Bodenbelags keine Rolle spielen.

Zwischen der Estrichoberfläche – und somit der Position des Temperatursensors – und dem Raum befinden sich folgende Schichten.

	Dicke [m]	Wärmeleitf. [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Widerstand [m ² KW ⁻¹]
Raum (oben)			
Laminatboden	0,007	0,105	0,067
Parkettunterlage	0,002	0,045	0,044
Estrich (unten)			

Tab. A 1: Aufbau Fußbodenbelag

Der thermische Widerstand des Fußbodenbelags ergibt sich gemäß Tab. A 1 damit zu $R_f = 0,067 + 0,044 = 0,111 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$.

In quasistationärer Näherung errechnet sich die Oberflächentemperatur des Fußbodens $\Theta_{s,f}$ als Gewichtsmittel aus der Raumtemperatur Θ_u und der vom Sensor gemessenen Temperatur Θ_g gemäß

$$\Theta_{s,f} = g \cdot \Theta_g + (1 - g) \cdot \Theta_u \quad , \quad \langle \text{A.1} \rangle$$

wobei der Gewichtungsfaktor g durch

$$g = \frac{1}{1 + \frac{R_f}{R_{s,f}}} \quad \langle \text{A.2} \rangle$$

gegeben ist. Da die Richtung des Wärmestroms an der Fußbodenoberfläche sich im zeitlichen Verlauf ändert, erscheint es zulässig, den Wärmeübergangswiderstand an der Fußbodenoberfläche gemäß Norm mit $R_{s,f} = 0,13 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ anzusetzen. Als Umrechnungsformel zur rechnerischen Abschätzung der Oberflächentemperatur des Fußbodens $\Theta_{s,f}$ aus dem vom Sensor gelieferten Wert Θ_g und der vom Raumthermostat registrierten Temperatur Θ_u ergibt sich somit

$$\Theta_{s,f} = 0,539 \cdot \Theta_g + 0,461 \cdot \Theta_u \quad . \quad \langle \text{A.3} \rangle$$

8.3 Rechnerische Abschätzung der Temperaturabhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten

Der Rückrechnung der Wärmeübergangskoeffizienten aus der gemessenen Wärmestromdichte und der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Decke und der vom Raumfühler registrierten Temperatur gemäß Gleichung <4> steht auf der einen Seite der Umstand entgegen, dass die Temperaturdifferenz nur auf eine Nachkommastelle genau vorliegt und die Anwendung von Gleichung <4> damit bei kleiner werdender Temperaturdifferenz unsinnig wird. Auf der anderen Seite liegen Messwerte dieser Größen in 5-Minuten-Intervallen vor, was zu einer sehr hohen Anzahl von Messdaten führt und zu einer statistischen Auswertung verleitet.

In der Folge wird geschildert, in welcher Art die Auswertung dieser Daten in Angriff genommen wurde und so das Entstehen der in den Abb. 49, Abb. 51 und Abb. 52 gezeigten Ergebnisse skizziert. Grundlage für die Auswertung sind die Daten von Dezember 2021 und Januar 2022, wobei die Oberflächentemperaturen der Deckenuntersicht am Messpunkt MP_1 verwendet werden.

Für die beiden betrachteten Monate Dezember und Januar liegen insgesamt 17.856 Messungen von Wärmestromdichte und Temperaturen vor. Diese können nicht alle verwertet werden, da statistische Auswertungen nur dann zielführend sind, wenn ausgeprägte Verteilungen vorliegen und die jeweilige Stichprobe groß genug ist.

In einem ersten Schritt wird die Differenz zwischen Temperatur der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur gebildet. Zudem wird der Wärmeübergangskoeffizient gemäß Gleichung <4> berechnet. In einem zweiten Schritt werden die errechneten Werte des Wärmeübergangskoeffizienten nach der jeweilig aufgetretenen Temperaturdifferenz $\Delta\Theta$ sortiert. Abschließend wird die für eine fixe Temperaturdifferenz erhaltene Verteilung der Werte des rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten analysiert.

Bei kleiner werdenden Werten der Temperaturdifferenz streuen aufgrund der immer größer werdenden Ungenauigkeit die Werte des rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten immer mehr. Als Beispiel zeigt folgende Abbildung das Histogramm der berechneten Wärmeübergangskoeffizienten für eine Temperaturdifferenz von $\Delta\Theta = 1,3 \text{ K}$.

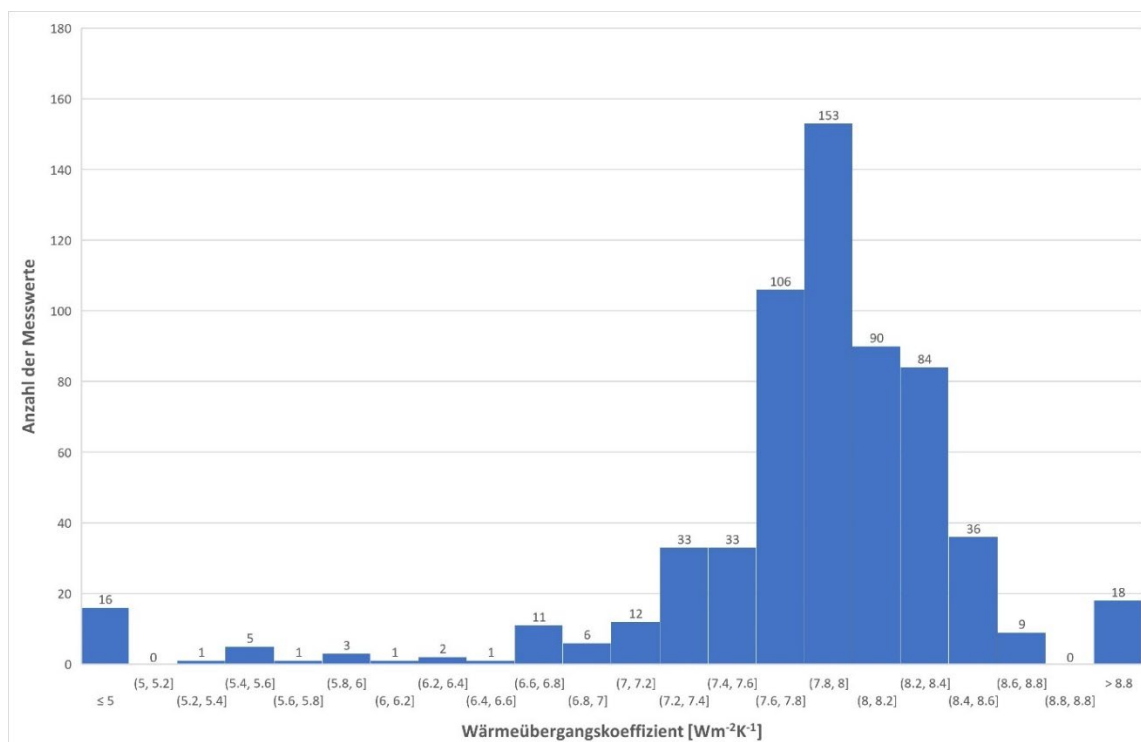


Abb. A 9: Histogramm der Verteilung der für eine Temperaturdifferenz von 1,3 K rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten

Obzwar die in Abb. A 9 gezeigte Verteilung ein ausgeprägtes Maximum in der Klasse von 7,8 bis 8,0 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ zeigt (berechneter Mittelwert: 7,8 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), weist der von $\alpha = 2,8$ bis $\alpha = 9,3$ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ reichende Wertebereich auf die hohe Unsicherheit dieses Ergebnisses hin. Auf die Auswertung solcher Verteilungen wird daher verzichtet.

Die derartig durchgeführten Analysen der für fixe Temperaturdifferenzen ermittelten Verteilungen führt auf das Ergebnis, dass Auswertungen ab einer Temperaturdifferenz von $\Delta\Theta = 1,7$ K sinnvoll sind. Als Beispiel für eine Verteilung mit verwertbarer Aussagekraft wird in folgender Abbildung das Histogramm für eine Temperaturdifferenz von 2,3 K gezeigt.

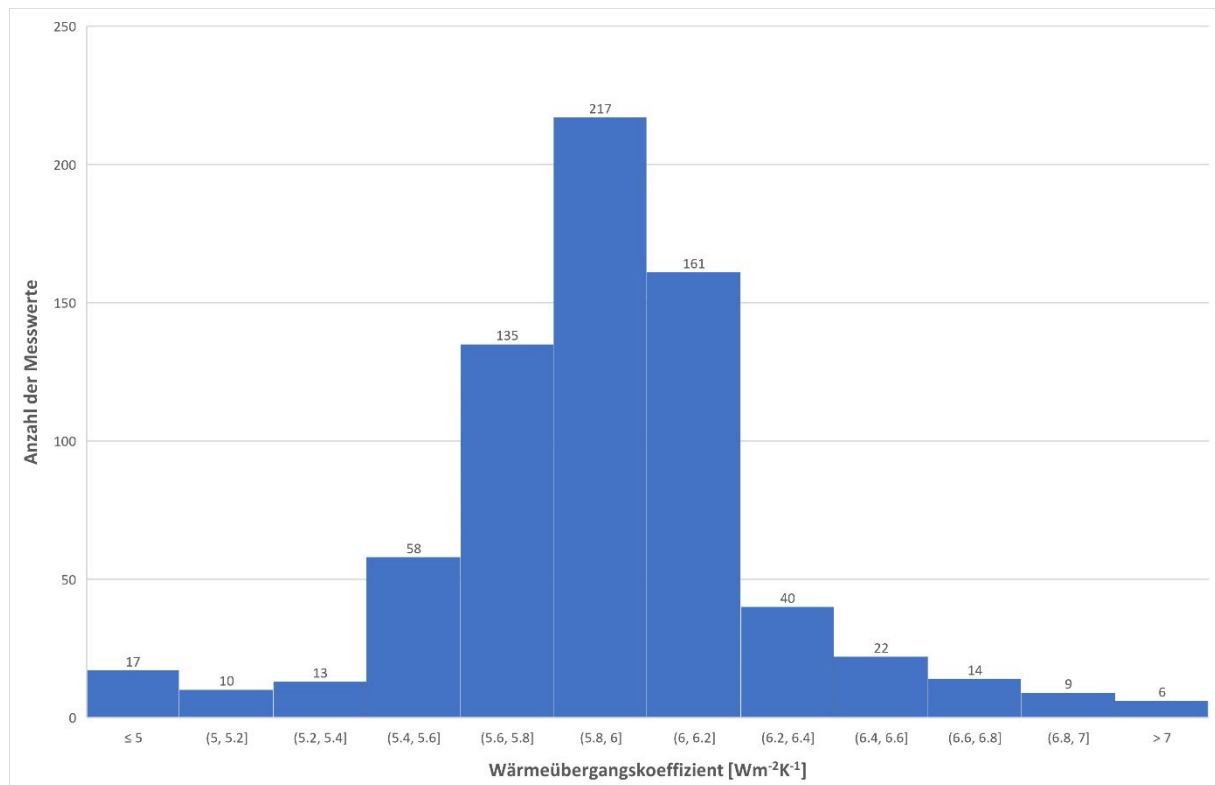


Abb. A 10: Histogramm der Verteilung der für eine Temperaturdifferenz von 2,3 K rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten

Der Mittelwert der Verteilung liegt bei 5,85 $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ und kann als Ergebnis weiter verwertet werden. Dieser Wert scheint als Punkt in Abb. 49 auf.

Bei großen Temperaturdifferenzen tritt die Problematik auf, dass die Stichprobe, d. h. die Anzahl der zur Analyse bereitstehenden Messwerte, klein ist. Auch in diesem Bereich stellt sich die Frage, ob eine statistische Auswertung noch sinnvolle Ergebnisse liefern kann. Die folgende Abbildung zeigt als Beispiel die für die Temperaturdifferenz $\Delta\Theta = 3,0$ K erhaltene Verteilung.

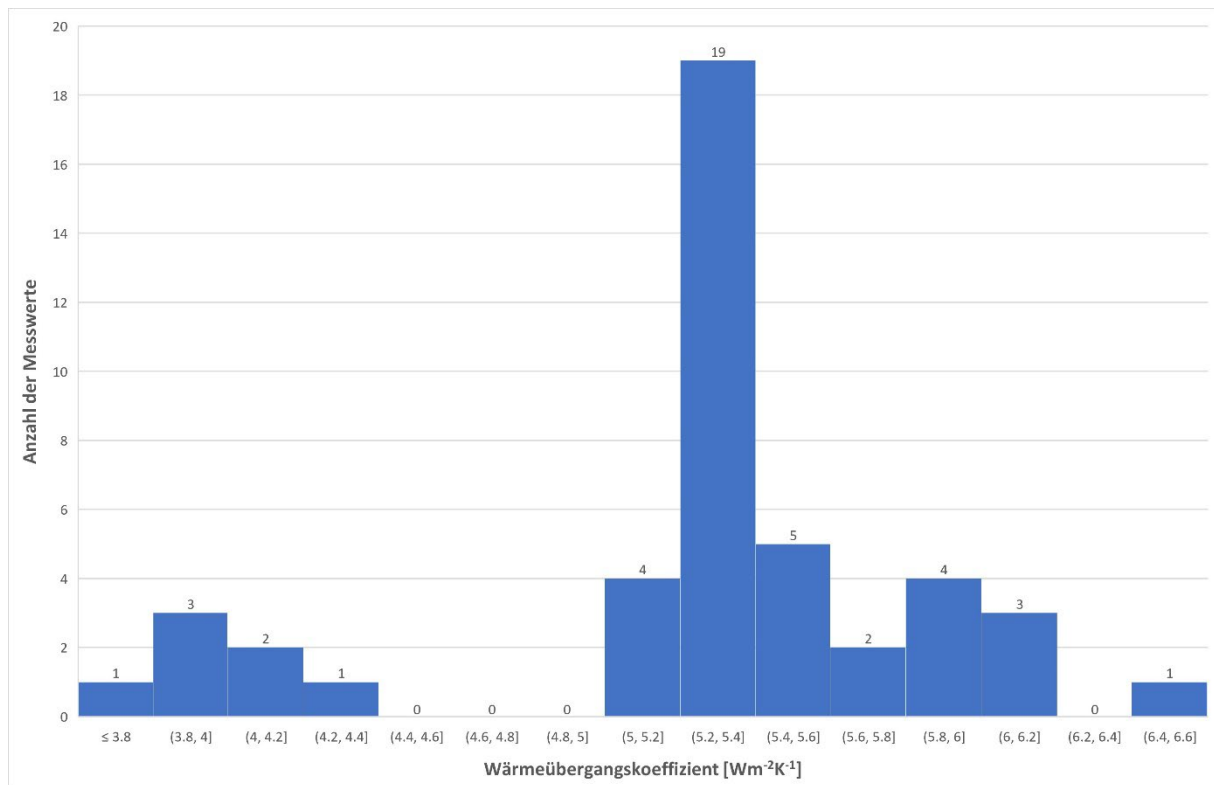


Abb. A 11: Histogramm der Verteilung der für eine Temperaturdifferenz von 3,0 K rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten

Die Verwertung des Mittelwerts der Verteilung bei 5,3 Wm⁻²K⁻¹ ist insofern problematisch, als die Anzahl der für eine solche Temperaturdifferenz zur Verfügung stehenden Messwerte (45 Messungen – siehe dazu auch Abb. 47) sehr klein ist.

Die Analyse der in Schritten der Temperaturdifferenz von 0,1 K erstellten Verteilungen führt zum Ergebnis, dass für den Messpunkt MP_1 der Bereich zwischen $\Delta\Theta \geq 1,7$ K und $\Delta\Theta \leq 2,9$ K den Kriterien für eine aussagekräftige statistische Auswertung genügt. Das Ergebnis dieser Auswertungen ist in Abb. 49 dargestellt.

8.4 Rückrechnung der Heizmitteltemperatur aus der Sensortemperatur

Da die Temperatur des Heizmittels an verschiedenen Punkten des Rohrregisters mit annehmbarem Aufwand nicht direkt gemessen werden kann, wurde an dessen Stelle die „Rohrtemperatur“ Θ_g gemessen, die ein Temperatursensor an der äußeren Oberfläche des Rohrs anzeigt. Dieser Sensor befindet sich in einem Überschubrohr, welches mittels Kabelbinder am Heizrohr fixiert wurde – siehe die folgende Abbildung.



Abb. A 12: Reihenhaus RH_M, Messpunkt MP1: Befestigung der Hülse mit dem Temperatursensor am Registerrohr

Das Heizungsrohr (rot in Abb. A 12) ist aus Kunststoff und hat einen Außendurchmesser von 17 mm. Die den Sensor enthaltende Metallhülse hat einen Außendurchmesser von ca. 6,0 mm. Zwischen der Rohrachse des Heizungsrohrs und der Position des Temperatursensors liegt ein Abstand von ca. $8,5 + 3,0 = 11,5$ mm.

Die Differenz zwischen der Temperatur des Heizmittels Θ_r und der vom Rohrtemperatursensor gemessenen Temperatur Θ_g sei mit Δ bezeichnet. In quasistationärer Näherung, d. h. unter Vernachlässigung von Wärmespeicherungseffekten, ergibt sich die Temperatur am Ort des Rohrsensors Θ_s als Gewichts Mittel zwischen den Raumtemperaturen Θ_u bzw. Θ_o und der gesuchten Heizmitteltemperatur Θ_r gemäß

$$\Theta_s = g_r \cdot \Theta_r + g_u \cdot \Theta_u + g_o \cdot \Theta_o \quad \text{<A.4>}$$

wobei die Gewichte g natürlich der Bedingung

$$g_r + g_u + g_o = 1 \quad \text{<A.5>}$$

genügen (6).

Wird nun vereinfachend angenommen, dass die Temperatur Θ_u in der Wohnküche – d. h. im Raum unter der thermisch aktivierten Decke – gleich der Temperatur Θ_o im OG, also im Raum oberhalb der Decke ist, so ergibt sich unter Berücksichtigung von Gleichung <A.5> die einfache Beziehung

$$\Theta_s = g_r \cdot \Theta_r + (1 - g_r) \cdot \Theta_u \quad \text{<A.6>}$$

für die Berechnung der Temperatur Θ_s am Ort des Sensors.

Die Bestimmung des der Heizmitteltemperatur Θ_r zugeordneten Temperaturgewichtungsfaktors g_r erfolgt mittels zweidimensionaler Berechnung unter Zugriff auf das Wärmebrückenprogramm AnTherm (7) und liefert für die Position des Temperatursensors in 11,5 mm Abstand von der Rohrachse des Registerrohrs den Wert $g_r = 0,82$. Die folgende Abbildung zeigt ein Bild der Isolinien des Gewichtungsfaktors.

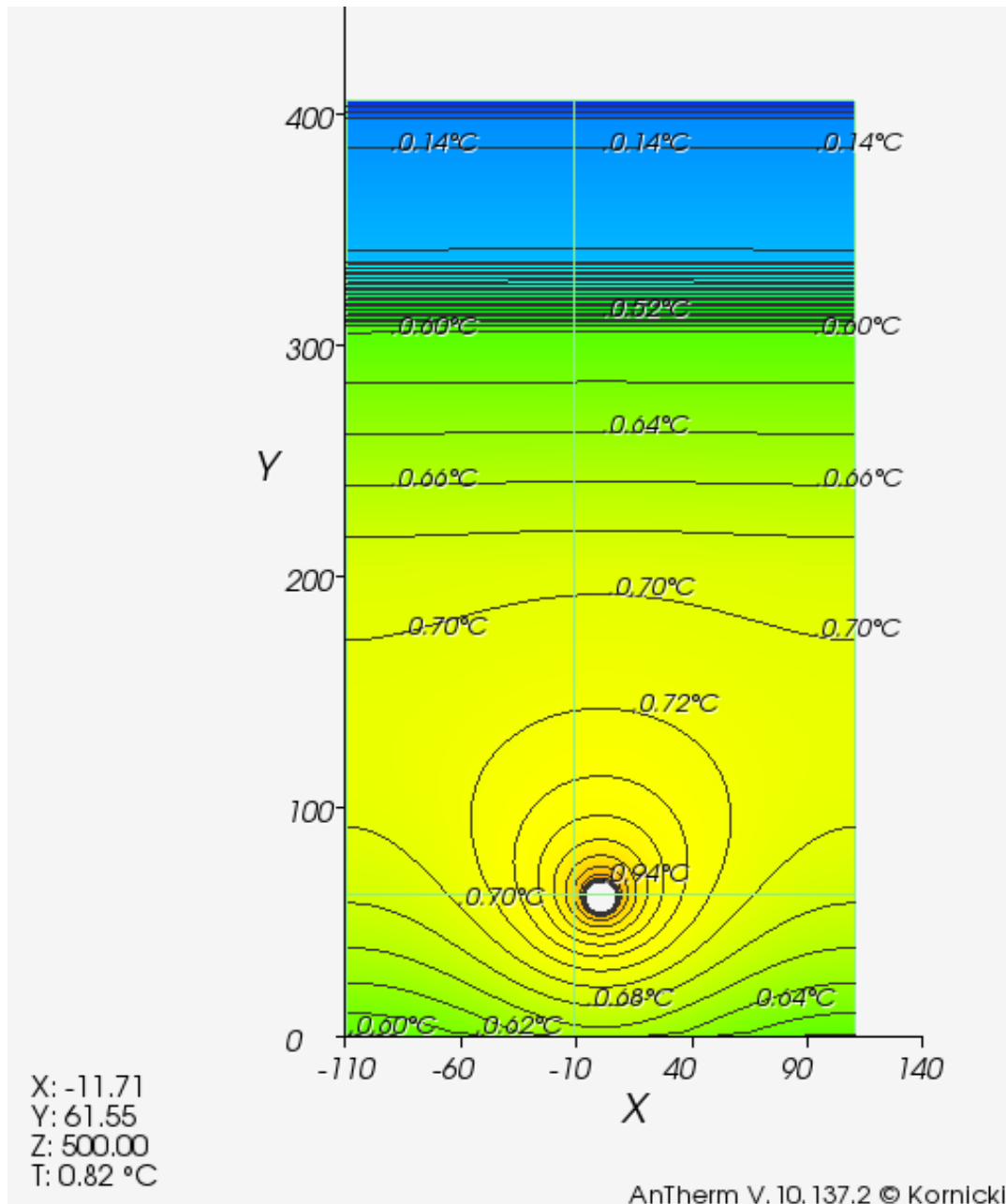


Abb. A 13: 2D-Berechnung für einen Vertikalschnitt durch die Decke mit Registerrohr:
 Isolinien des Gewichtungsfaktors g_r ; Abstand der Isolinien: 0,02

Durch Umformung von Gleichung <A.6> ergibt sich die Temperatur des Heizmittels zu

$$\Theta_r = \frac{\Theta_s - (1 - g_r) \cdot \Theta_u}{g_r} \quad \text{<A.7>}$$

und die gesuchte Differenz zwischen der Temperatur des Heizmittels und des Messwerts des Temperatursensors zu

$$\Delta = \Theta_r - \Theta_s = \frac{1 - g_r}{g_r} \cdot (\Theta_s - \Theta_u) \quad . \quad \text{<A.8>}$$

Mit dem Gewichtungsfaktor $g_r = 0,82$ ergibt sich die Temperaturdifferenz Δ , die zum Messwert Θ_s addiert werden muss, um die gesuchte Temperatur des Heizmittels Θ_r zu erhalten zu

$$\Delta = \frac{0,18}{0,82} \cdot (\Theta_s - \Theta_u) \quad . \quad \text{<A.9>}$$

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Lageplan des Wohnparks; Ausschnitt aus dem Einreichplan © AW Architekten.....	5
Abb. 2:	Wohnpark Wolfsbrunn, im Vordergrund der Wohnbau für JUNGES und BETREUTES Wohnen vor den 14 Reihenhäusern, im Hintergrund ein Windpark (Bild: SÜDRAUM).....	7
Abb. 3:	Auf den Elementdecken verlegte Rohrleitungen der thermischen Bauteilaktivierung (rot) im Bereich der Reihenhäuser	8
Abb. 4:	Bildschirm-Bild zum Gesamtschema des Wärmeerzeugungssystems für das Wohnhaus mit einer Übersicht der erhobenen Messwerte © GRT	10
Abb. 5:	Reihenhaus RH_M: Schemaskizze der Rohrregister in der Decke der Wohnküche im EG und der Positionen der Temperatursensoren; Bildschirmbild des Überwachungssystems © GRT	12
Abb. 6:	Reihenhaus RH_S: Schemaskizze der Rohrregister in der Decke der Wohnküche im EG und der Positionen der Temperatursensoren; Bildschirmbild des Überwachungssystems © GRT	13
Abb. 7:	Wohnhaus: Zeitlicher Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen von August 2020 bis Juli 2022 sowie Temperatur der Außenluft.....	16
Abb. 8:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die nordorientierte Wohnung.....	17
Abb. 9:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die südorientierte Wohnung	18
Abb. 10:	Südseitige Wohnung: zeitlicher Verlauf der Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur.....	19
Abb. 11:	Südseitige Wohnung: Histogramm der Differenz von Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur für den gesamten Beobachtungszeitraum	20
Abb. 12:	Reihenhäuser RH_M und RH_S: Zeitlicher Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen und Verlauf der Außentemperaturen von August 2020 bis Juli 2022.....	21
Abb. 13:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_M.....	22
Abb. 14:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_S	23
Abb. 15:	Reihenhaus RH_M: zeitlicher Verlauf der Oberflächentemperaturen der Deckenuntersicht und des Fußbodens, sowie der vom Raumfühler registrierten Temperatur.....	24
Abb. 16:	Reihenhaus RH_M: Histogramm der Differenz zwischen der Oberflächentemperatur der Deckenuntersicht und der Oberflächentemperatur des Fußbodens für den gesamten Beobachtungszeitraum	25
Abb. 17:	Zeitlicher Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen von Juli 2021 bis Juli 2022 für alle 14 Reihenhäuser	26
Abb. 18:	Zeitlicher Verlauf der von den Raumfühlern registrierten Temperaturen von Juli 2021 bis Juli 2022 für drei ausgewählte Reihenhäuser	27
Abb. 19:	Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpe im Wohnhaus	28
Abb. 20:	Monatssummen der von den Wärmepumpen im Wohnhaus erzeugten Wärme.....	29
Abb. 21:	Monatssummen der für die Warmwasserbereitung im Wohnhaus verbrauchten Wärme 31	
Abb. 22:	Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpen in den Reihenhäusern RH_M und RH_S	32
Abb. 23:	Registrierte Stromverbräuche der Wärmepumpen und Monatsmittelwerte der Raumtemperatur in der Wohnküche im Dezember 2021 für alle Reihenhäuser	33
Abb. 24:	Verlauf des Windsignals im Vergleich zur durch die Windkraftwerke in der Regelzone des APG erzeugten Windstroms für die Kalenderwoche 46 des Jahrs 2021.....	35
Abb. 25:	Vergleich der Verläufe der Außenlufttemperatur zwischen der Heizsaison 2020/21 und der Heizsaison 2021/22	36

Abb. 26:	Zeitlicher Verlauf der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden betrachteten Heizsaisonen in der nordseitig gelegenen Wohnung	37
Abb. 27:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die nordseitig orientierte Wohnung; Heizsaison 2020/21	38
Abb. 28:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die nordseitig orientierte Wohnung; Heizsaison 2021/22	38
Abb. 29:	Zeitlicher Verlauf der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden betrachteten Heizsaisonen in der südseitig gelegenen Wohnung	39
Abb. 30:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die südseitig orientierte Wohnung; Heizsaison 2020/21	40
Abb. 31:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die südseitig orientierte Wohnung; Heizsaison 2021/22	40
Abb. 32:	Zeitlicher Verlauf der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden betrachteten Heizsaisonen in der Wohnküche des Reihenhauses RH_M	42
Abb. 33:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_M; Heizsaison 2020/21	43
Abb. 34:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_M; Heizsaison 2021/22	43
Abb. 35:	Zeitlicher Verlauf der vom Raumfühler registrierten Temperaturen während der beiden betrachteten Heizsaisonen in der Wohnküche des Reihenhauses RH_S.....	44
Abb. 36:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_S; Heizsaison 2020/21.....	45
Abb. 37:	Abhängigkeit der vom Raumfühler registrierten Temperaturen von der Außenlufttemperatur für die Wohnküche in Reihenhaus RH_S; Heizsaison 2021/22.....	45
Abb. 38:	Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpen im Wohnhaus für die Heizsaison 2021/22	46
Abb. 39:	Wohnhaus: Vergleich der in Zeiten ohne Windüberschuss gemessenen monatlichen Stromverbräuche („Normalstrom“) mit den entsprechenden Stromverbräuchen bei durchlaufender Wärmepumpe	48
Abb. 40:	Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpe in Reihenhaus RH_M für die Heizsaison 2021/22	50
Abb. 41:	Reihenhaus RH_M: Vergleich der in Zeiten ohne Windüberschuss gemessenen monatlichen Stromverbräuche („Normalstrom“) mit den entsprechenden Stromverbräuchen bei durchlaufender Wärmepumpe	51
Abb. 42:	Monatssummen des Stromverbrauchs der Wärmepumpe in Reihenhaus RH_S für die Heizsaison 2021/22	51
Abb. 43:	Reihenhaus RH_S: Vergleich der in Zeiten ohne Windüberschuss gemessenen monatlichen Stromverbräuche („Normalstrom“) mit den entsprechenden Stromverbräuchen bei durchlaufender Wärmepumpe	52
Abb. 44:	Vergleich der in Zeiten ohne Windüberschuss gemessenen monatlichen Stromverbräuche („Normalstrom“) mit den entsprechenden Stromverbräuchen bei durchlaufender Wärmepumpe aller 14 Reihenhäuser; Dezember 2021.....	53
Abb. 45:	Skizze der Lage der Messfühler für den Wärmestrom an der Deckenuntersicht der Wohnküche von Reihenhaus RH_M.....	55
Abb. 46:	Sensor für die Messung von Wärmestromdichte und Oberflächentemperatur am Messpunkt MP_1 der Deckenuntersicht in der Wohnküche des Reihenhauses RH_M.....	55
Abb. 47:	Zeitlicher Verlauf der Differenz zwischen Oberflächentemperatur der Decke am Messpunkt MP_1 und der vom Raumfühler registrierten Temperatur für den Zeitraum von Dezember 2021 bis Anfang Februar 2022.....	56
Abb. 48:	Zeitlicher Verlauf der am Messpunkt MP_1 gemessenen Wärmestromdichte für den Zeitraum von Dezember 2021 bis Anfang Februar 2022.....	57

Abb. 49:	Abhängigkeit des für Messpunkt MP_1 rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten von der Differenz zwischen der Temperatur an der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur $\Delta\Theta$; Auswertungen für Dezember 2021 und Januar 2022	59
Abb. 50:	Zeitlicher Verlauf der Differenz zwischen Oberflächentemperatur der Decke am Messpunkt MP_4 und der vom Raumfühler registrierten Temperatur für den Zeitraum von Dezember 2020 bis Anfang Februar 2021	60
Abb. 51:	Abhängigkeit des für Messpunkt MP_4 rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten von der Differenz zwischen der Temperatur an der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur; Datenbasis: Dez. 21 und Jan. 22.....	61
Abb. 52:	Abhängigkeit der rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten für die Deckenuntersicht von der Differenz zwischen der Temperatur an der Deckenuntersicht und der vom Raumfühler registrierten Temperatur; Datenbasis: Dezember 2021 und Januar 2022.....	62
Abb. 53:	Abhängigkeit der Wärmestromdichte von der Differenz $\Delta\Theta$ der Temperatur der Deckenuntersicht und der Raumtemperatur	63
Abb. 54:	Bild des Verteilers mit eingebautem Wärmemengenzähler in Reihenhaus RH_M.....	64
Abb. 55:	Reihenhaus RH_M: Vermessung der genauen Position des in der Metallhülse befindlichen Temperatursensors für die Bestimmung der Temperatur des Heizmittels.	65
Abb. 56:	Mäanderförmig verlegtes Register des Heizkreises 6 in der Decke der Wohnküche von Reihenhaus RH_M	66
Abb. 57:	Reihenhaus RH_M: Lage der Messanordnungen zur Bestimmung der Temperatur des Heizmittels	67
Abb. 58:	Reihenhaus RH_M: zeitlicher Verlauf der Heizmitteltemperaturen vom 1. November 2021 bis 28. Februar 2022	67
Abb. 59:	Reihenhaus RH_M: zeitlicher Verlauf der Heizmitteltemperaturen und der elektrischen Aufnahmeleistung der Wärmepumpe am 12. Januar 2022.....	68
Abb. 60:	Rohrführung von Vorlauf- und Rücklaufleitungen im Bereich des Verteilers; Decke über der Wohnküche eines Reihenhauses	70
Abb. 61:	Reihenhaus RH_M: Histogramm der gemessenen Spreizung für das Zeitintervall zwischen 1. Dezember 2021 und 31. Januar 2022	71
Abb. 62:	Schneckenförmig verlegtes Register des Heizkreises 6 in der Decke der Wohnküche von Reihenhaus RH_S.....	72
Abb. 63:	Reihenhaus RH_S: zeitlicher Verlauf der Heizmitteltemperaturen vom 1. November 2021 bis 28. Februar 2022	73
Abb. 64:	Reihenhaus RH_S: zeitlicher Verlauf der Heizmitteltemperaturen und der elektrischen Aufnahmeleistung der Wärmepumpe am 12. Januar 2022.....	74
Abb. 65	Reihenhaus RH_S: Histogramm der gemessenen Spreizung für das Zeitintervall zwischen 1. Dezember 2021 und 31. Januar 2022	75

Anhang

Abb. A 1:	Elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Oktober 2021	82
Abb. A 2:	Registrierte Temperaturen im Oktober 2021	83
Abb. A 3	Elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; November 2021.....	84
Abb. A 4:	Wärmeabgabeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Anfang November 2021.....	85
Abb. A 5	Elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Dezember 2021	86
Abb. A 6:	Elektrische Aufnahmeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Detail von Abb. A 4 für Anfang Dezember 2021	87

Abb. A 7: Wärmeabgabeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Anfang Dezember 2021	88
Abb. A 8: Wärmeabgabeleistung der Wärmepumpen im Wohnhaus in Abhängigkeit vom Windsignal; Ende Dezember 2021 (blau hinterlegt: windarme Zeiten, grau hinterlegt: Ausfall der Wärmepumpe).....	89
Abb. A 9: Histogramm der Verteilung der für eine Temperaturdifferenz von 1,3 K rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten.....	91
Abb. A 10: Histogramm der Verteilung der für eine Temperaturdifferenz von 2,3 K rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten	92
Abb. A 11: Histogramm der Verteilung der für eine Temperaturdifferenz von 3,0 K rückgerechneten Wärmeübergangskoeffizienten	93
Abb. A 12: Reihenhaus RH_M, Messpunkt MP1: Befestigung der Hülse mit dem Temperatursensor am Registerrohr	94
Abb. A 13: 2D-Berechnung für einen Vertikalschnitt durch die Decke mit Registerrohr: Isolinien des Gewichtungsfaktors g ; Abstand der Isolinien: 0,02	95

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Wohnhaus: Übersicht über die im Monitoring verwendeten Daten.....	11
Tab. 2: Reihenhäuser: Übersicht über die im Monitoring verwendeten Daten	13
Tab. 3: Monatliche Arbeitszahlen der Wärmepumpen im Wohnhaus	30
Tab. 4: Temperaturmittelwerte über die Heizsaison im Vergleich zum entsprechenden Stromverbrauch	32
Tab. 5: Monatsmittelwerte der Temperatur und monatlicher Stromverbrauch der Wärmepumpe für Dezember 2021.....	33
Tab. 6: prozentueller Anteil u des Windstromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch der Wärmepumpe im Wohnhaus und Anteil v der Zeiten mit Windüberschuss am Gesamtzeitraum; Heizsaison 2021/22	47
Tab. 7: prozentueller Anteil w des Normalstromverbrauchs am fiktiven Verbrauch ohne Windstromregelung	48
Tab. 8: prozentueller Anteil u des Windstromverbrauch am Gesamtstromverbrauch der Wärmepumpe im Reihenhaus RH_M und Anteil v der Zeiten mit Windüberschuss am Gesamtzeitraum; Heizsaison 2021/22	50
Tab. 9: prozentueller Anteil u des Windstromverbrauch am Gesamtstromverbrauch der Wärmepumpe im Reihenhaus RH_S und Anteil v der Zeiten mit Windüberschuss am Gesamtzeitraum; Heizsaison 2021/22	52
Tab. 10: Monatsmittelwerte der Wärmeübergangskoeffizienten für zwei verschiedene Punkte an der Untersicht der thermisch aktivierten Decke	57
Tab. 11: Reihenhaus RH_M: Temperaturen des Heizmittels an verschiedenen Stellen des Registers von Heizkreis 6 am 12. Januar 2022.....	69
Tab. 12: Reihenhaus RH_S: Temperaturen des Heizmittels an verschiedenen Stellen des Registers von Heizkreis 6 am 12. Januar 2022	74

Netzfleibler Wohnbau als Energiespeicher

für Windstrom-Spitzenlasten
im öffentlichen Stromnetz



Bericht Sozialwissenschaftliche Untersuchung

Wohnpark Wolfbrunn, 2453 Sommerein

Claudia Maier, BA MA, Forschung Burgenland



Niederösterreich / Wien, März 2023



Sozialwissenschaftliche Untersuchung

Im Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein wurden im Rahmen des Projektes „Hybrid LSC“ Befragungen unter den Bewohner:innen durchgeführt, um einen ersten explorativen Einblick in deren subjektives Wohlbefinden zu erhalten sowie deren unterschiedliche Bedürfnisse für ihre Wohnsituation zu erörtern. Die Befragung zielte darauf ab, gemeinsame Anliegen und Anforderungen zu identifizieren, die für Systementscheidungen genutzt werden können. Auf der Grundlage zuverlässiger Skalen aus der Literatur wurde eine quantitative Umfrage zum Wohnkomfort und zu weiteren Umweltthemen erstellt.

Es fand eine Erstbefragung der Bewohner:innen im November 2021 statt. 14 Personen wurden persönlich befragt, davon waren 8 männlich und 6 weiblich. Das Durchschnittsalter der Befragten lag bei 59 Jahren, die Hälfte von ihnen hat als Höchstabschluss eine Lehre absolviert, zwei Personen eine Pflichtschule und je eine Person hat ihren Abschluss in einer berufsbildenden mittleren Schule gemacht, eine Matura absolviert oder einen Universitäts- bzw. Fachhochschulabschluss; zwei Personen gaben „sonstiges“ bei der Frage zum Bildungsniveau an. 5 der Befragten leben in einem Einpersonenhaushalt und 9 Personen leben zu zweit, davon 11 im Wohnhaus in Wolfsbrunn und 3 in einem Reihnhaus.

1.1 Einstellung der Bewohner:innen

Die Umfrage umfasste aus der Literatur entnommene Konstrukte zu folgenden Themenbereichen:

- Energiesparverhalten der Bewohner:innen (Schahn 2014)
- Bereitschaft, Verzicht in Kauf zu nehmen, um die Umwelt zu schützen (Montada, Kals & Becker 2014)
- Umweltbewusstes Verkehrsverhalten (Schahn 2014)
- Rechnungsbewusstsein für Stromrechnungen (Chen et al. 2017)

Die einzelnen Items der Skalenkonstrukte wurden mittels einer 5-Point-Likert Skala gemessen (1= trifft gar nicht zu bis 5= trifft völlig zu). Die Auswertung der Mittelwerte ergab, dass die befragten Bewohner:innen eine sehr hohe Ausprägung beim Energiesparverhalten und bei umweltschützenden Verzicht an den Tag legen. Auch das umweltbewusste Verkehrsverhalten ist ausgeprägt. Das Rechnungsbewusstsein der Proband:innen ist eher neutral zu bewerten (s. Abb. 1)

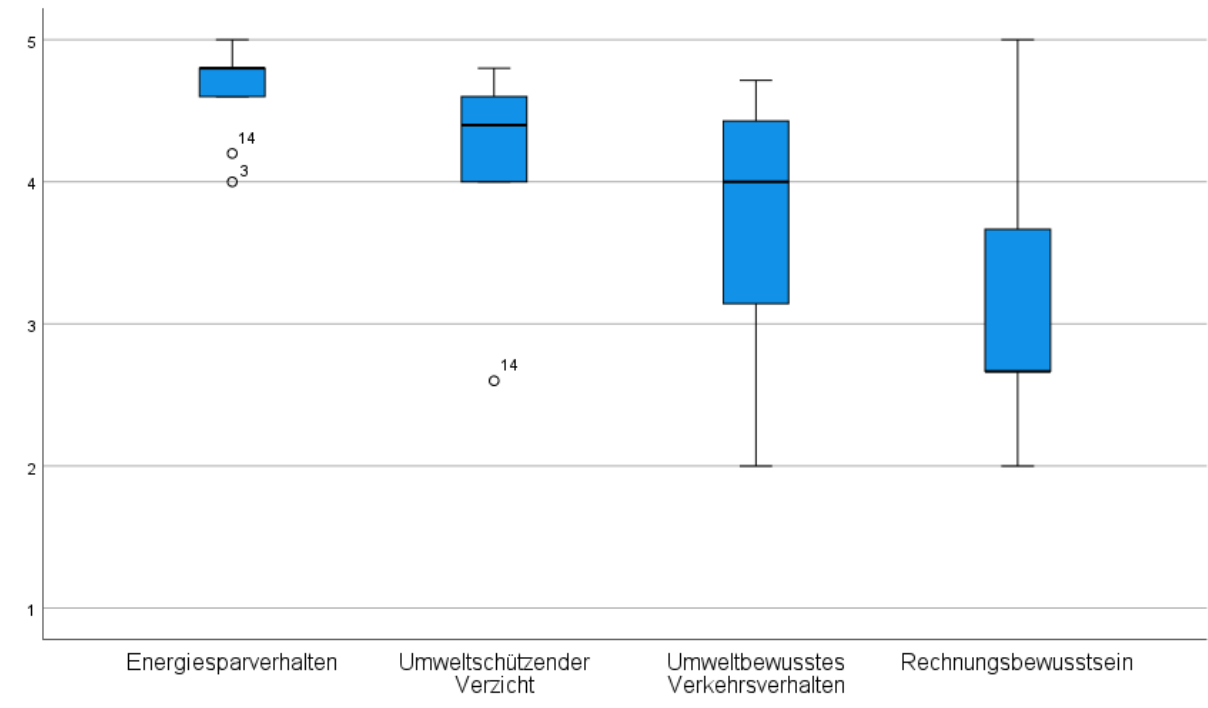


Abb. 1: Mittelwertvergleich der Skalenkonstrukte

1.2 Thermischer Komfort der Bewohner:innen

Um einen Einblick in das Wohlbefinden der Bewohner:innen zu erhalten wurde in einem ersten Schritt die gewünschte Idealtemperatur der einzelnen Personen abgefragt. Diese Idealtemperaturen unterscheiden sich in gewissem Maß voneinander, wobei die gesamte Bandbreite zwischen 20° Celsius und 26° Celsius im Wohnzimmer liegt und im Schlafzimmer zwischen 16,5° Celsius und 24° Celsius. Abb. 2 und Abb. 3 geben einen Überblick über die Idealtemperatur pro Proband:in, jeweils im Wohnzimmer und im Schlafzimmer.

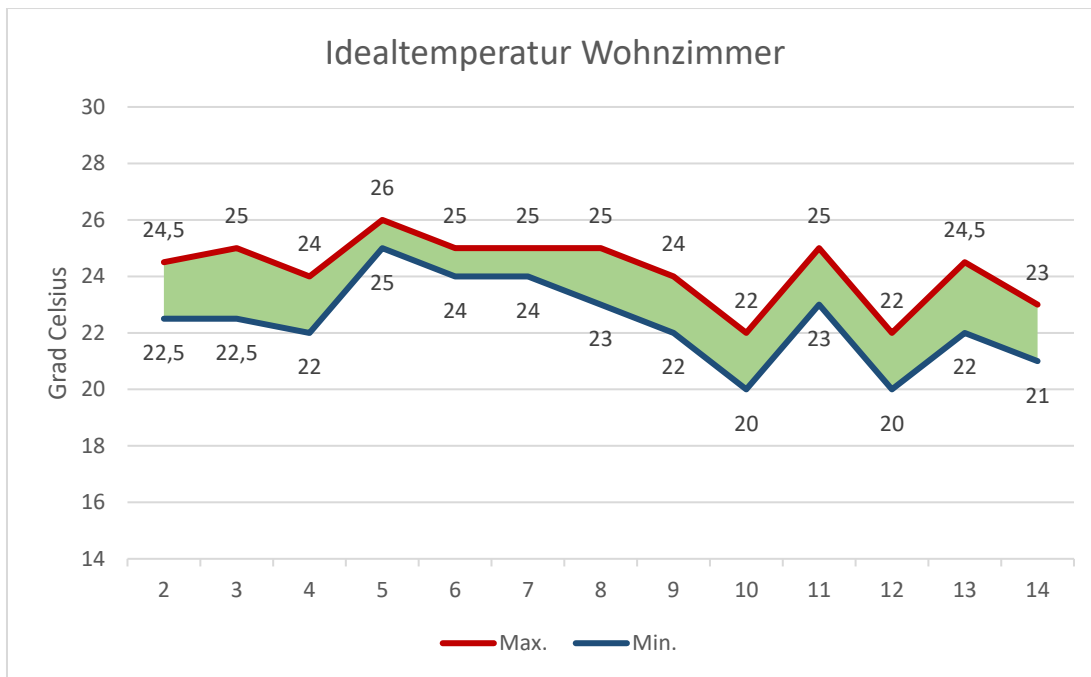


Abb. 2: Idealtemperatur Wohnzimmer

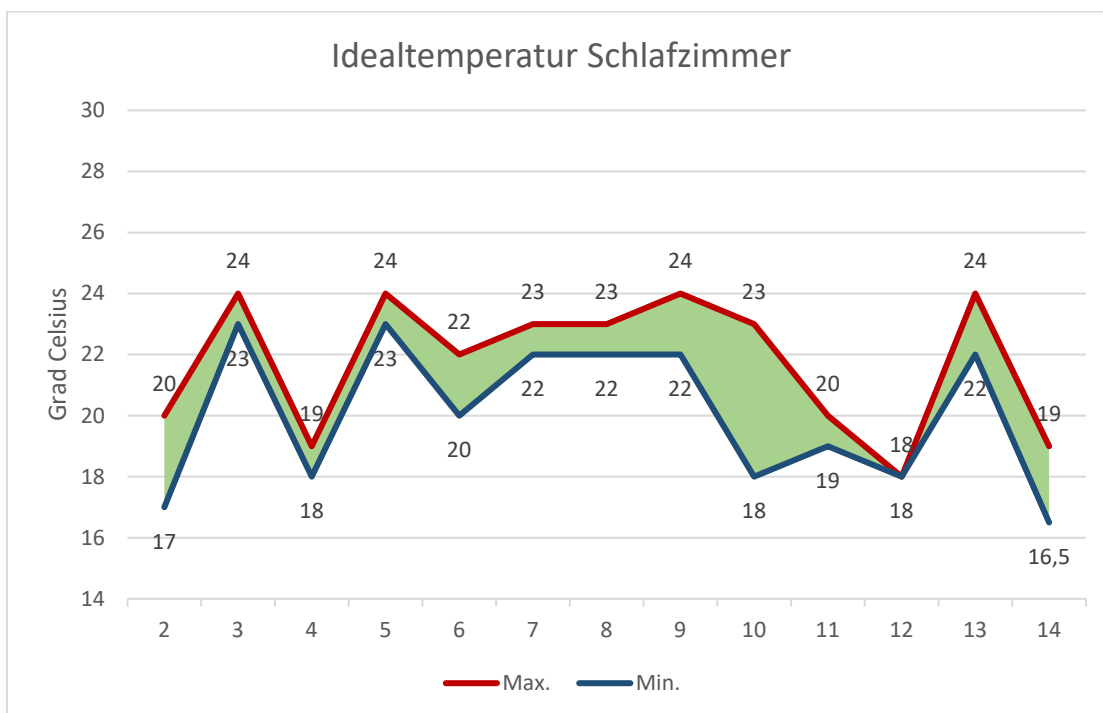


Abb. 3: Idealtemperatur Schlafzimmer

Die Proband:innen wurden weiters darum gebeten, eine Bewertung zum thermischen Zustand und zu ihrem eigenen thermischen Wohlbefinden bzw. Komfort abzugeben, jeweils im Wohnzimmer und im Schlafzimmer.

Um den thermischen Zustand zu messen, wurde die ASHRAE scale herangezogen, für das thermische Wohlbefinden die Bedford scale (Wong et al. 2002). Die Reichweite des Wohlfühlbereichs liegt lt. Wong et al (2002) bei beiden Skalen zwischen +1 und -1, s. Abb. 4.

Thermischer Zustand ASHRAE scale	Thermisches Wohlbefinden Bedford scale
+3 heiß	+3 viel zu warm
+2 warm	+2 zu warm
+1 etwas warm	+1 angenehm warm
0 neutral	0 angenehm
-1 etwas kühl	-1 angenehm kühl
-2 kühl	-2 zu kühl
-3 kalt	-3 viel zu kühl

Abb. 4: Reichweite des Wohlfühlbereichs auf ASHRAE scale und Bedford scale

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bewertung des thermischen Zustands im Wohnzimmer sich kaum überschneidet mit dem thermischen Wohlbefinden. Obwohl die Bewohner:innen den thermischen Zustand (ASHRAE scale) teilweise als warm einschätzen, fühlt es sich für sie angenehm bis angenehm warm an (Bedford scale). Die konkreten Angaben finden sich in nachfolgenden Abb. 5 und Abb. 6.

Im Schlafzimmer stimmen die Bewertung des thermischen Zustands und des thermischen Wohlbefindens öfter überein. Jedoch fühlen sich in diesem Raum in Bezug auf die Temperatur weniger Proband:innen wohl.

Thermischer Zustand vs. Komfort Wohnzimmer

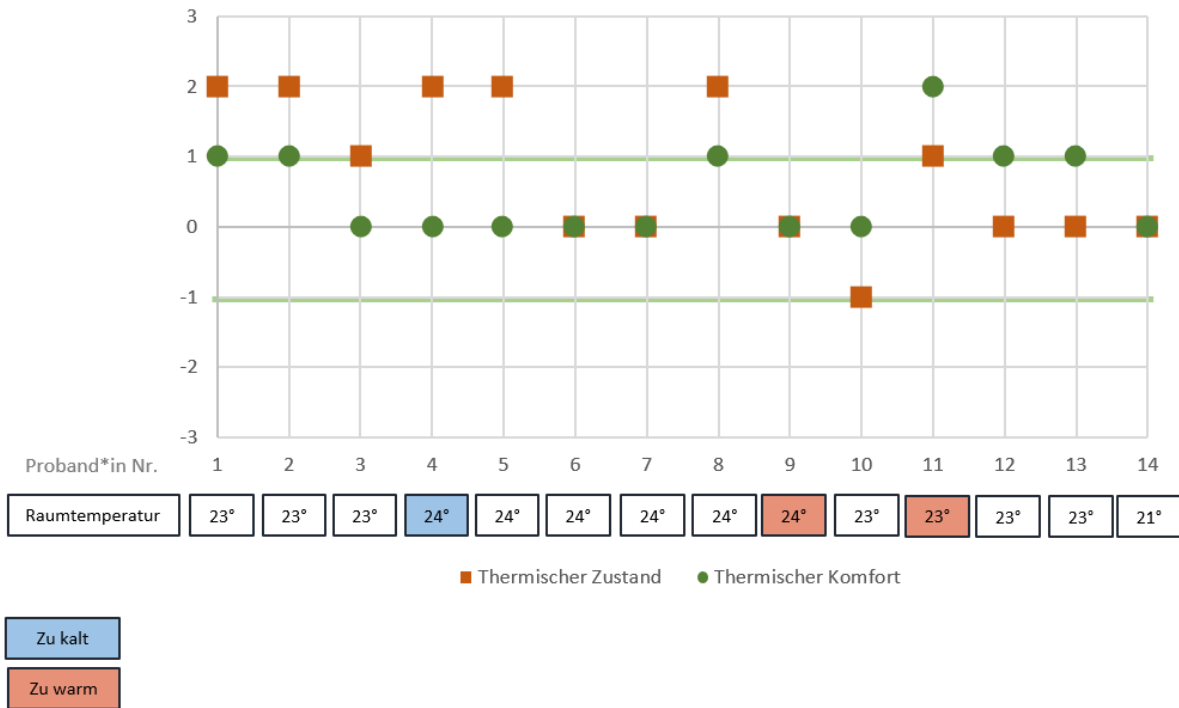


Abb. 5: Thermischer Zustand vs. Komfort – Thermisches Wohlbefinden Wohnzimmer

Thermischer Zustand vs. Komfort Schlafzimmer

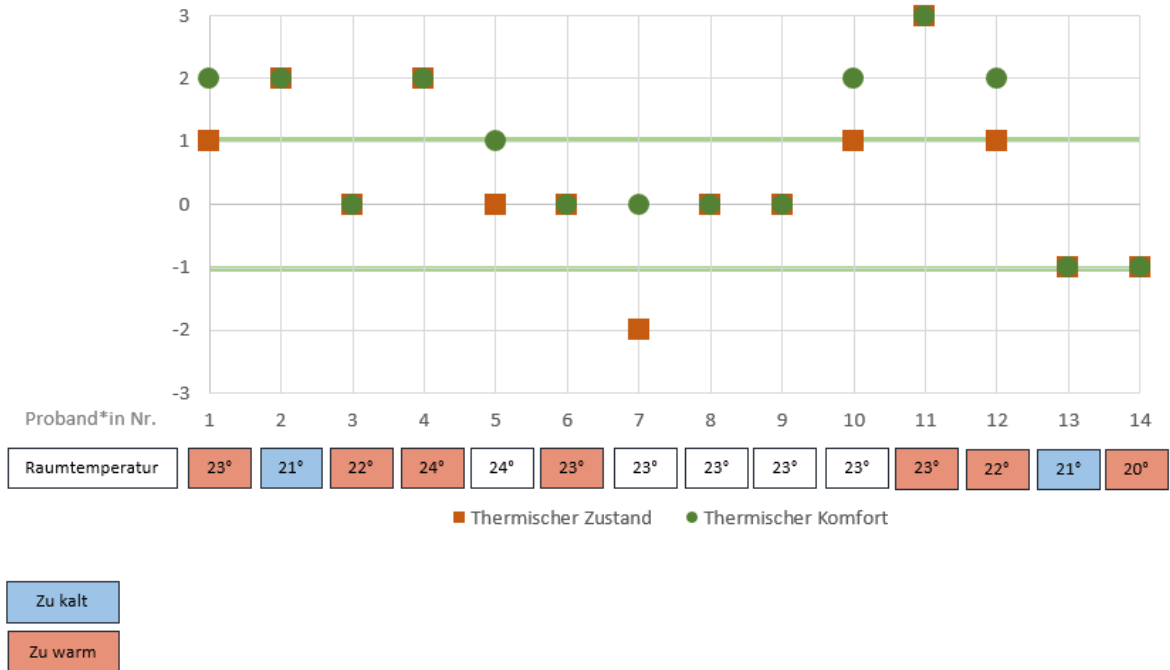


Abb. 6: Thermischer Zustand vs. Komfort – Thermisches Wohlbefinden Schlafzimmer

Es gab zwei Folgebefragungen, bei welchem die Proband:innen Fragebögen zum selbst Ausfüllen auf dem Postweg erhielten, um den thermischen Zustand und das thermische Wohlbefinden der Bewohner:innen über einen längeren Zeitraum zu untersuchen. Dabei wurden die Proband:innen über den Zeitraum von vier Wochen gebeten, je einen Fragebogen pro Woche auszufüllen und diese am Ende gesammelt an die Forschung Burgenland zu übermitteln. Die erste Folgebefragung fand von November 2021 bis Jänner 2022 statt. Die Ergebnisse hierbei zeigen, dass die Werte des thermischen Zustands und des thermischen Wohlbefindens sich stärker überschneiden und dass insgesamt mehr Werte im Wohlfühlbereich liegen. Es ist anzumerken, dass hierbei 5 Proband:innen weniger erreicht wurden. Die zweite Folgebefragung fand im Juli 2022 statt, bei welcher im Vergleich zur Erstbefragung 3 Proband:innen wegfielen. Auch hier lagen mehr Werte im Wohlfühlbereich, lediglich bei einer Temperatur von über 26 ° Celsius Raumtemperatur wurde angegeben, dass es zu warm ist.

1.3 Limitationen und Ausblick

Es ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der persönlichen Befragungsform nicht sehr viele Personen erreicht werden konnten. Trotzdem hat sich das Projektteam gegen einen Fragebogen, der im Alleingang ausgefüllt hätte werden sollen, entschieden, da die Beantwortung der Fragen nach dem thermischen Zustand und dem thermischen Wohlbefinden vor allem für die älteren Bewohner:innen zu kompliziert gewesen wäre.

Im Rahmen des Projekts „Hybrid LSC“ wird es noch eine weitere Abschlussbefragung im Frühjahr 2023 durchgeführt, bei der die Bewohner:innen im Gegensatz zu den vorangegangenen Befragungen explizit auf die Netzflexibilität des Wohnparks und die Nutzung von Windüberschussstrom aufmerksam gemacht werden sollen. Dabei soll einerseits untersucht werden, ob sich die Einstellung der Bewohner:innen zu den bereits abgefragten Themenbereichen im Laufe der Zeit geändert hat sowie ob das Wissen über das innovative Energiekonzept einen Einfluss auf das thermische Wohlbefinden der Bewohner:innen hat.

Das Projekt „Hybrid LSC“ ist Teil der Forschungsinitiative Green Energy Lab. Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen der FTI-Initiative „Vorzeigeregion Energie“ durchgeführt.

Weiterführende Informationen zu „Hybrid LSC“ wie Projektdauer und Projektpartner sind unter <https://greenenergylab.at/projects/hybrid-lsc/> zu finden.

Literatur zum Kapitel „Sozialwissenschaftliche Untersuchung“

Chen, Y. S., Lai, S. B., & Wen, C. T. (2006). The influence of green innovation performance on corporate advantage in Taiwan. *Journal of business ethics*, 67, 331-339.

Montada, L., Kals, E., & Becker, R. (2014). Umweltschützende Verzicht. Zusammenstellung sozialwissenschaftlicher Items und Skalen (ZIS). <https://doi.org/10.6102/zis70>

Schahn, J. (2014). Skalensystem zur Erfassung des Umweltbewusstseins, 3. Version (SEU3). Zusammenstellung sozialwissenschaftlicher Items und Skalen (ZIS). <https://doi.org/10.6102/zis167>

Wong, N. H., Feriadi, H., Lim, P. Y., Tham, K. W., Sekhar, C., & Cheong, K. W. (2002). Thermal comfort evaluation of naturally ventilated public housing in Singapore. *Building and environment*, 37(12), 1267-1277.