

TAB-Scale 3

Modellentwicklung und Validierung für thermisch aktivierte Bauteile (TAB) an einem Demo-Wohngebäude für Scale-up auf mehrgeschossigen Wohnbau



Niederösterreich / Wien, Juli 2023

Forschungsvorhaben gefördert von der Wohnbauforschung der niederösterreichischen Landesregierung, Kennzeichen F-2269



Projektteam

**Universität für Bodenkultur Wien,
Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik,
Institut für Verfahrens- und Energietechnik**

DI Bernhard Kling

DI Dr. Magdalena Wolf

Univ. Prof. DI Dr. Tobias Pröll



Treberspurg & Partner Architekten ZT GmbH

Univ. Prof DI Dr. Martin Treberspurg

Mag. Arch. Christoph Treberspurg

TREBERSPURG & PARTNER ARCHITEKTEN
Ziviltechniker GmbH



Ingenieurbüro Wilhelm Hofbauer

DI Wilhelm Hofbauer

Ingenieurbüro
Wilhelm
HOFBAUER

Autor:innen des Endberichts:

DI Bernhard Kling

DI Dr. Magdalena Wolf

Zusammenfassung

Der Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein, bestehend aus 14 Reihenhäusern und einem zweigeschossigen Gebäude mit 22 Wohneinheiten, ist mit thermisch aktivierten Bauteilen (TAB) ausgestattet, die es erlauben, die Gebäudebeheizung mit sehr niedrigen Vorlauftemperaturen zu betreiben. Eine Herausforderung in der Regelung dieser Gebäude stellt dabei die Trägheit des Systems dar. Gleichzeitig kann die thermische Masse als Speichermedium verwendet werden. So kann in Zeiten, wo Überschussstrom aus erneuerbaren Quellen vorhanden ist, dieser Strom als Wärme in den Gebäuden eingespeichert werden.

Im Forschungsprojekts „TAB-Scale3 - Modellentwicklung und Validierung für thermisch aktivierte Bauteile (TAB) an einem Demo-Wohngebäude für Scale-up auf mehrgeschossigen Wohnbau“ wird beispielhaft in zwei Wohneinheiten das Potenzial für die Lastverschiebung auf Simulationsebene erprobt. Dazu wird eine prädiktive, auf Wetterprognosedaten basierende, Regelung der Raumtemperatur untersucht. Der Regelungsalgorithmus weicht von einem klassischen Regler ab, da es sich um eine Optimierung des Heiz/ Kühlbedarfs auf Basis der Prognosedaten und Daten aus dem Gebäude handelt. Ziel der Optimierung ist dabei einerseits einen hohen Wohnkomfort im Gebäude zu erhalten und gleichzeitig das thermische Speicherpotenzial des Gebäudes maximal zu nutzen.

Dazu ist ein Gebäudemodell nötig, mit dem die Temperatur im Objekt abgebildet werden kann. Das im Projekt entwickelte Modell basiert auf Massen- und Energiebilanzen und auf gebäudespezifischen Daten (Fensterflächen, Ausrichtung, Kubaturen, etc.). In das Modell fließen zudem Messdaten und Prognosedaten ein, die die Ermittlung einer prädiktiven Raumtemperatur über den Prognosehorizont durch Optimierung einer Zielfunktion ermöglichen. Das mögliche Lastverschiebungspotential der prognosebasierten Regelung wird anhand einer Simulationsrechnung am Beispiel eines realen Objekts erhoben. Als Untersuchungsobjekt werden zwei Wohneinheiten aus dem mehrgeschossigen Wohnbau im Wohnpark Wolfsbrunn näher betrachtet. Um Unterschiede der Ausrichtung untersuchen zu können, wurden eine nord- und eine südseitig orientierte Wohnung ausgewählt. Beide Wohneinheiten befinden sich im Erdgeschoss. Die beiden Wohneinheiten sind mit umfangreicher Messtechnik (Temperatur, Wärmemenge, Durchflüsse) ausgestattet, um Energie- und Wärmeströme in- und aus der Wohneinheit quantitativ zu erfassen. Mit Hilfe der vorhandenen Monitoringdaten wird untersucht, wie sich das reale Gebäude im Vergleich zum Modell verhält.

Es wird eine Vergleichssimulation angestellt und mit den Realdaten aus dem Gebäude verglichen. Die Heizperiode 2021 / 2022 wurde im Detail evaluiert und es wurde eine geeignete Untersuchungsperiode für die Vergleichssimulation ausgewählt, in der ein konsistenter und vollständiger Datensatz vorlag. Für diesen Zeitraum wurde einerseits eine Optimierung rein nach Wohnkomfort angestellt und eine Optimierung mit möglichst hoher Lastverschiebung (Wind Peak Shaving – WPS) durchgeführt. Durch Vergleich dieser beiden Optimierungen konnte das Potenzial der Lastverschiebung erhoben werden.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Modell gut an das reale Objekt angepasst werden konnte und liefern vielversprechende Ergebnisse. Die Raumtemperatur konnte in beiden Simulationsläufen sehr nahe an den Sollwert bzw. innerhalb definierter Temperaturgrenzen gehalten werden. Im Betrachtungszeitraum wären lt. Simulation für die nordseitig gelegene Wohnung 135 kWh thermische Energie nötig, um die Solltemperatur von 24°C zu halten. Die südseitig gelegene Wohnung benötigt, aufgrund höherer solarer Erträge, eine niedrigere Wärmemenge (11 kWh). Bei der Simulation mit max. Lastverschiebung (Wind Peak Shaving) konnten in der nordseitigen Wohneinheit 41% des nötigen Stroms in Zeiten mit Überschussstrom verschoben werden. In der südseitig gelegenen Wohnung konnte der ganze Stromverbrauch in Zeiten von Überschussstrom verschoben werden, wobei hier der nötige Energiebedarf deutlich niedriger war als in der nordseitigen Wohneinheit.

Unterschiede zeigen sich zu den erhobenen Wärmemengen aus den Monitoringdaten. Dies kann unterschiedliche Gründe haben, wie etwa Messungenauigkeiten, Unstimmigkeiten im Messverfahren oder bei der Datenaufzeichnung. In der Praxis eine große Herausforderung ist etwa eine exakte Erfassung von Wärmeströmen bei sehr niedrigen Temperaturspreizungen (< 2 K).

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Lastverschiebung, unter Berücksichtigung zukünftiger meteorologischer Rahmenbedingungen, in Zeiten von Überschussstrom möglich ist, ohne den Wohnkomfort zu beeinträchtigen. Potenzial für Optimierungen im Regelungsansatz liegen in einer vertieften Anpassung der Modells. So könnte etwa die Windgeschwindigkeit bei der Berechnung des konvektiven Wärmeverlustes an die Umgebung berücksichtigt werden. Weiterer Fokus liegt in den definierten Nebenbedingungen. So könnte bei der Kostenoptimierung der Börsenstrompreis oder die Einbindung von Strom aus Photovoltaik berücksichtigt werden.

Abstract

The Wolfsbrunn residential park in Sommerein, consisting of 14 terraced houses and a multilevel building with 22 residential units, is equipped with thermally activated components, which allow a heating of the building with very low flow temperatures. A challenge in controlling such buildings is the inertia of the system. At the same time, the thermal mass can be used as a storage medium. Thus, at times when surplus electricity from renewable sources is available, this electricity can be stored as heat in the buildings.

In the research project "TAB-Scale3 - Model development and validation for thermally activated components (TAB) on a demo residential building for scale-up to multilevel residential buildings", the potential for load shifting is tested at simulation level in two residential units. For this purpose, a predictive control of the room temperature based on weather forecast data is investigated. The control algorithm differs from a classical controller in that it optimizes the heating/cooling demand based on the forecast data and data from the building. The aim of the optimization is on the one hand to maintain a high level of living comfort in the building, and on the other hand to make maximum use of the thermal storage potential of the building.

This requires a building model that can be used to map the temperature in the object. The model developed in the project is based on mass and energy balances and on building-specific data (window areas, orientation, cubatures, etc.). The model also incorporates measurement data and forecast data, which allow the determination of a predictive room temperature over the forecast horizon by optimizing an objective function. As an object of investigation, two residential units from multi-storey residential buildings are considered in more detail. In order to be able to investigate differences in orientation, a north-facing and a south-facing apartment were selected. Both residential units are located on the first floor. The two residential units are equipped with extensive measurement technology (temperature, heat quantity, flow rates) in order to quantitatively record energy and heat flows into and out of the residential unit. The available monitoring data is used to investigate how the real building behaves in comparison to the model.

A comparative simulation is made and compared with the real data from the building. The heating period 2021/2022 was evaluated in detail and a suitable investigation period was selected for the comparison simulation, in which a consistent and complete data set was available. For this period, on the one hand, an optimization purely based on residential comfort was performed, and on the other hand, an optimization with the highest possible load shifting (Wind Peak Shaving - WPS) was carried out. By comparing these two optimizations, the potential of load shifting could be determined.

The simulation results show that the model could be well adapted to the real object and provide promising results. The room temperature could be kept very close to the setpoint or within defined temperature limits in both simulation runs. According to the simulation, 135 kWh of thermal energy would be required for the north-facing apartment to maintain the setpoint temperature of 24°C during the period under consideration. The south-facing apartment

requires a lower amount of heat (11 kWh) due to higher solar yields. In the simulation with max. load shifting (wind peak shaving), 41% of the necessary electricity in the north-facing apartment could be shifted to times with surplus electricity. In the south-facing apartment, the entire electricity consumption could be shifted to times of surplus electricity, although here the necessary energy demand was significantly lower than in the north-facing apartment.

There are differences to the heat quantities collected from the monitoring data. This may be due to various reasons, such as measurement inaccuracies, inconsistencies in the measurement procedure or in the data recording. In practice, a major challenge is the exact recording of heat flows at very low temperature spreads (< 2 K).

The results show that load shifting, taking into account future meteorological conditions, is possible in times of excess electricity without compromising living comfort. Potential for optimization in the control approach lies in a more in-depth adaptation of the model. For example, wind speed could be taken into account when calculating convective heat losses to the environment. Further focus lies in the defined constraints. For example, the exchange electricity price or the integration of electricity from photovoltaics could be taken into account in the cost optimization.

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung	9
1.1	Anwendungsfälle für thermische Bauteilaktivierung im Wohnbau	10
1.1.1	Doppelhaus Purkersdorf	10
1.1.2	Kugelmanngasse	11
1.1.3	MGG ²²	11
1.1.4	Viertel Hoch Zwei	12
1.1.5	Volkshilfehaus Heiligenstädter Straße	12
1.1.6	Campo Breitenlee	13
1.1.7	Alpenland Zukunftshaus Wolkersdorf	14
2	Versuchsobjekt Wohnpark Wolfsbrunn Sommerein	15
3	Modellaufbau prognosebasierte Regelung	17
3.1	Energiebilanz Gebäudemodell	17
3.2	Kalkulation Solare Einstrahlung	19
3.3	Transmissions- und Lüftungsverluste	21
3.4	Eingabeparameter für das Gebäudemodell	22
3.4.1	Fensterflächen und Ausrichtung des Gebäudes	22
3.4.2	Gesamtenergiedurchlasswert (g-Wert)	23
3.4.3	Massen und Grundflächen der Wohneinheiten	23
3.5	Wetterprognosedaten	26
3.5.1	Außentemperatur	26
3.5.2	Bewölkungsgrad	26
3.5.3	Windgeschwindigkeit	26
4	Prozessablauf prognosebasierte Regelung	27
4.1	Optimierungsfunktion	27
4.1.1	Komfortoptimierung	28
4.1.2	Lastverschiebung durch Wind Peak Shaving	28
4.1.2.1	Gewichtungsfaktoren Temperaturabweichung Kostenoptimierung	29
4.1.3	Daten für Optimierung	30
4.1.4	Output Optimierung	30
5	Simulation und Messdatenaufbereitung	31
5.1	Startbedingungen für die Simulationen	31

5.2	Aufbereitung der Messdaten	31
6	Ergebnisse und Interpretation	33
6.1	Messdatenauswertung Monitoring	33
6.1.1	Temperaturmessungen	33
6.1.2	Wärmeeintrag	35
6.2	Ergebnisse prädiktive Regelung	38
6.2.1	Ergebnisse ohne Wind Peak Shaving (Komfortoptimierung)	38
6.2.2	Ergebnisse mit Wind Peak Shaving (Kostenoptimierung)	39
6.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit und ohne Wind Peak Shaving	40
7	Interpretation und Ausblick	45
8	Quellen und Verzeichnisse	47
8.1	Literaturverzeichnis	47
8.2	Abbildungsverzeichnis	48
8.3	Tabellenverzeichnis	49
8.4	Nomenklatur	50

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Folgen des Klimawandels sind mittlerweile allgegenwärtig zu spüren. Extremwetterereignisse und Wetterkapriolen sind auch in Europa überall zu spüren. Die EU hat sich daher zum Ziel gesetzt, bis 2050 klimaneutral zu werden. Das bedeutet, Netto-Null Treibhausgase zu emittieren. In Österreich lag im Jahr 2021 der Treibhausgasaustoß bei 77,5 Mio. Tonnen Kohlendioxid-Äquivalent. Gebäude tragen mit knapp 12% zu Österreichs Treibhausgasaustoß bei (siehe Abbildung 1). Die Reduktion des Emissionsausstoßes durch einen effizienten Betrieb von Gebäuden leistet daher einen wichtigen Beitrag zu Österreichs Klimazielen.

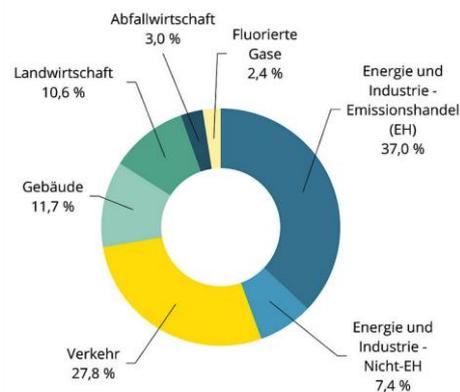


Abbildung 1: Sektorale Aufteilung des Treibhausgasausstoßes im Jahr 2021 (Quelle: Umweltbundesamt)

Gebäude mit thermisch aktivierten Bauteilen spielen als Energiespeicher eine Rolle im zukünftigen Energiesystem. Durch die hohen Speichermassen kann Überschussstrom, z.B. aus Sonnen- oder Windkraft, in Form von thermischer Energie im Gebäude eingespeichert werden. Herausfordernd ist dabei die Regelung der Raumtemperatur, da aufgrund der großen Trägheit des Systems eine klassische Regelung über Außentemperatur zu Über- oder Unterregelung führen, vor allem wenn Störgrößen wie solare Einstrahlung auf das System einwirken.

Im Zuge des Forschungsprojekts „TAB-Scale 3: Modellentwicklung und Validierung für thermisch aktivierte Bauteile (TAB) an einem Demo-Wohngebäude für Scale-up auf mehrgeschossigen Wohnbau“ wird daher der Einsatz einer prognosebasierten Regelungsstrategie für Wohngebäude mit thermischer Bauteilaktivierung untersucht. Dabei fließen Wetterprognosedaten (Außentemperatur, Bewölkung, Windgeschwindigkeit) in die Regelung ein. Das prognosebasierte Regelungskonzept wird mit Daten aus einem realen Objekt abgeglichen. Ergänzend wird das Lastverschiebungspotenzial durch Wind Peak Shaving (WPS), bei Kenntnis von Prognosen zur Windstromerzeugung, untersucht.

Als Ergebnis wird für einen definierten Versuchszeitraum, in dem konsistente Daten vorliegen, das theoretische Potenzial zur Einspeicherung von Überschussstrom aus Wind bei gleichzeitig hohem Wohnkomfort erhoben. Das entwickelte Regelungskonzept wird in weiteren Wohnobjekten mit thermischer Bauteilaktivierung Anwendung finden. An einem Vergleichsobjekt in Purkersdorf konnte dieser Ansatz, mit Fokus auf Wohnkomfortoptimierung, bereits erfolgreich umgesetzt werden.

1.1 Anwendungsfälle für thermische Bauteilaktivierung im Wohnbau

In Büro- und Wirtschaftsgebäuden ist der Einsatz von thermischer Bauteilaktivierung zur Gebäudeheizung und -klimatisierung bereits etabliert. Im Wohnbau hingegen sind TAB noch nicht Standard, da hohe Ansprüche an den Wohnkomfort und individuelle Eingriffsmöglichkeiten in die Regelbarkeit gegeben sein müssen. Im folgenden Abschnitt werden Anwendungsfälle von thermischer Bauteilaktivierung im mehrgeschossigen Wohnbau zusammengefasst, die entweder im Bau befindlich oder bereits in Betrieb gegangen sind.

1.1.1 Doppelhaus Purkersdorf

Das Doppelhaus Purkersdorf ist ein Zweifamilienhaus mit einer Nettonutzfläche von 350 m², das mit thermischen Decken ausgestattet ist und im Frühjahr 2019 bezogen wurde. Das Gebäude wird über eine Sole-Wasserwärmepumpe mit Wärme und Kälte versorgt, die die Energie aus drei Tiefensonden mit je 120 m Tiefe bezieht. In den Sommermonaten kann mit der Wärmepumpe aktiv das Gebäude gekühlt werden. Das Gebäude ist an der nördlichen Grenze des Grundstücks situiert. Um die Freibereiche des Hanggrundstücks ideal zu nutzen und Privatheit sicherzustellen, wurde das Gebäude an der Trennwand der beiden Häuser gespiegelt und um eine Etage versetzt (siehe Abbildung 2). So können die zugeordneten Freibereiche im Süden und Osten des Grundstücks ebenerdig aus den jeweiligen Wohnzimmern erschlossen werden. Die sich daraus ergebende Splitleveltypologie sorgt für einen großzügigen Raumeindruck mit spannenden Durchblicken. Die Zonierung innerhalb der Räume erfolgt über den großzügigen und offenen Gemeinschaftsbereich sowie über die Erschließungshalle als verbindendes Element, das als kommunikatives Herzstück des Gebäudes dient.



Abbildung 2: Doppelhaus in Purkersdorf, das mit thermischer Bauteilaktivierung und prädiktiver Steuerung ausgestattet ist [8]

1.1.2 Kugelmanngasse

Im Mai 2019 wurden 49 freifinanzierte Eigentumswohnungen in der Kugelmanngasse 1A bezogen, die mit thermischer Bauteilaktivierung ausgestattet sind. Das Gebäude ist auf 4 Ebenen aufgebaut und besitzt eine Nutzfläche von 3.944 m². Die Wärme- und Kälteabgabe erfolgt über eine Sole-Wasserwärmepumpe. Errichtet wurde das Objekt vom Bauträger Mischek.



Abbildung 3: Wohnbau mit thermischer Bauteilaktivierung in der Kugelmanngasse 1A [9]

1.1.3 MGG²²

In der Mühlgrundgasse im 22. Wiener Gemeindebezirk wurde Herbst 2019 ein Wohngebäude mit 160 Wohnungen und thermischer Bauteilaktivierung fertiggestellt. Das Quartier ist aus 7 Häusern aufgebaut, das neben einer Arztpraxis über geförderte und freifinanzierte Mietwohnungen sowie geförderte SMART-Wohnungen verfügt. Die Wärme- und Kälteversorgung des Quartiers erfolgt mit einer Sole-Wasserwärmepumpe und Tiefensonden. Im Sommer ist passive Kühlung über die Tiefensonden möglich. Die thermisch aktivierte Decke wird als thermischer Speicher für Überschussstrom verwendet.



Abbildung 4: Wohnquartier Mühlgrundgasse MGG²² im 22. Wiener Gemeindebezirk (© Manfred Seidl) [10]

1.1.4 Viertel Hoch Zwei

In Theresienfeld nahe Wiener Neustadt wurde 2020 ein Quartier mit 4 Baukörpern mit 28 Wohnungen fertiggestellt, das mittels thermischer Bauteilaktivierung die Gebäude beheizt. Die Gebäudehülle wurde in Passivhausqualität ausgeführt und über eine Luft-Wasserwärmepumpe wird das Gebäude mit Wärme und Kälte versorgt. Das Warmwasser wird dezentral in den Wohnungen durch Klein-Wärmepumpen erzeugt, um die sonst üblichen Verteilungsverluste zu minimieren. In Kooperation mit der WEB Windenergie AG wird Windüberschussstrom für den Betrieb der Wärmepumpe verwendet.



Abbildung 5: Wohnquartier Viertel Hoch Zwei in Theresienfeld [11]

1.1.5 Volkshilfehaus Heiligenstädter Straße

Das Volkshilfehaus in der Heiligenstädter Straße 172 ist ein Gebäude mit gemischter Nutzung, das eine Vielzahl von Nutzungen und Nutzer:innengruppen vereinen und als sozialer Katalysator im Bezirk dienen soll. Das Angebot reicht von einem Volkshilfe-Shop und Café über eine betreute Kinder- und Jugendlichen-Wohngemeinschaft für 8 Jugendliche sowie 36 Wohneinheiten für Klienten und Pflegepersonal der Volkshilfe.

Das fünfstöckige Gebäude ist mit thermischer Bauteilaktivierung ausgestattet und ost- und westseitig ausgerichtet. Die Wärmeversorgung erfolgt mittels Wasser-Wasserwärmepumpen aus oberflächigen Grundwasser, da die geplanten Tiefensonden aufgrund von stark drückendem Wasser in großer Tiefe nicht möglich war. Aufgrund der Kleinteiligkeit der Wohneinheiten wird das prognosebasierte Regelungskonzept in zwei Zonen ausgeführt: die ostseitig ausgerichtete Bauteilhälfte vom EG bis zum Dachgeschoss wird als eine Einheit betrachtet (Ostzone) und die westseitig ausgerichtete Bauteilhälfte wird als eine Zone betrachtet (Westzone).

Beide Zonen werden gesondert betrachtet und erhalten jeweils eine Regelungseinheit. Durch laufendes Monitoring und Erfassung der Temperaturen und Wärmeströme wird der Betrieb der Anlage laufend optimiert. zeigt ein Rendering des Objekts aus der Entwurfsplanung.



Abbildung 6: Volkshilfe Heiligenstädter Straße 172 [12]

1.1.6 Campo Breitenlee

Das Demo-Quartier „Campo Breitenlee“ „gemeinsam wohnen“ liegt an der Podhagskygasse und Hausfeldstraße in 1220 Wien. Das Projekt ist zurzeit in der Bauphase und besteht aus 7 Gebäuden mit einer Bruttogrundfläche von rund 30.652 m² (GFZ 1,69). Die Nutzfläche beträgt 21.537 m². Es gibt zahlreiche gemeinschaftsbildende Einrichtungen sowie eine partizipative Vergabe aller 323 Wohnungen. Neben der vorwiegenden Wohnnutzung wird es auch anmietbare Plus-Räume, einen Kindergarten sowie eine Arztpraxis geben.

Der „Campo Breitenlee“ verbindet passive Maßnahmen mit einer hocheffizienten Gebäudehülle mit intelligenter Gebäudetechnik. Die gezielte Anordnung der kompakten Baukörper gewährleistet eine optimale Durchlüftung des Wohngebietes. Die Begrünungsmaßnahmen im Quartier tragen zu einem angenehmen Mikroklima bei. Die hocheffiziente Gebäudehülle verringert den Energiebedarf und schafft ein natürlich behagliches Innenraumklima. Die innovative Gebäudetechnik umfasst ein Erdsondenfeld mit 120 Duplex-Tiefensonden mit 14.400 lfm in Kombination mit hocheffizienten Wärmepumpen (520 kW primäre und 50 kW sekundäre). Die Bauteilaktivierung, gesteuert durch eine innovative wettergestützte Regelung, gewährleistet eine angenehme Temperierung in den Wohnungen. Für eine erneuerbare Stromversorgung ist in der Entwurfsphase eine 600 m² Photovoltaikanlage geplant.

Im Zuge des Forschungsprojekts „ZQ3Demo - Umsetzung von urbanen ZukunftsQuartieren mit Akteursvernetzung und rechtlich-ökonomisch replizierbaren Lösungen“ (gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG im Zuge der 8. Ausschreibung Stadt der Zukunft – Projektnummer: 886997) werden 15 ausgewählte Wohneinheiten mit dem prognosebasierten Regelungskonzept ausgestattet und im Detail gemonitort. 4 weitere Wohneinheiten werden als Referenzwohnungen ebenfalls mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, jedoch mit der für das restliche Gebäude vorgesehenen Regelung betrieben. Das ermöglicht einerseits einen direkten Vergleich von prognosebasierter Regelung mit klassischer Regelung und andererseits lassen sich so die Potenziale zur thermischen Speicherung von

solarer Energie aus der Photovoltaikanlage quantifizieren. zeigt eine Skizze des Quartiers aus der Entwurfsplanung. Dieses Bauprojekt befindet sich derzeit in der Umsetzungsphase



Abbildung 7: Campo Breitenlee [13]

1.1.7 Alpenland Zukunftshaus Wolkersdorf

Das „ALPENLAND-ZUKUNFTSHAUS-WOLKERSDORF“ der gemeinnützigen Bau-, Wohn- und Siedlungsgenossenschaft Alpenland ist geplant, das prognosebasierte Regelungskonzept auf alle 8 Wohneinheiten anzuwenden. Jede Wohneinheit erhält ihren eigenen Regler und die Nutzer:innen haben damit die Möglichkeit, ihre individuelle Komforttemperatur in der Wohnung auszuwählen.

Als primäres Wärmeerzeugungssystem wird eine Sole-Wasserwärmepumpe mit Tiefensonden installiert. Zudem wird ein kaskadiertes Wärmepumpensystem eingesetzt, um hygienisch sicheres Trinkwarmwasser in den Wohneinheiten zu erzeugen.

Das Objekt ist als reiner Wohnbau mit 8 Wohneinheiten konzipiert. Die Wohnnutzfläche beträgt 730 m². Das Objekt wird voraussichtlich in Passivhausqualität ausgeführt. Das Energiesystem wird durch eine Photovoltaikanlage mit 14 kWp installierter Leistung ergänzt. zeigt eine Skizze aus dem Vorentwurf des Objekts. Geplant ist eine Umsetzung des Projekts im Jahr 2024.



Abbildung 8: ALPENLAND-ZUKUNFTSHAUS-WOLKERSDORF [14]

2 Versuchsobjekt Wohnpark Wolfsbrunn Sommerein

Der 2019 fertiggestellte Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein (PLZ 2453) besteht in der ersten Baustufe aus 14 Einfamilienhäusern und einem mehrgeschossigen Wohnbau mit 22 Wohneinheiten. Alle Gebäude sind mit thermischer Bauteilaktivierung ausgestattet und werden mittels Sole-Wasser-Wärmepumpen mit Tiefenbohrungen wärmeversorgt. Im Sommer können die Objekte über passive Kühlung durch die Tiefensonden gekühlt werden. Im mehrgeschossigen Wohnbau ist generationenübergreifendes Wohnen möglich. Geplant wurde das Projekt von AW/Architekten. Die Wohnnutzfläche des mehrgeschossigen Wohnbaus beläuft sich auf 1.358m², die eines Reihenhauses auf 107m². Abbildung 9 zeigt das Konzept des Wohnparks Wolfsbrunn in Sommerein.



Abbildung 9: Wohnpark Wolfsbrunn und Sommerein, NÖ [1]

Für das vorliegende Forschungsprojekt werden zwei Wohnungen im mehrgeschossigen Wohnbau ausgewählt, um das prognosebasierte Regelungskonzept auf Simulationsebene umzusetzen. Wie in Abbildung 10 dargestellt befinden sich die beiden Testwohneinheiten in konträrer geographischer Ausrichtung zueinander und damit sind die Fensterflächen in der einen Wohnung nach Norden (geringe solare Einstrahlung) und in der anderen Wohnung nach Süden (hohe solare Einstrahlung) ausgerichtet. In weiterer Folge wird die nordseitig ausgerichtete Wohnung mit „Nord“, die südseitig ausgerichtete Wohnung mit „Süd“ bezeichnet.

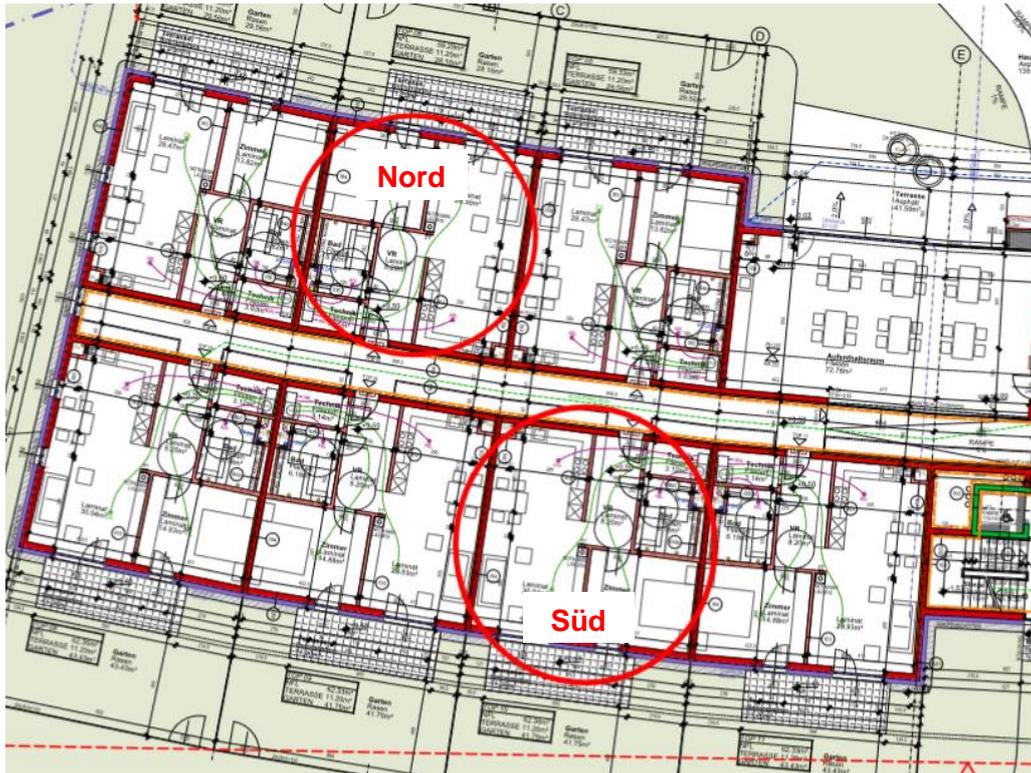


Abbildung 10: Forschungswohneinheiten aus dem Einreichplan

Angrenzend an den Wohnpark befindet sich ein von der EVN betriebener Windpark. Überschussstrom aus dem Windpark wird über Wind Peak Shaving (WPS) in den Gebäuden als thermische Energie eingespeichert. Der Windpark Sommerein wird im Endausbau eine Gesamtleistung von knapp 35 MW erzielen. Mit zehn Windkraft-Anlagen werden ca. 28.000 Haushalte mit Windstrom versorgt.

Realisiert wird das Wind Peak Shaving über Steuerungseinheiten (Joulie – von EVN zur Verfügung gestellt). Ein Freigabesignale, das seitens des Energieerzeugers gesteuert wird, gibt die Wärmebereitung durch die Wärmepumpen in den Objekten frei.

3 Modellaufbau prognosebasierte Regelung

Das Gebäudemodell ist das zentrale Element des prognosebasierten Regelungskonzepts. Es ermöglicht eine Voraussage der Temperaturen im Raum und der thermischen Bauteilaktivierung. Das zu untersuchende Wohnobjekt wird dabei als eine Einheit betrachtet. Hierbei kann es sich um ein gesamtes Gebäude, um ein Stockwerk oder eine einzelne Wohnung handeln. Für das Wohnobjekt wird eine Energiebilanz aufgestellt, die die ein- und austretenden Energieströme berücksichtigt. Solare Einträge durch die Fensterflächen werden dabei als aktiver Beitrag zur Beheizung der Gebäude gewertet.

Der gewählte methodische Ansatz beinhaltet die thermischen Speicherkapazitäten des Gebäudes ($c_{p,R}$) sowie der aktivierten Decken ($c_{p,TAB}$), die Konvektions- und Lüftungsverluste \dot{Q}_{Conv} und die solare Einstrahlung \dot{Q}_{Solar} . Abbildung 11 zeigt das Schema des Modells. Nicht im Modell berücksichtigt sind die unvorhersehbaren Störquellen (\dot{Q}_{Dist}) durch Fenster öffnen, Kochen, etc.

Als Ergebnis des Gebäudemodells wird ein prädiktiver Raumtemperaturvektor ausgegeben, der die Raumtemperatur über den Prognosehorizont voraussagt. Die Ermittlung des nötigen Wärmestroms in oder aus dem Gebäude um eine Zieltemperatur zu erreichen, erfolgt durch eine spezifische Optimierungsfunktion, was das prognosebasierte Regelungskonzept von anderen Regelungen in der Gebäudetechnik, z.B. Außentemperaturregelung, unterscheidet.

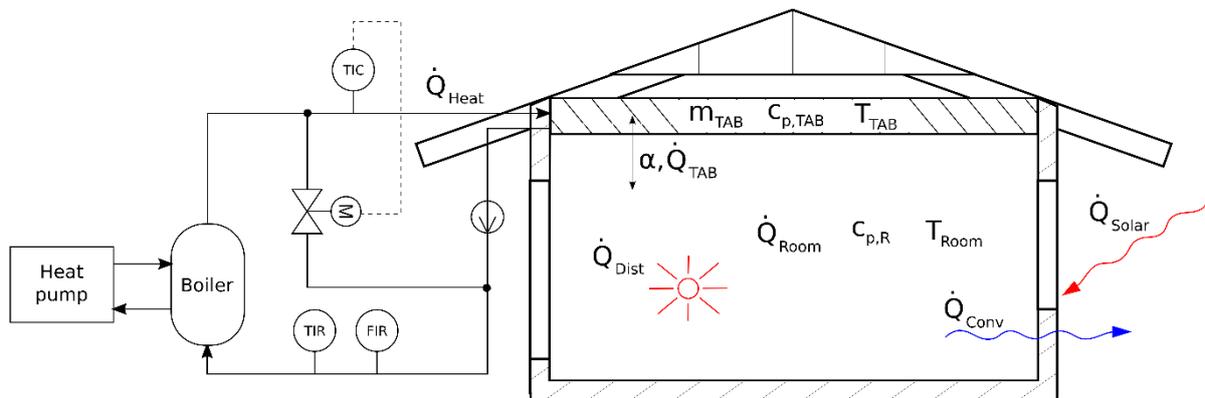


Abbildung 11: Konzept der prognosebasierten Regelung mit den ein- und austretenden Wärmeströmen. Vereinfachte Annahme: Ganzes Gebäude/ Wohneinheit als 1 Raum modelliert

3.1 Energiebilanz Gebäudemodell

Zentrales Element des Gebäudemodells stellt die Energiebilanz dar. Dabei werden ein- und austretende Wärmeströme gegenübergestellt. Zur Vereinfachung des Modells wird eine Wohneinheit als ein geschlossener Bilanzraum betrachtet. Die eintretenden Wärmeströme in den Bilanzraum sind folgende:

- Solare Einstrahlung \dot{Q}_{Solar}
- Wärmeeintrag durch thermisch aktivierte Decke \dot{Q}_{TAB}
- Wärmeeintrag durch unvorhersehbare Störquellen \dot{Q}_{Dist}

Der Wärmeeintrag durch solare Einstrahlung und der Wärmeeintrag durch die thermisch aktivierte Decke können mathematisch vorkalkuliert werden. Unvorhersehbare Störquellen sind sehr viel schwieriger zu prognostizieren, weshalb sie nicht im Modell berücksichtigt sind.

Im Gegensatz dazu tretende folgende Wärmeströme aus dem Gebäude aus:

- Konvektions- und Lüftungsverluste \dot{Q}_{Conv}

Primärer Ansatz für die Energiebilanz ist, dass eine Änderung der Wärme im Raum durch die Summe der ein- und austretenden Wärmeströme verursacht wird. Gleichung (1) formuliert diesen Bilanzraum.

$$C_{p,R} * \frac{\partial \theta_R}{\partial t} = \dot{Q}_{TAB} + \dot{Q}_{Solar} + \dot{Q}_{Dist} - \dot{Q}_{Conv} \quad (1)$$

Als zweiten Bilanzraum wird die Wärmeübertragung der Decke auf den Raum betrachtet. In Gleichung (2) wird die Speicherfähigkeit der Decke als die Differenz zwischen dem Wärmeeintrag aus dem Heizsystem und dem Wärmestrom von der Decke an den Raum betrachtet.

$$C_{p,TAB} * \frac{\partial \theta_{TAB}}{\partial t} = \dot{Q}_{Heiz} - \dot{Q}_{TAB} \quad (2)$$

Der Wärmestrom, der von der thermisch aktivierten Decke in den Raum fließt wird entsprechend Gleichung (3) formuliert.

$$\dot{Q}_{TAB} = \alpha * (\theta_{TAB} - \theta_R) \quad (3)$$

Für die Kalkulation des Wärmeübergangs der thermisch aktivierten Decke auf den Raum, wird ein Wärmeübergangskoeffizient aus der Literatur verwendet [2]. In den Sommermonaten (Kühlfall $\alpha = 10.75\text{W/m}^2\text{K}$) wird ein höherer Wert für den Wärmeübergang angenommen als in den Wintermonaten (Heizfall $\alpha = 6.5\text{W/m}^2\text{K}$). Die Konvektions- und Lüftungsverluste \dot{Q}_{Conv} werden aus der Temperaturdifferenz von Außentemperatur (θ_{out}) und Innenraumtemperatur (θ) sowie dem Konvektions- und Lüftungsverlustfaktor k berechnet (siehe Gleichung (4)).

$$\dot{Q}_{Conv} = k * (\theta_R - \theta_{out}) \quad (4)$$

Durch die Berechnung der Energieströme und Integration der Gleichungen (5) und (6) über einen definierten Zeitraum können die Temperaturen im Raum T_R und in der Decke T_{TAB} bestimmt werden, wobei für $T_{TAB,i}$ und $T_{R,i}$ als Startwerte die tatsächlichen Messwerte aus der thermisch aktivierten Decke und dem Raum verwendet werden.

$$T_{TAB,i+1} = \frac{\dot{Q}_{Heiz} - \dot{Q}_{TAB}}{C_{p,TAB}} * \Delta t + T_{Tab,i} \quad (5)$$

$$T_{R,i+1} = \frac{\dot{Q}_{TAB} + \dot{Q}_{Solar} - \dot{Q}_{Conv}}{C_{p,R}} * \Delta t + T_{R,i} \quad (6)$$

Die Heizleistung \dot{Q}_{Heiz} , die vom Wärmebereitstellungssystem an die Bauteilaktivierung übergeben wird, wird gesondert betrachtet. Dieser Wert ist das Ergebnis der Optimierung und wird in einem iterativen Prozess dem Gebäudemodell übergeben. Das Ergebnis des Gebäudemodells ist ein prädiktiver Temperaturvektor für die Raumtemperatur. Dieser Temperaturvektor wird in der Optimierung an einen, vom Bewohner:in / Nutzer:in gewünschten Solltemperaturwert, durch Änderung der Heizleistung angepasst.

3.2 Kalkulation Solare Einstrahlung

Primärer Energieeintrag in das Gebäude, neben dem Wärmestrom aus dem Wärmeverteilsystem, ist die solare Einstrahlung. Diese thermische Energie soll unterstützend zur Beheizung des Gebäudes in den Heizperioden genutzt werden. Die solare Einstrahlung über die Fensterflächen beeinflusst zudem maßgeblich die Raumtemperatur und spielt im Modell der prädiktiven Regelung daher eine zentrale Rolle. Um den Sonnenstand in Abhängigkeit der Tageszeit berechnen zu können, ist der genaue Standort des Gebäudes notwendig. Die geographischen Koordinaten des Demo-Wohngebäudes in Sommerein sind:

- Längengrad Sommerein: 16.658
- Breitengrad Sommerein: 47.992

Bei der solaren Einstrahlung wird zwischen direkter und diffuser Strahlung unterschieden. Die Summe dieser beiden Einstrahlungen ergibt die Gesamtstrahlung (7).

$$E_{ges} = E_{dir} + E_{dif} \quad (7)$$

Der direkte Strahlungsanteil errechnet sich aus der maximal auf der Erdoberfläche eintretenden solaren Einstrahlung. Da die Strahlung nicht an einer horizontalen Oberfläche, sondern auf einer vertikalen bzw. geneigten Fensterfläche auftritt, wird diese direkte Strahlung mit einem der Sonne entsprechenden Einfallswinkel θ_{gen} zu dieser geneigten Fläche (Fensterfläche) umgerechnet. Die Berechnung des Einfallswinkels θ_{gen} erfolgt mittels Winkelfunktionen, die in der Literatur ausführlich beschrieben sind. [3] beschreibt die Kalkulation des Einfallswinkels mittels Sonnenhöhe γ_s , dem Sonnenazimut-Winkel γ_S , dem Höhenwinkel γ_E und dem Azimutwinkel α_E , um den die geneigte Fläche gedreht ist. Gleichung (8) beschreibt den mathematischen Zusammenhang zur Bestimmung des Einfallswinkels θ_{gen} , ergänzend wird in Abbildung 12 der Zusammenhang der Sonneneinstrahlung und der geneigten Fläche graphisch dargestellt. Als Standardwert für die maximale direkte globale Einstrahlung E_0 wird ein Wert von 900 W/m^2 verwendet. Erst ab einer Sonnenhöhe von $\gamma_s \geq 10$ erfolgt die Berechnung der direkten Strahlung, bei $\gamma_s < 10$ wird $E_{dir,gen} = 0$ angenommen.

$$\cos(\theta_{gen}) = -\cos(\gamma_S) * \sin(\gamma_E) * \cos(\alpha_S - \alpha_E) + \sin(\gamma_S) * \cos(\gamma_E) \quad (8)$$

Die Kalkulation der direkten Einstrahlung $E_{dir,gen}$ auf der geneigten Fläche erfolgt mittels Gleichungen (9) und (10).

$$E_{dir,gen} = E_0 * \cos(\theta_{gen}) * g_{dir} * f_{Bew} * A_F \quad (9)$$

$$g_{dir} = 0,45 \quad (10)$$

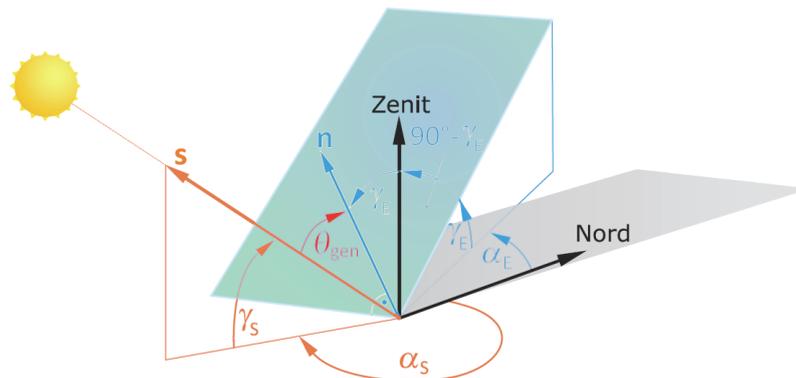


Abbildung 12: Einfallswinkel Sonnenstrahlung auf geneigte Fläche [3]

Um die direkte Einstrahlung in das Gebäude zu erhalten, wird die Einstrahlung an der geneigten Fläche der jeweiligen Himmelsrichtung mit der eingestrahelten Fensterfläche, die dieser Himmelsrichtung ausgerichtet ist, multipliziert. Zudem wird ein Faktor für den Gesamtdurchlass des Fensterglases (Direkte Strahlung $g_{dir} = 0,45$, diffuse Strahlung $g_{dif} = 0,35$ sowie die Beschattung bei bestehen eines Balkons berücksichtigt. Nötige Parameter wie die Größe der Fenster, deren Ausrichtung und Neigung sowie Geometrien eventueller Beschattungen (z.B. Balkon) werden dem Energieausweis entnommen. Aus dem Energieausweis bzw. aus den Einreichplänen können auch der Neigungswinkel der Fenster zur Horizontalen (γ_E), in den meisten Fällen 90°) und die Abweichung der Fensterausrichtung zur Nordachse (α_E) entnommen werden. Die Reduktion der direkten Einstrahlung durch Wolken wird durch den Bewölkungsgrad f_{Bew} berücksichtigt, der in den Wetterprognosedaten enthalten ist.

$$E_{dif} = E_{0,dif} * A_F * g_{dif} \quad (11)$$

$$g_{dif} = 0,35 \quad (12)$$

Gleichungen (11) und (12) beschreiben die Kalkulation der diffusen Einstrahlung. Für die diffuse Strahlung $E_{0,dif}$ wird ein Wert von 100 W/m^2 angenommen. Die diffuse Strahlung wird ab einer Sonnenhöhe $\gamma_S \geq 5^\circ$ angenommen, bei einer Sonnenhöhe $\gamma_S < 5^\circ$ wird $E_{0,dif} = 0$ angenommen.

$$\dot{Q}_{Solar} = E_{dir,gen} + E_{dif} \quad (13)$$

Die gesamte solare Einstrahlung in das Gebäude \dot{Q}_{Solar} ist somit die Summe der einwirkenden direkten und diffusen Strahlung auf die jeweilige Fensterfläche (siehe Gleichung (13)). Das Ergebnis der Berechnung der solaren Einstrahlung fließt in das Gebäudemodell ein [3].

3.3 Transmissions- und Lüftungsverluste

Die Transmissions- und Lüftungsverluste als austretende Wärmeströme aus dem Gebäude können auf Basis des der Daten im Energieausweis errechnet werden. Die Transmissionsverluste setzen sich aus dem U-Wert und der Fläche von Außenwand, Fensterflächen und Grundfläche zusammen. Die Summe der Außenwandflächen, der Fensterflächen und der Gesamtgrundfläche wird mit den jeweiligen U-Werten multipliziert. In Tabelle 1 sind die verwendeten U-Werte für das Gebäude aufgelistet, während in Tabelle 2 die daraus resultierenden Transmissionsverluste angeführt sind.

U-Wert	Wert	Einheit
U_außen	0,16	W/m²K
U_Fenster	0,90	W/m²K
U_Grund	0,173	W/m²K

Tabelle 1: U-Werte für Außenwandflächen, Fenster und Gesamtgrundfläche

Parameter	Nord		Süd	
	Wert	Einheit	Wert	Einheit
f_außen	2,13	W/K	2,41	W/K
f_Fenster	5,63	W/K	5,63	W/K
f_Grund	4,87	W/K	5,13	W/K
f_T	12,62	W/K	13,16	W/K

Tabelle 2: Zusammenfassung der Transmissionsverluste für die untersuchten Wohneinheiten

Die Lüftungsverluste setzen sich aus dem Produkt von Volumen, Luftwechsel (Annahme von 0,3 Luftwechsel/Stunde), einem Faktor der Wärmerückgewinnung (60% Wärmerückgewinnung) und der spezifischen Wärmekapazität für Luft zusammen. Für die beiden untersuchten Wohnungen lassen sich Lüftungsverluste wie in Tabelle 3 angeführt ermitteln.

Parameter	Nord		Süd	
	Wert	Einheit	Wert	Einheit
V	141,75	m ³	149,31	m ³
Luftwechsel	0,3	1/h	0,3	1/h
cp_Luft	1,005	kJ/kgK	1,005	kJ/kgK
Dichte_Luft	1,2	kg/m ³	1,2	kg/m ³
f_L	14,25	W/K	15,01	W/K

Tabelle 3: Transmissions- und Lüftungsverluste der untersuchten Wohneinheiten

Als Eingabeparameter zur Parametrierung des Gebäudemodells lassen sich die Transmissions- und Lüftungsverluste, wie in Tabelle 4 angeführt, zusammenfassen.

Parameter	Nord		Süd	
	Wert	Einheit	Wert	Einheit
f_T+f_L	26,86	W/K	28,16	W/K

Tabelle 4: Transmissions- und Lüftungsverluste der untersuchten Wohneinheiten

3.4 Eingabeparameter für das Gebäudemodell

3.4.1 Fensterflächen und Ausrichtung des Gebäudes

Die Fensterflächen und deren Ausrichtung spielen eine zentrale Rolle für den Wärmeeintrag mittels solarer Einstrahlung. Die nordseitige Wohnung ist 190° zur Südrichtung ausgerichtet. Die südseitige Wohnung hingegen nur 10°. Die Fensterflächen ergeben sich wie in Tabelle 5 aufgelistet.

Nord		Süd	
Ausrichtung Nord		Ausrichtung Süd	
2,04	m ²	2,04	m ²
4,21	m ²	4,21	m ²
Summe Nord		Summe Süd	
6,25	m²	6,25	m²

Tabelle 5: Fensterflächen der Wohneinheiten der untersuchten Wohneinheiten

3.4.2 Gesamtenergiedurchlasswert (g-Wert)

Der Gesamtenergiedurchlasswert erfasst die Energiedurchlässigkeit von transparenten Bauteilen. Herkömmliches Glas hat einen g-Wert von ca. 0.85, das bedeutet dass 85% der eingestrahnten Energie in den Raum hinter der Glasscheibe gelangen kann. Bei modernen Verglasungen, z.B. Dreifachverglasung, liegt der g-Wert bei ca. 0.55 [4]. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des Fensters gibt an, wie groß ein Wärmestrom in- oder aus dem Gebäude hinaus ist, bei einer gewissen Temperaturdifferenz. Dabei wird das gesamte Fenster ($U_{\text{Rahmen}} + U_{\text{Glas}}$) als Fläche berücksichtigt [5]. Bei der Parametrierung des Reglers für den Anwendungsfall Sommerein wurde ein g-Wert = 0,45 für direkte Strahlung und für diffuse Strahlung g-Wert = 0,35 angenommen.

3.4.3 Massen und Grundflächen der Wohneinheiten

Massen und Grundfläche spielen bei den Berechnungen des MPC eine zentrale Rolle. Um die aktivierten Flächen zu identifizieren, wird die Annahme getroffen, dass alle Decken grundsätzlich aktiviert sind und somit in Wärmespeicherung- und abgabe eine Rolle spielen:

Gesamtfläche Decke / Aktivierte Fläche					
Nord			Süd		
Wohnküche	28,36	m ²	Wohnküche	30,04	m ²
Zimmer	13,87	m ²	Zimmer	14,83	m ²
Vorraum	8,20	m ²	Vorraum	8,20	m ²
Bad	5,82	m ²	Bad	6,18	m ²
Technik	3,05	m ²	Technik	3,12	m ²
Summe Nord	56,25	m²	Summe Süd	59,25	m²

Tabelle 6: Aktivierte Flächen in den Wohneinheiten

Für das Deckenmaterial wird Beton mit einer Dicke von 0,18 m, einer spezifischen Wärmekapazität von 1,11 kJ/kgK und einer Dichte von 2300 kg/m³ angenommen. Somit lassen sich für die Massen der Wohneinheiten folgende Werte darstellen:

Nord			Süd		
V_TAB	10,13	m ³	V_TAB	10,67	m ³
m_TAB	23 288	kg	m_TAB	24 530	kg
m_TAB	23,30	t	m_TAB	24,50	t
m_TAB*cp_TAB	25 849	kJ/K	m_TAB*cp_TAB	27 228	kJ/K

Tabelle 7: Massen der TAB in den Wohneinheiten

Um die Masse der gesamten Wohneinheit und folglich auch deren Wärmespeicherkapazität abzubilden sind die Mengen an folgenden Baustoffen ausschlaggebend:

Baustoff	c_p [kJ/kgK]
Beton	1,11
Ziegel	1,00
Estrich	1,07
Fliese	0,84
Laminat	1,16

Tabelle 8: Wichtige Baustoffe und deren spez. Wärmekapazitäten

Werden die Massen und die Speicherkapazitäten der einzelnen Komponenten für beide Wohneinheiten aufgeschlüsselt, ergeben sich spez. Speicherkapazitäten wie in Tabelle 9 angegeben:

Parameter	TOP 6	TOP 10	Einheit	Beschreibung
m_{TAB}	23288	24530	[kg]	Masse aktivierte Decke
cp_{TAB}	7,18	7,56	[kWh/K]	Speicherfähigkeit aktivierte Decke
m_{AW}	14412	17270	[kg]	Masse Außenwände
cp_{AW}	4,00	4,80	[kWh/K]	Speicherfähigkeit Außenwände
m_{IW}	4156	4646	[kg]	Masse Innenwände
cp_{IW}	1,15	1,23	[kWh/K]	Speicherfähigkeit Innenwände
m_{GF}	5849	6150	[kg]	Masse Grundfläche
cp_{GF}	1,76	1,85	[kWh/K]	Speicherfähigkeit Grundfläche
m_R	47704	25596	[kg]	Gesamtmasse Wohneinheiten
cp_R	6,92	7,94	[kWh/K]	Speicherfähigkeit Wohneinheiten

Tabelle 9: Massen und spezifische Wärmespeicherkapazität der untersuchten Wohneinheiten

3.5 Wetterprognosedaten

3.5.1 Außentemperatur

Die Außentemperatur wird aus den lokalen Wetterdaten bezogen. Für die prognosebasierte Regelung wird eine stündliche Aktualisierung der Wetterdaten durchgeführt.

3.5.2 Bewölkungsgrad

Der Bewölkungsgrad wird aus den lokalen Wetterdaten entnommen und für das Modell stündlich aktualisiert.

3.5.3 Windgeschwindigkeit

Um Wind Peak Shaving im Modell simulieren zu können, sind lokale Windprognosedaten notwendig. Die Wetterdaten liefern die Windgeschwindigkeit am Standort Sommerlein genormt für eine Messhöhe von 10 m über dem Erdreich. Diese Daten werden auf die Höhe der einer Windturbine hochgerechnet. Windturbinen sind für eine spezifische Windgeschwindigkeit ausgelegt (Rated Wind Speed), bei der sie die höchste Leistung erbringen. Übertritt die Windgeschwindigkeit einen gewissen Wert (Cut-Out-Speed) setzt die Turbine ihren Betrieb aus, wie in Abbildung 13 dargestellt.

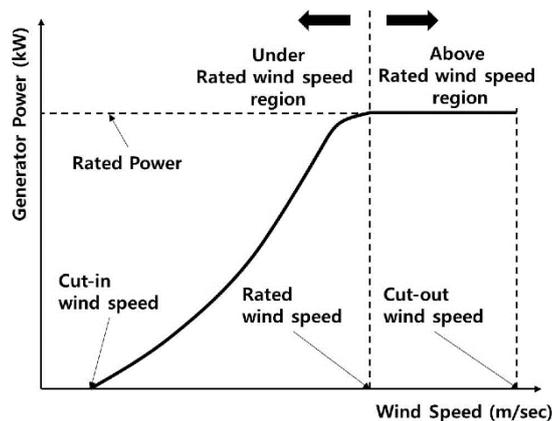


Abbildung 13: Betriebspunkte einer Windturbine [6]

4 Prozessablauf prognosebasierte Regelung

Zentrales Element der modellprädiktiven Steuerung ist das Gebäudemodell, das in Kapitel 3 umfassend beschrieben wurde. Dieses Gebäudemodell ermöglicht eine Kalkulation der Raumtemperatur im Gebäude in die Zukunft, unter Berücksichtigung der Prognosedaten. Der Prognosehorizont für den Anwendungsfall Sommerein beträgt 48 Stunden, da für diesen Zeitraum Prognosedaten aus dem Internet verfügbar sind. Der errechnete Temperaturverlauf wird in einem Optimierungsverfahren mit einem gewünschten Sollwert (Wunschtemperatur des Bewohner:in / Nutzer:in) verglichen. Durch Minimierung der Fehlerquadratsumme wird die Solltemperatur der prognostizierten Temperatur angeglichen. Als Ergebnis der Optimierung wird ein Heizleistungs-/Kühlleistungsverlauf erstellt, von dem das erste Element als aktuell nötige Heiz/Kühlleistung an das Wärmeerzeugungssystem übergeben wird. Der Regler (wie in Abbildung 14 schematisch dargestellt) wird in regelmäßigen Intervallen (z.B. stündlich) aufgerufen und durchläuft folgende Kalkulationsschritte:

1. Abfrage Wetterprognosedaten
2. Kalkulation Solare Einstrahlung
3. Kalkulation prädikative Raumtemperatur mit Gebäudemodell
4. Optimierung auf gewünschte Solltemperatur
5. Ergebnis der Optimierung an Wärmeabgabesystem übergeben

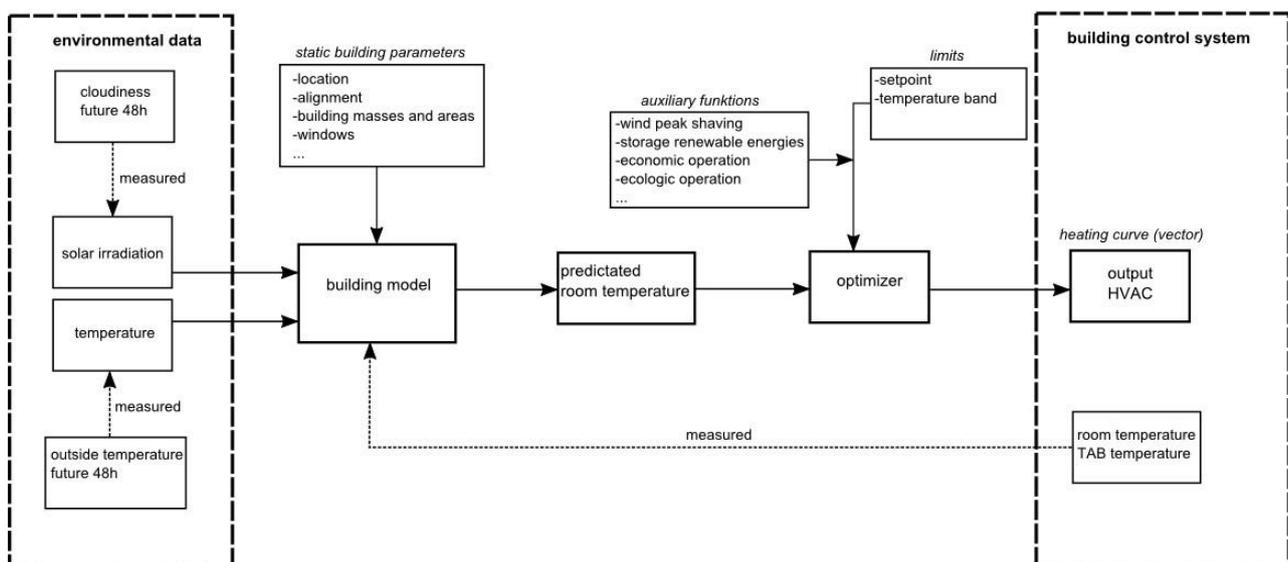


Abbildung 14: Übersicht Regelungskonzept

4.1 Optimierungsfunktion

Zur Ermittlung des nötigen Wärmestroms wird eine Optimierungsfunktion in das Regelungskonzept integriert. Je nach Anforderung kann die Zielfunktion beliebig gewählt werden. Folgende Zielfunktionen sind derzeit möglich:

1. Komfortoptimierung
2. Ökonomische Optimierung
3. Max. Lastverschiebung / Wind Peak Shaving

Im Folgenden werden die im Forschungsprojekt umgesetzten Zielfunktionen für Komfortoptimierung und Maximierung von Wind Peak Shaving vorgestellt.

4.1.1 Komfortoptimierung

Das Ergebnis des Gebäudemodells ist ein prädiktiver Temperaturverlauf $\vec{T}_{R,i}(\vec{x})$ für die kommenden Stunden in Abhängigkeit der vorherrschenden Parameter. Dieser Temperaturverlauf wird mit einer Solltemperatur T_{sp} verglichen. Die Optimierung hat nun die Aufgabe, jene Heizleistung zu ermitteln, die nötig ist, damit der prädiktive Temperaturverlauf mit der Solltemperatur übereinstimmt. Als Zielfunktion wird die Minimierung der Fehlerquadratsumme zwischen Raumtemperatur und Solltemperatur definiert (Gleichung (14)). Mit Nebenbedingung 1 wird verhindert, dass gleichzeitig geheizt und gekühlt wird. Die Optimierung erhält als Ergebnis damit nur positive Wärmeströme in das Gebäude.

$$f(\vec{x}) = \sum_{i=0}^{48} (T_{R,i}(\vec{x}) - T_{sp})^2 \rightarrow \min \quad (14)$$

$$x \dots \dot{Q}$$

$$NB\ 1: x \geq 0 \quad (15)$$

Der Optimierungsalgorithmus erfolgt in iterativen Schritten und ist im Zwischenbericht zum Forschungsprojekt „TAB-Scale3 - Modellentwicklung und Validierung für thermisch aktivierte Bauteile (TAB) an einem Demo-Wohngebäude für Scale-up auf mehrgeschossigen Wohnbau“ im Detail beschrieben.

4.1.2 Lastverschiebung durch Wind Peak Shaving

Die in Kapitel 4.1.1 beschriebene Optimierung lässt sich auch als Kostenfunktion mit Nebenbedingungen ausdrücken und dahingehend erweitern, dass verschiedene ökonomische und ökologische Parameter in die Optimierung einfließen. In diesem Forschungsprojekt wird ein Ansatz gewählt, bei dem ein Anteil an Windstrom (Wind Peak Shaving – WPS) aus dem angrenzenden Windpark Sommerein eingebunden werden kann.

Um Nebenbedingungen in die prognosebasierte Regelung einfließen zu lassen, wird die Optimierung auf eine Kostenfunktion umgestellt und sowohl die Abweichung von der Zieltemperatur als auch die nötigen Kosten für die Wärmebereitstellung berücksichtigt. Ziel der Optimierung ist es, die Gesamtkosten für das Erreichen des gewünschten Temperaturniveaus inkl. der Kosten der Wärmebereitung zu minimieren. Gleichung (16) beschreibt die Optimierungsfunktion, während Gleichungen (17) und (18) die Nebenbedingungen für die Temperaturabweichung sowie Gleichung (20) den Einfluss der Kosten der Wärmebereitung

(Energiekosten) darstellt. Gleichung (19) beschränkt die Optimierung auf einen positiven Wärmeeintrag (nur Heizen, kein Heizen und Kühlen gleichzeitig).

Zusammengefasst spielen folgende Kosten in der Optimierungsfunktion eine Rolle

- Kosten Temperatur-Überschreitung: $f_+ * (T_{R,i}(\vec{x}) - T_{sp})^2$
- Kosten Temperatur-Unterschreitung: $f_- * (T_{sp} - T_{R,i}(\vec{x}))^2$
- Kosten Wärmebereitstellung durch Wärmepumpe: $K_{Energie,i}(x_i)$

$$f(\vec{x}) = \sum_{i=0}^{48} f_+ * (T_{R,i}(\vec{x}) - T_{sp})^2 + f_- * (T_{sp} - T_{R,i}(\vec{x}))^2 + K_{Energie,i}(x_i) \rightarrow \min \quad (16)$$

$$x \dots \dot{Q}$$

$$NB 1: \text{Wenn } (T_{R,i}(\vec{x}) - T_{sp}) < 0: (T_{R,i}(\vec{x}) - T_{sp}) = 0 \quad (17)$$

$$NB 2: \text{Wenn } (T_{sp} - T_{R,i}(\vec{x})) < 0: (T_{sp} - T_{R,i}(\vec{x})) = 0 \quad (18)$$

$$NB 3: x \geq 0 \quad (19)$$

$$K_{Energie,i}(x_i) = \frac{x_i}{COP} * \Delta t_i * C_{Strom,i} \quad (20)$$

Um den Windstrom (Wind Peak Shaving) in die Simulation einbinden zu können wurden einige vereinfachende Annahmen getroffen. Windstrom wird als kostenlos angenommen. Ab einer Windgeschwindigkeit von 7-12 m/s erzeugen die Windkraftanlagen Strom für das Netz. Da die verwendeten Wetterdaten aber aus Bodennähe stammen wird aus Abschätzungen 43% Zuschlag zur Windgeschwindigkeit aus den Wetterdaten (bodennah) aufgerechnet. Cut-off, Abschalten der Windturbine aufgrund zu hoher Windgeschwindigkeit, wird bei 20 m/s angenommen. Solarer Eintrag fließt ebenso als Wärmequelle ohne Energiekosten in die Gleichung mit ein. Für die Kostenfunktion muss der Strompreis integriert werden. Der Strompreis für alle Simulationen wird mit 0,30 €/kWh angenommen. Der COP wurde für alle Berechnungen konstant mit 4 angenommen.

4.1.2.1 Gewichtungsfaktoren Temperaturabweichung Kostenoptimierung

Um Temperaturabweichungen in der Kostenoptimierung für WPS zu berücksichtigen, werden für verschiedene Abweichungen über- und unterhalb der voreingestellten Solltemperatur Kosten beaufschlagt. Im Heizfall werden für Temperaturen, die das eingestellte Niveau unterschreiten $f_- = 0,08 \text{ €/K}^2$ angenommen, während für Überschreitungen $f_+ = 0,04 \text{ €/K}^2$ angenommen werden. Temperaturüberschreitungen werden also weniger stark bestraft als Unterschreitungen. Diese Werte orientieren sich an den Kosten für Energiebereitstellung und sind spezifisch für diese Wohneinheiten. Sie sind so dimensioniert, dass sie sich vom Einfluss auf die Gesamtkosten so verhalten, dass Temperaturkomfort bestmöglich eingehalten werden kann. Wie in [7] beschrieben orientiert sich die Komforttemperatur eines Individuums an vielen Faktoren, wie etwa der Außentemperatur. Es kann angenommen werden, dass eine leichte Überschreitung der Solltemperatur weniger negativ auf das individuelle Komfortempfinden

einwirkt, als eine Unterschreitung. Eine Unterschreitung führt im Ernstfall zu einem Nutzer:inneneingriff, was eine höhere Solltemperatur bedingen kann.

4.1.3 Daten für Optimierung

Für die Optimierung des nötigen Wärmestroms sind einige Daten und Parameter erforderlich. Die Soll-Temperatur des Nutzers / der Nutzerin gibt das Temperaturniveau vor, das erreicht werden soll. Aus Wetterprognosedaten wird die prognostizierte solare Einstrahlung errechnet und damit der solare Eintrag in die Wohneinheit, der in den nächsten zwei Tagen erwartet werden kann. Dieser verringert den Wärmeeintrag der ansonsten durch das Heizsystem abgedeckt werden müssen. Eine Vereinfachung hinsichtlich der Annahmen für die Kostenoptimierung werden dahingehend getroffen, dass der Strompreis ab einer gewissen Windgeschwindigkeit mit null angenommen wird.

4.1.4 Output Optimierung

Als Ergebnis der Optimierungsfunktion wird ein Wärmestromvektor ausgegeben, der nötig ist, um die gewünschte Zielfunktion zu erreichen. Die Anzahl der Vektorelemente ist vom Prädiktionshorizont abhängig. Das erste Element des Wärmestromvektors wird als Zielwert in die Regelung des Heizsystems (Wärmepumpe, Mischventil, Volumenstromregelung) übergeben. Es erfolgt eine stündliche Aktualisierung des optimierten Wärmestromvektors.

5 Simulation und Messdatenaufbereitung

Das prognosebasierte Regelungskonzept wird an zwei ausgewählten Wohneinheiten im Wohnpark Wolfsbrunn in Sommerein auf Simulationsebene erprobt. Verglichen werden sollen die Simulationsergebnisse mit den Messdaten aus dem realen Objekt. Als Ergebnis soll das theoretische Potenzial zur Lastverschiebung und thermischen Energiespeicherung ermittelt werden. Dazu werden die Messdaten mit den Simulationsdaten verglichen. Da es Lücken in den Messdaten bzw. den historischen Aufzeichnungen der Wetterdaten gibt, wurde ergänzend eine Vergleichssimulation ohne und mit Wind Peak Shaving durchgeführt. In einem ersten Schritt wird daher eine Optimierung ohne WPS (Komfortoptimierung - Kapitel 4.1.1) durchgeführt und in einem zweiten Schritt eine Optimierung mit WPS (Kostenoptimierung - Kapitel 4.1.2) durchgeführt. Das ermöglicht den Vergleich zwischen Theorie und Praxis, wieviel thermische Energie nötig ist, um eine gewünschte Solltemperatur zu halten. Ergänzend kann auf Basis von Vergleichssimulationen das thermische Speicherpotenzial durch Wind Peak Shaving für die beiden Wohneinheiten ermittelt werden.

5.1 Startbedingungen für die Simulationen

Um ein anfängliches Einschwingen des Systems zu reduzieren, werden die Temperaturniveaus der Vorlauftemperatur der Bauteilaktivierung und der prädiktiven Temperatur zur Stunde Null an die geforderte Raumtemperatur angepasst (siehe Tabelle 10). Als Solltemperatur für die Simulation wurde 24°C gewählt, da dies die Durchschnittstemperatur in den untersuchten Wohnungen im betrachteten Zeitraum war.

Weiters wurde die Optimierung so parametrisiert, dass ein Wärmestrom nur zu- und nicht abgeführt wird ($x > 0$). Damit wird ein dauernder Wechsel von Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr in der Optimierung unterbunden. Das ist an die Praxis angelehnt, in der auch nur zweimal im Jahr, meist durch manuelles Umschalten, ein Change-Over von Heizen auf Kühlen und umgekehrt stattfindet.

Startbedingungen Simulation	
Starttemperatur TAB Vorlauf [°C]	24
Starttemperatur Raum-Solltemperatur [°C]	24
Starttemperatur Raum-prädiktiv [°C]	24

Tabelle 10: Startbedingungen Temperaturen

5.2 Aufbereitung der Messdaten

Messdaten aus dem Monitoring werden über Fernzugriff abgegriffen und als .csv-Files für die weitere Verarbeitung abgelegt. Auf diesen Dateien sind sämtliche Messpunkte aufgelistet. Alle 5 Minuten werden Messwerte erhoben und in das Tages-File geschrieben. Um die Daten weiter auswerten zu können, werden die Daten angepasst.

Für die Analyse der Monitoringdaten wird Python verwendet. Python ist in der Lage, .csv-Files einzulesen und zu verarbeiten, weshalb keine Änderungen an den Rohdaten notwendig sind. Die Rohdaten werden mithilfe der Python-Bibliothek Pandas eingelesen, bereinigt und auf 15-Minuten-Mittelwerte hochgerechnet. Mit der Bibliothek Pandas ist zudem eine statistische Auswertung der Messdaten möglich. Die Visualisierung der verarbeiteten Daten erfolgt mit den Bibliotheken Matplotlib und Bokeh.

Für die Modellrechnung werden die 15-Minuten-Mittelwerte weiter verarbeitet und auf Stundenwerte hochgerechnet. Das minimiert die Rechenzeit und bildet auch die Struktur des prognosebasierten Reglers nach.

6 Ergebnisse und Interpretation

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Messdatenauswertung (6.1) für den Betrachtungszeitraum sowie die Ergebnisse der Simulationsläufe mit und ohne WPS (6.2) präsentiert.

6.1 Messdatenauswertung Monitoring

Der Wohnpark Sommerein ist seit Frühjahr 2020 bewohnt und in der Heizperiode 2021/2022 wurden Versuche zur Einspeicherung von Überschussstrom aus dem anliegenden Windpark durchgeführt. Im folgenden werden Ergebnisse des Monitorings für die Heizperiode 2021/2022 zusammengefasst und als Grundlage für die Simulation herangezogen. Der Beginn der Heizperiode wurde mit 01.10.2021 festgelegt, Ende der Heizperiode war der 31.03.2022.

6.1.1 Temperaturmessungen

Ein wichtiger Einflussfaktor auf den Heizwärmebedarf ist die **Außentemperatur**. In *Abbildung 15* ist der Außentemperaturverlauf für die Heizperiode 2021/2022 dargestellt. Für diese Periode betrug die durchschnittliche Außentemperatur 6.8°C . Die niedrigste Temperatur in diesem Zeitraum wurde am 12.01.2022 mit -3.0°C erreicht, die höchste Temperatur zu Beginn der Heizsaison mit 24.1°C am 05.10.2021.

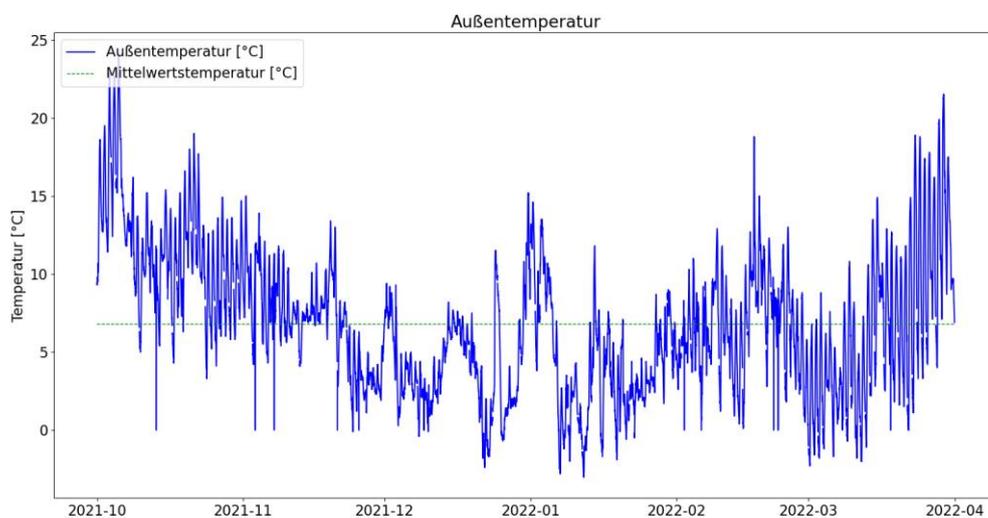


Abbildung 15: Außentemperaturverlauf der Heizperiode 2021/2022

Eine Auswertung der gemessenen **Raumtemperaturen** in den Wohneinheiten Nord und Süd zeigt für beide Wohnungen, dass die Raumtemperaturen innerhalb gängiger Komfortgrenzen gelegen sind. Im untersuchten Zeitraum wird von einem Sollwert von 24°C in beiden Wohneinheiten ausgegangen. Um den Sollwert wird ein Temperaturband von +/- 2 K gelegt. Somit ergibt sich eine obere und untere Grenztemperatur (rot), die die jeweilige Grenze der Behaglichkeit darstellen. In beiden Fälle ist die untere Temperaturgrenze 22°C und die obere Grenze 26°C. Die durchschnittliche Temperatur (grün) gibt die durchschnittliche Temperatur über den betrachteten Zeitraum an.

In der nordseitig ausgerichteten Wohnung betrug die durchschnittliche Raumtemperatur in der betrachteten Periode 23.8°C. Die Temperaturkurve für die nordseitige Wohnung ist in *Abbildung 16* dargestellt. Die niedrigste Temperatur wurde am 27.10.2021 mit 22.0°C gemessen, die höchste Temperatur mit 26.2°C am 01.12.2021.

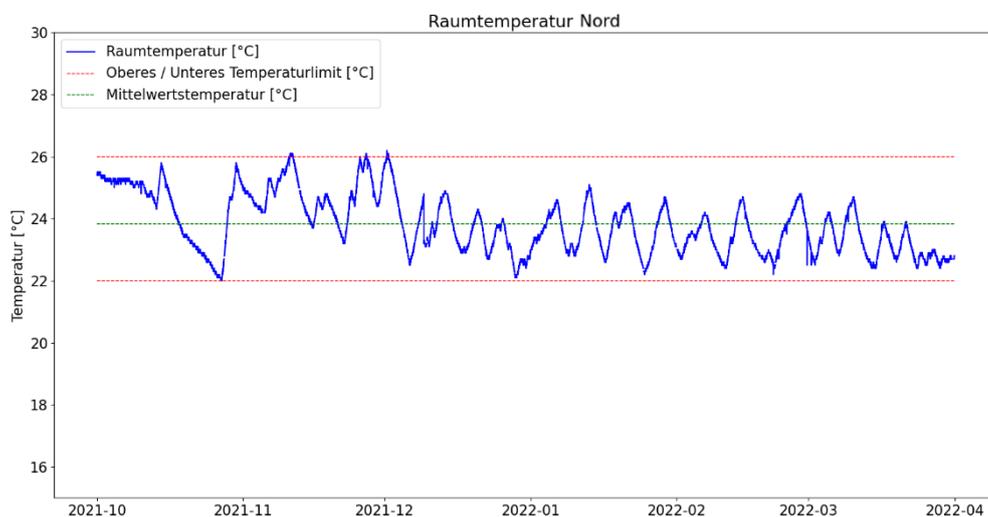


Abbildung 16: Temperaturverlauf in der nordseitig gelegenen Wohnung in der Heizperiode 2021/2022

In der südseitig ausgerichteten Wohnung lag die Durchschnittstemperatur bei 24.1°C. *Abbildung 17* zeigt den Temperaturverlauf für die Heizperiode 2021/2022 der südseitig orientierten Wohneinheit. Das Minimum mit 21.2°C wurde am 06.12.2021 erreicht. Die höchste Temperatur in dieser Periode wurde am 09.12.2021 mit 26.1°C gemessen.

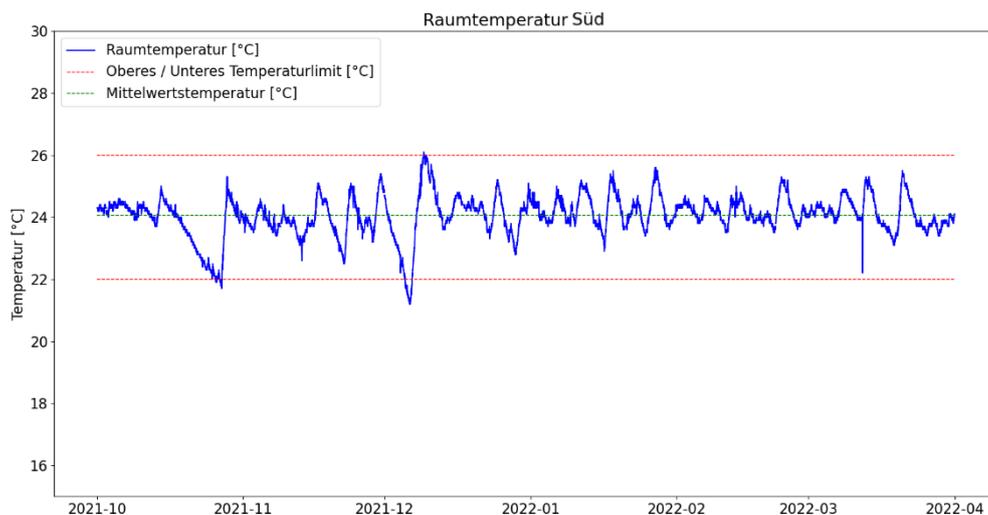


Abbildung 17: Temperaturverlauf in der südseitig gelegenen Wohnung in der Heizperiode 2021/2022

6.1.2 Wärmeeintrag

Im folgenden Abschnitt wird der Wärmeeintrag in die Wohnungen für die Heizperiode 2021/2022 betrachtet. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die gemittelten Heizleistungen auf Basis von 15-Minutenwerten. Auffällig hier ist, dass der Wärmeeintrag in die südseitig orientierte Wohnung deutlich höher ist als in die nordseitig orientierte Wohneinheit. Das zeigt auch der kumulierte Wärmebedarf, der von den Wärmemengenzählern für diesen Zeitraum erfasst wurde. Während in Wohnung Nord 515 kWh Wärme eingebracht wurden, wurden in Wohnung Süd 646 kWh Wärme verbraucht. Das entspricht einem 25% höheren Verbrauch. Die durchschnittlichen Temperaturen der beiden Wohnungen waren im Betrachtungszeitraum in etwa gleich hoch (Nord: 23.8°C, Süd: 24.1°C), weshalb der große Unterschied im Wärmeverbrauch womöglich durch die Regelung bzw. durch Eingriffe des Nutzers / der Nutzerin hervorgerufen wurde.

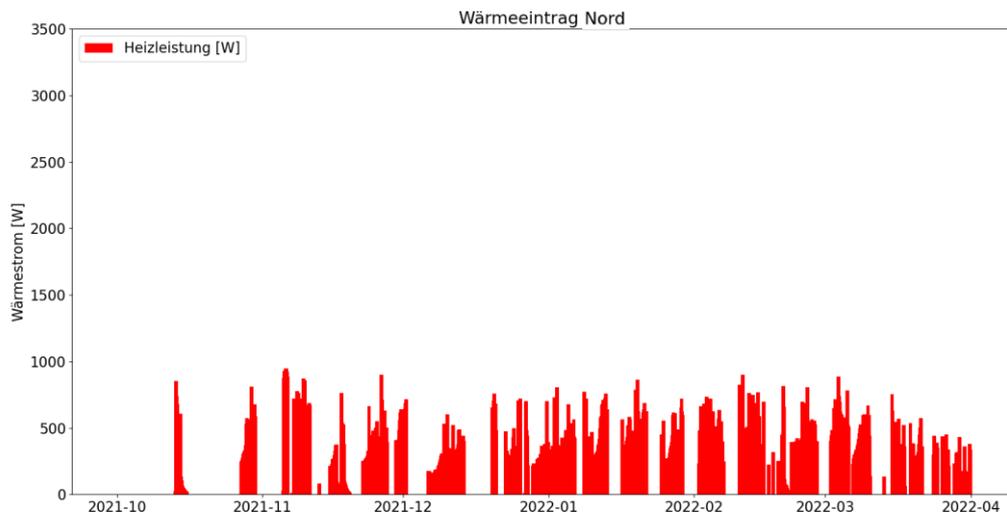


Abbildung 18: Wärmeeintrag durch das Heizsystem in die nordseitig gelegene Wohnung in der Heizperiode 2021/2022

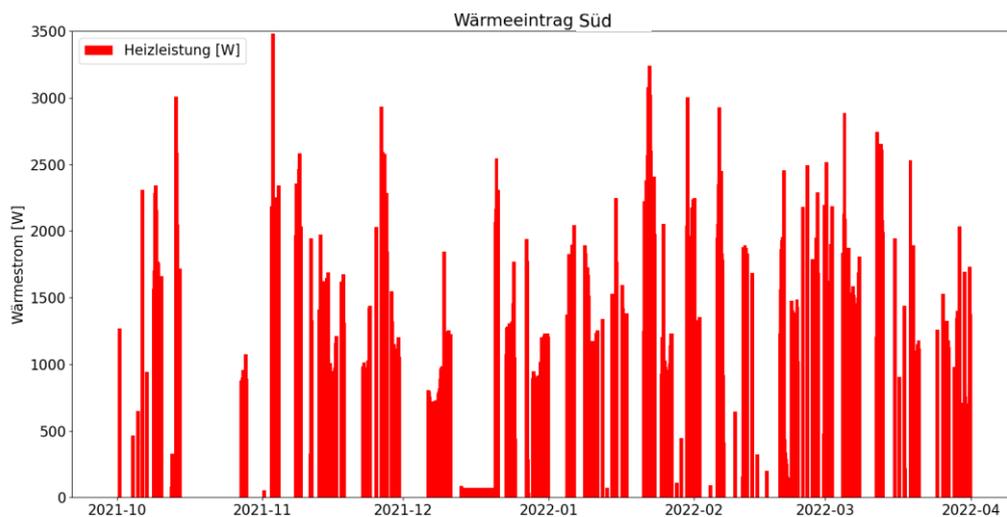


Abbildung 19: Wärmeeintrag durch das Heizsystem in der südseitig gelegenen Wohnung in der Heizperiode 2021/2022

Abgeleitet von den Messdaten, einer günstigen Wetterlage (hohe solare Erträge), der laufenden Heizsaison und einer konsistenten Datenlage wurde der Zeitraum vom 22.11.2021 bis zum 01.12.2021 für die Detailbetrachtung und Vergleichssimulation ausgewählt.

Abbildung 20 zeigt die gemessene Raumtemperatur in der nordseitig ausgerichteten Wohneinheit im betrachteten Vergleichszeitraum. Die Einflussnahme der solaren Einstrahlung auf die Wohnraumtemperatur ist aufgrund der Orientierung sehr gering.

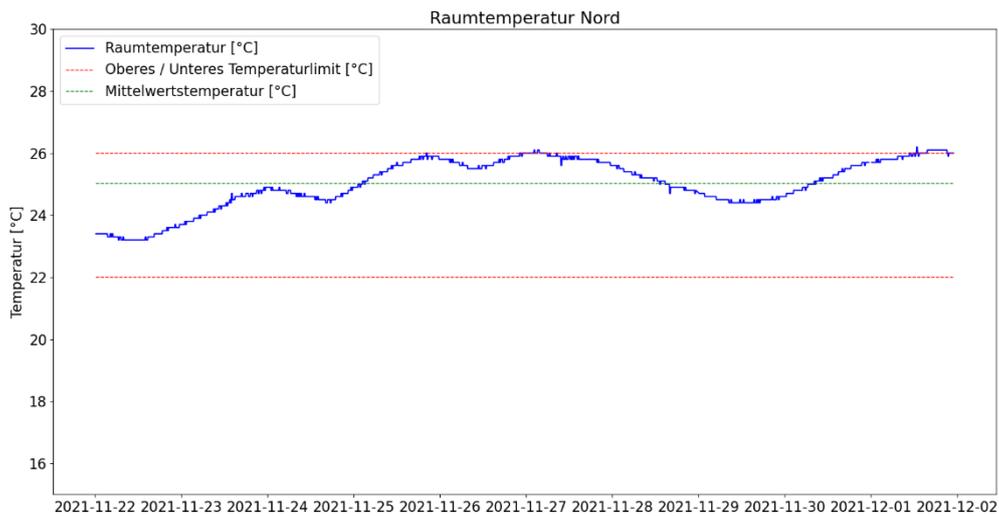


Abbildung 20: Detailbetrachtung Temperaturverlauf in der nordseitig gelegenen Wohnung

In der südseitig orientierten Wohnung spielt der solare Wärmeeintrag eine wichtige Rolle. Abbildung 21 zeigt den Temperaturverlauf der südseitig gelegenen Wohnung höher aufgelöst.

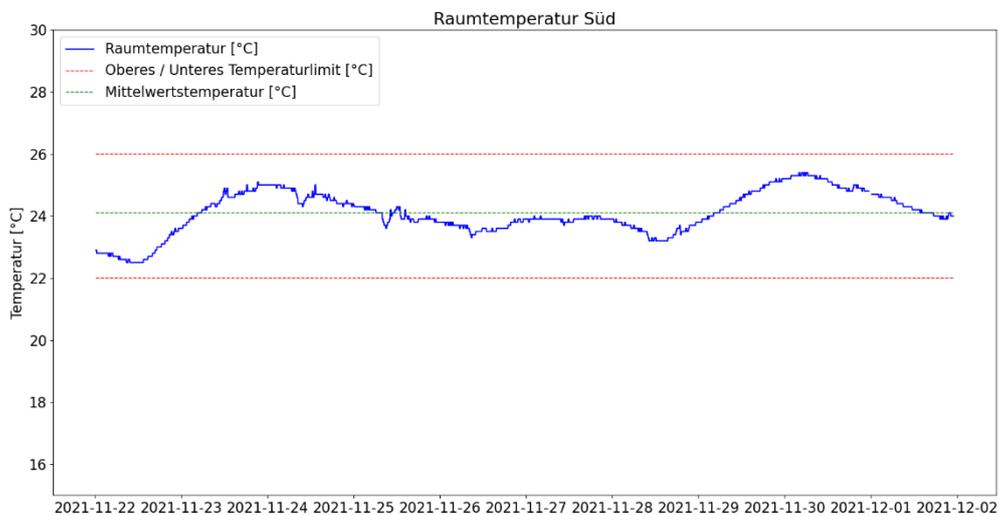


Abbildung 21: Detailbetrachtung Temperaturverlauf in der südseitig gelegenen Wohnung

6.2 Ergebnisse prädiktive Regelung

Die beiden vorgestellten Wohneinheiten wurden mit dem prädiktiven Regelungsmodell auf Simulationsebene nachgebildet, um das Verhalten des Optimierers bei realen Wetterprognosen zu testen. In einem ersten Schritt wird eine Simulation des prädiktiven Regelungskonzept mit Komfortoptimierung angestellt. Um das Potenzial der Lastverschiebung erheben zu können, wird in einem weiteren Schritt eine Kostenoptimierung mit WPS durchgeführt. Die Ergebnisse dieser beiden Simulationsläufe werden im folgenden Abschnitt zusammengefasst.

6.2.1 Ergebnisse ohne Wind Peak Shaving (Komfortoptimierung)

Neben den Messdaten dient dieses Szenario als Referenz für die Erhebung des Potenzials der Lastverschiebung in Zeiten von WPS. In werden die Ergebnisse der Optimierungsrechnung ohne WPS zusammengefasst. Eine Auswertung der Wärmeströme über den Betrachtungszeitraum zeigt konsistente Ergebnisse. Der solare Eintrag in die nordseitige Wohnung ist deutlich geringer als in die südseitig orientierte Wohnung. Auf Basis der Energiebilanz wären im Betrachtungszeitraum ein Wärmeverlust an die Umgebung von 144 kWh (Nord) bzw. 145 kWh (Süd) zu decken.

Für die nordseitig ausgerichtete Wohnung müssten lt. Simulation unter Berücksichtigung des solaren Ertrags 135 kWh an Wärme zugeführt werden. Die Wärme, die für das Aufrechterhalten der gewünschten Zieltemperatur von 24°C notwendig ist, wird über die TAB und die Wärmepumpe zur Verfügung gestellt. Aus den Monitoringdaten geht hervor, dass die tatsächlich in die nordseitige Wohneinheit eingebrachte Wärmemenge bei 41 kWh lag.

In der südseitig orientierten Wohnung liegt der Wärmeeintrag durch solare Einstrahlung deutlich höher, weshalb der Beitrag durch die Heizung deutlich geringer ausfällt (11 kWh). Die Simulationsergebnisse zeigen erwartbare Ergebnisse: der nötige Wärmeeintrag für die nordseitige Wohnung ist deutlich höher als jener der südseitigen Wohneinheit. Die Messdaten zeigen jedoch ein anderes Bild. Das kann mehrere Ursachen haben, wie etwa Messungenauigkeiten oder Unstimmigkeiten im Messverfahren. So zeigt sich in der Praxis die Herausforderung, Wärmeströme bei sehr niedrigen Temperaturspreizungen (< 2 K) genau zu erfassen.

	Nord	Süd
Starttemperaturen [°C]	24	24
Energieinput Solar [kWh]	15	135
Energieverlust [kWh]	144	145
Energieinput TAB Simulation ohne WPS [kWh]	135	11
Energieinput TAB Monitoringdaten [kWh]	41	76

Tabelle 11: Wärmeströme der untersuchten Wohneinheiten für die Optimierung ohne WPS (Komfortoptimierung)

6.2.2 Ergebnisse mit Wind Peak Shaving (Kostenoptimierung)

Um nun zu untersuchen, welches Potential das Gebäude für WPS darstellt, werden die zwei Wohneinheiten auf Simulationsebene einer Kostenoptimierung, wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, unterzogen. Für die Kostenoptimierung sind Prognosedaten für den Wind nötig, die aus den Wetterprognosedaten kommen und wie in Kapitel 3.5.3 beschrieben, aufbereitet werden. Die Optimierungsfunktion wird von einer Minimierung der Fehlerquadratsumme hin zu einer Kostenfunktion mit Nebenfunktion umgestellt. Bei der Berechnung wird die Temperaturabweichung, die durch das thermische Einspeichern entsteht, mit Kosten belegt. Die Ergebnisse scheinen schlüssig, da die solare Einstrahlung sowie die Außentemperaturbedingungen in der Simulation gleich sind und sich ähnliche Energiebilanzen bilden wie in der Optimierung ohne WPS. Allerdings verschiebt sich der Zeitpunkt des Wärmeeintrags in Zeiten, wo günstig erneuerbarer Strom vorhanden ist (Tabelle 12).

	Nord	Süd
Starttemperaturen [°C]	24	24
Energieinput Solar [kWh]	15	135
Energieverlust [kWh]	138	145
Energieinput TAB Simulation mit WPS [kWh]	133	11
Energieinput TAB Monitoringdaten [kWh]	41	76

Tabelle 12: Wärmeströme der untersuchten Wohneinheiten für die Optimierung mit WPS (Kostenoptimierung)

Da die Höhe des Energieinputs bei den Optimierungen ohne oder mit WPS ähnlich hoch ist, wird im folgenden Abschnitt der Zeitpunkt des Wärmeeintrags näher untersucht, da dieser bei der Kostenoptimierung aufgrund des Einflusses des Strompreises direkten Einfluss auf die Optimierung nimmt.

6.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit und ohne Wind Peak Shaving

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zwischen den Optimierungen mit und ohne WPS graphisch gegenübergestellt. Mittels WPS wird die Wärmebereitung in Zeiten verschoben, in denen günstig Strom (da Überschuss) zur Verfügung steht.

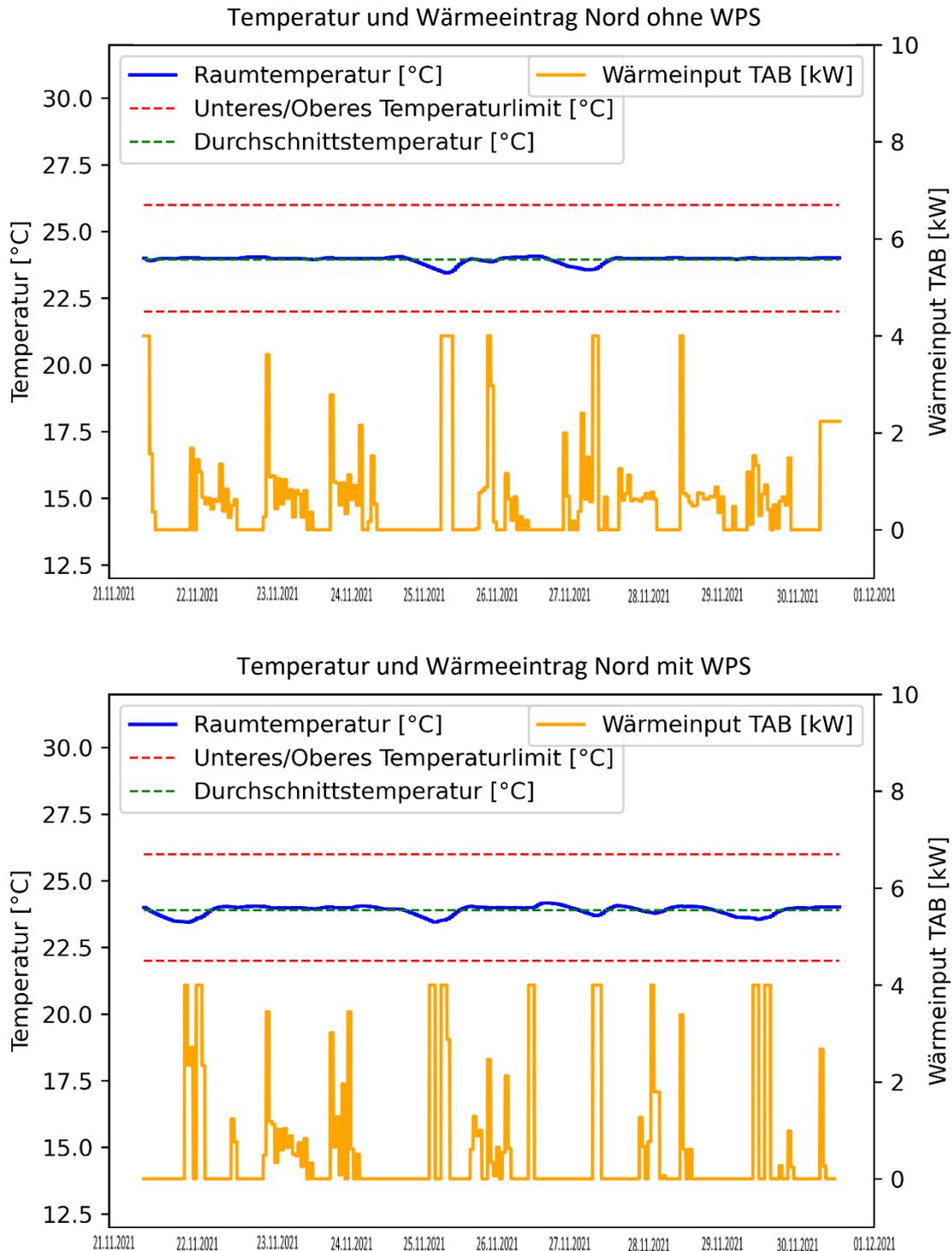


Abbildung 22: Graphische Gegenüberstellung des simulierten Temperaturverlaufs und des simulierten Wärmeinputs in der nordseitig gelegenen Wohnung ohne (oben) und mit (unten) WPS. Es ist zu erkennen, dass geringfügige Temperaturabweichungen vom Sollwert beim Betrieb mit WPS in Kauf genommen werden, dafür aber der Wärmeinput in Zeiten mit hohem Windstromanteil geschoben werden. Dies ist vor allem am 22.11.2022 und kurz vor 30.11.2021 zu erkennen.

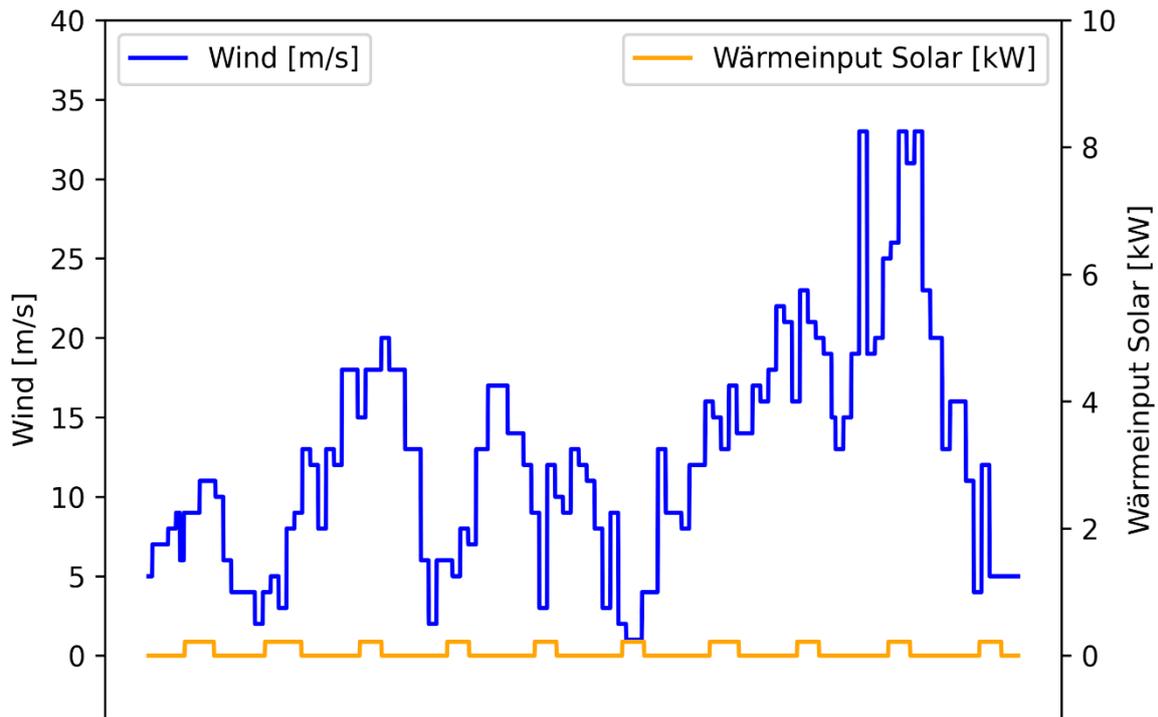


Abbildung 23: Verlauf der Windgeschwindigkeit im Betrachtungszeitraum und die solare Einstrahlung in die nordseitig gelegene Wohnung

Abbildung 22 zeigt die Simulationsergebnisse der nordseitig gelegenen Wohnung ohne und mit WPS. Dargestellt sind der Temperaturverlauf und der Wärmeeintrag durch die TAB. Abbildung 23 zeigt ergänzend die Windgeschwindigkeit sowie die solaren Erträge in die nordseitig gelegene Wohnung für den betrachteten Zeitraum.

In Abbildung 22 ist im Temperaturverlauf des unteren Bildes am 22.11.2021 sowie kurz vor dem 30.11.2021 eine Unterschreitung des Temperaturverlaufs zu erkennen, der im oberen Bild nicht zu sehen ist. Bei gleichzeitiger Betrachtung der Windgeschwindigkeit und des Wärmeeintrags ist zu erkennen, dass der Wärmeeintrag in Zeiten mit höheren Windgeschwindigkeiten verschoben wurde und dafür eine Unterschreitung der Raumtemperatur in Kauf genommen wurde. Damit konnte vermehrt Windstrom genutzt werden.

Während bei der Simulation ohne WPS 27 kWh_{el} der für die Wärmebereitung nötigen elektrischen Energie für die Wärmebereitung in jenen Zeiten bezogen wurde, in denen kein Windüberschussstrom zur Verfügung stand, konnte mit WPS dieser Anteil auf 16 kWh_{el} reduziert werden. Mittels WPS könnten somit rund 41% (11 kWh_{el}) der nötigen elektrischen Energie in Zeiten mit Windüberschussstrom, ohne merkliche Einschränkungen des Komforts, verschoben werden.

Die Kosten für die Wärmebereitung würden bei der Simulation ohne WPS bei 8.2 € für den betrachteten Simulationszeitraum liegen, während sie bei der Option mit WPS auf 4.8 € reduziert werden könnte.

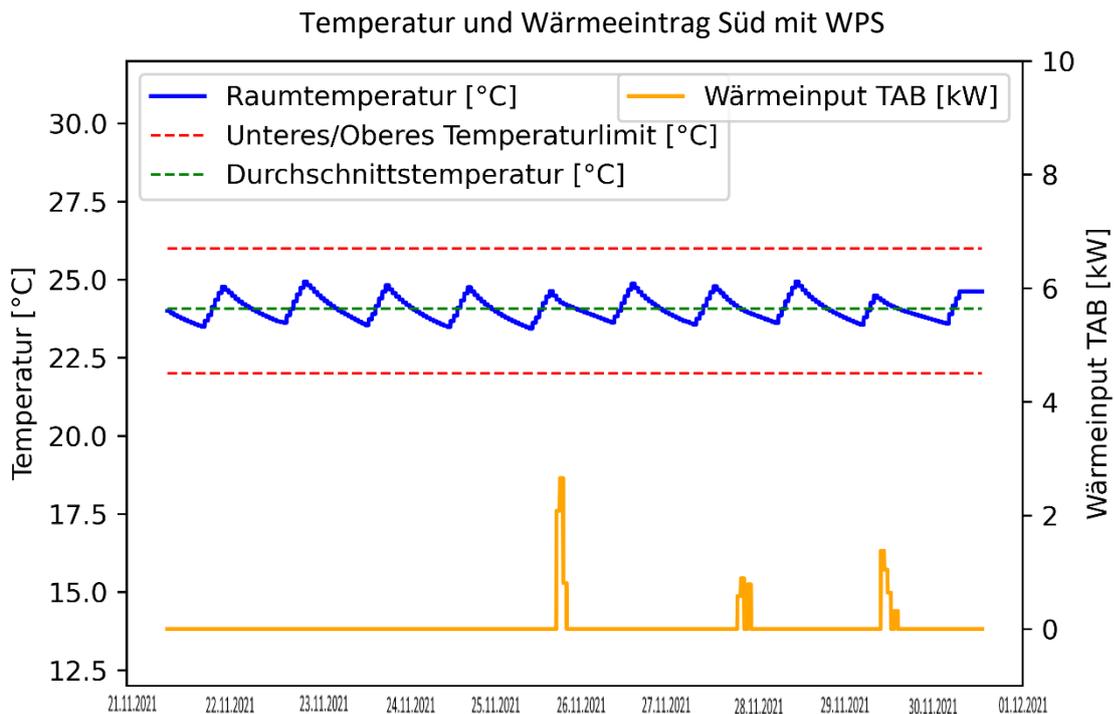
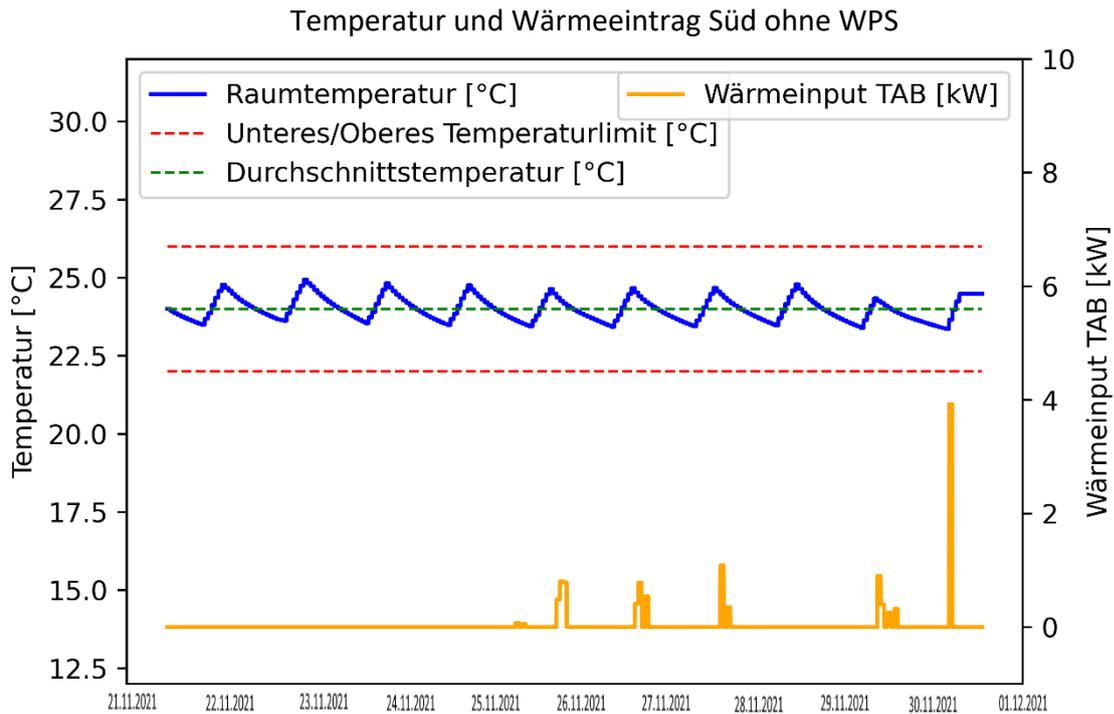


Abbildung 24: Graphische Gegenüberstellung des simulierten Temperaturverlaufs und des simulierten Wärmeeintrags in der südseitig gelegen Wohnung ohne (oben) und mit (unten) WPS. Für den betrachteten Zeitraum ergibt sich folgende Situation, dass der solare Eintrag in dieser Periode ausreicht, um die Temperaturanforderungen zu erfüllen. Für ein Glätten der Kurve wäre sogar eine Kühlung nötig, die als Nebenfunktion bei der Optimierung ausgeschlossen wurde. Es ist nur ein geringer Wärmeeintrag von 11 kWh nötig.

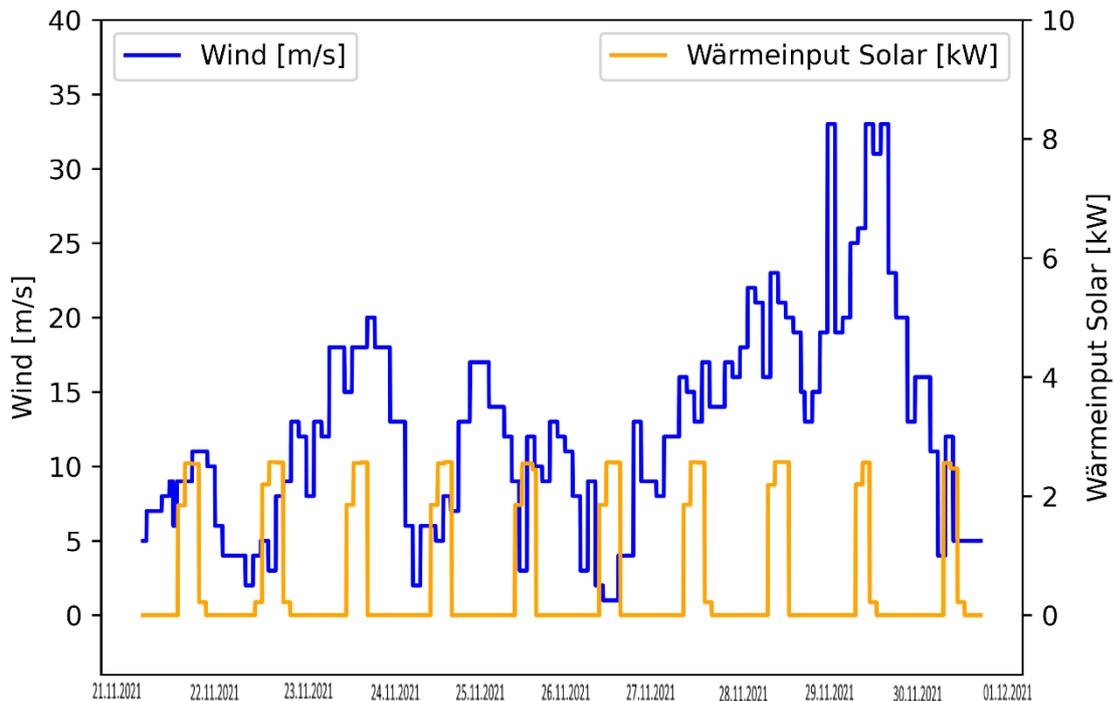


Abbildung 25: Verlauf der Windgeschwindigkeit im Betrachtungszeitraum und die solare Einstrahlung in die südseitig gelegene Wohnung

Abbildung 24 bildet die südseitige Wohneinheit ab. Hier lässt sich beobachten, dass der Temperaturverlauf im Vergleich zur nordseitigen Wohnung stark von Ausschlägen unter und über den Sollwert geprägt ist. Dies liegt daran, dass durch die hohen solaren Erträge (siehe Abbildung 25) der Wärmeeintrag so hoch ist, dass die Zieltemperatur überschritten wird und eigentlich gekühlt werden müsste. Kühlung ist jedoch durch eine Nebenbedingung ausgeschlossen, da es effizienztechnisch wenig sinnvoll ist, in kurzen Intervallen zwischen Heizung und Kühlung hin- und herzuschalten. Das Ergebnis der Optimierung ist daher nur ein sehr geringer Wärmeeintrag, der durch die hohen solaren Erträge am Temperaturverlauf wenig Auswirkung hat.

Bei der reinen Optimierung nach Komfort ist zu erkennen, dass der Wärmeeintrag in Zeiten stattfindet, in denen kein Überschussstrom aus Wind vorhanden ist. Die Kosten für die Wärmebereitung würden sich auf 0.80 € für die betrachtete Periode belaufen, da nur ein Wärmeeintrag von 11 kWh eingebracht werden muss.

Bei der Optimierung mit WPS wird der geringe Wärmeeintrag in jene Zeiten verschoben, in denen Windstrom zur Verfügung steht. Damit konnten für diese Periode die Kosten für die Wärmebereitung gegen null gebracht werden.

Die Ergebnisse der Simulation mit WPS sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Für die nordseitig gelegene Wohnung konnten rund 41% der für die Wärmebereitung nötige Energie in Zeiten mit Überschussstrom verschoben werden. Für die südseitig gelegene Wohnung ist der Anteil an Heizenergie deutlich geringer, da durch höhere solare Einstrahlung ein Großteil des Wärmebedarfs gedeckt werden kann. Mit WPS wäre es in der betrachteten Periode

theoretisch möglich, den gesamten Anteil an elektrischer Energie in Zeiten mit Überschussstrom aus Wind zu verschieben.

	Nord	Süd
Wärmeeintrag lt. Simulation [kWh]	135	11
Kosten Wärmeeintrag Max* [€]	10.0	0.8
Kosten Wärmebereitung ohne WPS [€]	8.2	0.8
Kosten Wärmebereitung mit WPS [€]	4.8	0.0

* Annahme, dass der gesamte Strom für den Betrieb der Wärmepumpe mit Kosten von 30 Cent/kWh abgerechnet wird
Tabelle 13: Übersicht über die nötigen Energiekosten der Wärmebereitung der beiden Wohneinheiten mit und ohne WPS

7 Interpretation und Ausblick

Die Ergebnisse aus den Vergleichssimulationen sind vielversprechend und zeigen, dass mittels prognosebasierter Regelung ein signifikanter Anteil der nötigen Energie für die Wärmebereitung und Zeiten von Überschussstrom verschoben werden kann. Das entwickelte Modell arbeitet konsistent und liefert plausible Ergebnisse.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die nordseitig orientierte Wohneinheit lt. Simulation ein Wärmeeintrag von 135 kWh nötig wäre. In der südseitig orientierten Wohnung liegt der Anteil deutlich niedriger, da die solaren Erträge höher sind. Für diese Wohneinheit liegt der nötige Wärmeeintrag bei nur 15 kWh für den betrachteten Zeitraum. Durch Aufstellung einer einfachen Energiebilanz des Gebäudes unter der Annahme, dass bei gleichen Außentemperaturen die Konvektions- und Lüftungsverluste in beiden Wohneinheiten annähernd gleich sind, konnten die Ergebnisse auf Plausibilität überprüft werden, die Wärmeeintrag durch die TAB und solare Einstrahlung in beiden Wohneinheiten die Wärmeverluste an die Umgebung abdecken.

Unterschiede zeigen sich zu den Monitoringdaten der erhobenen Wärmeströme. Für die südseitig ausgerichtete Wohneinheit werden laut Wärmemengenzähler 76 kWh im Beobachtungszeitraum an Wärme in die Wohnung geschickt. Laut Modellrechnung wären 11 kWh. Bei der nordseitigen Wohneinheit werden laut Monitoring 41 kWh an Wärme eingesetzt um die geforderte Temperatur zu halten. Das Modell geht hier von 135 kWh aus.

Der Unterschied zwischen Modell und Realität kann mehrere Ursachen haben. So sind z.B. Einflüsse der Nutzer:innen bzw. Eingriffe in die Regelung durch Nutzer:innen nicht im Modell abgebildet. Eine weitere Möglichkeit können Messungenauigkeiten oder Unstimmigkeiten im Messaufbau bzw. der Datenaufzeichnung sein. Vor allem bei Gebäuden mit guter thermischer Hülle und geringem Wärmeeintrag geraten handelsübliche Wärmemengenzähler an die Grenzen der Messgenauigkeit. Wärmeströme bei Temperaturspreizungen $< 2\text{K}$ können daher oftmals nur mit hoher Messgenauigkeit erhoben werden.

Weiters wurde im Modell die Integration von WPS untersucht. Dadurch wird das thermische Speicherpotential des Gebäudes genutzt, um Windspitzen in Form von Wärme einzulagern. Dafür wurde das Modell auf eine Kostenfunktion umgestellt und um die Nebenbedingung ergänzt, dass Windstrom, wenn laut Winddaten verfügbar, genutzt und in der Wärmepumpe verarbeitet werden soll. Dafür wird ein kurzfristiges Abweichen der Solltemperatur in Kauf genommen. Vor allem in der nordseitig gelegenen Wohnung ist ersichtlich, dass bei zeitlichem Vergleich des Wärmeeintrags dieser in Zeiten von Überschussstrom verschoben werden konnte.

Durch die maximale Lastverschiebung ist es möglich, bei hohem Wärmeeintrag (Referenz nordseitige Wohnung) bis zu 41% in Zeiten von Überschussstrom zu verschieben, während bei niedrigen Wärmeeinträgen (Referenz südseitige Wohnung) der gesamte Anteil an nötiger elektrischer Energie für die Wärmepumpe in Zeiten von Überschussstrom verschoben werden

konnte. Damit direkt einher geht eine Reduktion der Energiekosten, wenn davon ausgegangen wird, dass Überschussstrom keine oder kaum Gestehungskosten verursacht. Damit kann ein wichtiger Schritt zur Sicherung leistbaren Wohnens gesetzt werden.

Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Lastverschiebung, unter Berücksichtigung zukünftiger meteorologischer Rahmenbedingungen, in Zeiten von Überschussstrom möglich ist, ohne den Wohnkomfort zu beeinträchtigen. Potenzial für Optimierungen gibt es jedoch noch. So könnten noch weitere Anpassungen des Modells angestellt werden, wie etwa die Windgeschwindigkeit bei der Berechnung des konvektiven Wärmeverlustes an die Umgebung zu berücksichtigen. Weiterer Fokus liegt in den definierten Nebenbedingungen. So könnte bei der Kostenoptimierung der Börsenstrompreis oder die Einbindung von Strom aus Photovoltaik berücksichtigt werden. Als weitere Optimierungsmaßnahme könnten die Auswirkungen verschiedener Gewichtungsfaktoren bei der Kostenoptimierung untersucht werden. Damit könnte das Potenzial der Lastverschiebung eventuell noch vergrößert werden.

Abschließend lässt sich sagen, dass mit diesem Regelungsansatz die Nutzung von fluktuierender erneuerbarer Energie aus Wind oder Photovoltaik weiter erhöht wird. Nutzer:innen ziehen dabei den positiven Effekt, dass Energiekosten eingespart werden können, ohne auf Einschränkungen im Wohnkomfort verzichten zu müssen. Damit wird ein wichtiger Beitrag zu den gesetzten Klimazielen erreicht.

8 Quellen und Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

1. Treberspurg & Partner Architekten, "Wohnpark Wolfsbrunn und Sommerein," *Treberspurg & Partner Architekten*. <https://awarchitekten.at/portfolio/wohnbau-sommerein> (accessed Feb. 02, 2022).
2. K. Krec, "Konditionierung und Energiespeicherung im Passivhaus mittels thermischer Aktivierung von Stahlbetondecken," *Expertenforum Energiespeicher Beton*. 2017.
3. V. Quaschnig, *Regenerative Energiesysteme*, 7th ed. München: Hanser Verlag, 2011.
4. "Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) | Glas | Bauphysik | Baunetz_Wissen." <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/bauphysik/gesamtenergiedurchlassgrad-g-wert-159244> (accessed Jan. 31, 2023).
5. R. Pfluger, J. Schneiders, B. Kaufmann, and W. Feist, "Hochwärmedämmende Fenstersysteme: Untersuchung und Optimierung im eingebauten Zustand. Anhang zum Teilbericht A (Bauphysikalische Untersuchungen und Optimierung des Baukörperanschlusses). Teilbericht Passivhaus Institut.," *PHPP*, 2003, [Online]. Available: https://passiv.de/downloads/05_fenster_optimierung-baukoerperanschluss.pdf.
6. J. Cheon, J. Kim, J. Lee, K. Lee, and Y. Choi, "Development of Hardware-in-the-Loop-Simulation Testbed for Pitch Control System Performance Test," *Energies* 2019, Vol. 12, Page 2031, vol. 12, no. 10, p. 2031, May 2019, <https://doi.org/10.3390/EN12102031>.
7. N. Aquilah, H. B. Rijal, and S. A. Zaki, "A Review of Thermal Comfort in Residential Buildings : Comfort Threads and Energy Saving Potential," 2022.
8. T. & P. Architekten, "Doppelhaus Purkersdorf," *Treberspurg & Partner Architekten*. <https://www.treberspurg.com/projekt/doppelhaus-purkersdorf/> (accessed Feb. 06, 2023).
9. Mischek, "Grüner Lebensraum Kugelmanngasse 1A", Mischek GmbH. <https://www.mischek.at/blog/article/2019/07/18/gruener-lebensraum-kugelmanngasse-1a-fertigstellungsfotos> (accessed July 31, 2023).
10. IBA WIEN, "MGG²²", <https://www.iba-wien.at/projekte/projekt-detail/project/mgg22> (accessed July 31, 2023)
11. klimaaktiv, "Objekt des Monats 3/2021: Viertel hoch Zwei - Sozialer Wohnbau mit Bauteilaktivierung, Theresienfeld". <https://www.klimaaktiv.at/bauen-sanieren/gebaeude-in-oesterreich/objekt-des-monats-2021-3.html> (accessed July 31, 2023)
12. T. & P. Architekten, "VOLKSHILFE HAFEN," *Treberspurg & Partner Architekten*. <https://www.treberspurg.com/projekt/heiligenstaedter-strasse/> (accessed Feb. 06, 2023).
13. Treberspurg & Partner Architekten, "CAMPO BREITENLEE: PLUS-ENERGIE-QUARTIER ," *Treberspurg & Partner Architekten*. <https://www.treberspurg.com/projekt/campo-breitenlee-gemeinsam-wohnen/#&gid=1&pid=1> (accessed Feb. 06, 2023).
14. T. & P. Architekten, "Zukunftshaus Wolkersdorf," *Treberspurg & Partner Architekten*. <https://www.treberspurg.com/forschung/zukunftshaus-wolkersdorf/> (accessed Feb. 06, 2023).

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sektorale Aufteilung des Treibhausgasausstoßes im Jahr 2021 (Quelle: Umweltbundesamt)	9
Abbildung 2: Doppelhaus in Purkersdorf, das mit thermischer Bauteilaktivierung und prädiktiver Steuerung ausgestattet ist [8]	10
Abbildung 3: Wohnbau mit thermischer Bauteilaktivierung in der Kugelmanngasse 1A [9] ...	11
Abbildung 4: Wohnquartier Mühlgrundgasse MGG ²² im 22. Wiener Gemeindebezirk (© Manfred Seidl) [10]	11
Abbildung 5: Wohnquartier Viertel Hoch Zwei in Theresienfeld [11]	12
Abbildung 6: Volkshilfe Heiligenstädter Straße 172 [12]	13
Abbildung 7: Campo Breitenlee [13].....	14
Abbildung 8: ALPENLAND-ZUKUNFTSHAUS-WOLKERSDORF [14]	14
Abbildung 9: Wohnpark Wolfsbrunn und Sommerein, NÖ [1]	15
Abbildung 10: Forschungswohneinheiten aus dem Einreichplan	16
Abbildung 11: Konzept der prognosebasierten Regelung mit den ein- und austretenden Wärmeströmen. Vereinfachte Annahme: Ganzes Gebäude/ Wohneinheit als 1 Raum modelliert.....	17
Abbildung 12: Einfallswinkel Sonnenstrahlung auf geneigte Fläche [3]	20
Abbildung 13: Betriebspunkte einer Windturbine [6]	26
Abbildung 14: Übersicht Regelungskonzept	27
Abbildung 15: Außentemperaturverlauf der Heizperiode 2021/2022	33
Abbildung 16: Temperaturverlauf in der nordseitig gelegenen Wohnung in der Heizperiode 2021/2022	34
Abbildung 17: Temperaturverlauf in der südseitig gelegenen Wohnung in der Heizperiode 2021/2022	35
Abbildung 18: Wärmeeintrag durch das Heizsystem in die nordseitig gelegene Wohnung in der Heizperiode 2021/2022	36
Abbildung 19: Wärmeeintrag durch das Heizsystem in der südseitig gelegenen Wohnung in der Heizperiode 2021/2022	36
Abbildung 20: Detailbetrachtung Temperaturverlauf in der nordseitig gelegenen Wohnung ..	37
Abbildung 21: Detailbetrachtung Temperaturverlauf in der südseitig gelegenen Wohnung ..	37
Abbildung 22: Graphische Gegenüberstellung des simulierten Temperaturverlaufs und des simulierten Wärmeeintrags in der nordseitig gelegenen Wohnung ohne (oben) und mit (unten) WPS. Es ist zu erkennen, dass geringfügige Temperaturabweichungen vom Sollwert beim Betrieb mit WPS in Kauf genommen werden, dafür aber der Wärmeeintrag in Zeiten mit hohem Windstromanteil geschoben werden. Dies ist vor allem am 22.11.2022 und kurz vor 30.11.2021 zu erkennen.....	40
Abbildung 23: Verlauf der Windgeschwindigkeit im Betrachtungszeitraum und die solare Einstrahlung in die nordseitig gelegene Wohnung	41
Abbildung 24: Graphische Gegenüberstellung des simulierten Temperaturverlaufs und des simulierten Wärmeeintrags in der südseitig gelegenen Wohnung ohne (oben) und mit (unten) WPS. Für den betrachteten Zeitraum ergibt sich folgende Situation, dass der solare Eintrag in dieser Periode ausreicht, um die Temperaturanforderungen zu erfüllen. Für ein Glätten der	

Kurve wäre sogar eine Kühlung nötig, die als Nebenfunktion bei der Optimierung ausgeschlossen wurde. Es ist nur ein geringer Wärmeeintrag von 11 kWh nötig.	42
Abbildung 25: Verlauf der Windgeschwindigkeit im Betrachtungszeitraum und die solare Einstrahlung in die südseitig gelegene Wohnung	43

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: U-Werte für Außenwandflächen, Fenster und Gesamtgrundfläche.....	21
Tabelle 2: Zusammenfassung der Transmissionsverluste für die untersuchten Wohneinheiten	21
Tabelle 3: Transmissions und Lüftungsverluste der untersuchten Wohneinheiten	22
Tabelle 4: Transmissions- und Lüftungsverluste der untersuchten Wohneinheiten.....	22
Tabelle 5: Fensterflächen der Wohneinheiten der untersuchten Wohneinheiten.....	22
Tabelle 6: Aktivierte Flächen in den Wohneinheiten	24
Tabelle 7: Massen der TAB in den Wohneinheiten	24
Tabelle 8: Wichtige Baustoffe und deren spez. Wärmekapazitäten	25
Tabelle 9: Massen und spezifische Wärmespeicherkapazität der untersuchten Wohneinheiten	25
Tabelle 10: Startbedingungen Temperaturen.....	31
Tabelle 11: Wärmeströme der untersuchten Wohneinheiten für die Optimierung ohne WPS (Komfortoptimierung).....	38
Tabelle 12: Wärmeströme der untersuchten Wohneinheiten für die Optimierung mit WPS (Kostenoptimierung)	39
Tabelle 13: Übersicht über die nötigen Energiekosten der Wärmebereitung der beiden Wohneinheiten mit und ohne WPS	44

8.4 Nomenklatur

Latein

A_{AW}	Fläche Wand außenliegend	$[m^2]$
A_F	Fensterfläche	$[m^2]$
A_D	Fläche Geschossdecke	$[m^2]$
A_{GF}	Grundfläche	$[m^2]$
$C_{p,R}$	Wärmespeicherfähigkeit gesamter Raum	$[kJ/K], [kWh/K]$
$C_{p,TAB}$	Wärmespeicherfähigkeit thermisch aktivierte Decke	$[kJ/K], [kWh/K]$
$C_{p,Beton}$	spez. Wärmespeicherkapazität Beton	$[kJ/kgK]$
$C_{p,L}$	spez. Wärmespeicherkapazität Luft	$[kJ/kgK]$
$C_{p,Material}$	spez. Wärmespeicherkapazität des Baumaterials	$[kJ/kgK]$
$C_{Strom,i}$	Strompreis zum Zeitpunkt [i]	$[€/kWh]$
E_0	Maximale, direkte solare Einstrahlung in Österreich	$[W/m^2]$
$E_{0,dif}$	Maximale, diffuse solare Einstrahlung	$[W/m^2]$
E_{dif}	Diffuse solare Einstrahlung	$[W/m^2]$
E_{dir}	Direkte solare Einstrahlung	$[W/m^2]$
$E_{dir,gen}$	Direkte solare Einstrahlung auf der geneigten Ebene	$[W/m^2]$
E_{geS}	Gesamte solare Einstrahlung	$[W/m^2]$
f_{Bew}	Grad der Bewölkung	$[\%]$
f_+	Gewichtungsfaktor positive Temperaturabweichung	$[€/K^2]$
f_-	Gewichtungsfaktor negative Temperaturabweichung	$[€/K^2]$
g_{dif}	Durchlasskoeffizient Fenster diffuse Strahlung	$[-]$
g_{dir}	Durchlasskoeffizient Fenster direkte Strahlung	$[-]$
k	Faktor Transmissions- und Lüftungsverluste	$[W/K]$
k_L	Faktor Lüftungsverluste	$[W/K]$
k_T	Faktor Transmissionsverluste	$[W/K]$
$m^{Material}$	Masse Baustoff	$[kg]$
m_{TAB}	Masse Beton thermisch aktivierter Decken	$[kg]$
\dot{Q}_{Conv}	Wärmestrom durch Konvektion und Lüftung	$[W]$
\dot{Q}_{Dist}	Wärmestrom durch Störquellen	$[W]$
\dot{Q}_{Heiz}	Heiz- bzw. Kühlleistung	$[W]$
\dot{Q}_{Room}	Änderung der Wärme im Raum	$[W]$
\dot{Q}_{Solar}	Wärmestrom durch solare Einstrahlung	$[W]$
\dot{Q}_{TAB}	Wärmestrom zwischen thermischer Bauteilaktivierung und Raum	$[W]$
t	Zeit	$[s]$
Δt	Zeitintervall 1 Stunde	$[h]$
T_{out}	Außentemperatur	$[°C]$
$T_{R,i}$	Raumtemperatur zum Zeitpunkt [i]	$[°C]$
$T_{R,i+1}$	Raumtemperatur zum Zeitpunkt [i+1]	$[°C]$
T_{sp}	Solltemperatur im Raum	$[°C]$
$T_{TAB,i}$	Temperatur der thermisch aktivierten Decke zum Zeitpunkt [i]	$[°C]$
$T_{TAB,i+1}$	Temperatur der thermisch aktivierten Decke zum Zeitpunkt [i+1]	$[°C]$
U_{AW}	U-Wert Wand außenliegend	$[W/m^2K]$
U_F	U-Wert Fenster	$[W/m^2K]$
U_D	U-Wert Geschossdecke	$[W/m^2K]$
U_{GF}	U-Wert Bodenplatte/ Grundfläche	$[W/m^2K]$
V	Volumen Wohneinheit	$[m^3]$
v_{Wind}	Windgeschwindigkeit	$[m/s]$
x	Wärmestrom	$[W]$

Griechisch

α	Wärmeübergangskoeffizient Decke - Raum	$[W/m^2K]$
α_E	Abweichung der Ausrichtung der geneigten Fläche zur Nordachse	$[^\circ]$
α_S	Sonnenazimut-Winkel	$[^\circ]$
γ_E	Winkel der geneigten Fläche zur Horizontalen	$[^\circ]$
γ_S	Sonnenhöhe	$[^\circ]$
θ_{gen}	Sonnenwinkel zur geneigten Fläche	$[^\circ]$
ϑ_{out}	Außentemperatur	$[^\circ C]$
ϑ_R	Raumtemperatur	$[^\circ C]$
ϑ_{TAB}	Temperatur thermische Bauteilaktivierung	$[^\circ C]$
ρ_L	Dichte der Luft	$[kg/m^3]$
τ	Luftwechsel	$[1/h]$

Abkürzungen

COP	Coefficient of Performance
csv	comma separated value
MPC	Modellprädiktive Steuerung
TAB	Thermische Bauteilaktivierung
WPS	Wind Peak Shaving