

EINFLUSS VON STROMPREIS UND NETZENTGELT AUF DIE FLEXIBILITÄT DURCH WÄRMEPUMPEN IN WOHNGEBÄUDEN

Daniel Heidenthaler^{(*)1}, Michael Moltinger¹, Maximilian Lugmair¹, Klaus Prenninger¹

¹Department Design and Green Engineering, Salzburg University of Applied Sciences, Markt 136a, 5431 Kuchl, daniel.heidenthaler@fh-salzburg.ac.at

Kurzfassung: Die zunehmende Elektrifizierung des Gebäudesektors und der steigende Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien erhöhen den Bedarf an nachfrageseitiger Energieflexibilität. Wohngebäude mit Wärmepumpen bieten hierfür ein relevantes Potenzial, indem ihre thermische Masse als kurzzeitiger Energiespeicher genutzt wird. Diese Arbeit untersucht anhand einer simulationsbasierten Analyse den Einfluss dynamischer Strompreise und zeitvariabler Netzentgelte auf das Kosteneinsparpotenzial gebäudebasierter Energieflexibilität. Untersucht werden ein Einfamilien- und ein Mehrfamilienhaus mit effizienter Gebäudehülle. Die Energieflexibilität wird über eine einfache regelbasierte Steuerung mit variablem Temperatursollwert (21,5–22,5 °C) realisiert. Die Ergebnisse zeigen jährliche Kosteneinsparungen von 6,6 bis 25,5 % in Abhängigkeit vom gewählten Regelsignal und Gebäudetyp, wobei insbesondere zeitvariable Netzentgelte deutlich höhere Einsparungen ermöglichen als rein dynamische Strompreise. Gleichzeitig können erhöhte Lastspitzen auftreten. Dies sollte aus netztechnischer Sicht und bei der Implementierung entsprechender Regelstrategien berücksichtigt werden. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse das Potenzial von Energieflexibilität durch die Nutzung der thermischen Speichermassen von Gebäuden in Kombination mit Wärmepumpen zur gezielten Lastverschiebung und zur Unterstützung eines netzdienlichen Betriebs.

Keywords: Energieflexibilität, thermische Speichermassen, Lastverschiebung, preisbasiertes Regelsignal, dynamischer Strompreis, zeitvariables Netzentgelt

1 Einleitung

Die stattfindende Transformation der Energiesysteme—gekennzeichnet durch steigende Anteile fluktuierender erneuerbarer Energien, Sektorkopplung sowie die Elektrifizierung von Heizung und Kühlung in Gebäuden—erhöht den Bedarf an flexibler und reaktionsfähiger Erzeugung und Nachfrage erheblich. Flexibilitäten tragen dazu bei, die Systemstabilität zu sichern, Kosten zu senken und zuverlässige sowie resiliente Stromnetze zu gewährleisten. Während Flexibilitäten traditionell von konventionellen Kraftwerken bereitgestellt wurden, werden zunehmend dezentrale Ressourcen dafür eingesetzt. Gebäude haben sich in diesem Zusammenhang als vielversprechende Quelle für Flexibilitäten erwiesen.

Laut IEA EBC Annex 67 können energieflexible Gebäude ihren Energiebedarf und ihre gebäudeeigene Erzeugung aktiv an Nutzeranforderungen und die Bedürfnisse der Energieinfrastruktur anpassen [1]. Ahmed et al. [2] identifizieren verschiedene Ressourcen in Gebäuden, welche Flexibilitäten zur Verfügung stellen können. In der Praxis bedeutet dies

meist eine zeitliche Verschiebung thermischer Lasten mithilfe von Heizungs-, Klima- und Lüftungssystemen, häufig durch die Nutzung der thermischen Masse von Gebäuden als kurzfristigen Energiespeicher [2], [3]. Neben konventionellen thermischen Speichern können somit durch die gezielte Steuerung und Regelung von Wärmeabgabesystemen wie etwa Fußbodenheizungen oder Bauteilaktivierungen auch die thermischen Speichermassen aktiv angesteuert und genutzt werden. Diese kostengünstige Strategie ermöglicht Lastspitzenreduktion, Lastverschiebung und eine verbesserte Integration erneuerbarer Energien [4].

Energieflexibilität kann auch nach ihrem Zweck kategorisiert werden. Ahmed et al. [3] identifizieren vier grundlegende Flexibilitätstypen auf Basis von Änderungen im Gebäudebetrieb: Verschieben, Reduzieren, Erzeugen und Modulieren. Unter diesen ist die Lastverschiebung die am häufigsten umgesetzte Strategie [2], [5]. Zur Aktivierung und Nutzung solcher Flexibilität stehen verschiedene Regelungs- und Optimierungsstrategien zur Verfügung. Allgemein lassen sich drei Arten von Regelungsstrategien unterscheiden: manuelle Steuerung durch Endnutzer, automatisierte regelbasierte Steuerung oder fortgeschrittene Optimierungsverfahren (z. B. Model Predictive Control, MPC) [6].

Das zur Aktivierung von Flexibilität verwendete Steuersignal kann aus internen oder externen Quellen stammen: entweder als internes Signal des Gebäudeleitsystems, als direkte externe Steuerung (z.B. durch einen Netzbetreiber) oder als indirekter externer Anreiz, etwa ein dynamisches Energiepreis- oder CO₂-Intensitätssignal, auf das der lokale Regler reagiert und Flexibilitätsmaßnahmen auslöst [7]. Unter diesen Ansätzen sind preisbasierte Signale nach wie vor die am weitesten verbreitete Methode zur Aktivierung von Flexibilitäten [7].

Der Einsatz von Energieflexibilität in Gebäuden kommt einer Vielzahl von Akteuren entlang der energiewirtschaftlichen Wertschöpfungskette zugute [6]. Energiesystembetreiber, einschließlich Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern (TSO, DSO), profitieren von erhöhter Netzstabilität, reduzierten Lastspitzen und einer verbesserten Integration variabler erneuerbarer Energiequellen. Energieversorger und Aggregatoren können flexible Nachfrage und dezentrale Ressourcen nutzen, um den Systembetrieb zu optimieren und die Abhängigkeit von fossil befeuerter Spitzenlastherzeugung zu verringern, was sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile mit sich bringt. Auf Gebäude- und Quartiersebene profitieren Eigentümer und Nutzer von geringeren Energiekosten, einer höheren Eigennutzung vor Ort erzeugter erneuerbarer Energie, größerer Kontrolle über den Energieverbrauch sowie erheblichen Emissionsminderungen. Auch politische Entscheidungsträger und Regulierungsbehörden, etwa nationale Regierungen und die Europäische Union, ziehen Nutzen daraus, da Energieflexibilität zur Erreichung von Dekarbonisierungs- und Energiesicherheitszielen beiträgt; Initiativen wie der Smart Readiness Indicator (SRI) im Rahmen der EPBD unterstreichen ihre strategische politische Relevanz. Die wirksame Realisierung dieser Vorteile erfordert jedoch eine Abstimmung zwischen den Akteuren auf technischer, wirtschaftlicher und institutioneller Ebene, unterstützt durch geeignete politische und regulatorische Rahmenbedingungen, Marktmechanismen sowie eine aktive Einbindung der Nutzer.

Diese Arbeit untersucht anhand einer Simulationsstudie, wie dynamische Strompreise und zeitvariable Netzentgelte das Kosteneinsparpotenzial der Energieflexibilität von Gebäuden beeinflussen. Mithilfe einer einfachen regelbasierten Steuerung und Wärmepumpen zur

Sektorkopplung wird bewertet, wie Wohngebäude ihre thermische Masse nutzen können, um Betriebskosten zu senken und gleichzeitig Flexibilität für das übergeordnete Energiesystem bereitzustellen.

2 Methode

Diese Studie untersucht den Einfluss von Preissignalen auf die Energieflexibilität von Gebäuden mit Wärmepumpen durch Nutzung der thermischen Massen als Speicher. In vorliegendem Kapitel werden erst die zugrundeliegenden Gebäude und Simulationsmodelle beschrieben, sowie anschließend die Regelung und Quantifizierung der Energieflexibilität.

2.1 Archetypen und Simulationsmodelle

Die Simulationen basieren auf einem automatisierten Gebäudebestands-Modellierungstool SimuDis [8]. Dieses Modellierungstool beinhaltet detaillierte Modelle typischer Wohngebäude, kategorisiert in mehrere Archetypen, auf Basis welcher physikalische Simulationsmodelle in der Umgebung IDA ICE erstellt und für verschiedene Szenarien untersucht werden können. Der Gebäudebestand wird dabei basierend auf Baualtersklassen (9 Baualtersklassen), Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus) sowie Zustand (sanirt, unsanirt) in mehrere, für den österreichischen Gebäudebestand repräsentative Archetypen eingeteilt. Für Gegenständliche Untersuchung werden zwei repräsentative Wohngebäude mit effizienter thermischer Gebäudehülle herangezogen, nämlich ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus, die nach 2010 errichtet wurden (siehe [9] für weitere Details). Für jeden dieser Archetypen werden in IDA ICE detaillierte physikalische Simulationsmodelle auf Basis der folgenden Eingangsgrößen erstellt:

- Konstruktionen und Materialien
- Flächen der Bauteile und Fenster (thermische Gebäudehülle als auch innenliegende Bauteile)
- Wärmeabgabesystem
- Nutzer / Bewohner
- Haushaltsgeräte
- Luftwechselrate
- Anzahl der Geschosse
- Gebäudevolumen
- Ausrichtung
- Größe Pufferspeicher

Die beiden Gebäude sind mit einer Fußbodenheizung und einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ausgestattet.

2.2 Energieflexibilitätsstrategie

Für jeden Gebäudetyp wird ein Referenzfall ohne Flexibilität sowie mehrere Flexibilitätsszenarien simuliert, bei denen die Stromkosten als Regelsignal dienen. Diese

Stromkosten setzen sich aus dem Arbeitspreis und dem Netzentgelt zusammen, die je nach Szenario entweder dynamisch bzw. zeitvariabel oder als feste Durchschnittswerte berücksichtigt werden. Die Energieflexibilität wird durch eine Anpassung des Temperatursollwerts des Gebäudes umgesetzt. Ein vorab definierter Grenzwert unterscheidet Hochpreisphasen von Niedrigpreisphasen. In vorliegendem Fall ist der Grenzwert mit 25 % definiert (d.h. 25 % der Stunden des jeweiligen Tages liegen die Stromkosten unter dem Grenzwert) und wird jeden Tag basierend auf den Stromkosten neu berechnet. Der Regler erhöht den Sollwert in Stunden mit besonders niedrigen Stromkosten, um die thermische Masse des Gebäudes „aufzuladen“, und senkt ihn in Hochpreiszeiten ab, wodurch der Stromverbrauch in weniger günstigen Preisphasen reduziert wird. Die Sollwerte werden stündlich aktualisiert, wobei der thermische Komfort durch die Einhaltung der Mindesttemperatur unabhängig vom Preissignal gewährleistet bleibt. Der Simulationszeitraum umfasst die Heizsaison vom 1. September 2024 bis zum 1. Juni 2025.

Abbildung 1 zeigt exemplarisch für eine Winterwoche den Sollwertverlauf des Flexibilitätsszenarios als Ergebnis des variablen Signals (Stromkosten) sowie den zugehörigen Grenzwert.

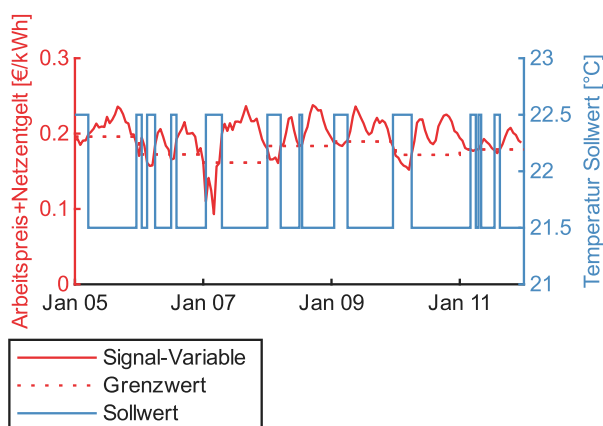


Abbildung 1: Regelsignal und daraus resultierender Temperatur-Sollwert für eine exemplarische Winterwoche

Um trotz der Eingriffe in die Raumtemperatur hohen Komfort zu gewährleisten, wird in den Flexibilitätsszenarien ein variabler Temperatursollwert in einem schmalen Bereich von 21,5–22,5 °C implementiert, während im Referenzszenario gemäß ÖNORM B 8110-6 [10] ein fester Temperatursollwert von 22 °C angenommen wird. Als Regelgröße dient die Lufttemperatur, geregelt wird über einen PI-Regler. Trotz statischem Sollwert im Referenzszenario können durch die Trägheit des Systems, die Regelung und andere äußerliche Einflüsse wie etwa Solarstrahlung dennoch Schwankungen der Raumlufttemperatur auftreten.

Die dynamischen Strompreise basieren auf Day-Ahead-Marktdaten der EXAA [11], die im Voraus von der Austrian Power Grid AG (APG) veröffentlicht und daher für eine regelbasierte Steuerung herangezogen werden können. Die Marktpreise unterliegen kurzfristigen Schwankungen und bieten daher potenzielle Kosteneinsparungen, wenn sie in der Regelstrategie eines Gebäudes berücksichtigt werden. Die zeitvariablen Netzentgelte folgen einer dreistufigen Struktur, die am deutschen Regulierungsmodell orientiert ist [12], [13]. Dabei wird zwischen günstigen Nachtstunden (2,6 ct/kWh von 00:00–04:00), Standardzeiten am Tag (8,6 ct/kWh von 04:00–17:00 und 20:00–24:00) sowie einer kurzen Hochpreisphase am frühen Abend (12,5 ct/kWh von 17:00–20:00) unterschieden. Szenarien mit festen Preisen bzw.

festen Netzentgelten werden durch die Durchschnittswerte über den Simulationszeitraum abgebildet. Insgesamt werden drei Flexibilitätsszenarien (F1, F2, F3) mit unterschiedlichen Preissignalen mit dem Referenzszenario (R) verglichen:

- Szenario F1: Dynamischer Strompreis, festes Netzentgelt
- Szenario F2: Dynamischer Strompreis, zeitvariables Netzentgelt
- Szenario F3: Fester Strompreis, zeitvariables Netzentgelt

Zur Quantifizierung der Energieflexibilität wird die relative Kostenreduktion ΔC_{el} gemäß folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta C_{el} [\%] = 100 * \left(1 - \frac{C_{el,flex}}{C_{el,ref}} \right) \quad 1$$

Dabei sind $C_{el,flex}$ die gesamten jährlichen Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe im Flexibilitätsszenario [€/a] und $C_{el,ref}$ die gesamten jährlichen Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe im Referenzszenario [€/a].

Die Stromkosten für das Flexibilitätsszenario $C_{el,flex}$ werden wie folgt berechnet:

$$C_{el,flex} = \sum_{t=1}^n P_{el,t} * E_{HP,el,flex,t} \quad 2$$

wobei $P_{el,t}$ die Stromkosten [€/kWh] zum Zeitpunkt t und $E_{HP,el,flex,t}$ der Stromverbrauch [kWh] der Wärmepumpe im Flexibilitätsszenario zum Zeitpunkt t ist.

Die Stromkosten im Referenzszenario $C_{el,ref}$ werden wie folgt berechnet:

$$C_{el,ref} = \bar{P}_{el} * \sum_{t=1}^n E_{HP,el,ref,t} \quad 3$$

wobei $E_{HP,el,ref,t}$ der Stromverbrauch [kWh] der Wärmepumpe im Referenzszenario zum Zeitpunkt t ist. Die durchschnittlichen Stromkosten über die betrachtete Periode \bar{P}_{el} wird dabei wie folgt berechnet:

$$\bar{P}_{el} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n P_{el,t} \quad 4$$

In diesem Fall besteht das Ziel der Regelstrategie darin, durch die Implementierung eines variablen, preissignalbasierten Temperatursollwerts die Kosten für die Raumheizung zu senken. Die Kostenreduktion stellt daher den geeigneten Indikator zur Quantifizierung der Energieflexibilität dar.

3 Ergebnisse

In Abbildung 2 wird für eine beispielhafte Winterwoche die Heizleistung der beiden Gebäudetypen in den drei Flexibilitätsszenarien dargestellt, ebenso wie der jeweilige Temperatursollwert, der sich aus dem Stromkostensignal ergibt. Die verschiedenen Signale zeigen, dass die größten Stromkostenschwankungen bei einer Kombination aus dynamischem Strompreis und variablem Netzentgelt auftreten, während der durchschnittliche Strompreis in Verbindung mit einem zeitvariablen Netzentgelt das regelmäßigste Signal aufweist.

Zusätzlich zeigt die Abbildung die Differenz der Heizleistung zwischen dem jeweiligen Flexibilitätsszenario mit variablem Temperatursollwert und dem Referenzszenario mit einer konstanten Raumlufttemperatur von 22 °C. Grüne Flächen kennzeichnen eine erhöhte Heizleistung, während rote Flächen eine Reduktion der Heizleistung im Flexibilitätsszenario im Vergleich zum Referenzszenario darstellen. Es wird deutlich, dass die unterschiedlichen Signale zu ausgeprägten Lastverschiebungen führen. Gleichzeitig ist erkennbar, dass die flexible Regelstrategie teilweise auch deutlich höhere Leistungsspitzen verursachen kann, insbesondere beim Einfamilienhaus.

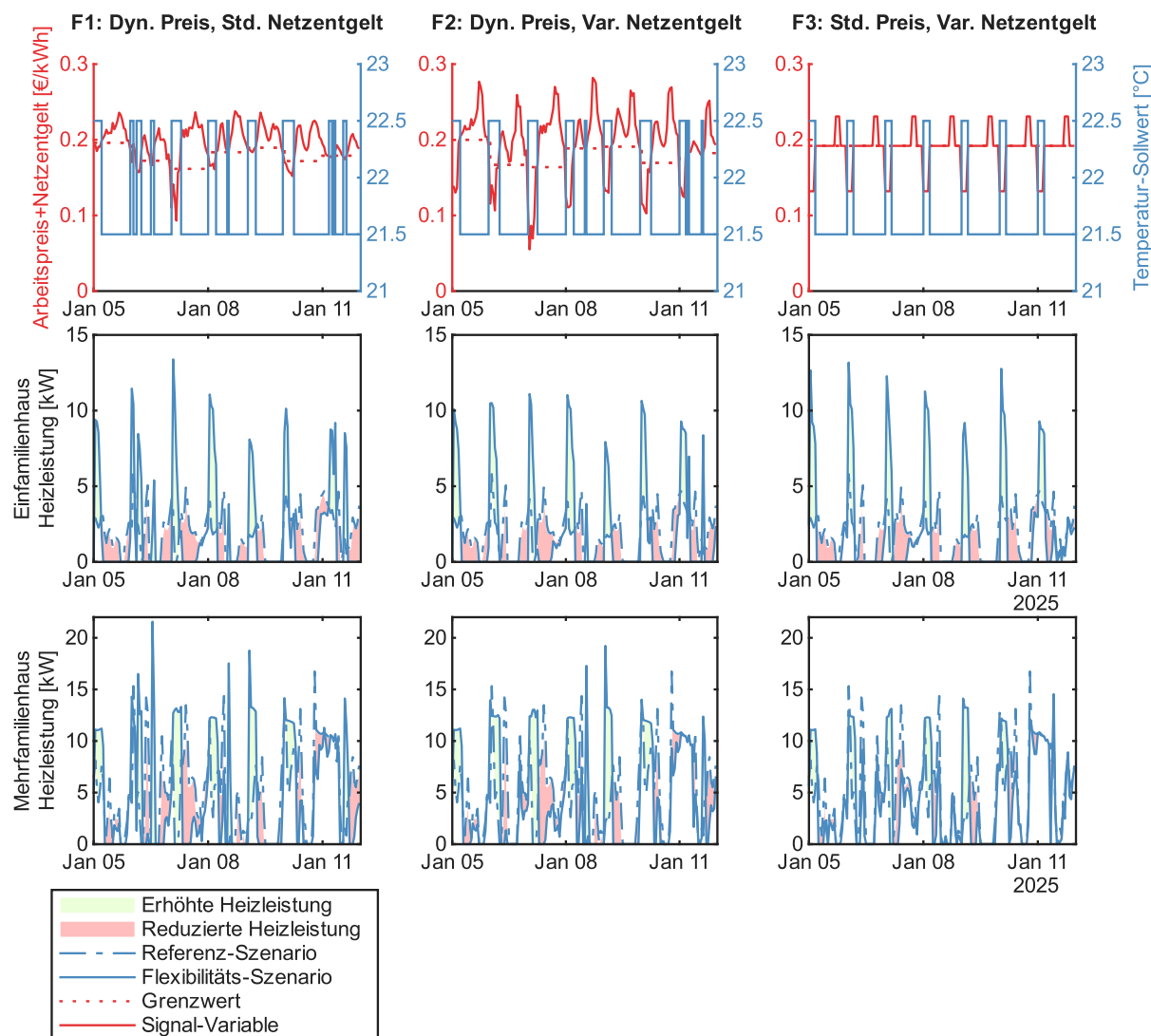


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen variablem Temperatursollwert und resultierender Heizleistung in drei Flexibilitätsszenarien für die beiden Gebäudetypen Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus, beispielhafte Winterwoche

Die Ergebnisse in Abbildung 3 zeigen, dass das Kosteneinsparpotenzial ΔC_{el} der Energieflexibilität stark von der Art des Preis- und Netzentgeltsignals abhängt. Szenarien, die ausschließlich auf dynamischen Strompreisen basieren, erzielen die geringsten Einsparungen. Die kurzfristige Volatilität der Marktpreise führt zu häufigen Änderungen des Temperatursollwerts und damit zu vielen Ein- und Ausschaltzyklen der Wärmepumpe. Demgegenüber weisen Szenarien mit zeitvariablen Netzentgelten deutlich höhere Einsparungen auf, da die Tarifstruktur vorhersehbare Niedrigpreisfenster schafft, in denen das Gebäude gezielt vorgeheizt werden kann. Dieses strukturierte Signal ermöglicht es der

regelbasierten Steuerung, Lasten effektiver zu verschieben, und zeigt, dass selbst einfache Regelstrategien von gut gestalteten Tarifstrukturen profitieren können.

Für die Szenarien F2 und F3 erzielen Einfamilienhäuser höhere Einsparungen als Mehrfamilienhäuser, während in Szenario F1 das Mehrfamilienhaus eine höhere Einsparung erzielt. In diesem Szenario weist das Mehrfamilienhaus zudem eine stärkere Reduktion des Stromverbrauchs der Wärmepumpe auf als eine entsprechende Reduktion der Stromkosten C_{el} . Dies deutet darauf hin, dass es der Regelung in diesem Szenario nicht gelingt, den Stromverbrauch gezielt in Niedrigpreiszeiten zu verlagern und somit die effektiven Kosten pro kWh zu senken. Interessanterweise zeigen die Simulationen zudem eine insgesamt höhere Effizienz der Wärmepumpe in den Flexibilitätsszenarien (in Szenario F3 im Einfamilienhaus beispielsweise verbraucht die Wärmepumpe 7.1 % weniger Strom, während 0.7 % mehr Wärme erzeugt wird), was darauf hindeutet, dass die Wärmepumpe während der Vorheizphasen unter günstigeren Betriebsbedingungen arbeitet.

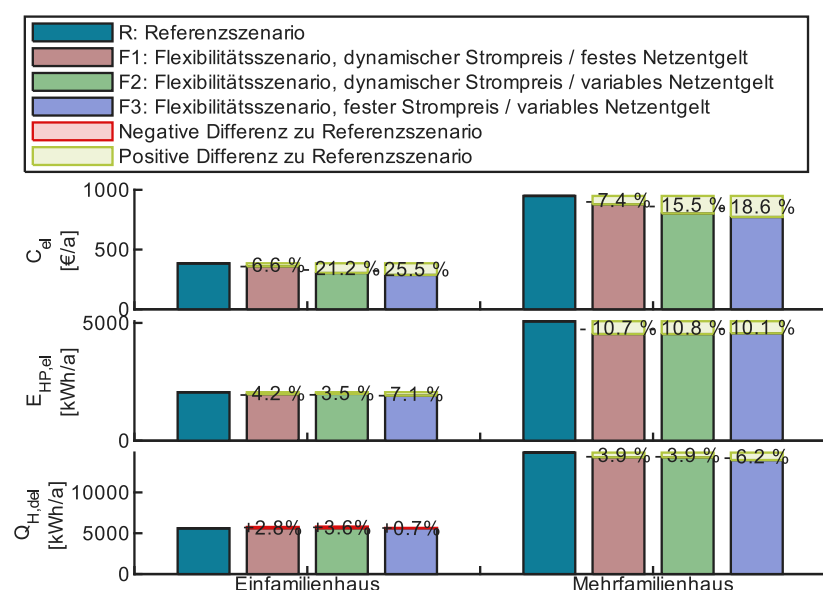


Abbildung 3: Jährliche Stromkosten C_{el} , Stromverbrauch der Wärmepumpe $E_{HP,el}$ und gelieferte Wärmemenge $Q_{H,del}$ je Gebäudetyp und Flexibilitätsszenario im Vergleich zum Referenzszenario

Um einen klareren Einblick in die Ursachen der Kosteneinsparungen sowie in die Funktionsweise der implementierten Flexibilitätsregelung zu erhalten, ist eine detaillierte Betrachtung der resultierenden Temperaturen in den einzelnen Zonen hilfreich. Das Simulationsmodell bildet dabei je Geschoss eine Zone ab. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen die Raumlufttemperaturen der einzelnen Zonen für eine beispielhafte Winterwoche in den jeweiligen Szenarien, getrennt nach Einfamilienhaus (Abbildung 4) und Mehrfamilienhaus (Abbildung 5).

Für das Einfamilienhaus zeigt sich, dass in den Flexibilitätsszenarien trotz des insgesamt reduzierten Stromverbrauchs der Wärmepumpe im Erdgeschoss höhere Raumlufttemperaturen auftreten als im Referenzszenario. Die untere Grenztemperatur von 21,5 °C wird dabei zu keinem Zeitpunkt erreicht. Im ersten Obergeschoss hingegen schwankt die Raumlufttemperatur stärker innerhalb des vorgegebenen Temperaturbereichs, so dass die untere Grenztemperatur häufiger erreicht wird. Eine mögliche Ursache hierfür liegt in der Konzipierung des Wärmeabgabesystems: Während das Erdgeschoss von unten mittels Fußbodenheizung beheizt wird und zusätzlich an eine darüberliegende, konditionierte Zone

angrenzt, ist das Obergeschoss stärker exponiert und weist höhere Wärmeverluste nach oben auf. Die tagsüber auftretenden Temperaturspitzen sind auf solare Einstrahlung zurückzuführen. Infolgedessen wird die obere Grenztemperatur in allen Szenarien zeitweise überschritten.

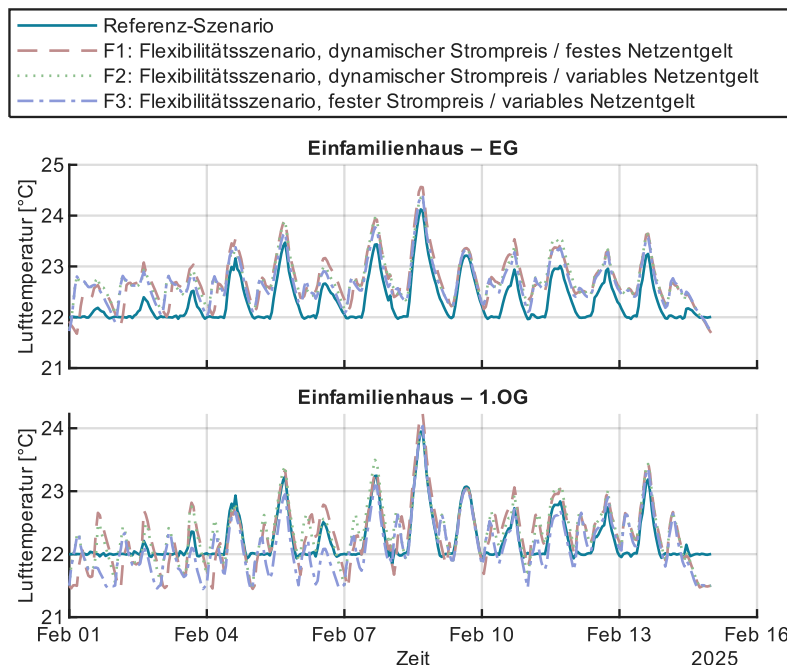


Abbildung 4: Lufttemperatur der einzelnen Zonen im Vergleich je Szenario - Einfamilienhaus, beispielhafte Winterwoche

Für das Mehrfamilienhaus zeigt sich ein differenziertes Bild. In der Erdgeschosszone liegen die Raumlufttemperaturen in den Flexibilitätsszenarien ebenfalls innerhalb des vorgegebenen Temperaturbereichs, erreichen jedoch häufiger die untere Grenztemperatur. Im ersten Obergeschoss tritt in allen Szenarien eine leichte Überhitzung auf, sodass die mittlere Raumlufttemperatur deutlich über dem vorgegebenen (mittleren) Sollwert von 22 °C liegt. Mögliche Ursachen hierfür sind einerseits solare Gewinne und andererseits die angrenzenden konditionierten Zonen im Erdgeschoss und im zweiten Obergeschoss, wodurch die Wärmeverluste in dieser Zone deutlich reduziert sind.

Im zweiten Obergeschoss zeigt sich hingegen, dass die Raumlufttemperaturen in den Flexibilitätsszenarien überwiegend unter 22 °C liegen und meist nahe der unteren Grenztemperatur von 21,5 °C verbleiben. Die hier beobachteten Kosteneinsparungen sind folglich weniger auf eine zeitliche Verschiebung der Lasten in günstigere Zeitfenster zurückzuführen, sondern zumindest in Teilen auf einen insgesamt reduzierten Energieverbrauch im Vergleich zum Referenzszenario. Diese Zone erfordert daher eine Anpassung der Regelstrategie, beispielsweise durch eine Erhöhung des Schwellenwerts zur Identifikation günstiger Zeiträume über das 25-%-Quantil hinaus, um ein ausreichend großes Zeitfenster zur Beheizung und zur Aufrechterhaltung einer durchschnittlichen Raumlufttemperatur von 22 °C sicherzustellen.

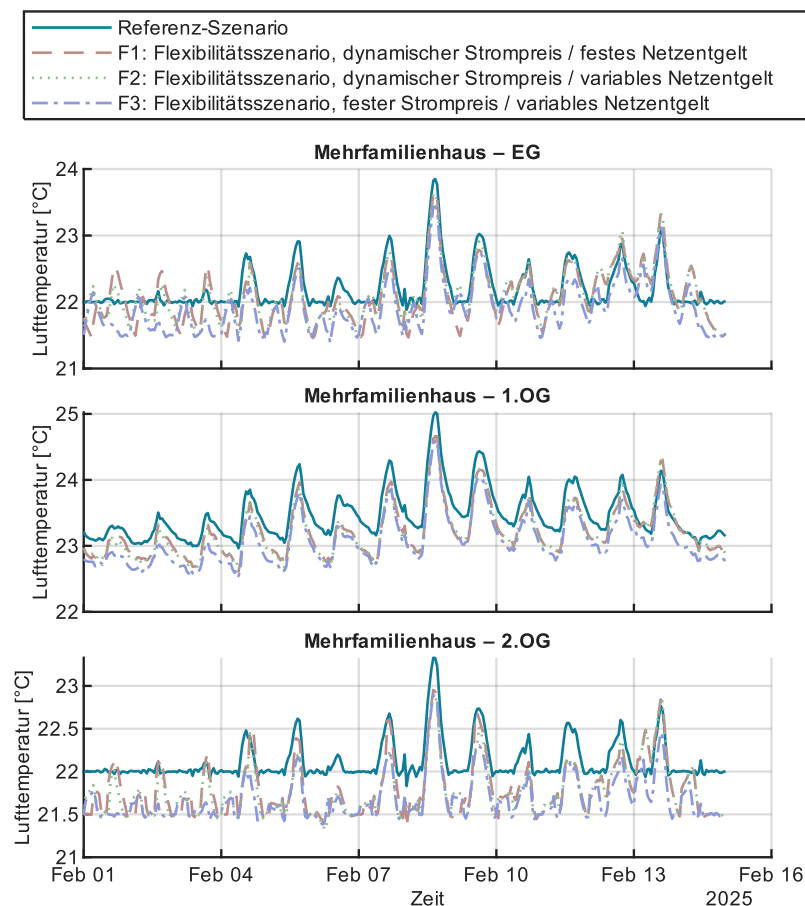


Abbildung 5: Lufttemperatur der einzelnen Zonen im Vergleich je Szenario - Mehrfamilienhaus, beispielhafte Winterwoche

4 Conclusio

Diese Arbeit untersucht den Einfluss dynamischer Strompreise und zeitvariabler Netzentgelte auf das Kosteneinsparpotenzial der Energieflexibilität in Wohngebäuden mit Wärmepumpen mithilfe einer simulationsbasierten Analyse. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass insbesondere variable Netzentgelte ein wirkungsvoller Hebel zur Aktivierung von Gebäudeflexibilität sind. Selbst bei Anwendung einer einfachen regelbasierten Steuerung und innerhalb eines engen Komforttemperaturbereichs können Wohngebäude den Verbrauch gezielt in wirtschaftlich günstigere Zeiträume verlagern und damit messbare Kosteneinsparungen erzielen.

Die Simulationen zeigen jährliche Kosteneinsparungen von 6,6 bis 25,5 %, wobei Einfamilienhäuser im Vergleich zu Mehrfamilienhäusern das größere Einsparpotenzial aufweisen. Dies unterstreicht die Bedeutung gebäudespezifischer Eigenschaften wie thermische Masse, Zonierung und Wärmeverluste für die erfolgreiche Nutzung von Energieflexibilität. Besonders hervorzuheben ist, dass Szenarien mit zeitvariablen Netzentgelten deutlich höhere und stabilere Einsparungen ermöglichen als solche, die ausschließlich auf dynamischen Strompreisen basieren. Strukturierte und vorhersehbare Tarifsignale schaffen verlässliche Niedrigpreisenster, die von einfachen Regelstrategien effizient genutzt werden können.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass Energieflexibilität häufig mit einem erhöhten Energieverbrauch einhergeht. In einzelnen Szenarien steigt der Gesamtstromverbrauch, etwa durch das Einspeichern von Energie während zusätzlicher Vorheizphasen, wenngleich dennoch Kosteneinsparungen realisiert werden. Darüber hinaus kann die flexible Betriebsweise neue, teils höhere Lastspitzen verursachen, insbesondere bei Einfamilienhäusern, was aus netztechnischer Sicht berücksichtigt werden muss.

Die Analyse der zonalen Raumtemperaturen zeigt zudem, dass eine einheitliche Regelstrategie nicht für alle Gebäude und Zonen gleichermaßen geeignet ist. Insbesondere in Mehrfamilienhäusern mit unterschiedlich exponierten Zonen ist eine Anpassung der Regelparameter erforderlich, um Komfortverluste zu vermeiden und Flexibilität gezielt dort zu aktivieren, wo sie tatsächlich wirtschaftlich und energetisch sinnvoll ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass variable Netzentgelte in Kombination mit einfachen, robusten Regelstrategien ein großes Potenzial zur Erschließung von Energieflexibilität im Gebäudebereich bieten. Für eine breite und systemdienliche Umsetzung sind jedoch gebäudespezifisch angepasste Regelstrategien sowie eine sorgfältige Ausgestaltung von Tarif- und Anreizstrukturen notwendig, um unerwünschte Effekte wie erhöhte Lastspitzen zu vermeiden und sowohl ökonomische als auch netztechnische Vorteile zu maximieren.

5 Danksagungen

Diese Forschung wird aus Mitteln des Landes Salzburg im Rahmen des „Zentrum Alpines Bauen“, sowie aus Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus (BMWET) im Rahmen des Programms „FH-Forschung für die Wirtschaft 2024“ gefördert und durchgeführt.

6 Literatur

- [1] S. Ø. Jensen *et al.*, "IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings," *Energy and Buildings*, Jg. 155, S. 25–34, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.08.044.
- [2] B. Ahmed, A. Ahmed, H.-N. Zhang, X.-B. Li, K.-Y. Qu und F.-C. Li, "Characterization, quantification and application of energy flexibility in office building: A comprehensive review," *Energy and Buildings*, Jg. 347, S. 116306, 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.116306.
- [3] J. Heier, C. Bales und V. Martin, "Combining thermal energy storage with buildings – a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 42, S. 1305–1325, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.031.
- [4] J. Lind, E. Möllerström, H. Averfalk und F. Ottermo, "Energy flexibility using the thermal mass of residential buildings," *Energy and Buildings*, Jg. 301, S. 113698, 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113698.
- [5] H. Li, Z. Wang, T. Hong und M. A. Piette, "Energy flexibility of residential buildings: A systematic review of characterization and quantification methods and applications," *Advances in Applied Energy*, Jg. 3, S. 100054, 2021, doi: 10.1016/j.adapen.2021.100054.

- [6] R. Li *et al.*, "Ten questions concerning energy flexibility in buildings," *Building and Environment*, Jg. 223, S. 109461, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109461.
- [7] H. Li *et al.*, "Data-driven key performance indicators and datasets for building energy flexibility: A review and perspectives," *Applied Energy*, Jg. 343, S. 121217, 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121217.
- [8] D. Heidenthaler *et al.*, "Automated energy performance certificate based urban building energy modelling approach for predicting heat load profiles of districts," *Energy*, Jg. 278, S. 128024, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128024.
- [9] D. Heidenthaler und M. Leeb, "Trends in energy performance certificate data: A comparative study of building stock characteristics," in *Proceedings of BauSim 2024: 10th Conference of IBPSA-Germany and Austria*, 2024, doi: 10.26868/29761662.2024.37.
- [10] *Thermal insulation in building construction - Part 6-1: Principles and verification methods - Heating demand and cooling demand*, ÖNORM B 8110-6-1, Austrian Standards International, Wien, Jan. 2019.
- [11] Austrian Power Grid AG. "EXAA spot market prices." Zugriff am: 27. November 2025. [Online.] Verfügbar: <https://markttransparenz.apg.at/markt/Markttransparenz/Uebertragung/EXAA-Spotmarkt>
- [12] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. "Beschluss der Bundesnetzagentur: BK8-22/010-A." Zugriff am: 25. November 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK8-GZ/2022/2022_4-Steller/BK8-22-0010/BK8-22-0010-A_Festlegung_Download.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- [13] InnoCharge GmbH. "Branchenportal für variable Netzentgelte." Zugriff am: 26. November 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.variable-netzentgelte.de/>