

18. Symposium Energieinnovation, 14.-16.02.2024

Modellierung des Wärmesektors und dessen Flexibilität für Simulationen gekoppelter Energiesysteme

Natalia Luna-Jaspe
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-
Nürnberg



Inhalt

1. Einleitung und Motivation
2. Flexibilisierung von Wärmenachfragen
3. Modellierungsansatz
 - Wärmeverbraucher
 - Flexibilität durch Nutzung der thermische Gebäudemasse
 - Optimierung von aggregierten Wärmenachfragen
4. Ergebnisse
5. Zusammenfassung und Ausblick



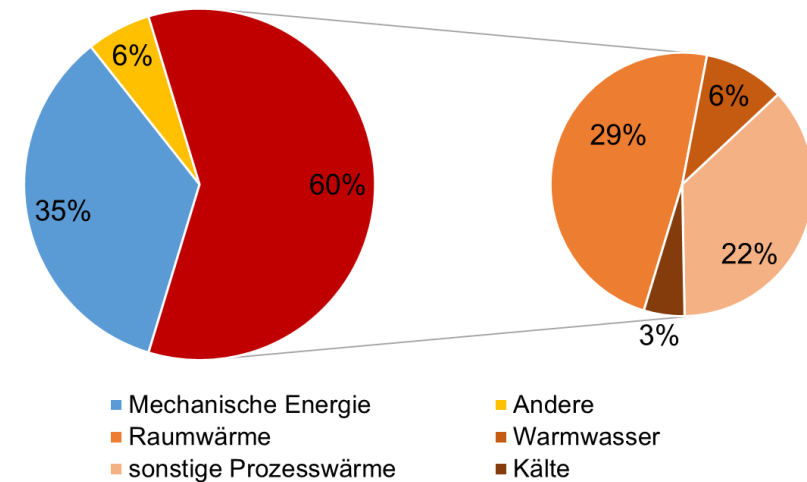
Einleitung und Motivation

- 59% der Endenergie wird in Deutschland als Wärme verbraucht [1]
- Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Wärmeversorgung beträgt nur 17,4% [1]

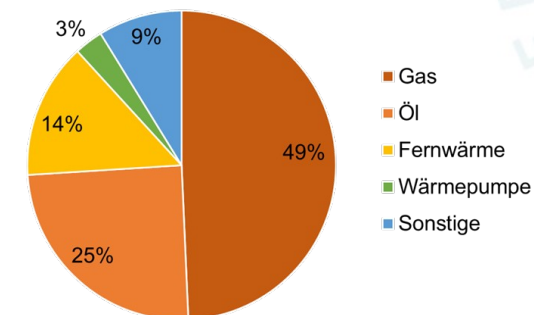
→ Um die deutsche (europäische) Energiewende erfolgreich umzusetzen muss der Wärmesektor defossilisiert werden

- Wärmepumpen sind eine Schlüsseltechnologie zur Elektrifizierung des Wärmesektors
- Ebenfalls Elektrifizierung in anderen Sektoren: Herausforderung für elektrische Netze und Bedarf an Flexibilität, um Lastspitzen zu reduzieren und fluktuierende Erzeugungsspitzen zu integrieren

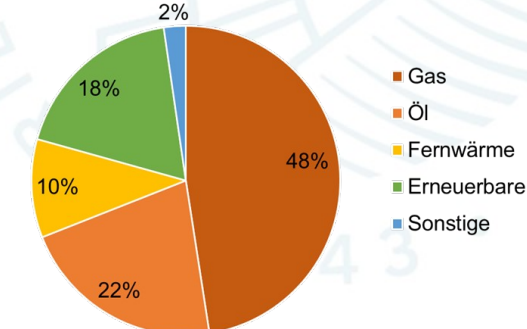
Endenergieverbrauch in Deutschland 2021



Beheizungsstruktur Wohnungsbestandes
42,9 Mio. Wohnungen



Wärmeverbrauch für Heizung
514 TWh



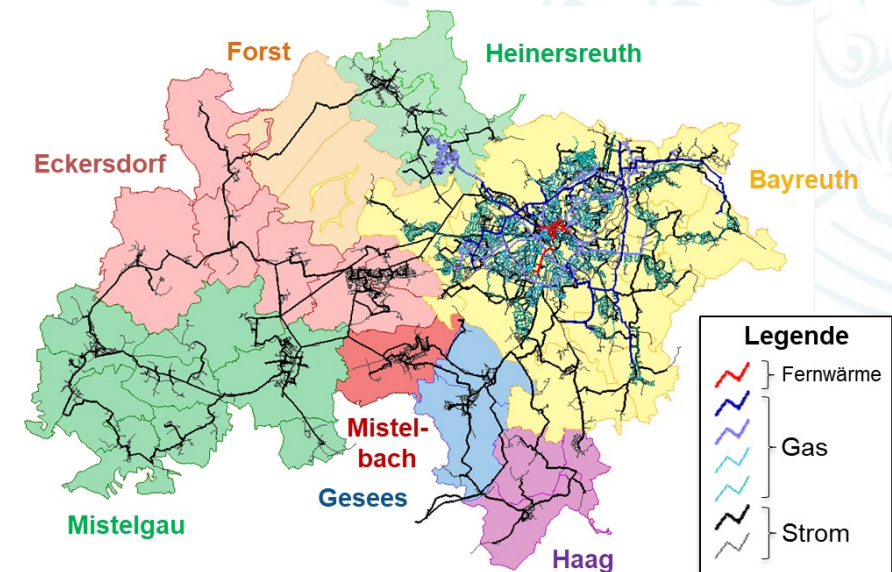
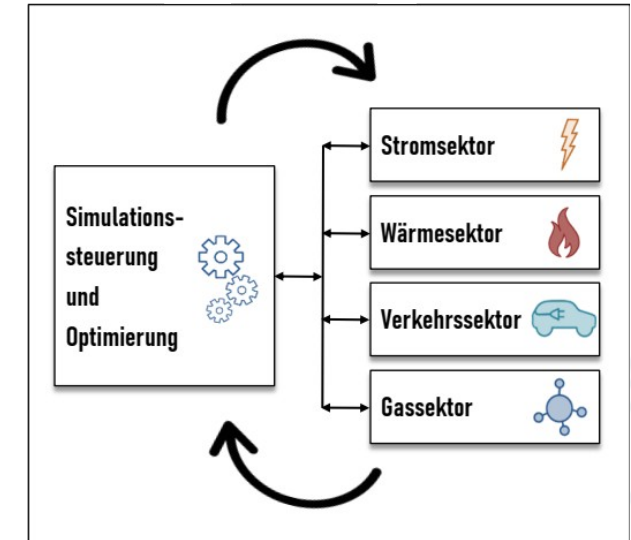
[1] BDEW Bundesverband Energie- und Wasserwirtschaft e.v.

Einleitung und

Motivation

- Wie kann das Energiesystem flexibilisiert werden und optimal betrieben werden?
- Wie können die verschiedenen Sektoren zur Flexibilisierung beitragen?
- Welches Flexibilitätspotential stellen Wohngebäude und die Nutzung der thermischen Gebäudemasse dar?
 - Forschungsprojekt ESM-Regio soll diese Fragen beantworten

- Betrachtung des Energiesystems der Stadt Bayreuth
- Sektoren Strom, Wärme, Gas und Verkehr
- Betriebsoptimierungssimulationen
- Modellierung, Simulation und Analyse von Flexibilitätspotentialen in allen Sektoren

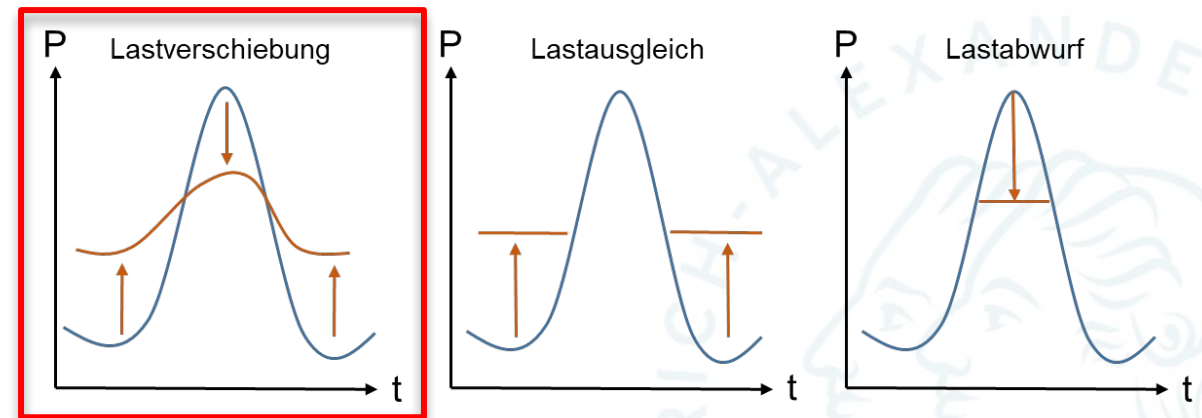


Flexibilisierung von

Wärmenachfragen

• Demand side management und demand side response

- Je nach Szenario (Einzelverbraucher, Netzbetreiber) unterschiedliche Ziele
- Perspektivisch stellen die Wärmenachfragen von Wohngebäuden eine Möglichkeit zur Lastverschiebung dar
- Einflussparameter: Gebäudeparameter
 - Wärmedurchgangskoeffizient
 - Wärmekapazität
 → Abhängig von den Baumaterialien, Sanierungszustand, Baujahrperiode



Bewertung von Flexibilitätsmaßnahmen der

Wärmemachfrage

Drei Kategorien: Leistungsbezogen, Energiebezogen, Sonstige (beispielsweise Kosten, A

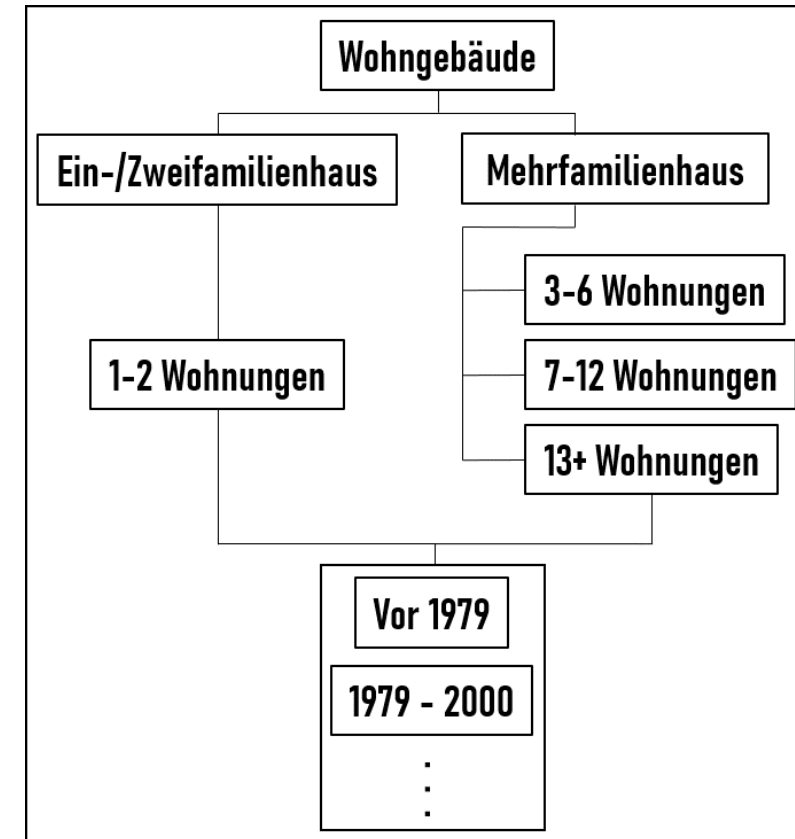
| Bewertungskriterium | Beschreibung | Kategorie |
|--------------------------------|---|------------------|
| Maximale Leistungsflexibilität | Die maximale Laststeigerung oder -senkung, die das System zu einem bestimmten Zeitpunkt zulässt | Leistungsbezogen |
| mittlere Leistungsflexibilität | Die durchschnittliche Leistungsänderung, die das System innerhalb seiner Grenzen ermöglicht | Leistungsbezogen |
| Verschiebungspotential | Die Verschiebung des Verbrauchs von einem Zeitintervall zu einem anderen | Energiebezogen |
| Kosteneinsparungen | Die Auswirkung der Flexibilität auf die Kosten | Sonstige |



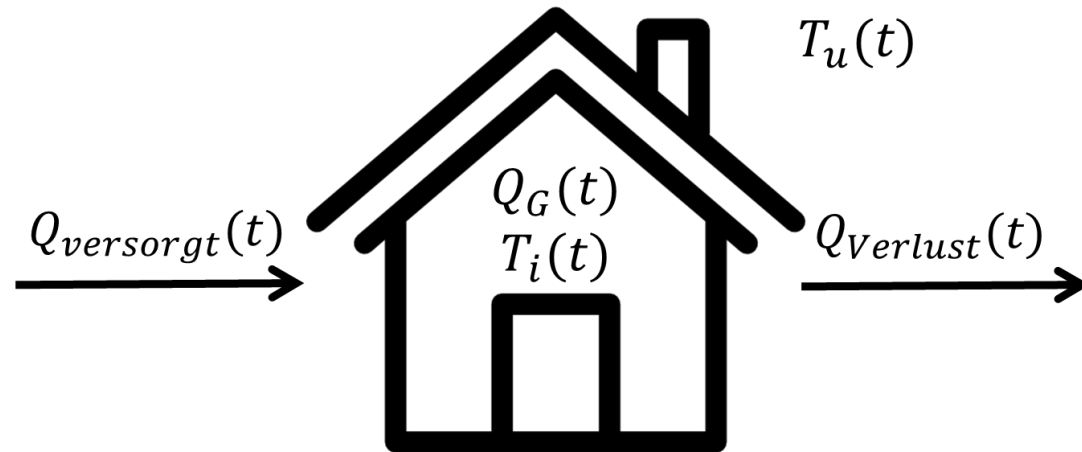
Modellierungsansatz: Wärmeverbraucher und

24 Kategorien für Gebäudetypen
beschreiben den Gebäudebestand

- Ergeben sich aus der Kombination von Gebäudezensusdaten und Angaben des Gebäudereports der deutschen Energie-Agentur (dena) und des TABULA Web Tools.
- Hohe zeitliche Auflösung durch Kombination mit Referenzprofilen der Norm DIN 4655.



Modellierungsansatz: Flexibilität durch Nutzung der thermischen Gebäudemasse



- Energiebilanz eines Gebäudes
- Wärmedurchgangskoeffizient u und Wärmekapazität C_b sind gebäudetypabhängig

$$(T_i(t) - T_i(t-1)) \cdot C_b \cdot A = Q_{\text{versorgt}}(t) - u \cdot A (T_i(t-1) - T_u(t)) \cdot \Delta t$$

Modellierungsansatz: Aggregation und Optimierung

- Aggregation der Gebäudeparameter durch anteilige Mittelwertbildung: Um die Rechenzeit der Optimierung zu begrenzen besteht das ESM-Regio Modell aus einer detaillierten Simulationsebene und einer aggregierte Optimierungsebene (Knotenebene)

- Kostenminimierung:

$$\sum_{t=1}^{t_{ende}} c(t) P_{WP}(t) \Delta t$$

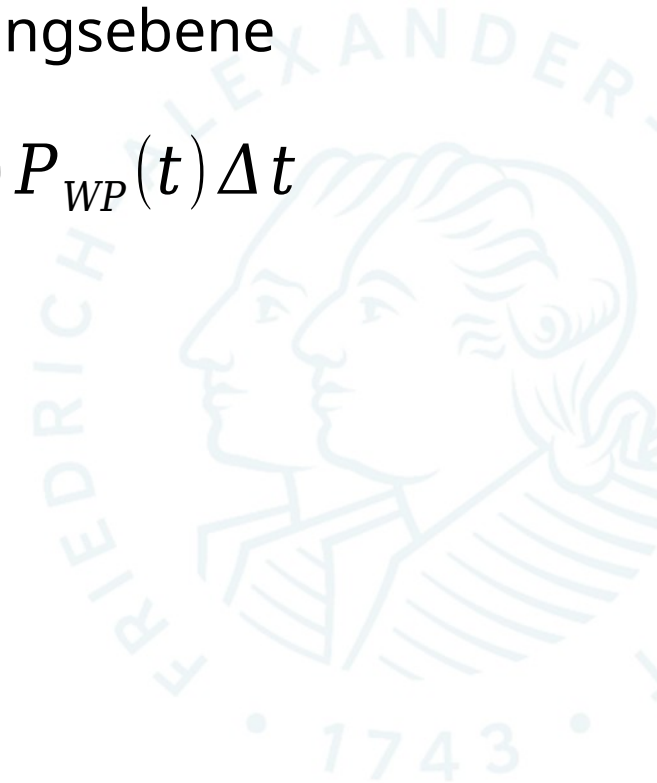
- Temperaturgrenzen:

C C

- Maximale Temperaturdifferenz zwei aufeinanderfolgende Zeitschritte:

|

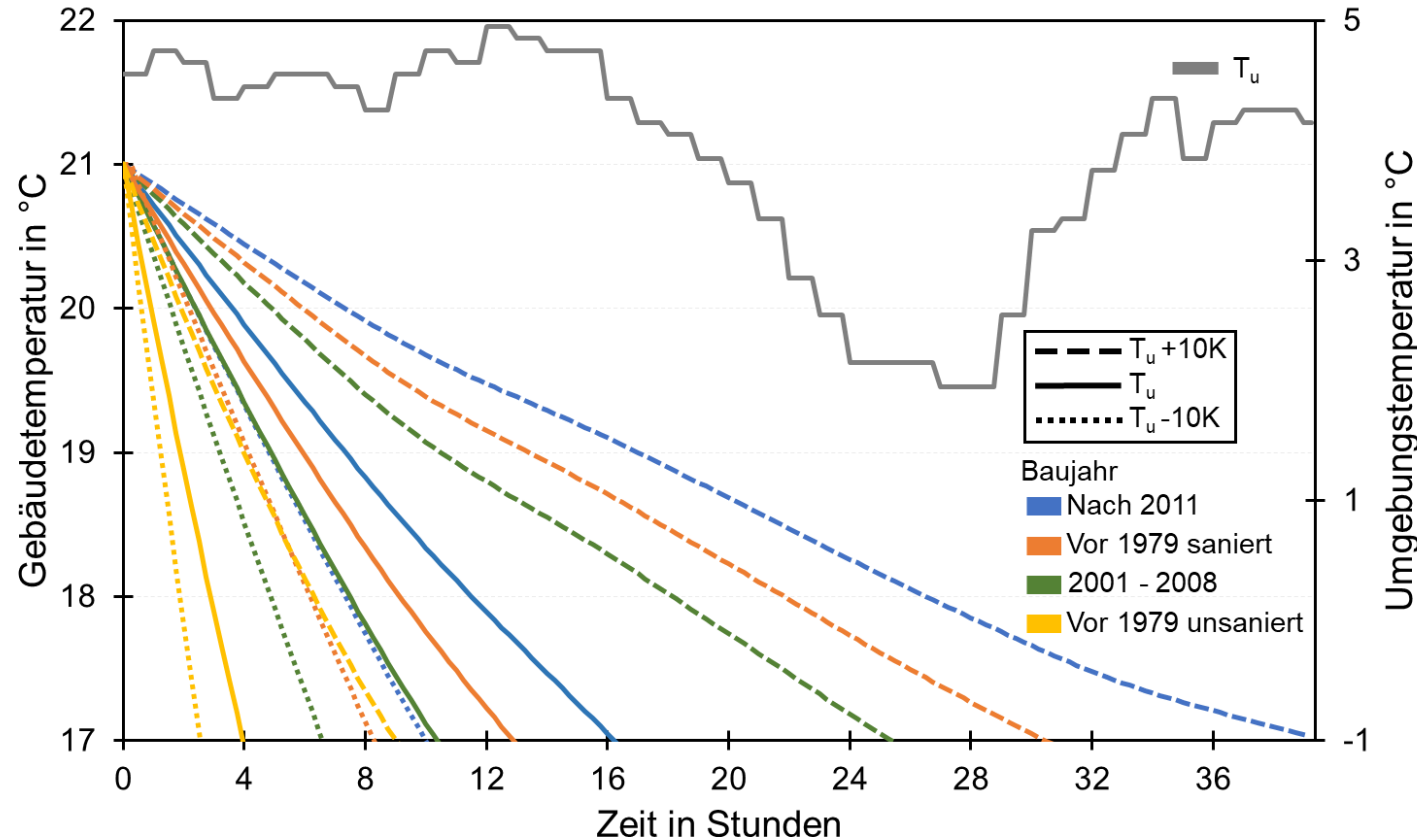
- Summe der optimierten Energie muss die Summe der Energie des Referenzprofils pro Tag entsprechen:



Ergebnisse

Flexibilitätspotential der thermischen Gebäudemasse

ausgewählter Verbraucher

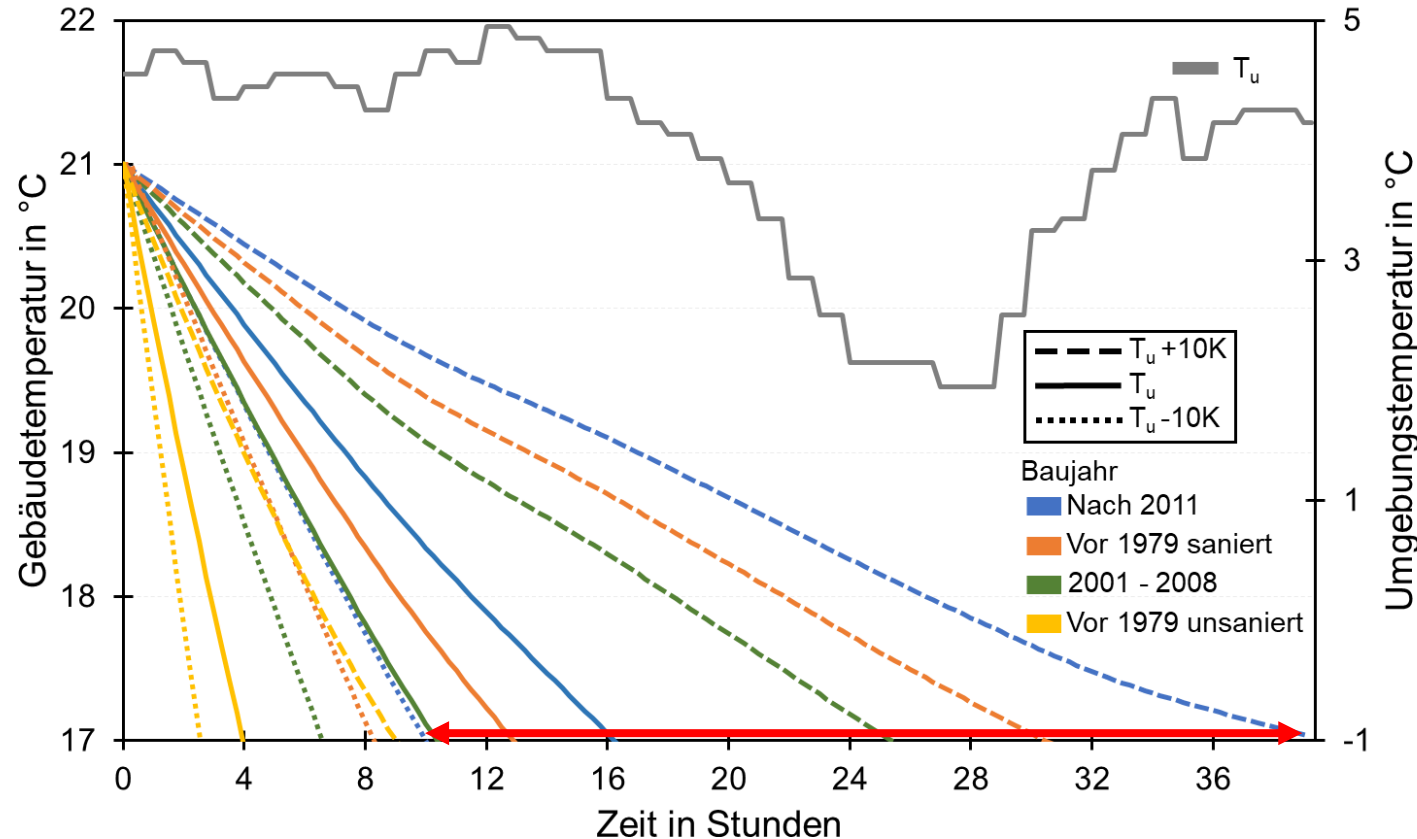


- Simulationsdurchläufe mit der Annahme, dass keine Wärme versorgt wird
- Für eine Beispielwoche im Winter des Referenzjahres 2019
- Untersuchung des Einflusses sehr kalter und milder Temperaturen durch Variation der Messzeitreihe um
- Untersuchung des Einflusses von Sanierungsmaßnahmen

Ergebnisse

Flexibilitätspotential der thermischen Gebäudemasse

ausgewählter Verbraucher

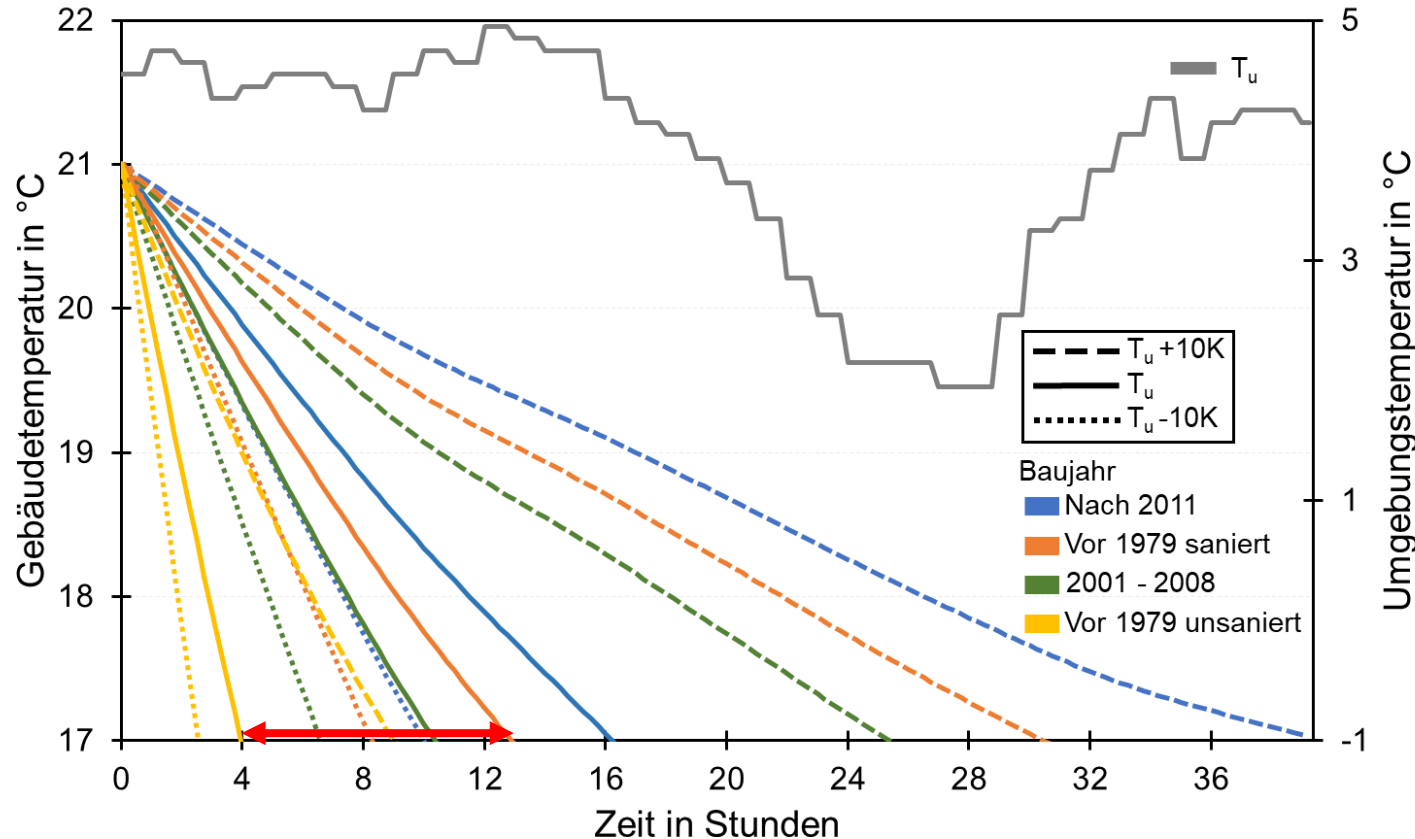


- Je niedriger die Außentemperatur, desto kürzer die verfügbare Flexibilitätzeit
- Am Beispiel des modernsten Gebäudes wird die untere Temperaturgrenze zwischen 11 und 39 Stunden erreicht.
 - Entspricht zwischen 38% und 160% Verschiebung der Energie des Tages.

Ergebnisse

Flexibilitätpotential der thermischen Gebäudemasse

ausgewählter Verbraucher



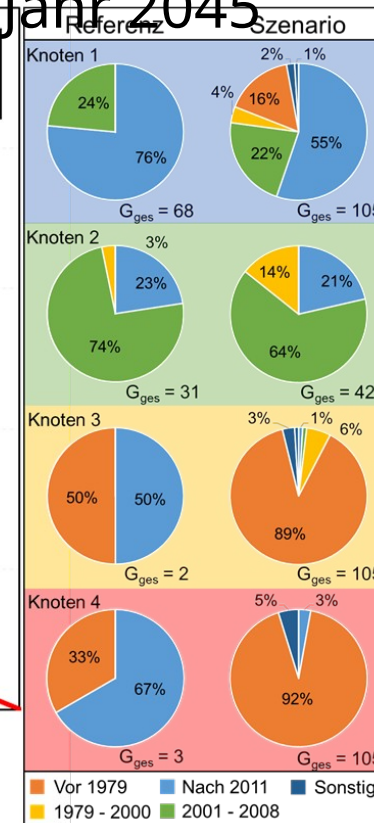
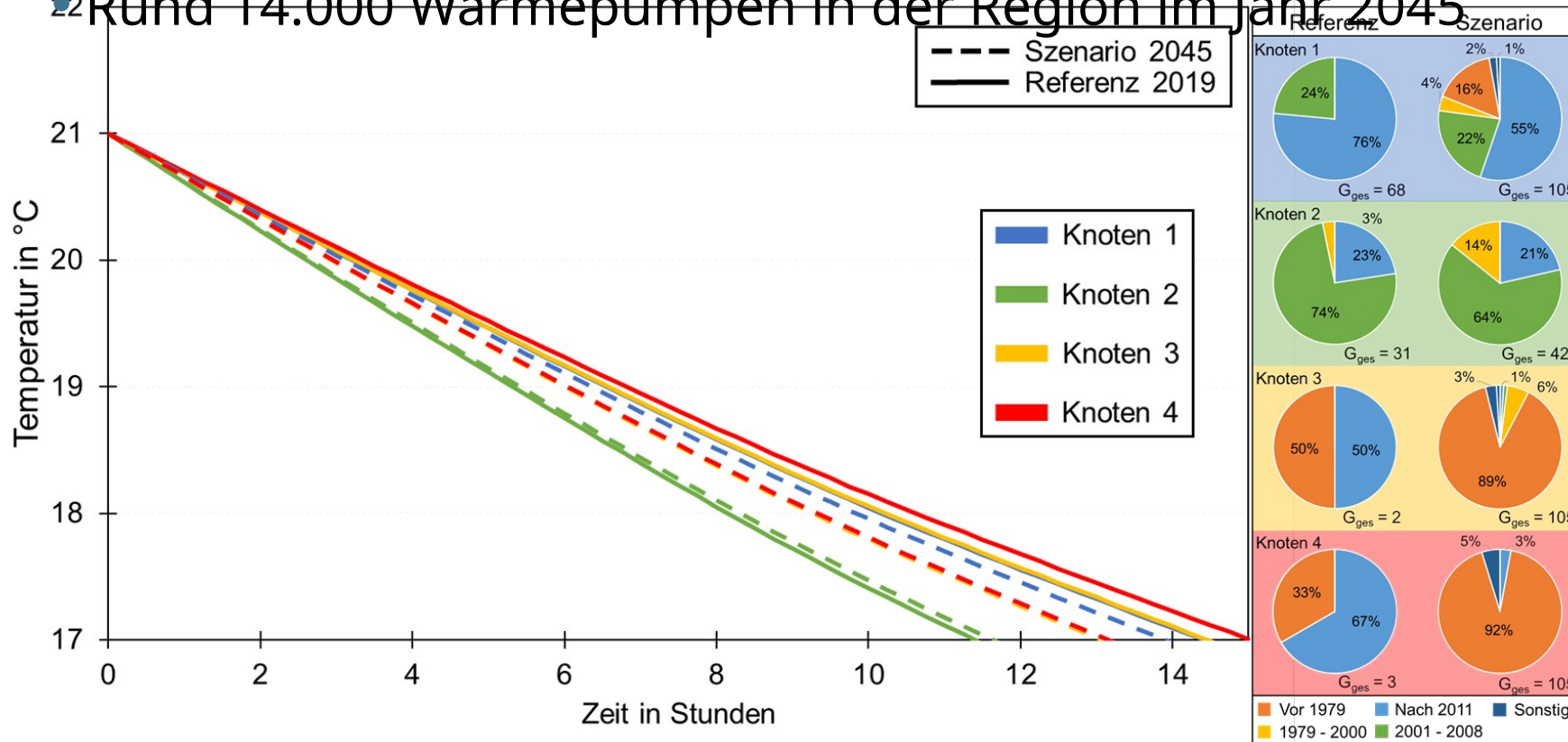
- Je niedriger die Außentemperatur, desto kürzer die verfügbare Flexibilitätszeit
- Am Beispiel des modernsten Gebäudes wird die untere Temperaturgrenze zwischen 11 und 39 Stunden erreicht.
 - Entspricht zwischen 38% und 160% Verschiebung der Energie des Tages.
- Die energetische Sanierung stellt großes Potential dar. Die verfügbare Flexibilitätszeit kann um 230% erhöht werden.
 - Entspricht Zunahme der Energie die verschoben werden kann, von 11% auf 50%.

Ergebnisse

Flexibilitätspotential der aggregierten Verbraucher

Exemplarische Betrachtung von vier Knoten und Analyse des Flexibilitätsverhaltens im Referenzszenario (2019) und im Zukunftsszenario (NEP 23, 2045)

Rund 14.000 Wärmepumpen in der Region im Jahr 2045



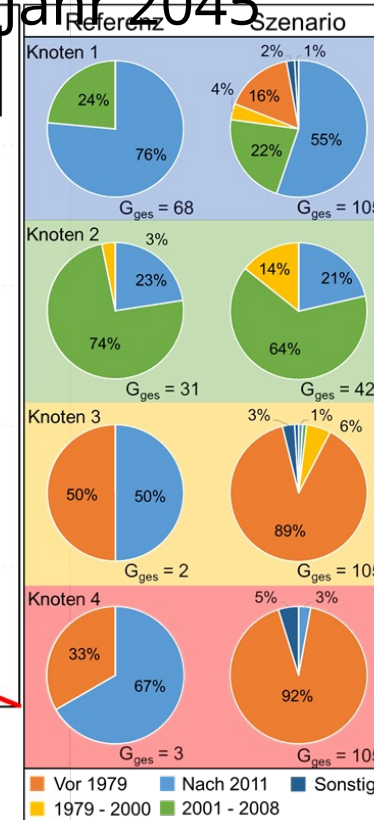
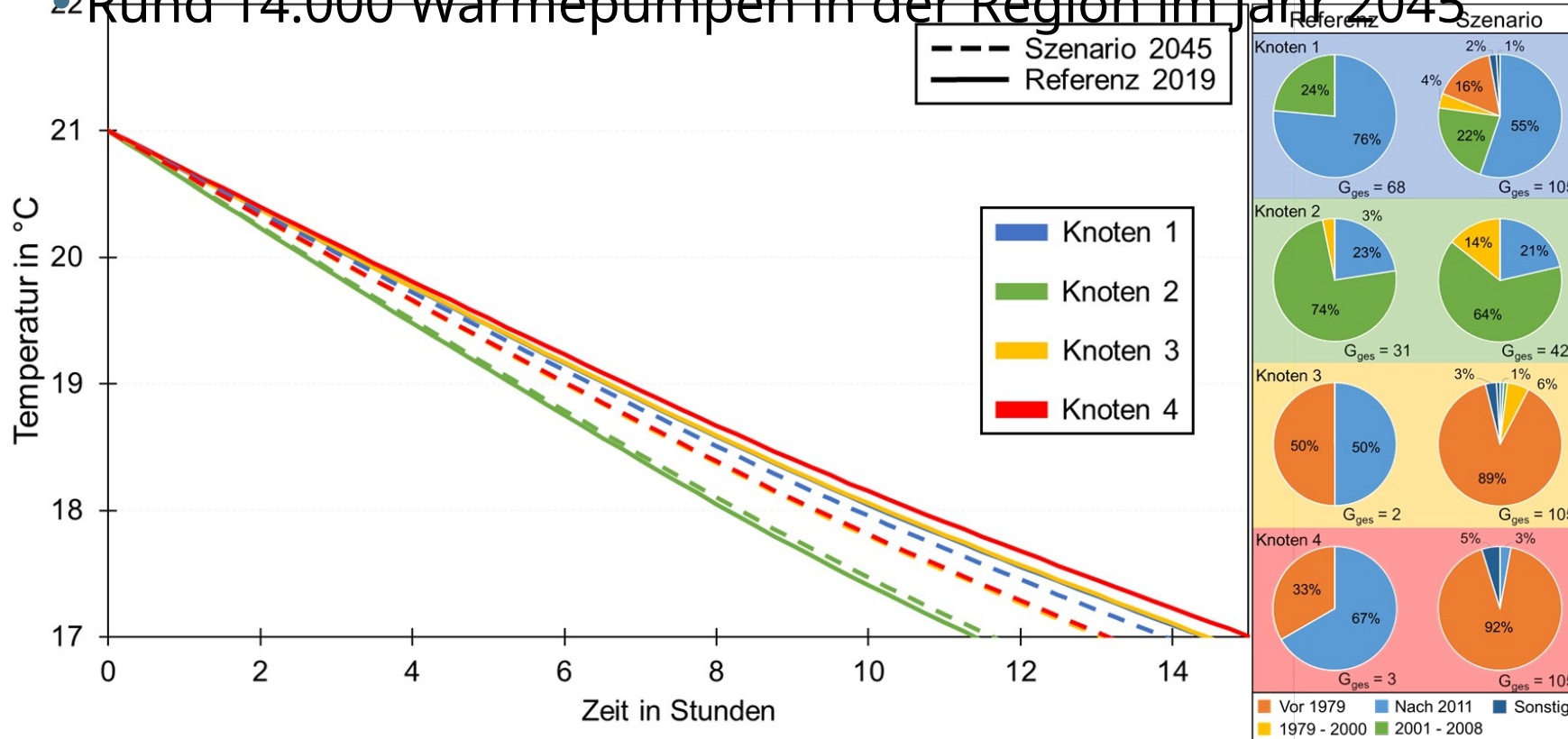
- Analyse der Gebäudestruktur und deren Einfluss auf die Flexibilität der Knoten
- Simulation mit der Annahme, dass keine Energie versorgt wird
- Annahme, dass ältere Gebäude saniert sind

Ergebnisse

Flexibilitätspotential der aggregierten Verbraucher

- Exemplarische Betrachtung von vier Knoten und Analyse des Flexibilitätsverhaltens im Referenzszenario (2019) und im Zukunftsszenario (NEP 23, 2045)

• Rund 14.000 Wärmepumpen in der Region im Jahr 2045



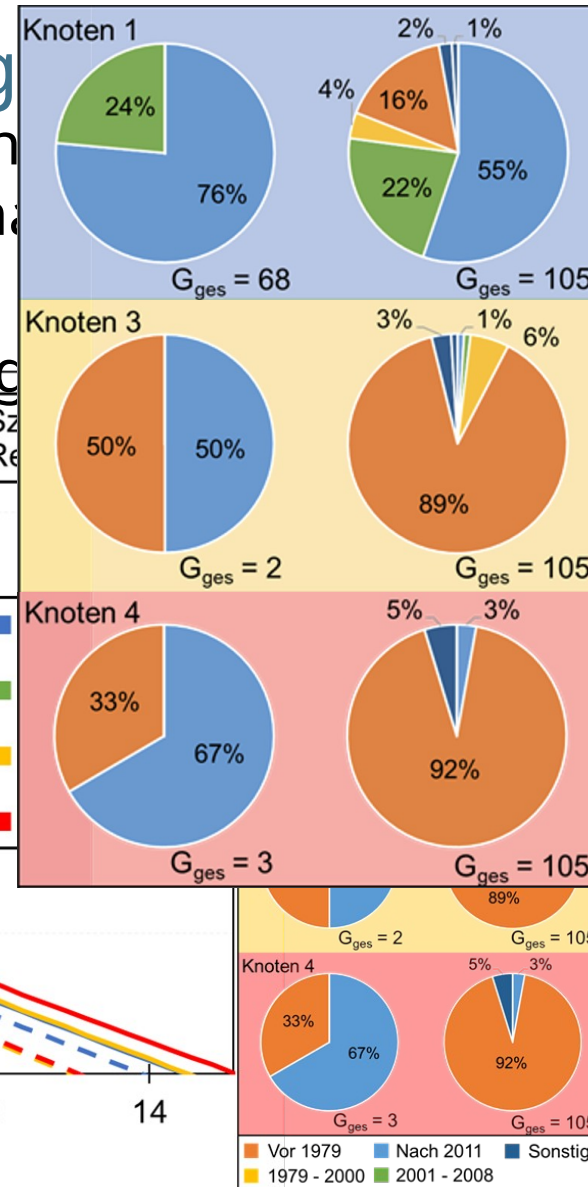
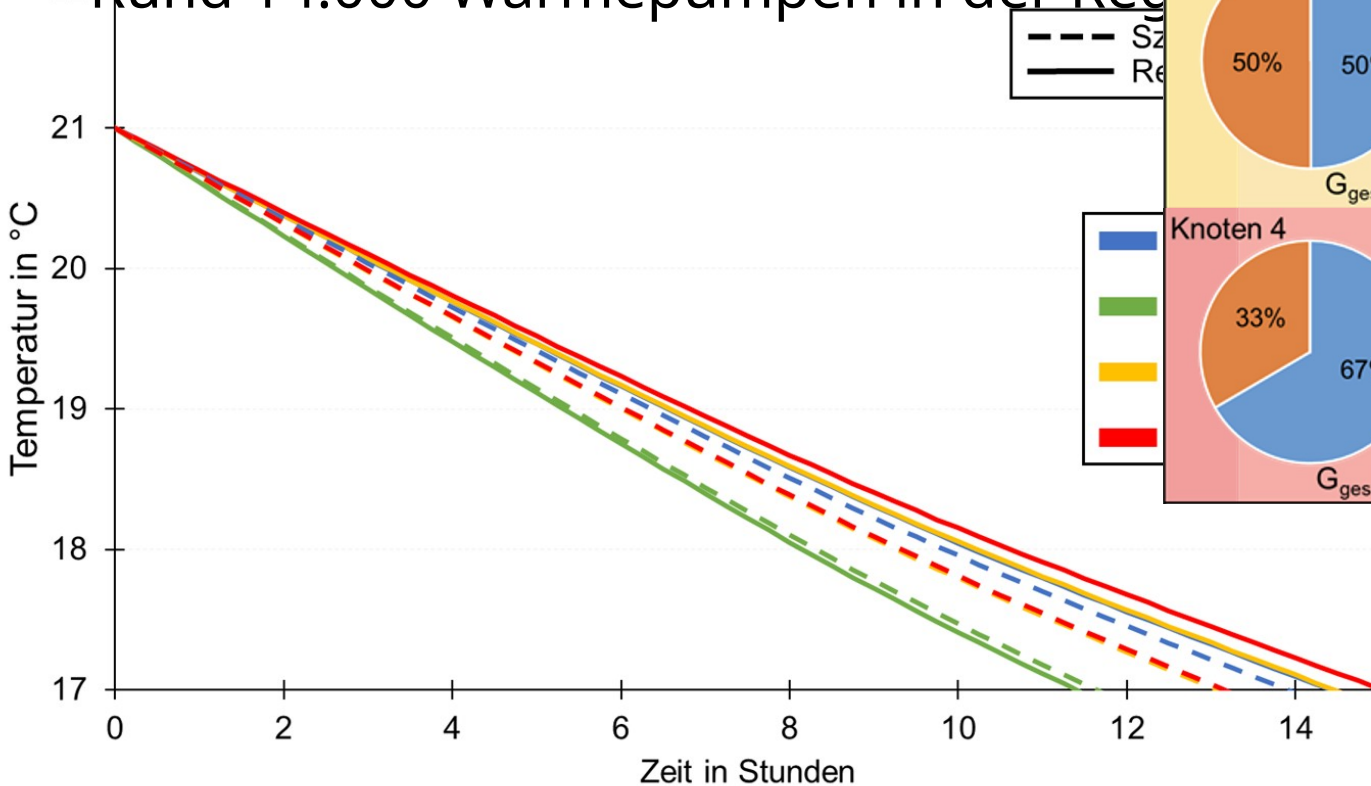
- Die Gebäudestruktur aggregierter Verbrauchergruppen beeinflusst die verfügbare Flexibilitätszeit.

Ergebnisse

Flexibilitätspotential der aggregierten Verbraucher

Exemplarische Betrachtung von vier Knoten Flexibilitätsverhaltens im Referenzszenario Zukunftsszenario (NEP 23, 2045)

Rund 14.000 Wärmepumpen in der Region



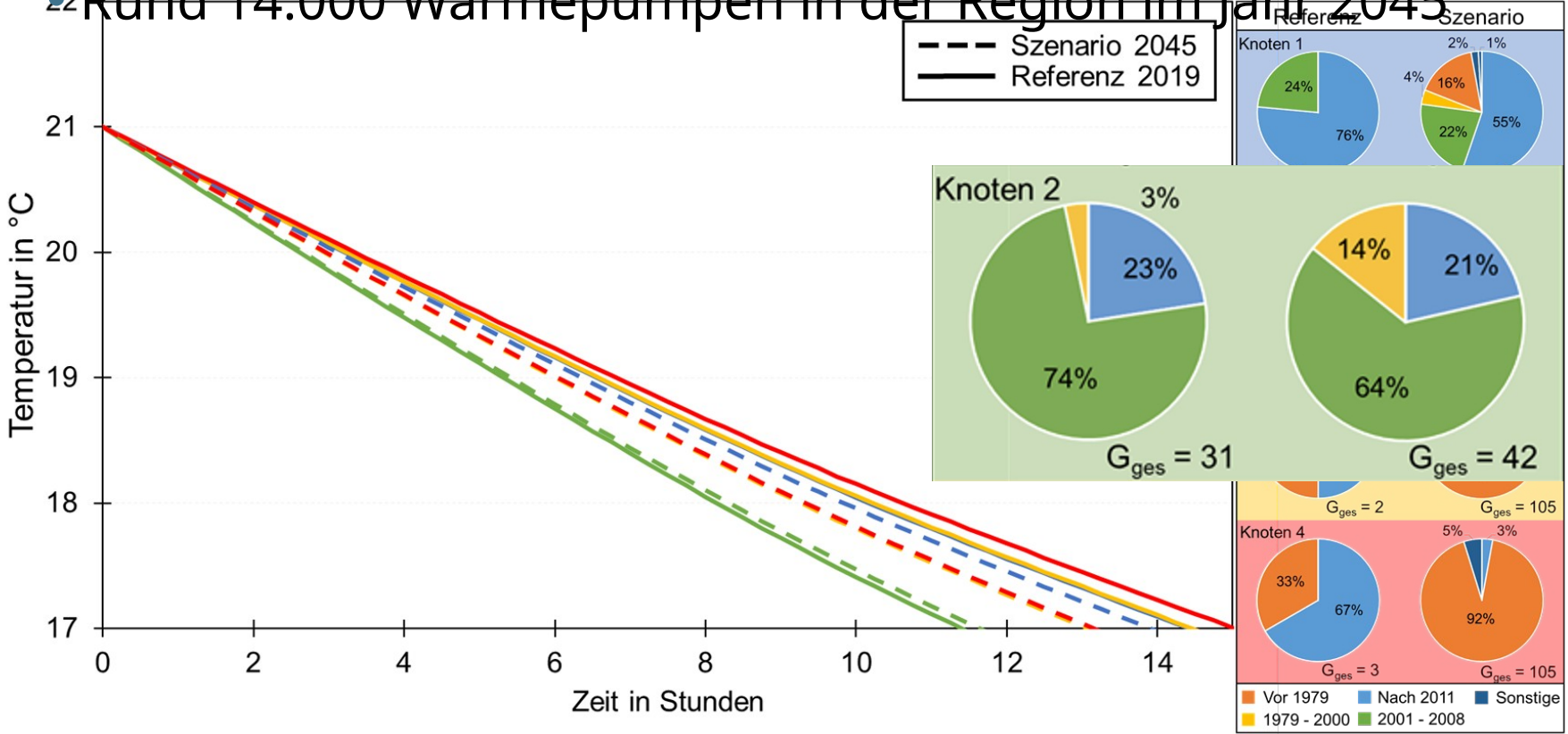
- Die Gebäudestruktur aggregierter Verbrauchergruppen beeinflusst die verfügbare Flexibilität im Zukunftsszenario eine kürzere verfügbare Flexibilitätszeit durch die Zunahme an sanierten aber nicht den Neubaustandard entsprechenden Gebäuden

Ergebnisse

Flexibilitätspotential der aggregierten Verbraucher

Exemplarische Betrachtung von vier Knoten und Analyse des Flexibilitätsverhaltens im Referenzszenario (2019) und im Zukunftsszenario (NEP 23, 2045)

Rund 14.000 Wärmepumpen in der Region im Jahr 2045



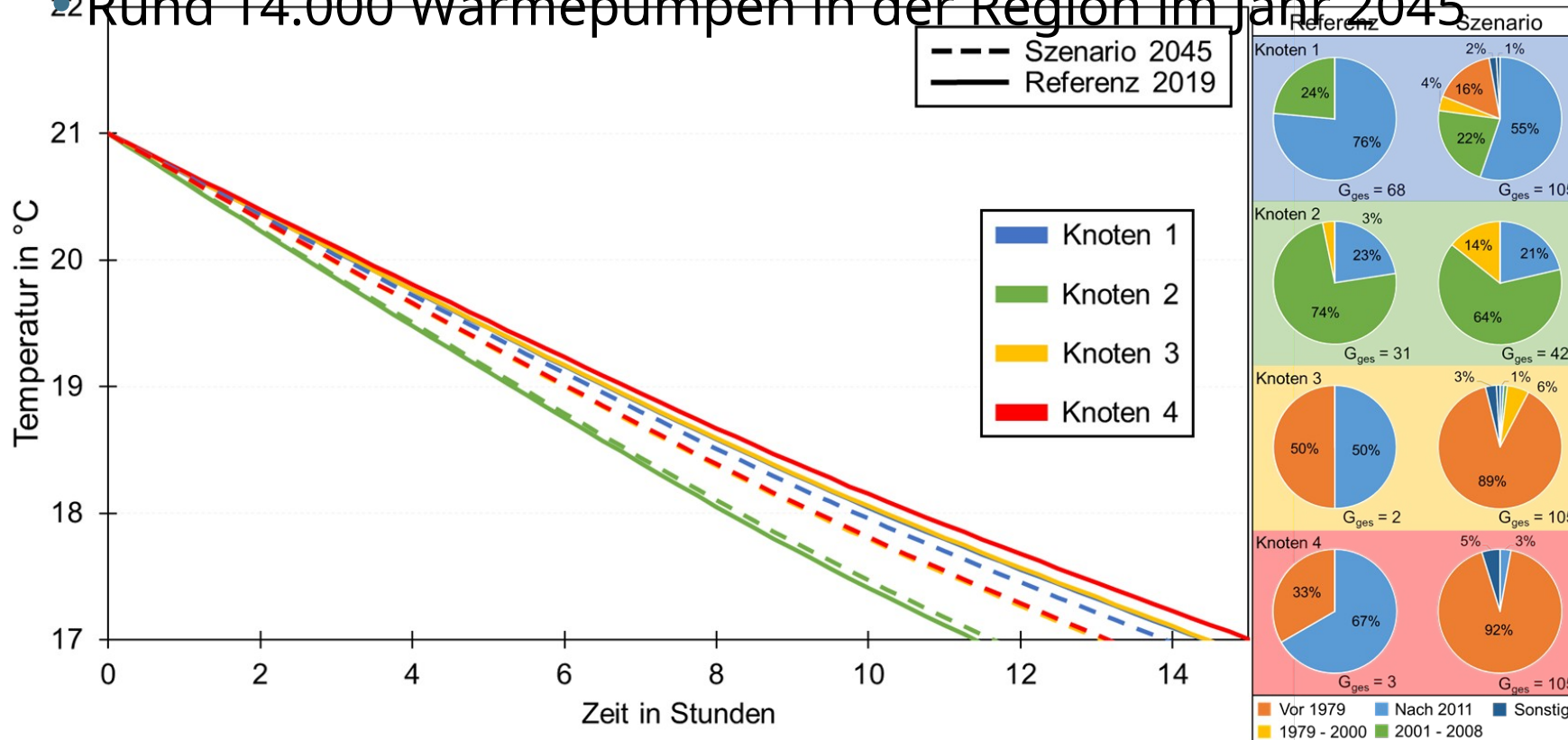
- Die Gebäudestruktur aggregierter Verbrauchergruppen beeinflusst die verfügbare Flexibilität im Zukunftsszenario
- Knoten 1, 3 und 4 zeigen eine kürzere verfügbare Flexibilitätszeit durch die Zunahme an sanierten aber nicht den Neubaustandard
- Knoten 2 wird flexibler, weil der Anteil an nicht sanierten Gebäuden sich reduziert

Ergebnisse

Flexibilitätspotential der aggregierten Verbraucher

• Exemplarische Betrachtung von vier Knoten und Analyse des Flexibilitätsverhaltens im Referenzszenario (2019) und im Zukunftsszenario (NEP 23, 2045)

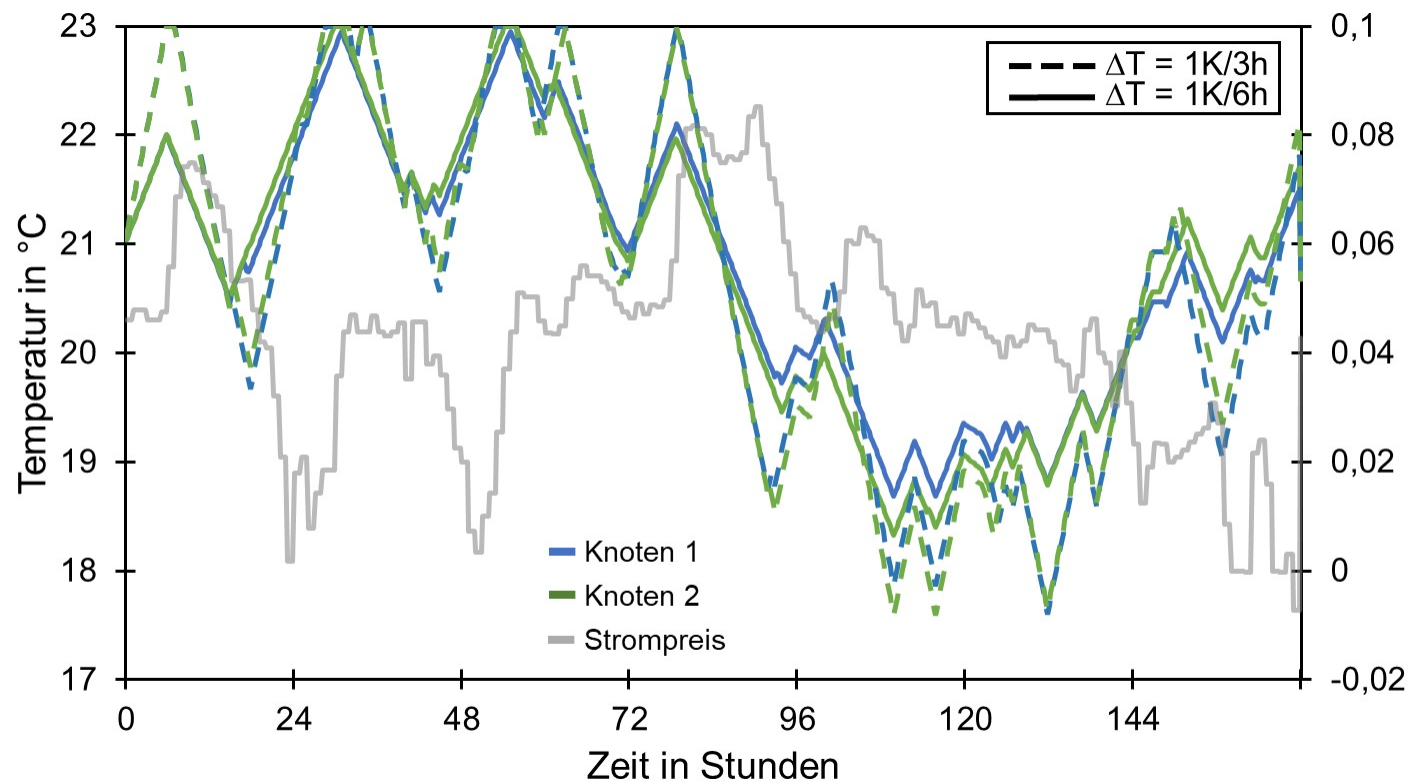
• Rund 14.000 Wärmepumpen in der Region im Jahr 2045



• Die Leistungsflexibilität aller Knoten steigt im Zukunftsszenario, weil diese von der Anzahl an Gebäuden abhängig ist → Die Elektrifizierung des Gebäudebestands durch den Ausbau von Wärmepumpen wird die verfügbare Flexibilitätszeit reduzieren. Diese Reduktion beträgt in den betrachteten Knoten

Ergebnisse

Wärmeoptimierer: Temperaturverlauf bei unterschiedlichen maximalen Temperaturdifferenzen zweier



C C

|

- Exemplarisch für Knoten 1 und 2 im Zukunftsszenario dargestellt
- Unabhängig vom Knoten (Gebäudestruktur) verläuft die Temperatur der optimierten Wärmeversorgung mit dem gleichen Trend
- ΔT_{\max} beeinflusst die Ausprägung der Region den Verlauf

Es ergibt sich ein optimaler Temperaturverlauf für die Region

Ergebnisse

Wärmeoptimierer

| Bewertungskriterium | Referenzszenario Knoten 1 bis 4 | | | | Zukunftsszenario NEP 23 Knoten 1 bis 4 | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|------|------|------|---|------|-------|-------|
| | K1 | K2 | K3 | K4 | K1 | K2 | K3 | K4 |
| Maximale Leistungsflexibilität in kW | 94,5 | 47,5 | 2,6 | 4,2 | 150,6 | 63,7 | 154,4 | 151,8 |
| Mittlere Leistungsflexibilität in kW | 44,6 | 19,8 | 1,3 | 2,0 | 70,8 | 26,7 | 70,4 | 70,2 |
| Verschobene Energie in MWh (Woche) | 7,5 | 3,3 | 0,2 | 0,3 | 11,9 | 4,5 | 11,8 | 11,8 |
| Anteil verschobene Energie in % | 44,8 | 32,3 | 48,2 | 50,1 | 43,9 | 33,0 | 44,1 | 45,1 |
| Kostensparnisse in % | 9,4 | 6,8 | 10,1 | 10,5 | 9,0 | 6,9 | 9,0 | 9,2 |

- Die Leistungsflexibilität steigt in allen Knoten im Zukunftsszenario
- In der betrachteten Region und Knoten beeinflusst die Gebäudestruktur die maximale und mittlere Leistungsflexibilität wenig
- Haupteinflussfaktor ist die Anzahl der Gebäude in der aggregierten Verbrauchergruppe

Ergebnisse

Wärmeoptimierer

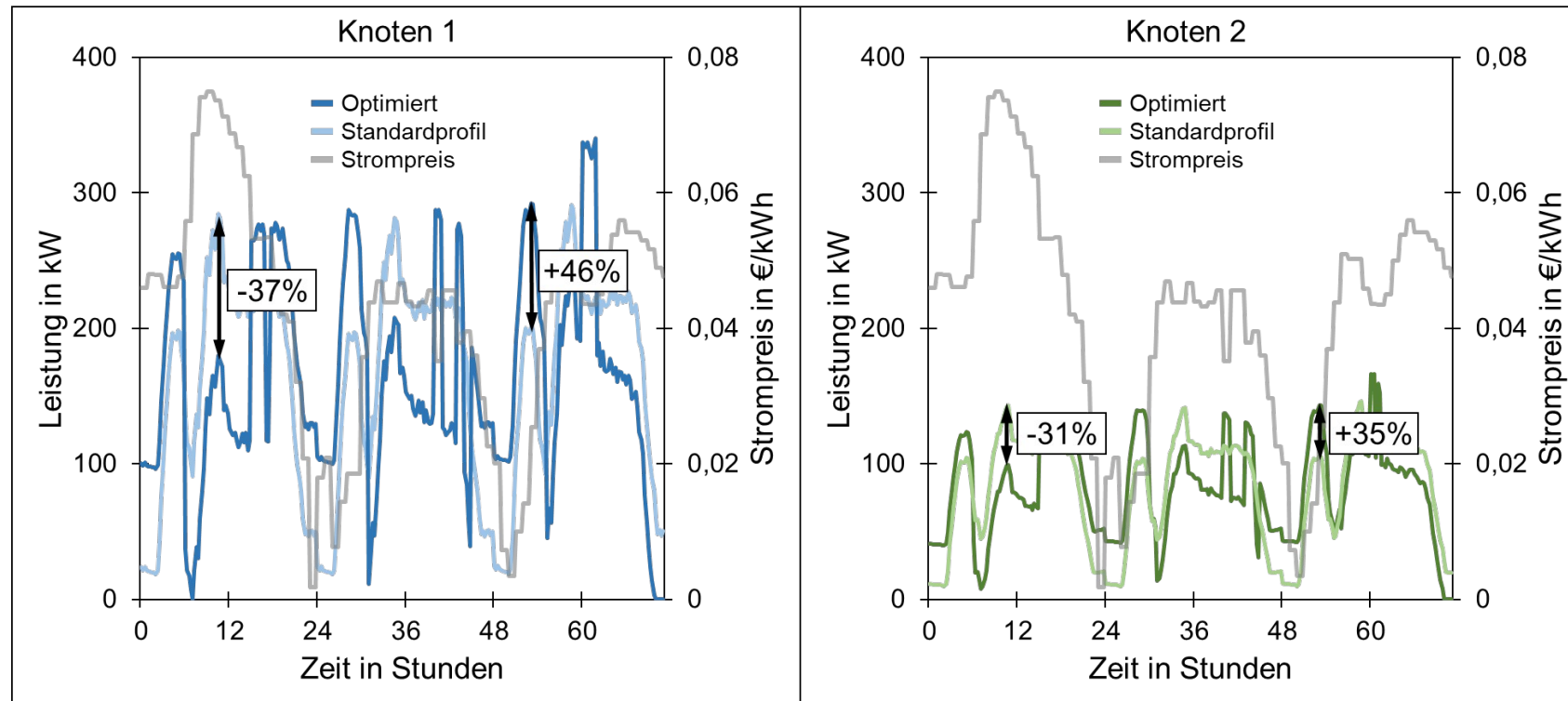
| Bewertungskriterium | Referenzszenario Knoten 1 bis 4 | | | | Zukunftsszenario NEP 23 Knoten 1 bis 4 | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|------|------|------|---|------|-------|-------|
| | K1 | K2 | K3 | K4 | K1 | K2 | K3 | K4 |
| Maximale Leistungsflexibilität in kW | 94,5 | 47,5 | 2,6 | 4,2 | 150,6 | 63,7 | 154,4 | 151,8 |
| Mittlere Leistungsflexibilität in kW | 44,6 | 19,8 | 1,3 | 2,0 | 70,8 | 26,7 | 70,4 | 70,2 |
| Verschobene Energie in MWh (Woche) | 7,5 | 3,3 | 0,2 | 0,3 | 11,9 | 4,5 | 11,8 | 11,8 |
| Anteil verschobene Energie in % | 44,8 | 32,3 | 48,2 | 50,1 | 43,9 | 33,0 | 44,1 | 45,1 |
| Kostensparnisse in % | 9,4 | 6,8 | 10,1 | 10,5 | 9,0 | 6,9 | 9,0 | 9,2 |

- Die Menge an Energie, die zu einem Zeitpunkt niedrigerer Preise verschoben wird, steigt im Zukunftsszenario für alle Knoten
- Der Anteil an verschobener Energie (bezogen auf die nicht optimierte Versorgung) wird von der Gebäudestruktur beeinflusst
- Die Kostenrisikanteile ~~gestiegen~~ (bezogen auf die nicht optimierte Versorgung) verhalten sich analog zu dem Anteil verschobener

Ergebnisse

Wärmeoptimierer: Optimierte Leistungsverläufe

- Vergleich der optimierten Leistungsverläufe mit den Standardprofilen exemplarisch für



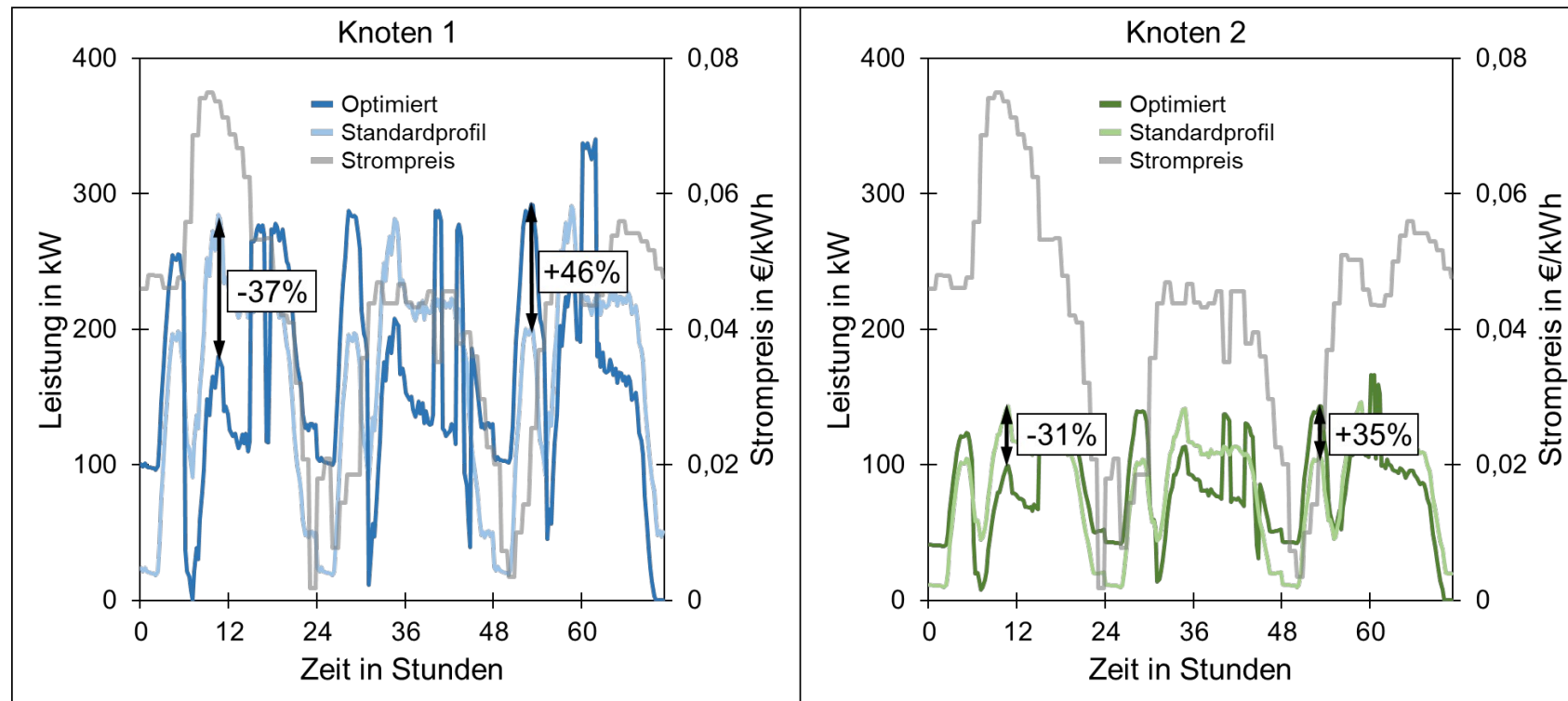
- Der Verlauf der optimierten Leistung zeigt eine ähnliche Periodizität wie das Standardprofil.
- Die Gebäudestruktur beeinflusst die Flexibilität der Knoten:

- Der flexiblere Knoten 1 zeigt größere prozentuale Abweichungen zum Standardprofil als

Ergebnisse

Wärmeoptimierer: Optimierte Leistungsverläufe

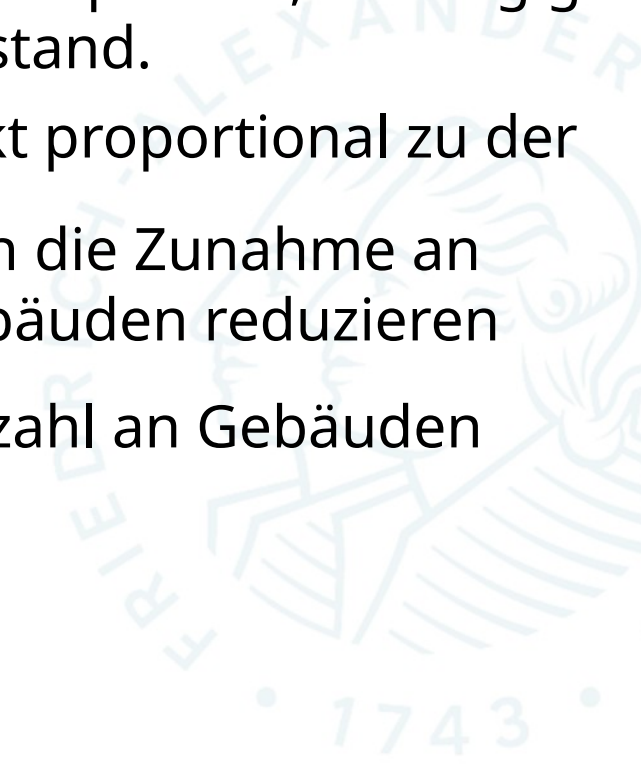
- Vergleich der optimierten Leistungsverläufe mit den Standardprofilen exemplarisch für



- Die exemplarisch dargestellte Peakreduktion in Stunde 10 bedeutet für Knoten 1 eine Kostenreduktion von 37%, während sich für Knoten 2 eine Kostenreduktion von 31% ergibt.
- Für die gesamte Woche ergibt sich für Knoten 1 eine Kostenreduktion von 9%. Für Knoten 2 beträgt die Kostenreduktion 6,9%

Zusammenfassung

- Die Nutzung der thermischen Gebäudemasse kann zur Flexibilisierung des Energiesystems beitragen.
- Die verfügbare Flexibilitätszeit ist, zusätzlich zu der Umgebungstemperatur, abhängig vom Gebäudetyp, insbesondere vom Baujahr und Sanierungszustand.
- Das Potential zum Flexibilitätsbeitrag sanierter Gebäude ist direkt proportional zu der Sanierungstiefe.
- Die Flexibilität aggregierter Verbrauchergruppen kann sich durch die Zunahme an sanierten aber nicht dem Neubau-Standard entsprechenden Gebäuden reduzieren (verfügbare Flexibilitätszeit).
- Die Leistungsflexibilität wird in Zukunft steigen aufgrund der Anzahl an Gebäuden die an der Flexibilität teilnehmen.



Zusammenfassung

- Mit den gewählten Annahmen konnte in den betrachteten Knoten zwischen 33% und 45% der Energie der Woche zu einem Zeitpunkt niedrigerer Strompreise verschoben werden
- Entsprechend ergibt sich eine Kostenreduktion für die Wärmeversorgung durch die Optimierung zwischen 6,9% und 9% im Vergleich zur nicht optimierten Versorgung.
- Für die Gesamtregion ergibt sich eine Kostenreduktion von 9,1%.

Ausblick

- Sensitivitäts- und Wirtschaftlichkeitsanalysen für Sanierungstiefen
- Erweiterung um Wärmespeicher
- Weitere Nebenbedingungen
- Kombination mit dem elektrischen Netz, um beispielsweise die Integration der erneuerbaren Energien zu analysieren
- Sektorkopplungssimulationen und -optimierung (ESM-Regio)

