

## UNTERSUCHUNG DES POTENZIALS PRÄDIKTIV GEREGLER WÄRMEPUMPEN HINSICHTLICH DES LASTMANAGEMENTS IN WOHNGEBÄUDEN

Daniel Schmidt<sup>1</sup>, Sabine Hoffmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TU Kaiserslautern, Deutschland, E-Mail: [Daniel.Schmidt@bauing.uni-kl.de](mailto:Daniel.Schmidt@bauing.uni-kl.de)

### Kurzfassung

Die Europäische Union hat klare Ziele formuliert, um dem Klimawandel entgegenzuwirken und langfristig klimaneutral zu werden. In diesem Kontext spielt die Wärmewende eine zentrale Rolle. Wärmepumpen eignen sich hierbei sehr gut, um zunehmend erneuerbaren Strom mit guter Effizienz in Wärme umzuwandeln. Innerhalb des Beitrags wird aufgezeigt, wie die Wärme durch ein modell-prädiktives Regelungssystem so erzeugt werden kann, dass sich sowohl für Verbraucher als auch für die Stromnetze Vorteile ergeben, wenn zukünftig flexible Stromtarife angeboten werden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Median der Strompreise um bis zu 4 Cent/kWh gesenkt werden kann, was ein großes Potenzial für Einsparungen aufzeigt.

The European Union has defined precise goals to mitigate climate change and become climate neutral. In this context, the heat transition plays a key role. Heat pumps are very well suited to convert the increasing renewable part of electricity into heat with good efficiency. Within the paper it is shown how heat can be generated by a model-predictive controller in a way that benefits both consumption and electricity grids when flexible electricity tariffs are offered in the future. The results illustrate that the median electricity price can be reduced by up to 4 cents/kWh, showing a large potential for savings.

### Einleitung

Der Klimawandel und seine möglichen Folgen stellen eine der größten globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Um der Erderwärmung entgegenzuwirken sind hierbei v.a. eine Abkehr von fossilen Energieträgern und der Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) unabdingbar. Daher haben sich bereits 2015 insgesamt 195 Staaten im Pariser Abkommen darauf geeinigt, entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, um vornehmlich den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verringern (European Commission 2015).

Auch die Europäische Union hat auf die Entwicklung der letzten Jahrzehnte mit entsprechenden Zielstellungen reagiert. So sollen im Jahr 2030 bereits 32 % der Endenergie aus EE gedeckt und 40 % weniger Treibhausgase im Vergleich zu 1990 ausgestoßen werden (European Commission 2018a).

Das übergeordnete Ziel ist eine komplette Klimaneutralität bis spätestens 2050 (European Commission 2018b).

Bei einem Blick auf den Gesamtenergiebedarf der EU fällt auf, dass insgesamt 50 % dieses Bedarfs auf das Beheizen und Kühlen entfallen bzw. alleine 27 % auf das Beheizen der Wohngebäude (European Commission 2016). Allerdings hinkt genau dieser Bereich innerhalb der Energiewende recht deutlich hinterher. Der Anteil an erneuerbarem Strom in der EU liegt im Jahr 2021 etwa bei 38 % (Europäische Kommission 26.10.2021). Der Anteil an erneuerbarer Wärme hingegen beträgt lediglich 12-15 %, die vorherrschenden Energieträger sind hier nach wie vor Gas, Kohle und Öl (European Commission 2016). Basierend darauf lässt sich schlussfolgern, dass die Energiewende in den letzten Jahren hauptsächlich auf die Erzeugung von „grünem“ Strom begrenzt wurde und die ebenso wichtige Wärmewende eher vernachlässigt wurde.

Ein wichtiger Ansatz, um dies zukünftig zu ändern, stellen Power-to-Heat-Anlagen dar. Diese nutzen Strom, um Wärme zu erzeugen. Somit wäre auch eine Sektorkopplung zwischen dem immer größeren Anteil an EE im Strom und dem hohen Bedarf an Wärme umsetzbar. Hierbei sind v.a. Wärmepumpen (WP) eine wichtige Zukunftstechnologie, da diese den Umwandlungsprozess zwischen Strom und Wärme grundsätzlich mit einer hohen Effizienz verbinden.

Innerhalb dieses thematischen Schwerpunkts ist das INTERREG-Forschungsprojekt PtH4GR<sup>2</sup>ID (Power to Heat for the Greater Region's Renewables Integration and Development) angesiedelt, in dem Forscher der Universitäten Kaiserslautern, Lüttich, Luxemburg und Nancy sowie des Forschungsinstituts IZES die Entwicklung eines Regelungssystems für Wärmepumpen untersuchen, das zu einer Entlastung der Stromnetze beitragen soll.

### Hintergrund

Die sogenannte Großregion (GR) umfasst Teile von Deutschland, Frankreich und Belgien, sowie Luxemburg (siehe Abbildung 1). Durch die geographische Lage und die entsprechenden Verfügbarkeiten sind hier v.a. Wind- und Solaranlagen für die Erzeugung von erneuerbarer

Energie zuständig. Der große Nachteil dieser Anlagen liegt in ihrer fluktuierenden Energieerzeugung, die sich an ständig wechselnden Wetterbedingungen orientiert. Dies stellt auch deshalb ein Problem dar, da die entsprechenden Stromnetze auf eine zentrale Erzeugungsstruktur in großen, konventionellen Kraftwerken ausgelegt waren.



Abbildung 1: Mitglieder der GR und ihre Position in Europa (Karina M Pallagst und Beate Caesar 2014)

Neben einem Ausbau der Netze können und müssen allerdings auch andere Maßnahmen ergriffen werden, um der schwankenden Einspeisung entgegenzuwirken. Dazu zählen sicherlich einerseits Speichertechnologien, die überschüssige Energie speichern und somit Unterschiede zwischen Erzeugung und Bedarf abfedern können. Andererseits wird auch der Regelenergie eine größere Bedeutung zukommen, die in bestimmten Zeiträumen dazu beitragen kann, dass sich Bedarf und Erzeugung die Waage halten.

Grundsätzlich wäre es dennoch die intelligenteste Lösung, den Bedarf zunehmend an die Erzeugung anzupassen. Dieses Konzept ist weitläufig als Demand-Side-Management (DSM) bekannt, hat allerdings auch klare Limitationen. So werden die wenigsten Menschen zukünftig bereit sein, ihre Tätigkeiten vornehmlich an der Einspeisung aus EE auszurichten. Dennoch gibt es Bereiche, in denen das DSM ein großes Potenzial bietet, ohne in den gewohnten Komfort einzugreifen.

Dies trifft v.a. auf die Wärmeerzeugung zu. Die große Mehrzahl der Wohngebäude in Deutschland und der GR verfügt über einen Wärmespeicher. Es ist also nicht notwendig, die Wärme dann zu erzeugen, wenn wir sie benötigen. Wir können sie vielmehr auch dann erzeugen, wenn es netzdienlich ist und sie anschließend zwischenspeichern.

Für diesen Ansatz sind gerade auch Wärmepumpen interessant, die einen konstant steigenden Anteil an den Heizsystemen in der GR ausmachen. Innerhalb des Beitrags soll dargestellt werden, wie WP in Wohngebäuden prädiktiv geregelt und somit zu einer besseren Integration der EE ins Stromnetz beitragen können.

## Simulationsmodelle

In einem ersten Schritt wurden zahlreiche Modelle entwickelt, um die unterschiedlichen Komponenten

abbilden zu können, die für die Simulation benötigt werden. Dazu zählen die modell-prädiktive Regelung, die Wärmepumpe, Wohngebäude, Stromtarife, thermische Speicher und das Heizsystem. Nachfolgend werden die einzelnen Modelle erläutert.

Die modell-prädiktive Regelung (model-predictive control; MPC) berücksichtigt einen Vorhersagehorizont von 48 Stunden. Innerhalb dieser Zeit entwirft sie einen Betriebsplan für eine Luft-Wasser-WP in 15-minütigen Intervallen, um diese möglichst wirtschaftlich betreiben zu können. Die Wirtschaftlichkeit hängt von zwei zentralen Punkten ab - dem Energiepreis und dem COP (Coefficient of Performance). Dazu benötigt die Regelung folgende Inputs:

- Preissignal: es wird ein flexibler Tarif genutzt, dessen Preis sich alle 15 Minuten ändern kann. Die detaillierte Struktur der Tarife wird im Laufe des Kapitels erläutert.
- Wettervorhersage: Eine Prädiktion der Außentemperatur und der Solarstrahlung wird benötigt.
- Vereinfachtes Gebäudemodell: einige Informationen über das Gebäude werden der Regelung zur Verfügung gestellt, v.a. Flächen und U-Werte.

Über die Wettervorhersage und die Gebäudeinformationen kann die Regelung den Heizwärmebedarf (HWB) des Gebäudes prognostizieren. Das Volumen des Speichers wird als Input übergeben, da es sich hierbei um einen konstanten Wert handelt. Mit den entsprechenden Temperaturen des Speichersystems kann die vorhandene Wärmekapazität berechnet werden. Über einen Abgleich der Kapazität mit dem Bedarf wird die benötigte Wärmeerzeugung festgelegt.

Das Ziel der Regelung ist es nun, den Betrieb der WP in die effizientesten und demnach wirtschaftlichsten Zeiträume zu verlegen. Dies sind entweder Zeiten mit geringem Strompreis oder hohen Außentemperaturen, die zu einem erhöhten COP der WP führen würden. Hierbei kann nicht nur die Betriebszeit, sondern auch die Drehzahl der WP geregelt werden. Für eine detaillierte Beschreibung der MPC siehe (Röhrenbeck et al. 2016).

Das Modell der Wärmepumpe bildet eine Luft-Wasser-WP ab und basiert auf mathematischen Formeln, die sich auf reale Messdaten beziehen. Innerhalb des Modells kann die thermische Leistung jeweils an die Heizlasten der einzelnen Gebäude angepasst werden.

Ein weiteres zentrales und wichtiges Modell stellen die untersuchten Gebäude dar. Innerhalb des Projekts wurden sowohl Einfamilienhäuser (EFH) als auch Mehrfamilienhäuser (MFH) untersucht, dieser Beitrag fokussiert sich auf die EFHs. Ein entsprechender Beitrag zu den MFHs steht in (Daniel Schmidt und Sabine Hoffmann 2021) zur Verfügung.

In einem ersten Schritt wurde jeweils ein Modell pro Land der GR erstellt, um somit auch regionale und bauphysikalische Unterschiede abzubilden. Die folgende Abbildung zeigt die 3D-Modelle, erzeugt mit SketchUp (Trimble 2017).

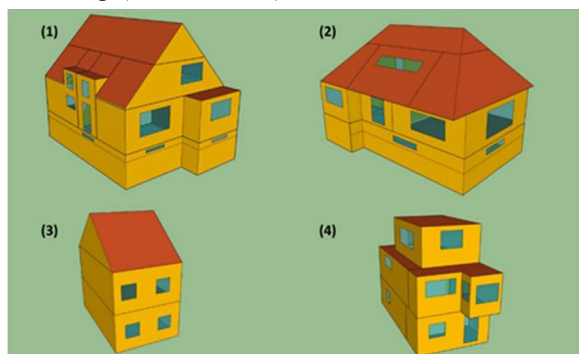


Abbildung 2: 3D-Modelle der Gebäude, (1) Deutschland, (2) Frankreich, (3) Belgien, (4) Luxemburg

Deutschland und Frankreich stellen reale, freistehende Bestandsgebäude aus den 1950ern dar, die auf der TABULA-Studie basieren (IEE Project TABULA). Für den belgischen Teil der GR sind eher kleinere EFHs typisch, dementsprechend wurde hier ein Reihenhaus modelliert. In Luxemburg hingegen ist der Anteil an neuen Gebäuden deutlich höher als in den anderen Ländern, somit wurde hier ein Neubau abgebildet.

Grundsätzlich werden WPs und v.a. Luft-Wasser-Wärmepumpen eher in neuen oder gut gedämmten Gebäuden eingesetzt. Dies liegt darin begründet, dass die Effizienz direkt mit der Differenz der Wärmequellen- und Wärmesenktemperatur zusammenhängt. Daher werden WPs bevorzugt mit Fußbodenheizung (FBH) eingesetzt. Allerdings können die Vorlauftemperaturen von Radiatoren im Bestand durch Sanierungsmaßnahmen ebenfalls in einen Bereich abgesenkt werden, der einen wirtschaftlichen Betrieb der WP ermöglicht. Die nachfolgende Tabelle zeigt den thermischen Zustand der betrachteten Gebäude. Die Werte beziehen sich auf eine gewünschte Innenraumtemperatur von 21 °C im Wohnbereich und 18 °C im Schlafbereich. Alle Gebäude wurden mit den beiden entsprechenden Zonen modelliert.

Tabelle 1: Ausgangszustand der Gebäude

Land	Heizwärmebedarf [kWh/a and kWh/m²a]	Heizlast [kW]
DE	11742 / 68	6.74
FR	15960 / 94	8.39
BE	7757 / 102	4.27
LUX	6251 / 46	4.49

Die Sanierungsmaßnahmen für das Gebäude in Deutschland beziehen sich auf die KfW (KfW), in Frankreich und Belgien wurden die regionalen

Vorschriften und Mindestanforderungen berücksichtigt (Kints; French EPISCOPE Project Team). Luxemburg benötigt als Neubau keine thermische Sanierung.

Entsprechend dem Ausgangszustand der Gebäude wurde nachfolgend auch das Heizsystem modelliert: Luxemburg als Neubau wurde mit einer Fußbodenheizung ausgestattet, während die Bestandsgebäude in den anderen Ländern mit den ursprünglichen Radiatoren untersucht werden.

Zur vollständigen Modellierung der gebäudeseitigen Anlagen fehlen nachfolgend lediglich die Wärmespeicher. Hier wurden v.a. Wasserspeicher untersucht, die in der GR mit Abstand am häufigsten genutzt werden. Allerdings spielt das Volumen der Speicher eine entscheidende Rolle bei der vorhandenen Flexibilität. Daher wurden im Projekt gezielt nicht nur klassische Volumina aus EFHs abgebildet, die in der Regel zwischen 300 l und 800 l liegen, sondern auch überdimensionierte Speicher bis zu 2000 l. Der Einfluss des Volumens auf die Funktionalität der Regelung wird im Ergebnisteil analysiert.

Die flexiblen Tarife stellen das letzte Modell dar und werden als Input in das Regelungssystem eingelesen. Klassischerweise gibt es heutzutage in Deutschland und einigen anderen Ländern der GR spezielle und konstante WP-Tarife. Diese sind im Schnitt kostengünstiger als der normale Haushaltsstrom, bieten den Energieversorgern dafür aber die Möglichkeit, die Wärmepumpe für einige Stunden am Tag auszuschalten und somit von Verbraucherseite auf Spitzenlasten zu reagieren. Innerhalb des Projekts sollen aber gezielt flexible Tarife untersucht werden, da diese bei einem großflächigen Ausbau der EE durchaus eine realistische Option in der Zukunft darstellen können.

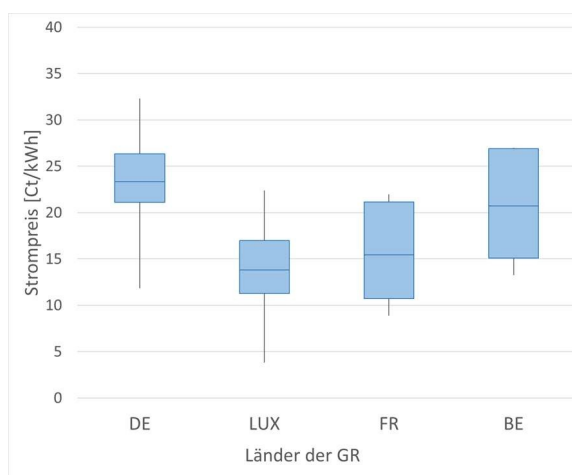


Abbildung 3: Flexible Stromtarife in der GR

Abbildung 3 zeigt den Aufbau der Strompreise in einem Boxplot-Diagramm. Innerhalb der Boxen befinden sich 90 % der Werte, der Strich in der Mitte verdeutlicht den Median. Die 5 % Maximum- bzw. Minimumwerte sind durch die Striche außerhalb der Box abgebildet. Die Tarife und die Flexibilität, die



ihnen zugewiesen wurde, basieren auf Daten des Day-Ahead-Markts von 2016. Für eine detaillierte Beschreibung der Modellierung, siehe (Barbara Dröschel und Andreas Weber 2019). Grundsätzlich zeigt die Abbildung, dass die Strompreise in Deutschland am teuersten sind, in Belgien aber die höchste Flexibilität aufweisen.

### Simulationsumgebung

Die eher mathematischen Modelle der modellprädiktiven Regelung und der WP wurden in MATLAB abgebildet (MathWorks 2019). Für die thermischen Modelle von Gebäude, Speicher und Heizsystem wurde hingegen TRNSYS genutzt (Transsolar 2019).

Während der Simulation müssen somit zahlreiche Variablen zwischen den beiden Programmen ausgetauscht werden. Um dies realisieren zu können, wurde auf Co-Simulation mit der Plattform BCVTB zurückgegriffen (Lawrence Berkeley National Laboratory). Durch Co-Simulation können grundsätzlich viele verschiedene Programme miteinander verknüpft werden und somit die einzelnen Limitationen erweitert werden. Abbildung 4 zeigt den Aufbau der Simulationsumgebung mit MATLAB, TRNSYS und BCVTB.

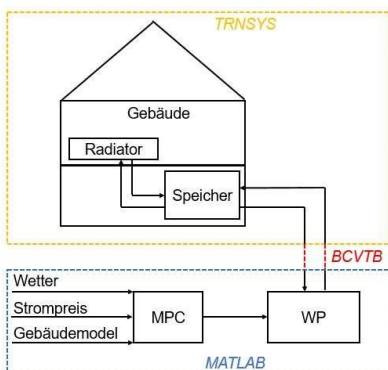


Abbildung 4: Aufbau der Simulationsumgebung

### Ergebnisanalyse

Die Ergebnisse unterteilen sich in zwei Bereiche. Im ersten Bereich soll der Einfluss der Regelung grafisch durch die Darstellung des Strombezugs über den Strompreis analysiert werden. Anschließend sollen Jahressimulationen untersucht und dargestellt werden, welche Vorteile sich durch die entwickelte Regelung ergeben könnten.

Um den Einfluss der MPC aufzeigen zu können, wird der Strombezug der WP nachfolgend für drei Tage im Februar über den Strompreis dargestellt. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse. Orange dargestellt ist der Strompreis, blau der Strombezug der WP. Der dargestellte Fall bezieht sich auf das belgische EFH mit dem entsprechenden Strompreis aus Abbildung 3.

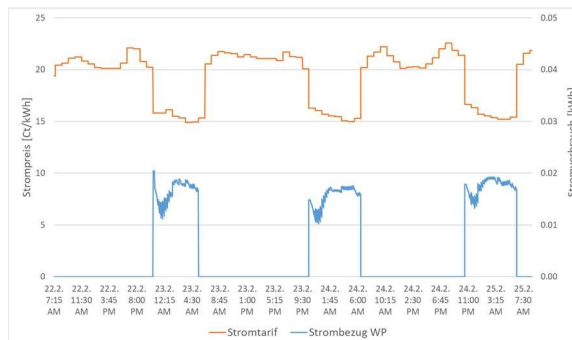


Abbildung 5: Stromverbrauch der WP über Strompreis für Belgien in klassischer Regelung

Die Abbildung zeigt die Ergebnisse mit der entwickelten Regelung. Der Strompreis orientiert sich am Börsenpreis und ist daher nachts günstiger, weist aber darüber hinaus auch anderweitige Schwankungen auf. Es ist zu erkennen, dass die MPC den Strombedarf ausschließlich auf die günstigeren Perioden verschieben kann. Somit kann einerseits der Verbraucher von Kostenersparnissen profitieren, andererseits kann aber auch der Stromverbrauch während der Spitzenlasten am Tag reduziert werden.

Anzumerken ist allerdings, dass das belgische EFH ein recht kleines Reihenhaus mit geringem Wärmebedarf abbildet. Die Regelung berücksichtigt, dass der gewünschte thermische Komfort von 21 °C bzw. von 18 °C immer eingehalten wird und verbraucht daher auch zu Perioden mit hohen Preisen Strom, um den Bedarf zu decken. Sobald eine hohe Flexibilität im Strompreis vorliegt und das Gebäude in gutem thermischen Zustand ist, kann die elektrische Last der WP allerdings sehr effektiv verschoben werden. Nachfolgend werden Ganzjahressimulationen für jedes Gebäude der GR dargestellt, jeweils mit unterschiedlichen Speichergößen und mit den verschiedenen, flexiblen Tarifen aus Abbildung 3.

Tabelle 2: Simulationsergebnisse Deutschland

WP in MPC Regelung, Deutschland			
Speichervolumen (l)	300	800	2000
Strombedarf (kWh)	3602	3548	3497
Wärmeerzeugung (kWh)	11132	11297	11358
Jahresarbeitszahl (JAZ)	3.09	3.18	3.25
Stromkosten (€)	833	819	801
Durchsch. genutzter Preis (Cent/kWh)	23.13	23.08	22.91

Tabelle 3: Simulationsergebnisse Belgien

WP in MPC Regelung, Belgien			
Speichervolumen (l)	300	800	2000
Strombedarf (kWh)	2188	2164	2220
Wärmeerzeugung (kWh)	6905	6906	6958
Jahresarbeitszahl (JAZ)	3.16	3.19	3.13
Stromkosten (€)	405	381	382
Durchsch. genutzter Preis (Cent/kWh)	18.51	17.61	17.21

Tabelle 4: Simulationsergebnisse Frankreich

WP in MPC Regelung, Frankreich			
Speichervolumen (l)	300	800	2000
Strombedarf (kWh)	5085	5219	5260
Wärmeerzeugung (kWh)	15424	15561	15606
Jahresarbeitszahl (JAZ)	3.03	2.98	2.97
Stromkosten (€)	765	762	748
Durchsch. genutzter Preis (Cent/kWh)	15.04	14.60	14.22

Tabelle 5: Simulationsergebnisse Luxemburg

WP in MPC Regelung, Luxemburg			
Speichervolumen (l)	300	800	2000
Strombedarf (kWh)	1788	1792	1798
Wärmeerzeugung (kWh)	5893	6125	6322
Jahresarbeitszahl (JAZ)	3.30	3.42	3.52
Stromkosten (€)	239	234	230
Durchsch. genutzter Preis (Cent/kWh)	13.37	13.06	12.79

Die Tabellen 2-5 zeigen den Strombedarf, die erzeugte Wärme und die resultierende JAZ der WP. Die Werte beziehen sich allerdings lediglich auf die Heizperiode. In den wärmeren Sommermonaten gibt es zwar ebenfalls einen geringen Bedarf an Trinkwarmwasser (TWW), dieser ist allerdings zu gering, um zu einer Netzentlastung beizutragen. Daher liegt der Fokus klar auf den Wintermonaten. Ebenfalls angegeben sind die resultierenden Stromkosten und der durchschnittlich genutzte Strompreis. Alle Werte beziehen sich auf drei unterschiedliche Speichervolumen – 300 l, 800 l, 2000 l.

Grundsätzlich bilden die Ergebnisse erstmal eine realistische Effizienz der Luft-Wasser-WP ab. Diese liegt für die Gebäude mit Radiatoren im Bereich von etwa 3 – 3.2. Durch die Sanierungsstrategien kann die Vorlauftemperatur soweit abgesenkt werden, dass der Betrieb von WP wirtschaftlich ist. Weiterhin zeigt sich aber auch der Vorteil der FBH in Luxemburg, hier liegt die JAZ bei bis zu 3.5. Der Unterschied fällt deshalb nicht höher aus, da alle Modelle auch für die Bereitstellung von TWW verantwortlich sind und dies die JAZ deutlich beeinflusst.

Die weiteren Ergebnisse zeigen in allen Fällen deutlich die Funktionalität der Regelung. Mit steigendem Speichervolumen erhöht sich auch die Flexibilität auf Gebäudeseite und es können günstigere Strompreise genutzt werden. Davon abgesehen zeigen sich aber auch deutliche Unterschiede.

In Deutschland sind beispielsweise lediglich Einsparungen von 0.22 Cent/kWh realisierbar, während dieser Wert in Belgien bei 1.3 liegt. Dies hat hauptsächlich zwei Gründe – einerseits weist das deutsche Gebäudemodell als großes EFH einen deutlich höheren HWB auf, als das recht kleine, belgische Reihenhaus. Die Flexibilität zur Wärmeerzeugung auf der Gebäudeseite ist in Belgien

also deutlich höher. Zusätzlich verstärken die jeweils vorliegenden Stromtarife diesen Effekt noch. Die belgischen Tarife weisen eine deutlich höhere Flexibilität auf, was es für die Regelung bedeutend leichter macht, die Betriebszeiten der WP in günstigere Abschnitte zu verschieben. Dies wird auch durch die nachfolgende Abbildung nochmal verdeutlicht.

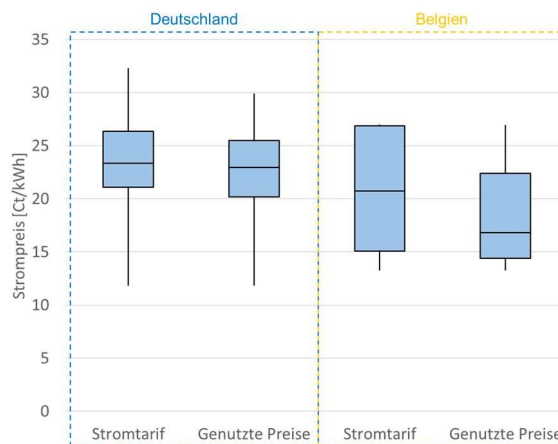


Abbildung 6: Einfluss der Regelung auf die genutzten Strompreise

Die Abbildung zeigt die grundsätzlich zugrundeliegenden Tarife für Deutschland und Belgien und ebenso die effektiv genutzten Preise mit der Regelung während der Heizperiode. Für Deutschland zeigt sich ein eher geringer Effekt. Maximale Preise können zwar ebenso abgesenkt werden, wie die gesamte Box, der Median lässt sich aber lediglich um etwa 0.4 Cent/kWh verbessern. In Belgien hingegen sind die Potenziale bedeutend höher. Alleine der Median kann um über 4 Cent/kWh verringert werden, was klare Möglichkeiten zur Kostenersparnis aufzeigt. Es zeigt sich also, dass die Regelung und ihr Effekt von zwei grundsätzlichen Größen abhängen: der Flexibilität auf Gebäudeseite und der Variabilität der Strompreise.

Es zeigt sich allerdings auch ein weiterer Effekt der Regelung. In Luxemburg sind, ähnlich wie in Deutschland, nur geringe Schwankungen im Strompreis vorhanden. Dafür ist die Flexibilität auf der Gebäudeseite am höchsten, durch den geringen Wärmebedarf im Neubau und die Trägheit der FBH. In diesem Falle fokussiert sich die Regelung zusätzlich auf eine Optimierung der JAZ und führt hier zu einer Verbesserung von 0.22, während dieser Wert in Belgien auch bei erhöhtem Speichervolumen nahezu gleichbleibt. Für den Fall eines nahezu konstanten Strompreises ist mit der MPC also dennoch eine Effektivitätssteigerung möglich durch das Verlegen der Betriebszeit in Perioden mit höher Außentemperatur, was zu einer besseren JAZ führt.

## Zusammenfassung

Innerhalb des Beitrags sollte dargestellt werden, inwieweit sich modell-prädiktiv geregelte

Wärmepumpen zum Lastmanagement in Wohngebäuden nutzen lassen. Die dargestellten Ergebnisse zeigen dabei deutlich, dass ein Potenzial zur Lastverschiebung vorhanden ist. Dieses Potenzial hängt dabei vornehmlich von der vorhandenen Flexibilität ab, sowohl auf Gebäudeseite, als auch im Stromtarif.

Flexibilität auf der Gebäudeseite kann hierbei direkt durch politische Anreize zur thermischen Sanierung gefördert werden. Aktuelle Untersuchungen zeigen bereits, dass die aktuelle Sanierungsrate in Deutschland nicht ausreichen wird, um die Klimaziele zu erreichen. Über ein Anheben der Sanierungsquote kann dabei nicht nur Energie eingespart werden, sondern die Energieerzeugung auch intelligent geregelt werden. Weiterhin könnten überdimensionierte Wärmespeicher, die aktuell keine wirklichen Vorteile bieten, zukünftig interessant werden, falls damit günstigere Energiepreise ausgenutzt werden könnten.

Vieles hängt allerdings auch an der Entwicklung des Strompreises. Durch zunehmende Einspeisung von erneuerbaren und stark fluktuierenden Energien wird sich die Struktur unserer Strompreise ändern müssen. So ist es zukünftig durchaus denkbar, mit variablen Strompreisen direkte Anreize zu setzen, Strom zu nutzen oder darauf zu verzichten. Die vorgestellte Regelung wäre eine Möglichkeit für eine solche Entwicklung und könnte somit auch einen Beitrag zur Netzstabilisierung leisten, indem sie Lasten in Zeiten mit geringem Bedarf und/oder hoher Einspeisung verschieben kann.

## Literaturverzeichnis

Barbara Dröschel; Andreas Weber (2019):

Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen und Marktdaten für den Betrieb von Wärmepumpen in der Großregion. IZES gGmbH. Online verfügbar unter [http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/PtH4GR2ID\\_Aktion%207%20energiewirtschaftl.%20Rahmen.pdf](http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/PtH4GR2ID_Aktion%207%20energiewirtschaftl.%20Rahmen.pdf), zuletzt geprüft am 29.03.2021.

Daniel Schmidt; Sabine Hoffmann (2021):

Simulation-based analysis of the load-shifting potential of Heat Pumps in Multi-Family Houses using co-simulation. Building Simulation. Brügge, September 2021.

Europäische Kommission (26.10.2021): Lage der Energieunion 2021: Erneuerbare Energien überholen fossile Brennstoffe als wichtigste Energiequelle der EU. Tim McPHIE. Online verfügbar unter

[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP\\_21\\_5554](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_21_5554), zuletzt geprüft am 28.02.2022.

European Commission (2015): Paris Agreement. Online verfügbar unter

[https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en), zuletzt geprüft am 11.08.20.

European Commission (2016): The EU strategy on heating and cooling. In: *SETIS Magazine*, 2016. Online verfügbar unter <https://setis.ec.europa.eu/publications/setis-magazine/low-carbon-heating-cooling/eu-strategy-heating-and-cooling>, zuletzt geprüft am 11.08.20.

European Commission (2018a): 2030 climate & energy framework. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en), zuletzt geprüft am 11.08.20.

European Commission (2018b): 2050 long-term strategy. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en), zuletzt geprüft am 11.08.20.

French EPISCOPE Project Team: National report on pilot actions. Online verfügbar unter [https://episcopes.eu/fileadmin/episcopes/public/docs/pilot\\_actions/FR\\_EPISCOPE\\_LocalCaseStudy\\_Pouget.pdf](https://episcopes.eu/fileadmin/episcopes/public/docs/pilot_actions/FR_EPISCOPE_LocalCaseStudy_Pouget.pdf), zuletzt geprüft am 22.09.2020.

IEE Project TABULA: Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Online verfügbar unter <https://episcopes.eu/welcome/>.

Karina M Pallagst; Beate Caesar (2014): European Cross-border Cooperation: EU instruments as drivers of convergence?

KfW: Kreditanstalt für Wiederaufbau. Online verfügbar unter <https://www.kfw.de/kfw.de.html>.

Kints, Caroline: La rénovation énergétique et durable des logements Wallons. Online verfügbar unter [http://www.lehr.be/Reports/UCL\\_Les\\_logements\\_wallons.pdf](http://www.lehr.be/Reports/UCL_Les_logements_wallons.pdf), zuletzt geprüft am 22.09.2020.

Lawrence Berkeley National Laboratory: Building Controls Virtual Test Bed. BCVTB. Version 1.6. Online verfügbar unter <https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb/FrontPage>.

MathWorks (2019): MATLAB. Version 2019b. Online verfügbar unter <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>.

Röhrenbeck et al. (2016): Prädiktive Betriebsoptimierung drehzahlvariabler Wärmepumpen in Kombination mit preisvariablen Stromtarifen. VDE Kongress. Mannheim, 2016.

Transsolar (2019): TRNSYS. Version 18. Online verfügbar unter <http://www.trnsys.com/index.html>.

Trimble (2017): SketchUp. Version 2017. Online verfügbar unter <https://www.sketchup.com/de>.