

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades einer

Diplom-Ingenieurin

der Studienrichtung Energie- und Automatisierungstechnik
an der Technischen Universität Wien

Vermarktung der Flexibilität eines Wärmepumpen-Pools
am österreichischen Regelenergiemarkt

eingereicht am

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

Begutachter: Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Auer

Assistent: Mag. Daniel Schwabeneder

von

Johanna Spreitzhofer, BSc
1026730

Wien, April 2018

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Menschen bedanken, die mich während des Studiums und insbesondere bei meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Zunächst gilt mein ausdrücklicher Dank meinen beiden Betreuern auf der TU Wien, Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Auer und Mag. Daniel Schwabeneder, für die fachliche Unterstützung, die hilfreichen Diskussionen und konstruktiven Anregungen.

Weiters danke ich dem Austrian Institute of Technology für die Möglichkeit, meine Diplomarbeit direkt in der Forschung durchführen zu können. Auch bei meinen KollegInnen bedanke ich mich für die zahlreichen Unterstützungen. Allen voran danke ich Tara Esterl, für die inhaltlichen Diskussionen, die Bestärkung und das Rückenfreihalten. Außerdem gilt mein Dank Fabian Leimgruber für die pythonischen Hilfestellungen und Immacolata Moretti und Daniele Basciotti für die Unterstützung bei der Modellerstellung.

Des weiteren bedanke ich mich bei der Fachschaft Elektrotechnik für die tollen Erfahrungen und die Unterstützung im gesamten Studium. Danke an meinen KollegInnen und FreundInnen in und außerhalb der Uni, die immer ein offenes Ohr für mich hatten. Besonders bedanke ich mich bei Gwen Göttl für ihre Zeit und Mühe als Korrekturleserin und die gemeinsamen Co-Working-Treffen.

Ein ganz besonderer Dank gilt auch meinem Freund Dominik Bartmann, auf dessen Unterstützung ich mich immer verlassen kann, egal ob bei Programmierdiskussionen, beim Korrekturlesen oder bei Motivationslöchern.

Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, Ingrid und Karl Spreitzhofer, dafür dass sie mir das Studium ermöglicht haben und immer für mich da sind.

Abstract

The topic of flexibility is gaining importance in the energy sector, including flexibility on the household level. Not only electrical storage but also heat pumps can provide the much-needed flexibility and can be pooled to participate in a number of electricity markets. The aim of this work is to determine the economic potential of the flexible use of heat pumps in single-family houses. For this, we use an example of the Austrian balancing market for manual frequency restoration reserve for a simulated pool consisting of 400 single-family houses with different thermal properties. Using a linear bottom-up optimization model, we identify a technically feasible flexibility range and achievable economic revenues, perform parameter variations, and examine various influencing factors. Building insulation, electric power of the installed heat pumps and the permitted room temperatures seem to have particularly significant effects on profitability. The greatest revenues can be achieved with existing buildings due to their higher heating load, followed by low-energy houses with air heat pumps. An additional storage tank has little influence on the flexibility potential. Most balancing energy can be offered in winter and autumn while in summer practically no market participation makes economic sense. Results further show that, depending on the building type, balancing power can be provided four to eight hours a day; a passive house in turn can offer up to twelve hours of service. With a heat pump and building distribution typical for Austria, it is possible to achieve 65-69€ per heat pump on the balancing market for manual frequency restoration reserve in 2016. In order to obtain a positive business case, above all an affordable, standardized communication infrastructure is crucial.

Kurzfassung

Das Thema Flexibilität in der Energiewirtschaft gewinnt zunehmend auch auf Haushaltsebene an Bedeutung. Neben elektrischen Speichern können hier insbesondere Wärmepumpen als flexible Einheiten gepoolt werden und so an den verschiedenen Strommärkten teilnehmen. Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung des wirtschaftlichen Potentials des flexiblen Einsatzes von Wärmepumpen in Einfamilienhäusern. Untersucht wird dies am Beispiel des österreichischen Tertiärregelenergiemarktes für einen simulierten Pool mit 400 Einfamilienhäusern mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften. Mittels eines linearen bottom-up Optimierungsmodells werden die technisch mögliche Flexibilität und die erzielbaren ökonomischen Erlöse ermittelt. Es wird eine Parametervariation durchgeführt und verschiedene Einflussfaktoren werden untersucht. Besonders große Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit zeigen die Isolation des Gebäudes, die elektrische Leistung der installierten Wärmepumpe sowie die erlaubten Raumtemperaturen. Die größten Erlöse können aufgrund der höheren Heizlast mit Bestandsgebäuden erzielt werden, gefolgt von Niedrigenergiehäusern mit Luftwärmepumpen. Ein zusätzlicher Pufferspeicher zeigt wenig Einfluss auf die Flexibilität. Am meisten Regelenergie kann im Winter und Herbst angeboten werden, im Sommer ist praktisch keine Marktteilnahme möglich. Je nach Gebäudetyp kann die Regelleistung für vier bis acht Stunden pro Tag vorgehalten werden, beim Passivhaus sind zwölf Stunden möglich. Mit einer für Österreich typischen Wärmepumpen- und Gebäudeverteilung können 2016 pro Wärmepumpe 65-69 € am Tertiärregelenergiemarkt erzielt werden. Um einen positiven Business Case zu erhalten, ist vor allem eine günstige, standardisierte Kommunikationsinfrastruktur wichtig.

Abkürzungsverzeichnis

aFRR	automatic Frequency Restoration Reserve (Sekundärregelreserve)
BGV	Bilanzgruppenverantwortlicher
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
HS	Heizungsspeicher
KW	Kalenderwoche
mFRR	manual Frequency Restoration Reserve (Tertiärregelreserve)
NE-	Niedrigenergie-
TSO	Transmission System Operator (Übertragungsnetzbetreiber)
WWS	Warmwasserspeicher

Inhaltsverzeichnis

Abstract	v
Kurzfassung	vii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Fragestellung und Methode	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Wärmepumpen-Pooling im Strommarkt	5
2.1.1 Überblick über den Österreichischen Regelenergiemarkt	6
2.1.2 Wärmepumpen am Regelenergiemarkt	7
2.2 Optimierung von Pools thermischer Verbraucher	9
3 Methode und analytisches Modell	11
3.1 Simulationsablauf	11
3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle	12
3.2.1 Nichtlineare thermische Modelle des Heizungssystems	12
3.2.2 Lineare, vereinfachte thermische Modelle des Heizungssystems	15
3.3 Datengrundlage	26
3.3.1 Wetterdaten und Benutzerverhalten	27
3.3.2 Marktdaten	28
3.4 Pool Zusammensetzung	30
3.4.1 Gebäudereiner Pool	30
3.4.2 Gemischter Pool	31
3.5 Beschreibung des Optimierungsmodells	33
3.5.1 Zielfunktion	33
3.5.2 Thermische Nebenbedingungen	35
3.5.3 Elektrische Nebenbedingungen	38
3.5.4 Ökonomische Nebenbedingungen	40

Inhaltsverzeichnis

4	Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung	41
4.1	Untersuchte Szenarien	41
4.2	Niedrigenergiehaus-Pool	42
4.2.1	Winterwoche	42
4.2.2	Sommerwoche	45
4.2.3	Frühlingswoche	47
4.2.4	Herbstwoche	49
4.2.5	Jahressimulation	51
4.3	Einfluss eines Pufferspeichers	52
4.4	Einfluss des Wärmepumpentyps	56
4.5	Einfluss des Heizungssystems	58
4.5.1	Fußbodenheizung	59
4.5.2	Radiatorheizung	59
4.5.3	Regelung	59
4.6	Variation der Raumtemperaturgrenzen	60
4.7	Vergleich der verschiedenen Gebäudetypen	62
4.8	Realistisch gemischte Pools für Österreich	65
5	Synthese der Ergebnisse	69
5.1	Flexibilitätsuntersuchung	69
5.2	Jährliche Erlöse pro KundIn	71
6	Schlussfolgerungen	73
	Literatur	75

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Nutzung der Flexibilität von Wärmepumpen im Haushaltssektor für das Energiesystem. Untersucht wird dies am Beispiel des Österreichischen Regelenergiemarkt für einen simulierten Pool mit 400 Einfamilienhäusern. Mittels eines linearen bottom-up Optimierungsmodells werden die technisch mögliche Flexibilität und die erzielbaren ökonomischen Erlöse ermittelt.

1.1 Motivation

Das Thema Flexibilität ist in der Energiewirtschaft allgegenwärtig. Während im Österreichischen Strommarkt traditionellerweise Pumpspeicher- und Gaskraftwerke die notwendige Systemflexibilität liefern, gewinnt auch Demand Response, also die Steuerung von Verbrauchern zunehmend an Bedeutung. Aktuell sind dies zumeist große Industriekunden oder auch Power-to-Heat Anlagen [1], wie jene von Wien Energie, die 2017 in Betrieb ging [2]. Andererseits kann Flexibilität aber auch durch gemeinsame Steuerung vieler kleiner Anlagen, dem sogenannten Pooling, erbracht werden. Dies ermöglicht es Haushalten aktive Teilnehmer am Strommarkt zu werden, Systemdienstleistungen für das Stromnetz zu erbringen und Energiekosten zu sparen. Neben stationären Batteriespeichern und Elektroautos können insbesondere Wärmepumpen automatisiert gesteuert und somit zu einem Pool zusammengeschlossen werden. Sie haben rasche Schaltcharakteristika und verfügen über Speicherkapazitäten aufgrund der Gebäudemasse und der Warmwasser- bzw. Heizungstanks.

Hinzu kommt, dass der Wärmepumpenmarkt in Österreich stark wachsend ist: Laut der Österreichischen Technologie-Roadmap für Wärmepumpen [3] ist die Anzahl an verkauften Wärmepumpen zwischen 2011 und 2015 um durchschnittlich 10.2% gestiegen. Insbesondere die Zahl der kleineren Wärmepumpen im Haushaltssektor ist in den letzten Jahren stark gewachsen. Somit ist in Österreich Potential vorhanden, diese Anlagen nicht nur für die Wärmeerzeugung im Haushalt zu nutzen, sondern auch an den Strom- und Regelenergiemärkten anzubinden. Besonders wichtig dafür ist die Entwicklung eines Standards für eine bidirektionale Schnittstelle zur Kommunikation mit der Wärmepumpe; das derzeit verwendete Smart Grid Ready Label [4] reicht für Regelenergiemarktteilnahme nicht aus.

1 Einleitung

In der Schweiz betreibt beispielsweise die Swisscom Energy Solutions AG einen Pool von 6500 Elektroheizungen, der unter anderen Wärmepumpen enthält, und bietet diese für den Regenergiemarkt an [5]. In Österreich ist zum Zeitpunkt der Arbeit jedoch noch kein Pool aus Haushalten am Regenergiemarkt präqualifiziert.

1.2 Fragestellung und Methode

Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung des wirtschaftlichen Potentials des flexiblen Einsatzes von Wärmepumpen in Einfamilienhäusern. Dieses generelle Konzept ist schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt: Die Basis bildet eine große Anzahl an Haushalten, deren Heizungen mit Wärmepumpen betrieben werden. Sie verfügen über thermische Speicher für das Warmwasser und gegebenenfalls über einen zusätzlichen Pufferspeicher für die Heizung. Die Gebäude kommunizieren mit einem übergeordneten Aggregator und übermitteln ihm ihren aktuellen Status (z.B. Raumtemperatur, Speicherfüllstand). Der Aggregator ermittelt die insgesamt verfügbare Flexibilität seines Pools und vermarktet diese optimal an den verschiedenen Strommarktsegmenten. Je nach Anforderung durch den Markt und aktuellem Status schickt er anschließend entsprechende Steuersignale an die einzelnen Wärmepumpen.

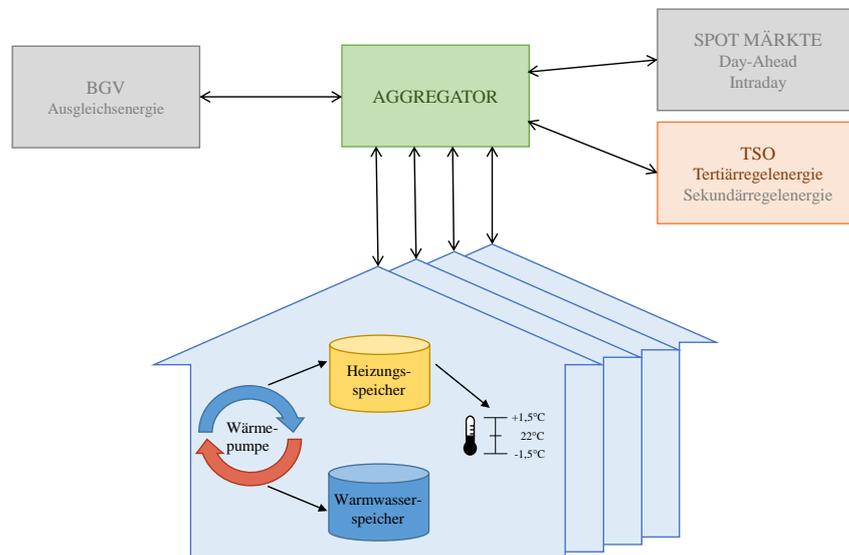


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung des Wärmepumpen-Pools und der Interaktion mit den verschiedenen Strommarktsegmenten

Dem Aggregator stehen zur Vermarktung des Wärmepumpen-Pools in Österreich verschiedene Optionen offen: Am Day-Ahead- und Intraday-Markt können durch die Flexibilität der Wärmepumpen günstige Preise ausgenutzt werden und Preisspitzen vermieden werden. Somit können die Stromkosten der Haushalte verringert werden. Außerdem kann die Flexibilität dem Übertragungsnetzbetreiber (Transmission System Operator - TSO) in Form von Regelenenergie angeboten werden. Dort bekommen die Wärmepumpen sowohl ihre Leistungsvorhaltung, das heißt ihre Verfügbarkeit in systemkritischen Zeiten, als auch ihren tatsächlichen Einsatz vergütet. Schließlich könnte die Flexibilität auch zu Gunsten des Bilanzgruppenverantwortlichen (BGV) genutzt werden und die Ausgleichsenergie der Bilanzgruppe verringern. Weitere, in der Abbildung nicht dargestellte Vermarktungsmöglichkeiten inkludieren die Unterstützung des lokalen Verteilnetzbetreibers, die Erhöhung des Eigenverbrauchs einer Photovoltaik Anlage und die Erhöhung der Effizienz der Wärmepumpe [6].

In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Vermarktung für den österreichischen Tertiärregelenergiemarkt gelegt, da dieser für einen Wärmepumpen-Pool relativ einfach zu erfüllende technische Teilnahmebedingungen hat. Allerdings kann die entwickelte Methodik zukünftig auch auf andere Marktsegmente angewendet werden. Die Arbeit baut auf den Ergebnissen des FFG Projektes iWPP-Flex [7] auf; im Projekt wurde die Vermarktung eines Wärmepumpen Pools für den Day-Ahead-Markt und den Tertiärregelenergiemarkt untersucht und dessen Wirtschaftlichkeit positiv bewertet. Die dort entwickelten Modelle und Erkenntnisse dienen als Grundlage und werden in dieser Arbeit validiert und weiter verbessert.

Es wird ein lineares, techno-ökonomisches Optimierungsmodell für die Vermarktung des Wärmepumpen-Pools entwickelt. Zielfunktion dabei ist die Profitmaximierung für den Wärmepumpen-Pool unter Einhaltung der vorgegebenen Komfortgrenzen und unter Berücksichtigung der österreichischen Marktbedingungen. Dabei wird ein bottom-up Ansatz, ausgehend von den physikalischen Modellen der Gebäude und Heizungssysteme verwendet. Als Flexibilitäten werden sowohl Warmwasserspeicher als auch Wärmespeicherung innerhalb der Gebäude berücksichtigt. Aus den Einzelgebäuden wird über Variation der Eingangsgrößen und Modelle ein Pool mit einer repräsentativen statistischen Streuung erzeugt. Außerdem werden verschiedene Einflussfaktoren (Gebäudetyp, Heizungssystem, Pufferspeicher) auf die verfügbare Flexibilität der Wärmepumpen und damit auf die Markterlöse hin untersucht.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nachdem in diesem ersten Kapitel die Motivation und Fragestellungen der vorliegenden Arbeit erläutert wurden, folgt in Kapitel zwei eine Analyse des aktuellen Stand der

1 Einleitung

Technik. Zunächst wird hier ein Überblick über den Österreichischen Regelenergiemarkt und die derzeitigen technischen Voraussetzungen für die Marktteilnehmer gegeben. Es wird analysiert, inwieweit Wärmepumpen diese Bedingungen erfüllen und welche Hemmnisse es für eine Marktintegration derzeit gibt. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird der State of the Art betreffend der Optimierung von Flexibilitäts-Pools dargelegt. Es werden verschiedene Modellierungs- und Optimierungsansätze aus der gängigen Praxis analysiert.

Kapitel drei erläutert die in dieser Arbeit verwendete Methodik und Datengrundlage. Nach einem generellen Überblick des Simulationsablaufs wird im Detail auf die Erstellung und Validierung der thermischen Gebäude- und Heizsystemmodelle eingegangen. Es werden die verwendeten historischen Daten und Annahmen erläutert und die Zusammenstellung des Wärmepumpen-Pools für die verschiedenen Szenarien erklärt. Schließlich erfolgt die Beschreibung des erstellten mathematischen Optimierungsmodells mit der gewählten Zielfunktion sowie den thermischen, elektrischen und ökonomischen Nebenbedingungen.

Im vierten Kapitel werden die Ergebnisse präsentiert: Zunächst wird ein Überblick über die untersuchten Szenarien gegeben. Danach folgt eine detaillierte Auswertung am Beispiel des Niedrigenergiehauses, sowohl für vier repräsentative Einzelwochen, als auch für das gesamte Betrachtungsjahr (2016). Danach werden die Ergebnisse der Parametervariationen nach Gebäudetyp, Vorhandensein eines Pufferspeichers, Wärmepumpen-Typ und Heizungssystem sowie der Variation der Temperatur-Komfortgrenzen gezeigt. Außerdem werden die Erlöse für zwei realistisch gemischte Pools für Österreich analysiert.

In Kapitel fünf folgt die Synthese der Ergebnisse. Die analysierten Szenarien werden verglichen und die durchschnittlich verfügbare Flexibilität sowie die jährlichen Erlöse pro Wärmepumpe werden ermittelt. In der abschließenden Schlussfolgerung werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Anwendungen und Erweiterungen gegeben.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt den aktuellen Stand der Technik bei der Pool-Optimierung und bei der Marktintegration von Wärmepumpen in Österreich. Da sich diese Arbeit auf den Regelenenergiemarkt beschränkt, liegt auf diesem auch der Fokus beim ersten Teil der Analyse des State of the Art. Im zweiten Teil wird der Stand der Technik in der Pool-Optimierung untersucht, insbesondere das Pooling von thermischen Flexibilitäten im Haushaltsbereich.

2.1 Wärmepumpen-Pooling im Strommarkt

Wie bereits in Kapitel 1.1 dargestellt gibt es verschiedene Vermarktungsoptionen für Flexibilität in Österreich, unter anderem am Day-Ahead- und Intraday-Markt, für die Verringerung von Ausgleichsenergie und an den Regelenenergiemärkten. Zumindest für die letztgenannten Möglichkeiten erfolgt die Marktteilnahme üblicherweise über einen Aggregator, der eine Vielzahl an Anlagen gemeinsam vermarktet. Unabhängige Aggregatoren in Österreich sind unter anderem A1 Energy Solutions [8] und Next Kraftwerke [9]. Beide haben Demand Response Anlagen wie Wärmepumpen oder Power-to-Heat Anlagen in ihren Portfolios; allerdings handelt es sich dabei um größere Anlagen (ab etwa 100-200 kW) von Industriekunden. Haushaltskunden sind in diesen Pools derzeit noch nicht inkludiert.

Für Haushaltskunden gibt es von aWATTar [10] und Energie AG Oberösterreich [11] jeweils flexible Tarife, mit denen (angepasste) Preise des Day-Ahead-Marktes genutzt werden können. Beide Anbieter arbeiten auch mit Wärmepumpenherstellern zusammen und ermöglichen in ersten Beta-Tests eine automatische Ansteuerung der Wärmepumpen basierend auf den Day-Ahead-Preisen. Intraday-Preise oder Regelenenergiemarktteilnahme für Haushalte wird aktuell in Österreich noch nicht angeboten. In der Schweiz ist hier die Swisscom Energy Solutions AG Vorreiterin und hat einen Pool von 6500 Elektroheizungen, die sie am Regelenenergiemarkt anbietet [5].

Im Folgenden wird ein Überblick über die verschiedenen Regelenenergieprodukte und ihre Rahmenbedingungen und technischen Präqualifikationsbedingungen gegeben. Danach wird analysiert, inwieweit diese Bedingungen von Wärmepumpen erfüllt werden können und welche Hemmnisse es für eine Marktteilnahme gibt.

2 Stand der Technik

2.1.1 Überblick über den Österreichischen Regenergiemarkt

Elektrische Erzeugung und Verbrauch im Stromsystem müssen sich zu jedem Zeitpunkt ausgleichen, da die elektrische Energie im Gegensatz zu beispielsweise Gas nicht im System zwischengespeichert werden kann. Dieses Gleichgewicht herzustellen ist in Österreich eine der Aufgaben des Regelzonenführers, der Austrian Power Grid (APG). Diese beschafft über den Regenergiemarkt die notwendige Regelreserve, um im Bedarfsfall das Systemgleichgewicht wieder herstellen zu können. Der Regenergiemarkt ist in Österreich in drei Teile aufgeteilt, den Primär-, Sekundär- und Tertiärregenergiemarkt. Die wichtigsten Charakteristika und Teilnahmebedingungen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

	FCR	aFRR	mFRR
Reaktionszeit	sofort	wenige sec	12 min
Zeit zur max. Leistung	30 sec	5 min	12 min
max. Abrufzeit	30 min	12 h-60 h	4 h
Produkte	1 Woche	Peak, Offpeak	4 h Peak, 4 h Offpeak
Min. Poolgröße	+/- 1 MW	+/- 5 MW	+/- 5 MW

Tabelle 2.1: Übersicht über die österreichischen Regenergiemärkte [12]

Am kurzfristigsten ist die Primärregelreserve (Frequency Containment Reserve, FCR), welche bisher hauptsächlich durch rotierende elektrische Maschinen erbracht wird [13]. Diese reagieren automatisch auf leichte Schwankungen in der Netzfrequenz und gleichen diese durch eine Änderung der Bewegungsenergie ihrer rotierenden Masse aus. Die Primärregelreserve wird wöchentlich ausgeschrieben und muss jeweils für die volle Folgewoche zur Verfügung gestellt werden. Dabei muss ein Anbieter sowohl negative, als auch positive Regelenergie mit einer Mindestgröße von 1 MW anbieten. Die volle Leistung muss dabei für jeweils mindestens 30 Minuten am Stück erbracht werden können. Da sich das Vorzeichen der Primärregelenergie häufig ändert, wird im Mittel praktisch keine Energie verbraucht bzw. erzeugt. Daher wird nur die zur Verfügung gestellte Leistung vergütet. [14]

Der zweite Teil ist die Sekundärregelreserve (automatic Frequency Restoration Reserve, aFRR), welche innerhalb weniger Sekunden reagiert und bei länger anhaltendem Ungleichgewicht im Energiesystem die Aufgabe der Primärregelung übernimmt. Hier werden klassischerweise Pumpspeicher oder sehr schnelle Gasturbinen eingesetzt, welche automatisiert abgerufen werden und innerhalb von 5 Minuten die notwendige Leistung zum Ausgleich der fehlenden Erzeugung oder Last erbringen müssen. Die verfügbaren Produkte sind Peak (8 - 20 Uhr, Mo-Fr) und Off-Peak (0 -8 Uhr und 20 - 24 Uhr, Mo-Fr bzw. 0 - 24 Uhr, Sa-So). Positive und negative Regelenergie können jeweils getrennt angeboten werden, die Mindestmenge beträgt 5 MW. Vergütet werden sowohl die vorgehaltene Leistung als auch die tatsächlich abgerufene Energiemenge. Das Zuschlagverfahren für

2.1 Wärmepumpen-Pooling im Strommarkt

die Marktteilnehmer erfolgt nach aufsteigenden Leistungspreisen (Merit Order); die Vergütung erfolgt pay-as-bid, das heißt jeder Teilnehmer bekommt den von ihm angebotenen Preis. [13] [14]

Für noch länger bestehende Ungleichgewichte kann manuell die Tertiärregelreserve (manual Frequency Restoration Reserve, mFRR) abgerufen werden, welche innerhalb von zwölf Minuten reagieren muss. Hier werden 4h-Produkte ausgeschrieben, sowohl wöchentlich für Peak (wochentags) bzw. Off-Peak (Wochenende), als auch täglich. Die Mindestgebotsgrößen sind auch hier 5 MW, jeweils getrennt für positive und negative Regelreserve. Die typischen Anbieter von Tertiärregelreserve sind Pumpspeicher und Gaskraftwerke. Das Zuschlagverfahren ist analog zur aFRR über eine Merit Order der Leistungspreise und eine pay-as-bid Vergütung. [13] [14]

2.1.2 Wärmepumpen am Regelenenergiemarkt

Grundsätzlich dürfen alle Arten von Erzeugern und Demand Response Anlagen am Regelenenergiemarkt teilnehmen, wenn sie die Qualifikationsbedingungen der APG erfüllen. Dies betrifft unter anderem die oben beschriebenen Verfügbarkeiten und Reaktionszeiten, aber auch Anforderungen die etwa die Kommunikationsinfrastruktur betreffen. Die Details sind im Dokument „Erläuterung Regelreserve“ der APG zusammengefasst [12].

Wärmepumpen dürfen somit prinzipiell an allen Regelenenergiemärkten teilnehmen. Die Mindestgröße von 1-5 MW können zwar von einzelnen Wärmepumpen meist nicht erfüllt werden, jedoch muss diese auch nicht von einer einzelnen Anlage, sondern nur von einem Anbieter (Aggregator) erreicht werden. Dennoch gibt es diverse Hemmnisse, die dazu führen, dass bisher keine Wärmepumpen im Haushaltssektor am Regelenenergiemarkt teilnehmen:

Wie oben beschrieben, betragen die Reaktionszeiten für den Primärregelenenergiemarkt nur wenige Sekunden und die erforderliche Leistung schwankt kontinuierlich. Allerdings wirkt sich eine ständige Leistungsänderung üblicherweise negativ auf die Effizienz der Wärmepumpe aus [15]. Zusätzlich muss die Leistung jeweils für eine ganze Woche angeboten werden. Damit braucht es einen sehr großen Pool modulierender Wärmepumpen, um sowohl die Kapazität als auch die Leistung über so lange Zeit bereithalten zu können.

Auch bei der Sekundärregelenergie sind die langen Verfügbarkeiten von mindestens zwölf Stunden ein Hemmnis für kleinere Flexibilitäten. Eine Marktteilnahme wäre nur mit einem sehr großen Pool möglich und für die kurzen Reaktionszeiten sind auch hier modulierende Wärmepumpen von Vorteil. Allerdings reagiert die APG zunehmend darauf, dass aktuell zunehmend neue Technologien und insbesondere auch kleinere Einheiten und Demand Response am Markt teilnehmen wollen. Daher wurde im Oktober 2017 veröffentlicht [16], dass ab Juli 2018 für den Sekundärregelenenergiemarkt Vierstundenprodukte in täglichen

2 Stand der Technik

Ausschreibungen verfügbar sein werden. Damit wird der Markteintritt neuer Teilnehmer erheblich erleichtert.

Im Tertiärregelenergiemarkt gibt es aktuell schon Vierstundenprodukte, in wöchentlichen und seit Mitte 2016 auch täglichen Ausschreibungen. Damit ist es hier schon jetzt für kleinere Flexibilitäten wie Wärmepumpen möglich, am Markt teilzunehmen. Aus diesem Grund liegt der Fokus in dieser Arbeit auf dem Tertiärregelenergiemarkt. Auch vereinfacht die APG die Teilnahme durch neue Änderungen Mitte 2018 noch weiter [16]: Die Ausschreibung wird auf einheitliche Tagesprodukte umgestellt und außerdem die Mindestgebotsgröße auf 1 MW reduziert.

Außerdem werden die das Netznutzungsentgelt betreffenden Vergünstigungen für Regelenergie Teilnehmer 2018 ausgeweitet, sodass sie auch von KundInnen auf Netzebene 7 in Anspruch genommen werden können [17]. Dadurch wird die Marktteilnahme für kleinere Einheiten noch attraktiver. Auch was das Clearing, das heißt die Ermittlung und Verrechnung der Ausgleichsenergie, betrifft, wurden positive Änderungen für kleinere Flexibilitäten getroffen: Ab 1.2.2018 werden, wo verfügbar, Verbrauchswerte von intelligenten Messgeräten für das technische Clearing verwendet [18]. Nur so kann auch die von HaushaltskundInnen erbrachte Regelenergie im Clearing Prozess berücksichtigt werden. Außerdem kann damit deren Flexibilität zukünftig auch zur Verminderung von Ausgleichsenergie eingesetzt werden. Dies war bisher nicht möglich da für das Clearing rein synthetische Lastprofile verwendet wurden.

D. Fischer hat in seinem Konferenzbeitrag „Business Models Using the Flexibility of Heat Pumps - A Discourse“ [6] verschiedene Business Modelle für die flexible Nutzung von Wärmepumpen in Deutschland untersucht. Da die deutschen und österreichischen Strommärkte weitgehend gekoppelt sind [19] [20], können die Erkenntnisse daraus auch auf Österreich umgelegt werden: In der durchgeführten Abschätzung der Gewinnmöglichkeiten zeigte der Primärregelenergiemarkt die höchsten Erlöse von den Regelenergiemärkten, gefolgt vom Sekundärregelenergiemarkt. Der Tertiärregelenergiemarkt ergab die geringsten Erlöse aufgrund der geringen Abrufzeiten pro Jahr. Allerdings wurde auch in dieser Studie festgestellt, dass hier die technischen Präqualifikationsbedingungen am einfachsten zu erfüllen sind. Neben den Hemmnissen durch die Präqualifikationsbedingungen (Mindestpoolgrößen, lange Produktzeiträume) stellt insbesondere die Kommunikationsanbindung der Wärmepumpen noch eine Herausforderung dar und ist mit relativ hohen Kosten verbunden. Außerdem braucht es noch verlässliche Optimierungs- und Steuerungsalgorithmen für Pool-Betreiber. [6]

2.2 Optimierung von Pools thermischer Verbraucher

In diesem Kapitel wird der Stand der Technik zur Pool-Optimierung zusammengefasst. Der Fokus liegt dabei zum einen auf Arbeiten, die Wärmepumpen oder andere thermische Verbraucher auf Haushaltsebene behandeln und zum anderen auf Pools, die für die Teilnahme am Regelenergiemarkt optimiert werden. Zur besseren Übersicht werden die untersuchten Arbeiten in drei Kategorien eingeteilt, basierend auf der Methodik mit der das Flexibilitätspotential des Pools ermittelt wurde.

Zeitliche Verfügbarkeit:

Bei diesem Ansatz werden verschiedene Parameter festgelegt, die das flexible Verhalten der Kunden beschreiben. Diese müssen im Vorhinein durch Messungen oder separate Simulationen bestimmt werden. Diese Methode wird im Konferenzbeitrag „Quantitative Analyse von Geschäftsmodellen für Aggregatoren“ von D. Schwabenender et al. angewandt [21]: Die Beschreibung der Flexibilitätsoption für Laststeuerung erfolgt hier beispielsweise über die zeitliche Verfügbarkeit, die maximale Anzahl an Aktivierungen pro Periode und die minimale Pause zwischen Aktivierungen. Im Beitrag wird ein Pool an flexiblen Lasten und Erzeugungsanlagen für verschiedene kurzfristige Märkte in Österreich optimiert.

Ein ähnlicher Ansatz wird in der Diplomarbeit „Sequenzielle dynamische Einsatzoptimierung aggregierter elektrischer Lasten“ von J. Fölser verwendet [22]: Hier werden verschiedene flexible Lasten ebenfalls für die Österreichischen Strommärkte optimiert. Für die Wärmepumpen wird in dieser Arbeit beispielsweise ein maximaler Flexibilitätsabruf von einer Stunde, einmalig pro Tag angenommen.

Generell ist diese Methode universell für verschiedene Arten und Größen von Verbrauchern einsetzbar. Die Schwierigkeit hier ist die genaue Beschreibung bzw. Prognose der verfügbaren Flexibilität für die einzelnen Kunden(-gruppen).

Thermisches Modell:

Eine andere Möglichkeit ist, die Flexibilität über das dynamische Verhalten in Form von physikalischen Differenzialgleichungen abzubilden. Dies wurde im Projekt iWPP-Flex [7] verwendet: Basierend auf einem detaillierten thermischen Modell eines Gebäudes und Heizungssystems wurden vereinfachte, lineare Zustandsraumgleichungen abgeleitet, die als Nebenbedingungen direkt in die Pool-Optimierung einfließen. Um den gesamten Pool abzubilden, wurde anschließend dieses Einzelgebäude hochskaliert, also die Leistungen um den Faktor 5000 (für 5000 Kunden) vergrößert. Auch im Projekt WARMup [23] und in der Masterarbeit von S. Pfaffen [24] wurde der gesamte Pool durch ein einziges hochskaliertes thermisches Modell abgebildet.

Ein ähnlicher Ansatz wird im Konferenzbeitrag „Electricity Market Optimization of Heat Pump Portfolio“ von Biegel B. et al. verfolgt: Hier wird das gesamte Wärmepumpen-Portfolio mittels eines thermischen Modells erster Ordnung beschrieben, das heißt über

2 Stand der Technik

nur eine thermische Kapazität und einen thermischen Widerstand. Zum einen wird dies dadurch gerechtfertigt, dass alle betrachteten Gebäude klassische Dänische Einfamilienhäuser sind; zum anderen wird das Modell nur für eine grobe Planung verwendet. Außerdem wird argumentiert, dass bei einer Betrachtung auf Einzelhausebene die Störungen (z.B. durch Öffnen eines Fenster) zu groß sind und die tatsächliche thermische Dynamik gar nicht beobachtet werden kann.

Der Ansatz eines einfachen Modells für den gesamten Pool zu verwenden eignet sich gut für eine erste Abschätzung und hat geringe Rechenzeiten. Für genauere Aussagen über die verfügbare Flexibilität reicht dieser simple Ansatz aber womöglich nicht aus bzw. bildet ein einfaches Hochskalieren das Verhalten eines gemischten, divergenten Pools nicht richtig ab.

Thermisches Modell mit variablen Eingangsgrößen:

Die Arbeit „Residential buildings with heat pumps, a verified bottom-up model for demand side management studies“ von Patteeu D. et al. basiert ebenfalls auf nur einem thermischen Gebäudemodell, allerdings werden unterschiedliche Benutzerverhalten als Eingangsdaten verwendet, um einen durchmischten Pool darzustellen [25]. Die Idee dazu stammt aus dem Buch „Distribution system modeling and analysis“ [26]: Hier wird über den elektrischen Verbrauch geschrieben, dass es ausreicht, das Lastprofil von 70 Gebäuden zu berücksichtigen, um dieselbe Diversität zu haben wie in einer viel größeren Anzahl an Gebäuden. In [25] werden aus einem Basisgebäudemodell 6 Gebäude mit unterschiedlicher Personenanzahl und somit unterschiedlichem Benutzerverhalten kreiert, die insgesamt 100 Einzelkunden repräsentieren.

Die Methodik dieser Arbeit basiert im Wesentlichen auf diesem Ansatz: Er ermöglicht es, verschiedene Gebäude- und Heizungscharakteristika zu berücksichtigen und so einen divergenten Pool abzubilden. Dennoch ist die Komplexität geringer als bei einer Abbildung jedes Einzelgebäudes des Pools. Er ist nicht so universell einsetzbar wie die Methode der zeitlichen Verfügbarkeit, jedoch entfällt durch die Einbindung der thermischen Gleichungen in das Optimierungsmodell die schwierige Vorabprognose der verfügbaren Flexibilität des Pools.

3 Methode und analytisches Modell

Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines techno-ökonomisches Optimierungsmodell zur Erlösmaximierung eines Wärmepumpen-Pools am Regelenergiemarkt. Im Folgenden wird das erstellte Modell Schritt für Schritt erläutert sowie die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen erklärt. Außerdem werden die Eingangsdaten beschrieben und die zu berechnenden Szenarien definiert.

3.1 Simulationsablauf

Abbildung 3.1 zeigt einen groben Überblick über den Simulationsablauf und gleichzeitig über den Aufbau dieses methodischen Kapitels. Zu den einzelnen Teilen ist das entsprechende Unterkapitel jeweils in Klammern angeführt sowie die Hauptkapitel farblich gekennzeichnet.

Ausgangspunkt für die Berechnungen sind die Modelle (Blau) verschiedener Heizungs-systeme, bestehend aus jeweils einer Wärmepumpe, eines Warmwasser- und optionalen Heizungsspeichers sowie des Gebäudes. Als Grundlage dienen detaillierte, nicht-lineare Modelle, die das physikalische Verhalten der Systeme genau beschreiben [3.2.1]. Daraus werden linearisierte, vereinfachte Modelle der Gebäude [3.2.2.1] sowie separat der Speicher [3.2.2.2] erstellt. Auch das Verhalten der Wärmepumpen [3.2.2.3] wird ausgehend von den detaillierten thermischen Modellen mittels vereinfachter Gleichungen beschrieben.

Die in der Simulation verwendeten Daten sind in der Übersicht in Grün gekennzeichnet. Als Eingangsgrößen für die Gebäudemodelle dienen Wetterdaten, bestehend aus den jeweiligen Außentemperaturen, internen Lasten sowie Warmwasserbedarfsprofilen [3.3.1]. Um einen realistischen Wärmepumpen-Pool zu erstellen, werden die einzelnen thermischen Modelle mit unterschiedlichen Eingangsdaten kombiniert, um so Variabilität im Pool zu schaffen [3.4].

Der finale Schritt ist das techno-ökonomische Optimierungsmodell [3.5]. Hier dienen als weitere Eingangsgrößen historische Marktdaten, insbesondere Regelenergiepreise für Leistung und Energie und die jeweiligen Abrufwahrscheinlichkeiten [3.3.2].

3 Methode und analytisches Modell

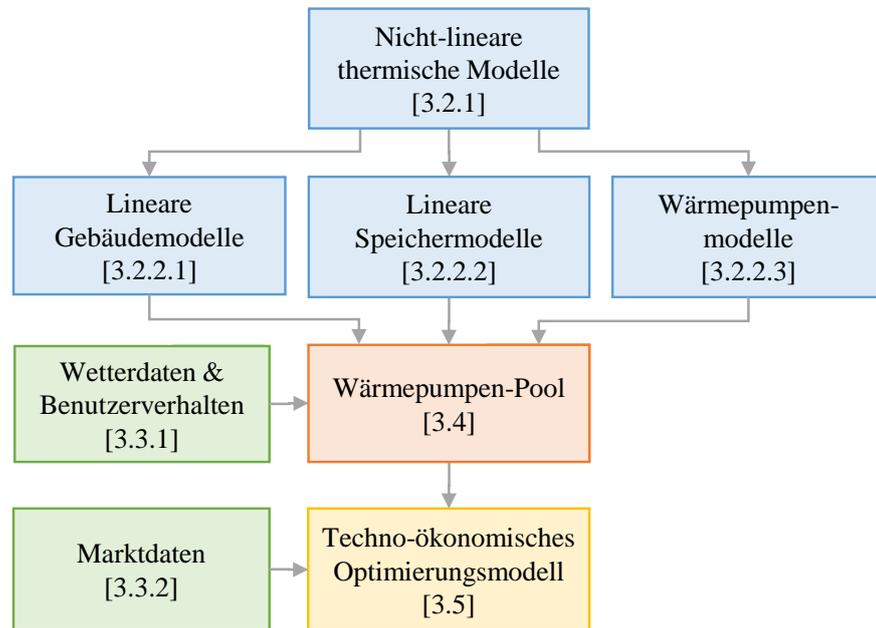


Abbildung 3.1: Simulationsablauf

3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle

Um eine realistische Abschätzung über Flexibilität und ökonomische Erlöse bekommen zu können, muss zuerst eine gute Datengrundlage in Form von physikalischen Modellen der thermischen Systeme sichergestellt werden. Daher beschreibt dieses Kapitel die Erstellung und Validierung dieser thermischen Modelle sowie die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen.

3.2.1 Nichtlineare thermische Modelle des Heizungssystems

Ausgangspunkt für die Analyse sind detaillierte, nichtlineare thermische Modelle, die im Rahmen des Projektes iWPP-Flex [7] in Dymola aufgebaut und mit realen Messdaten validiert wurden. Im Projekt wurden sechs verschiedene Systeme mit Heizungs- bzw. Warmwasserwärmepumpen erstellt und analysiert. Die Modelle beschreiben jeweils das Verhalten eines Einfamilienhauses mit Wärmepumpe, Warmwasserspeicher, optionalem Heizungsspeicher, Heizsystem und der dazugehörigen Steuerung. Für diese Arbeit wurden

3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle

daraus vier Fälle ausgewählt, deren wesentliche Unterscheidungsmerkmale in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind.

	Passivhaus	Niedrig-energiehaus	Bestandsgebäude	Renoviertes Bestandsgebäude
Heizbedarf	15 kWh/(m ² a)	45 kWh/(m ² a)	100 kWh/(m ² a)	75 kWh/(m ² a)
Heizung	Fußboden	Fußboden	Radiator	Radiator
Wärmepumpe	Luft-Wasser	Sole-Wasser	Sole-Wasser	Luft-Wasser
Nennleistung (elektrisch/thermisch)	1 kW/3 kW	1.2 kW/5 kW	4 kW/12 kW	2.7 kW/7 kW
Leistungsregelung(*)	variabel	ein-aus	ein-aus	variabel
Heizungsspeicher	Nein	Nein	Ja	Ja

Tabelle 3.1: Übersicht vier ausgewählten thermischen Gebäudemodelle aus dem iWPP-Flex Projekt [7].
 (*) Die Leistungsregelung wird in dieser Arbeit für alle Fälle als variabel angenommen (siehe auch Kapitel 3.2.2.3)

Um im weiteren Verlauf der Arbeit das Verhalten der detaillierten mit den daraus abgeleiteten linearen Modellen direkt vergleichen zu können, werden die in Dymola erstellten Modelle jeweils als Functional Mockup Unit (FMU) exportiert. Über das „Functional Mock-up Interface for Model Exchange“ [27] können Modelle zwischen verschiedenen Entwicklungsumgebungen ausgetauscht werden, indem ein C-Code der Modellgleichungen erstellt werden. In der Ziel-Umgebung (in dieser Arbeit Python) kann dieser als Black Box Modell importiert werden. Das Modell kann dann aus dieser Umgebung heraus direkt mit gewählten Eingangsgrößen gestartet werden und liefert als Antwort die entsprechenden Ausgangsgrößen. Dieser Ansatz wird nachfolgend für die Validierung der erstellten linearen Modelle verwendet.

3.2.1.1 Passivhaus

Das erste verwendete Modell beschreibt das Verhalten eines 140 m² großen Passivhauses, mit einem spezifischen Wärmebedarf von 15 kWh/m²/a. Das Gebäude hat eine Luft-Wasser Wärmepumpe mit einer Leistung von 1 kW elektrisch bzw. 3 kW thermisch, wobei die Leistung variabel gesteuert werden kann. Die Wärmepumpe speist ein Fußbodenheizungssystem sowie einen 300l Warmwasserspeicher. Der Regler gibt dem Warmwasser Priorität gegenüber der Fußbodenheizung. Der Warmwasserspeicher wird direkt nach Bedarf nachgeheizt; die Führungsgröße der Heizung sind die Rücklauftemperatur der

3 Methode und analytisches Modell

Fußbodenheizung sowie die gemessene Raumtemperatur. Dabei ist der Sollwert der Rücklauf­temperatur abhängig von der jeweiligen Außentemperatur und folgt genau wie die Raumtemperatur einem Hystereseverlauf (siehe Abbildung 3.2).

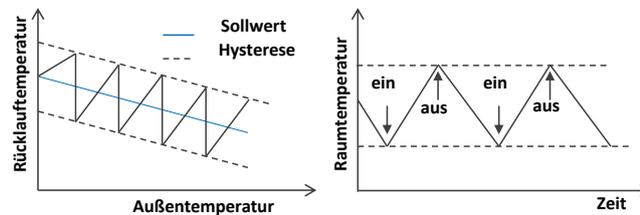


Abbildung 3.2: Regelerverlauf der Fußbodenheizung (Quelle: iWPP-Flex [7])

3.2.1.2 Niedrigenergiehaus

Der zweite Anwendungsfall entspricht einem Niedrigenergiehaus, welches ebenfalls eine beheizte Fläche von 140 m^2 hat, allerdings einen höheren Heizungsbedarf von $45\text{ kWh/m}^2/\text{a}$. Hier wurde eine Erd-Wasser-Wärmepumpe mit einer Leistung von 1.2 kW elektrisch bzw. 5 kW thermisch gewählt. Die modellierte Wärmepumpe hat ein reines ein-aus Verhalten, das heißt die elektrische Leistung hängt nur vom aktuellen Zustand der Wärmepumpe ab und kann nur auf ihrem jeweiligen Maximalwert oder Null sein. Das Abgabesystem ist auch hier eine Fußbodenheizung mit derselben Regelstrategie wie beim zuvor beschriebenen Passivhaus. Der Warmwasserspeicher ist mit 300 l ident zum Passivhaus und hat ebenfalls Priorität gegenüber der Heizung.

3.2.1.3 Bestandsgebäude

Als drittes Beispiel wird ein Bestandsgebäude betrachtet mit einer etwas geringeren Fläche von 120 m^2 . Dieses Gebäude hat von allen untersuchten aufgrund der schlechten Isolierung den höchsten spezifischen Wärmebedarf mit $100\text{ kWh/m}^2/\text{a}$. Die Wärmepumpe ist wie beim Niedrigenergiehaus ein-aus gesteuert und ebenfalls eine Erd-Wasser Wärmepumpe. Aufgrund des höheren Heizbedarfs ist jedoch die installierte Leistung mit 4 kW elektrisch bzw. 12 kW thermisch größer. Das Abgabesystem ist in diesem Fall eine klassische Radiatorheizung mit einer Systemtemperatur von 55 °C . Gesteuert wird dieses über ein Thermostatventil, welches auf eine fixen Sollwert von 20 °C regelt. Das Ventil öffnet wenn eine Differenz zwischen der gemessenen Raumtemperatur und dem Sollwert besteht. Der Warmwasserspeicher (300 l) hat auch in diesem Fall Priorität gegenüber der Heizung.

3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle

Zusätzlich gibt es hier einen Heizungsspeicher mit einem Fassungsvermögen von 500l. Dessen Temperatursollwert entspricht der Systemtemperatur der Radiatorheizung und hängt ähnlich wie beim Warmwasserspeicher (siehe Abbildung 3.2, links) von der jeweiligen Außentemperatur ab und wird nach einer fixen Hystereseffunktion geregelt.

3.2.1.4 Renoviertes Bestandsgebäude

Der vierte Gebäudetyp ist ein saniertes Bestandsgebäude, ebenfalls mit einer Fläche von 120 m². Es hat den zweithöchsten Wärmebedarf mit 70 kWh/m²/a. Als Heizsystem hat das Gebäude eine Luft-Wasser Wärmepumpe mit variabel steuerbarer Leistung (7 kW elektrisch / 2.7 kW thermisch) und Radiatoren als Abgabesystem. Das renovierte Bestandsgebäude hat sowohl einen Warmwasser- als auch einen Heizungsspeicher mit Volumina von 300l bzw. 500l. Die Regelung ist gleich wie beim reinen Bestandsgebäude, mit Thermostatventilen für die Radiatoren.

3.2.2 Lineare, vereinfachte thermische Modelle des Heizungssystems

Um sie im linearen, techno-ökonomischen Optimierungsmodell verwenden zu können, müssen die beschriebenen Modelle linearisiert werden. Dazu werden die Gesamtmodelle jeweils in separate Modelle für die Gebäude, den Warmwasser- und Heizungsspeicher sowie die Wärmepumpe aufgeteilt; die Einzelmodelle werden jeweils linearisiert und vereinfacht. Ein Überblick über die Modelle sowie ihre Interaktion ist schematisch in Abbildung 3.3 dargestellt.

In einem realen System bekommt zunächst der Regler ein Aktivierungssignal vom Aggregators und meldet den aktuellen Status (verfügbare Flexibilität, Speicherniveau, etc.) zurück. Unter Berücksichtigung der Aktivierung und der aktuellen Systemzustände ermittelt der Regler dann die notwendige elektrische Leistung der Wärmepumpe. Da der Fokus dieser Arbeit die Abschätzung der Flexibilität und der ökonomischen Erlöse ist, ist der Regler nicht implementiert und nur zur Vollständigkeit im Schema inkludiert. Aus der elektrischen Leistung erzeugt die Wärmepumpe thermische Wärmeströme, die jeweils als Eingänge für die Heizung und den Warmwasserspeicher dienen. Wenn ein Heizungsspeicher vorhanden ist fließt erster Wärmestrom in diesen Speicher, ansonsten direkt in das Gebäude. Vom Heizungsspeicher geht ein Wärmestrom weiter in das Gebäude, ein zweiter repräsentiert die Speicherverluste. Auch aus dem Warmwasserspeicher gehen zwei Wärmeströme nach außen, einer für den Warmwasserverbrauch der Benutzer und einer für die Speicherverluste. Die Zustandsgrößen des Systems sind dabei die Temperaturen der beiden Speicher sowie die Raumtemperatur und die Temperatur des Gebäudes, d.h. der Wände, Decke und des Bodens. Von Außen auf das System wirken die Außentemperatur,

3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle

3.2.2.1 Lineare Gebäudemodelle

Die Gebäude Modelle werden mittels der in Dymola vorhandenen automatischen Linearisierungsfunktion erstellt. Das Ergebnis daraus ist eine kontinuierliche Zustandsraumdarstellung, welche mit Zeitschritten von 900 s (15 min) diskretisiert wird:

$$x_{Raum}(t+1) = A_{Raum} \cdot x_{Raum}(t) + B_{Raum} \cdot u_{Raum}(t) \quad (3.1)$$

Das Gebäude wird als Zweiknotenmodell mit einem Luft- und einem Masseknoten abgebildet. Somit gibt es zwei Zustände, die Raumtemperatur und die „Wandtemperatur“. Letztere repräsentiert vereinfacht die Temperatur der Wände, des Bodens und der Decke im Gebäude.

$$x_{Raum} = \begin{bmatrix} T_{Wand} \\ T_{Raum} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Die Eingangsgrößen für das Gebäude sind der Wärmestrom, der von der Wärmepumpe bzw. vom Heizungsspeicher kommt, die Außentemperatur, die Sonneneinstrahlung sowie die inneren Lasten und die Belüftung.

$$u_{Raum} = \begin{bmatrix} Q_{Raum} \\ T_{au\ddot{a}}\text{u\ddot{a}}\text{en} \\ r_N \\ r_O \\ r_S \\ r_W \\ g_{int} \\ g_{vent} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Die linearisierte Systemmatrix A_{Raum} und Steuermatrix B_{Raum} ist je nach Gebäudemodell unterschiedlich. Für das Niedrigenergiehaus wurden beispielsweise folgende Matrizen ermittelt:

$$A_{Raum_NE} = \begin{bmatrix} 0.9991 & 6.63 \times 10^{-4} \\ 4.78 \times 10^{-4} & 0.9990 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$B_{Raum_NE} = \begin{bmatrix} 4.51 & 221 & 0.003 & 0.003 & 0.003 & 0.003 & 0.278 & -0.451 \\ 3.25 & 515 & 9.10 & 9.10 & 9.10 & 9.10 & 837 & -1360 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \quad (3.5)$$

3 Methode und analytisches Modell

Um zu überprüfen, wie gut die linearisierten Modelle das Verhalten der Gebäude abbilden können, werden sie, mit den detaillierten FMU Modellen validiert. Dazu wird das Abkühlverhalten des Gebäudes ausgehend von folgendem Arbeitspunkt analysiert:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{außen}} &= 0 \text{ °C} \\
 r_N &= r_O = r_S = r_W = 0 \text{ W/m}^2 \\
 g_{\text{int}} &= 7.3 \text{ W/m}^2 \\
 g_{\text{vent}} &= 1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h} \\
 Q_{\text{Raum}} &= 0
 \end{aligned}$$

Abbildung 3.4 (a) zeigt das Ergebnis der ersten Validierung für das Niedrigenergiehaus. Ausgehend vom Initialzustand $T_{\text{Raum}} = T_{\text{Wand}} = 20 \text{ °C}$ wird das detaillierte Gebäudemodell zunächst für 50 Zeitschritte (12.5 h) aufgeheizt, um das System und alle Zustandsgrößen in einen realistischen Anfangszustand zu bringen. Danach beginnt die eigentliche Validierung. Die Leistung der Wärmepumpe wird auf 0 gesetzt und das Verhalten des Gebäudes wird für 100 Zeitschritte (25 h) beobachtet. Dabei werden das detaillierte und das lineare Modell parallel berechnet. Das lineare Modell bekommt als Startzustand dieselben Werte wie das detaillierte zu Beginn des Abkühlvorgangs.

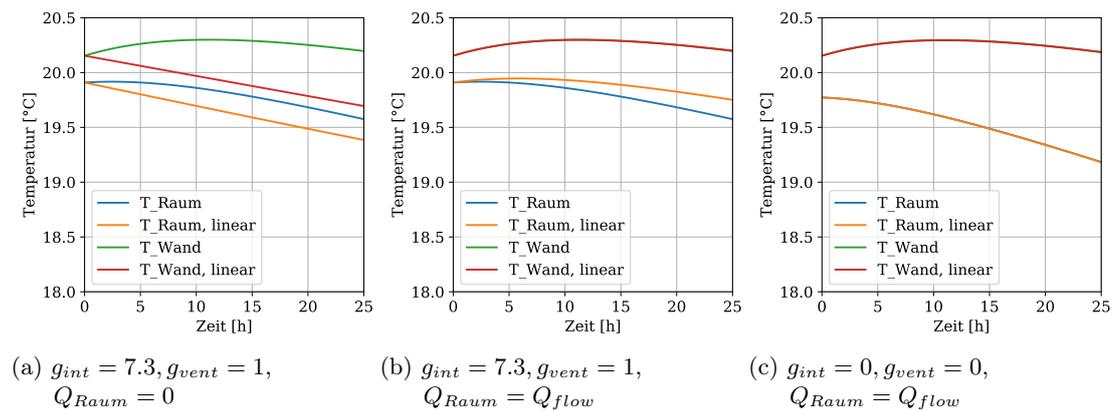


Abbildung 3.4: Validierung des Gebäudemodells für das Niedrigenergiehaus

Die orange und rote Kurve zeigen die Raum- bzw. Wandtemperatur für das lineare Modell. Man sieht, dass die Modelle einem gleichmäßigen Abkühlverhalten folgen und über den Betrachtungszeitraum um etwa 0.5 °C abkühlen. Die grüne und blaue Kurve zeigen die Temperaturverläufe die mit dem detaillierten Modell ermittelt wurden. Hier ist auffällig, dass die Wandtemperatur trotz deaktivierter Wärmepumpe zunächst weiter ansteigt und erst ab Stunde 10 langsam zu sinken beginnt. Bei der Raumtemperatur ist der Effekt in abgeschwächter Form ebenfalls zu sehen. Ab Stunde 15 ist das Abkühlverhalten annähernd linear, mit der gleichen Steigung wie das linearen Modells (orange).

3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle

Der Grund für das zunächst auftretende „Nachheizen“ der Gebäudemasse zeigt sich bei genauerer Analyse der Wärmeflüsse. Während in beiden Modellen der von der Wärmepumpe kommende Wärmestrom Null ist, gibt es im detaillierten Modell zusätzlich den Wärmestrom „ Q_{flow} “, welcher in den Masseknoten des Gebäudes fließt. Der Unterschied zwischen den beiden Wärmeströmen ist das dazwischenliegende Heizungssystem, im Fall des Niedrigenergiehauses eine Fußbodenheizung. Die Fußbodenheizung bzw. das Heizungswasser stellt selbst einen weiteren Speicher des Systems dar. Bei Stopp der externen Wärmezufuhr gibt er trotzdem weiterhin Wärme an die Gebäudemasse und in weiterer Folge an den Raum ab.

Zum Vergleich wird in Abbildung 3.4, Mitte, für das lineare Modell der Wärmestrom Q_{Raum} nicht auf Null, sondern gleich dem Massenstrom Q_{flow} aus dem detaillierten Modell gesetzt. Die anderen Eingänge bleiben gleich wie im vorigen Durchlauf. Man sieht, dass die Wandtemperaturen der beiden Modelle in diesem Versuch praktisch deckungsgleich sind und auch die Raumtemperatur im linearen Modell ähnlicher dem detaillierten Modell ist.

In einem letzten Schritt wird die Validierung für einen anderen Arbeitspunkt wiederholt, bei dem die internen Lasten ebenfalls auf Null gesetzt werden (siehe Abbildung 3.4 (c)):

$$\begin{aligned}T_{\text{außen}} &= 0\text{ °C} \\r_N &= r_O = r_S = r_W = 0\text{ W/m}^2 \\g_{\text{int}} &= 0\text{ W/m}^2 \\g_{\text{vent}} &= 0\text{ m}^3/\text{m}^2\text{h} \\Q_{\text{Raum}} &= Q_{\text{flow}}\end{aligned}$$

Der Wärmestrom im linearen Modell wird wieder gleich dem in den Masseknoten fließenden Wärmestrom aus dem detaillierten Modell gesetzt. In diesem Arbeitspunkt sind die beiden Abkühlverläufe sowohl für die Wand- als auch für die Raumtemperatur quasi deckungsgleich.

Da sich gezeigt hat dass insbesondere das Heizungssystem einen Einfluss auf das nicht-lineare Verhalten des Gebäudes hat, wird die Validierung zum Vergleich auch für das Bestandsgebäude mit Radiatorheizung durchgeführt. Das Ergebnis der Validierung ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Für diesen Fall ist es relativ schwierig, das reine Gebäudeverhalten zu untersuchen, da das detaillierte Modell einen zusätzlichen Heizungsspeicher hat. Um den Einfluss des Heizungsspeichers zu minimieren, wird die Wärmepumpe nach dem Initialisierungsvorgang abgeschaltet; danach wird das System abgekühlt, bis der Heizungsspeicher an seinem unteren Betriebspunkt von 50 °C ist und erst dann startet der Validierungsvorgang.

Auch hier werden nun das lineare und das detaillierte Modell vom gleichen Startzustand aus parallel abgekühlt (siehe Abbildung 3.5 (a)). Man sieht, dass der Verlauf der Wandtemperaturen auch im detaillierten Modell annähernd linear ist und beide Kurven nahezu

3 Methode und analytisches Modell

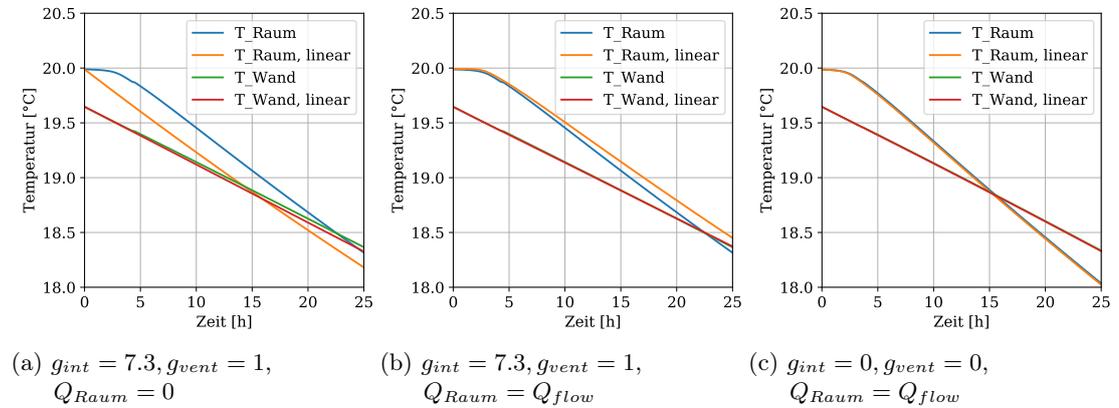


Abbildung 3.5: Validierung des Gebäudemodells für das Bestandsgebäude

deckungsgleich sind. Dies liegt daran, dass Radiatoren direkt die Luft heizen und das fehlende Heizungssystem im linearen Modell daher kaum Auswirkung auf die Wandtemperatur hat. Im Gegensatz dazu zeigt die Raumtemperatur am Beginn des Abkühlvorgangs sehr wohl eine nichtlineare Charakteristik und sinkt zunächst nur langsam. Zum einen liegt dies an der Restwärme im Heizungsspeichers, der nach wie vor auf das Gebäude wirkt. Zum anderen wirkt die Radiatorheizung bzw. das Heizungswasser selbst als Speicher. Man sieht jedoch, dass dieser Effekt (trotz Restwirkung des Pufferspeichers) deutlich geringer ausfällt als beim Gebäude mit Fußbodenheizung, da die Wassermenge und damit die Speichermasse bei einer Radiatorheizung geringer ist. Daher ist die Abweichung der Raumtemperatur zwischen den beiden Modellen in diesem Fall nur etwa $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Um das Verhalten des reinen Gebäudes (ohne Speicher) besser vergleichen zu können, wird im zweiten Testlauf der Wärmestrom für das lineare Modell wieder gleich dem Q_{flow} , welcher im detaillierten Modell in den Luftknoten fließt, gesetzt. Dies ist in Abbildung 3.5 (b) und (c) für zwei verschiedene Arbeitspunkte dargestellt. Man sieht, dass das Gebäudeverhalten sehr gut zum detaillierten Modell passt. Für den Arbeitspunkt bei dem alle Eingänge auf Null sind, sind die Modelle auch hier praktisch deckungsgleich.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die von Dymola linearisierten Gebäudemodelle in den untersuchten Arbeitspunkten relativ gut mit dem Verhalten der nicht-linearen Modelle übereinstimmen. Allerdings ist in dieser Vereinfachung die Heizung selbst nicht inkludiert, und damit der Speicher durch das Heizungswasser vernachlässigt. Für die Gebäude mit Radiatoren ist dies eine gute Näherung, da die Radiatorheizung eine relativ kleine Speichermasse hat. Die Fußbodenheizung hat eine größeres Wasservolumen und damit das Gesamtsystem eine größere Speicherkapazität und Trägheit. Daher stellt das Weglassen des Heizungssystems für diesen Fall eine relativ starke Vereinfachung dar. Man

3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle

könnte ein separates Modell für die Heizung erstellen und die Temperatur des Heizwassers als zusätzlichen Zustand einführen. Allerdings hängt die Wärmeabgabe vom Heizsystem in den Raum von der aktuellen Raumtemperatur ab, welche wiederum von der Wärmezufuhr abhängt. Dieses nichtlineare Verhalten kann nur schwer in einem linearen Modell abgebildet werden. Daher wird die Heizung in einer ersten Näherung vernachlässigt. Der mögliche Einfluss des Heizungssystems auf die Flexibilität und Erlöse des Wärmepumpenpools wird in Kapitel 4.5 qualitativ behandelt.

3.2.2.2 Lineare Speichermodelle

Die Linearisierungsfunktion von Dymola ist für die thermischen Speicher nicht anwendbar bzw. lieferte kein verwendbares Ergebnis. Daher wird ein allgemeines, vereinfachtes thermisches Modell, basierend auf der folgenden Differentialgleichung aufgestellt:

$$\rho \cdot V_{\text{Speicher}} \cdot c_W \cdot \frac{dT_{\text{Speicher}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{ein}} - \dot{Q}_{\text{aus}} - u_A \cdot (T_{\text{Speicher}} - T_{\text{Raum}}) \quad (3.6)$$

ρ	Dichte von Wasser (1000 kg/m ³)
V_{Speicher}	Volumen des Speichers (WW-Speicher: 300 l, HS-Speicher: 500 l)
c_W	spezifische Wärmekapazität von Wasser (4186.8 J/(kgK))
T_{Speicher}	Temperatur des Speichers [K]
Q_{ein}	Zufließender Wärmestrom [J]
Q_{aus}	Abfließender Wärmestrom [J]
u_A	Wärmeübertragungskoeffizient [W/K]
T_{Raum}	Umgebungstemperatur (= Raumtemperatur) [K]

Die Gleichung ist sowohl für den Warmwasser- als auch für den Heizungsspeicher anwendbar. Die Speicher unterscheiden sich primär durch ihre Volumina (300 l bzw. 500 l) und Wärmeübertragungskoeffizienten, sie sind gleich für die verschiedenen Gebäudetypen. Bei ersterem entspricht der abfließende Wärmestrom dem entnommenen Warmwasser, bei zweiterem der in den Raum abgegebenen Wärmemenge. Der zufließende Wärmestrom ist jeweils die von der Wärmepumpe zugeführte Wärmemenge. Der gewählte Ansatz entspricht einem Ein-Knotenmodell mit der Speichertemperatur T_{Speicher} als einziger Zustandsgröße. Um ein genaueres thermisches Verhalten abzubilden, könnten ein Mehrknotenmodell verwendet werden, bei dem die Speicher in mehrere thermische Schichten geteilt werden, welche jeweils eigene Zustandsgrößen darstellen. In Anlehnung an die Masterarbeit von S. Pfaffen zum Thema „Tertiärregelenergie im Wärmepool für den Schweizer Markt“ [24], wird in dieser Arbeit jedoch vereinfachend das Ein-Knotenmodell verwendet.

3 Methode und analytisches Modell

Der einzige unbekannte Parameter in Gleichung 3.6 ist der Wärmeübertragungskoeffizient u_A . Dieser beschreibt die thermischen Verluste des Speichers an die Umgebung. Für die Parameteridentifikation wird das Verhalten des gewählten lineare Modells mit jenem des detaillierten verglichen. Dazu wird folgender Arbeitspunkt angenommen:

$$T_{Raum} = 22\text{ °C}$$

$$Q_{ein} = Q_{aus} = 0\text{ J}$$

$$T_{Speicher}(t = 0) = 60\text{ °C}$$

Durch das Nullsetzen der Wärmeströme wird sichergestellt, dass die Entladung vom Speicher allein aufgrund thermischer Verluste an die Umgebung stattfindet. Es wird außerdem der reguläre Betriebstemperaturbereich (angenommen mit $50\text{ °C} - 60\text{ °C}$) untersucht. Abbildung 3.6 zeigt, dass das angenommene lineare Verhalten im gewählten Arbeitspunkt über den gesamten Betriebstemperaturbereich für beide Speicher relativ gut erfüllt ist.

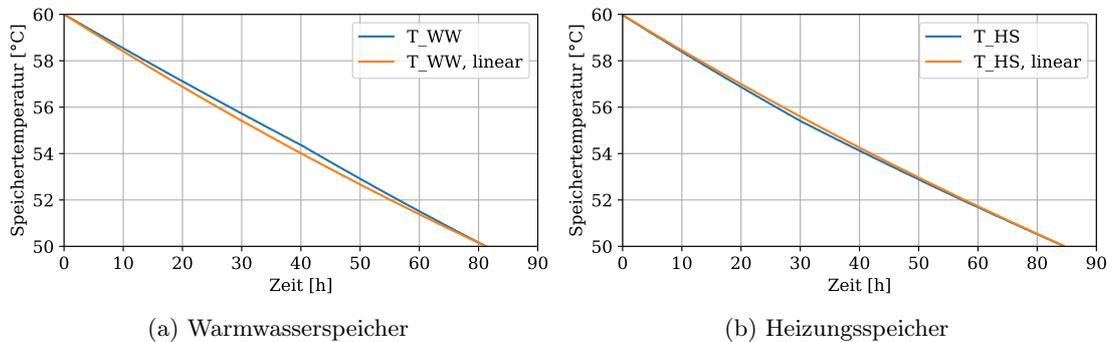


Abbildung 3.6: Validierung der Speichermodelle: Temperaturkurven des Entladevorgangs zur Parameteridentifikation der u_A -Werte

Aus der aufgenommenen Entladekurve des detaillierten Speichermodells werden die Entladezeiten ermittelt (siehe Tabelle 3.2). Der Parameter u_A wird nun mittels Approximationsverfahrens so ermittelt, dass die linearen Modelle jeweils die gleiche Entladezeit erreichen. Die Ergebnisse für beide Speicher sind ebenfalls in Tabelle 3.2 angeführt.

	Volumen [l]	Betriebstemperatur [°C]	Entladezeit [h]	u_A [W/K]
WW Speicher	300	50 - 60	71.25	1.4954
HS Speicher	500	50 - 60	74.50	2.3719

Tabelle 3.2: Parameteridentifikation der linearen thermischen Speichermodelle

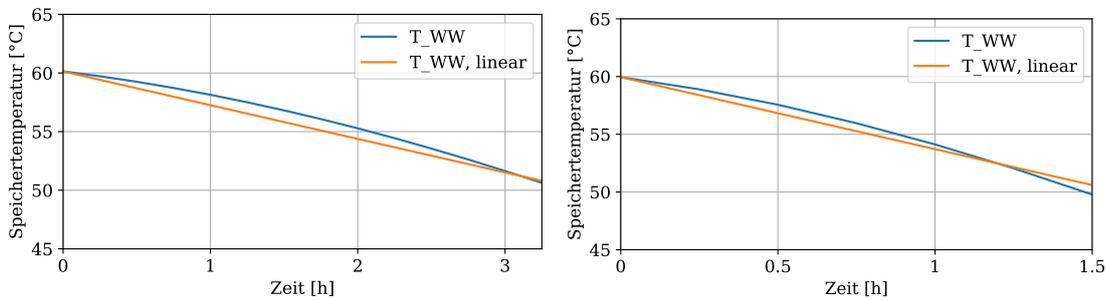
Für das Modell des Warmwasserspeichers ist ein weiterer unbekannter Parameter die

3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle

abfließende Wärmemenge Q_{aus} , welche dem Warmwasserverbrauch entspricht. Dieser ist in Form eines Massenstroms \dot{m} in kg/s bekannt (siehe dazu auch Kapitel 3.3.1.3). Um diesen in einen Wärmestrom umzuwandeln, wird folgende Formel verwendet:

$$\frac{\Delta Q_{aus}}{\Delta t} = \frac{\Delta m_{Zapf}}{\Delta t} \cdot c_W \cdot (T_{Zapf} - T_{Zufluss}) \quad (3.7)$$

Δm_{Zapf} Warmwasserverbrauch [kg/s]
 T_{Zapf} Zapftemperatur [K]
 $T_{Zufluss}$ Zufusstemperatur [K]



(a) Min. Durchfluss $\dot{V} = 6.5 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

(b) Max. Durchfluss $\dot{m} = 14.5 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Abbildung 3.7: Validierung der Speichermodelle - Entladekurven zur Ermittlung von Q_{WW}

Für die Zapftemperatur werden konstant 50°C angenommen, für die Zufusstemperatur 15°C . Vereinfachend wird letztere über das gesamte Jahr konstant angenommen (d.h. unabhängig von der Außentemperatur). Zur Validierung der mathematischen Beschreibung der abgeführten Wärmemenge, Gleichung 3.7, wird das lineare Modell mit dem detaillierten Modell verglichen. Als Arbeitspunkte werden die beiden Extremwerte des maximalen und minimalen Zuflusses gewählt:

$$m_{Zapf,min} = 6.5 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = 5.8 \text{ l/15 min}$$

$$m_{Zapf,max} = 14.5 \times 10^{-3} \text{ kg/s} = 13.1 \text{ l/15 min}$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Man sieht, dass das Entladeverhalten für die zwei Arbeitspunkte über den gesamten Betriebsbereich gut angenähert werden kann.

Durch die Validierung konnte gezeigt werden, dass die gewählte vereinfachte mathematische Beschreibung gut mit den detaillierten Modellen übereinstimmt. Die angesetzte Differentialgleichung 3.6 wird analog zum Gebäudemodell in eine Zustandsraumdarstellung

3 Methode und analytisches Modell

gebracht. Damit ergeben sich die System- und Steuermatrizen für den Warmwasserspeicher zu

$$A_{WWS} = 0.9989 \quad (3.8)$$

$$B_{WWS} = [7.16 \times 10^{-4} \quad -104.94 \quad 1.07 \times 10^{-3}] \quad (3.9)$$

und für den Heizungsspeicher zu

$$A_{HS} = 0.990 \quad (3.10)$$

$$B_{HS} = [4.30 \times 10^{-4} \quad -4.30 \times 10^{-4} \quad 1.02 \times 10^{-3}] \quad (3.11)$$

Die Zustände sind jeweils die mittleren Speichertemperaturen:

$$x_{WWS} = T_{WWS} \quad (3.12)$$

$$x_{HS} = T_{HS} \quad (3.13)$$

Die Eingänge für den Warmwasserspeicher sind die Wärmemenge, die von der Wärmepumpe kommt, der abgezapfte Massenstrom und die Raumtemperatur:

$$u_{WWS} = \begin{bmatrix} Q_{WWS} \\ m_{Zapf} \\ T_{Raum} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Der Eingangsvektor für den Heizungsspeicher besteht aus der Eingangswärmemenge, der Umgebungstemperatur und der in den Raum abgegebenen Wärmemenge:

$$u_{HS} = \begin{bmatrix} Q_{HS} \\ Q_{Raum} \\ T_{Raum} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.2 Erstellung und Validierung der thermischen Modelle

3.2.2.3 Lineare Wärmepumpenmodelle und Regelung

Das Verhalten der Wärmepumpen wird ebenfalls linear abgebildet, mittels einer monatlichen Leistungszahlen (Coefficient of Performance - COP) und der monatlich maximalen elektrische Leistungen (P_{max}). In Realität sind die Leistungszahlen abhängig von der Eingangstemperatur, also die Temperatur der Luft oder Erde, und der Zieltemperatur des Wassers. Das heißt, dass der COP Wert je nach Umgebungstemperatur und Temperaturniveau des Speichers variiert. Da dieses Verhalten nicht direkt linear abgebildet werden kann, wird vereinfachend ein monatlich konstanter Wert für COP und P_{max} jeweils für die Heizung und Warmwasseraufbereitung ermittelt. Abbildung 3.8 zeigt einen Vergleich für das Niedrigenergiehaus zwischen den vereinfachten, konstant angenommenen Werten (orange) und den in der detaillierten Simulation ermittelten (blau). Die zweigeteilte Kurve beschreibt jeweils die Heizung, die im Sommer nicht zum Einsatz kommt, die durchgehende Kurve beschreibt den Warmwasserspeicher. Im Vergleich sieht man, dass die monatlichen Durchschnittswerte das Verhalten der Wärmepumpe näherungsweise wiedergeben können.

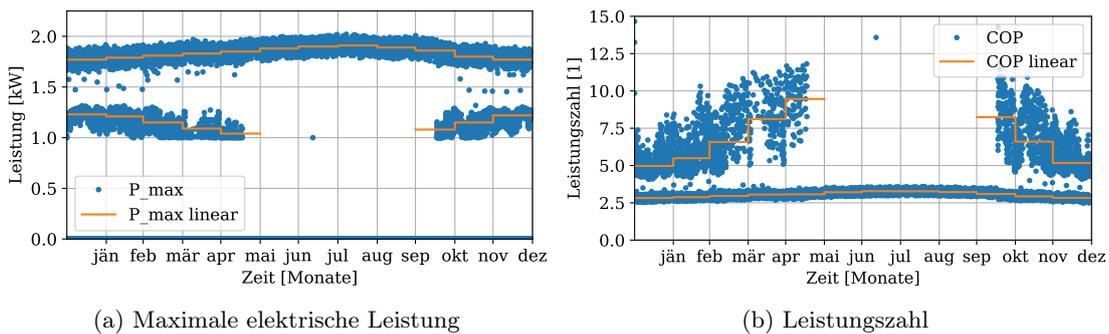


Abbildung 3.8: Validierung der Wärmepumpenmodelle am Beispiel des Niedrigenergiehauses. Vergleich zwischen detaillierter Simulation (blau) und linearisiertem Verhalten (orange)

Das dynamische Verhalten der Wärmepumpe, wie zum Beispiel der Einschalt- und Ausschaltvorgang, wird im vereinfachten Modell nicht berücksichtigt. Dies ist zulässig, da die Berechnungsschritte 15 min betragen und die Schaltvorgänge viel kürzer sind. Auch Mindestlaufzeiten bzw. Mindeststillstandzeiten werden vereinfachend nicht abgebildet. Um das Optimierungsmodell linear zu halten, wird die elektrische Leistung der Wärmepumpe als kontinuierlich veränderbar modelliert. Tatsächlich ist dies nur für einen Teil der Modelle (Passivhaus und renoviertes Bestandsgebäude) der Fall, die anderen Wärmepumpen sind ein-aus gesteuert. Um dies in der Simulation abbilden zu können, wird jeweils ein Wärmepumpenmodell für 10 tatsächliche Wärmepumpen verwendet und die Leistungen entsprechend um den Faktor 10 hochskaliert. Das vergrößerte, kontinuierliches Modell

3 Methode und analytisches Modell

entspricht somit näherungsweise dem Verhalten von 10 einzelnen, ein-aus gesteuerten Wärmepumpen.

Auch die Regelung des Heizungssystems wird in den linearen Modellen vereinfacht angenommen. Das generelle Prinzip wurde bereits in Abbildung 3.3 dargestellt: Von der Wärmepumpe gehen zwei Wärmeströme jeweils zum Heizungs- und Warmwasserspeicher, bzw. falls ersterer nicht vorhanden ist, direkt in das Gebäude. Die Speicher werden so geregelt, dass ihre Temperaturen im vorgegebenen Arbeitsbereich bleiben. Das Gebäude bekommt als Eingang einen Wärmestrom, der je nach Heizungssystem direkt in den Luft- oder Wandknoten geht, das Heizungssystem selbst wird nicht modelliert. Daher wird auch die im detaillierten Modell verwendete Rücklauftemperatur nicht als Führungsgröße verwendet. Die Heizung wird nur mittels der Raumtemperatur geregelt.

Im Gegensatz zum in Abbildung 3.2 dargestellten Reglerverlauf des detaillierten Modells, kann die Heizung im vereinfachten Modell beliebig ein und aus geschaltet werden und folgt keiner fixen Hysterese. Dies ist gleichzeitig eine notwendige Annahme, um die Flexibilität des Gebäudes überhaupt nutzbar zu machen: Wenn fixe ein-aus Schaltungen vorgegeben wären, könnte das System nicht auf externe Schaltbefehle reagieren und beispielsweise einem Marktsignal folgen. Gleiches gilt für die Radiatorheizung, die im detaillierten Modell immer auf eine fixe Raumtemperatur (20 °C) regelt. Bei einem solchen Heizungsverhalten könnte ebenfalls keine Flexibilität des Gebäudes genutzt werden. Daher wird auch bei den Gebäuden mit Radiatorheizung angenommen, dass die Heizung beliebig in einem vorgegebenen Temperaturband geregelt werden kann.

3.3 Datengrundlage

Im Folgenden werden alle für die Optimierung notwendigen Eingangsdaten beschrieben. Dies betrifft insbesondere historische Regelenergiepreise, Einstrahlungswerte und Außentemperaturen sowie interne Lasten und Warmwasserprofile.

Eine wesentliche Annahme bzw. Vereinfachung für das Optimierungsmodell ist die Verwendung historischer Daten und damit die Erstellung eines „perfect foresight“ Modells. Es wird angenommen, dass der Aggregator, der die Wärmepumpen vermarktet, eine perfekte Prognose, der Preise und Abrufwahrscheinlichkeiten am Regelenergiemarkt und eine akkurate Vorhersage des Wetters hat. In der Realität würde ein Aggregator auch Prognosen über das Markt-, Wetter- und Benutzerverhalten machen, allerdings würde sich durch die vorhandenen Unsicherheiten üblicherweise geringere Erlöse einstellen. Der gewählte Ansatz stellt also eine „best case“ Annahme dar.

3.3.1 Wetterdaten und Benutzerverhalten

Als Eingangsdaten für die thermischen Modelle werden Zeitreihen für das Wetter, die internen Lasten und den Warmwasserverbrauch benötigt. Wie auch die thermischen Modelle, werden die Daten analog zum Projekt iWPP-Flex [7] verwendet; allerdings werden die Eingangsdaten für die einzelnen Wärmepumpen variiert um ein realistischeres und durchmisches Verhalten abzubilden.

3.3.1.1 Außentemperaturen und Einstrahlungswerte

Ein wesentlicher Einflussparameter auf das Heizverhalten sind die Wetterdaten, also die Umgebungstemperatur sowie die Sonneneinstrahlung. Die Daten wurden von Meteororm [28] bezogen und stammen von vier typischen österreichischen Standorten, Wien, Graz, Salzburg und Innsbruck. Die Außentemperaturen stehen jeweils in stündlichen Werten für das gesamte Jahr zur Verfügung; dabei wurde ein „typisches“ Jahr aus den Messwerten der Jahre 1961-1990 erstellt. Auch die Einstrahlungsdaten sind in einem stündlichen Profil gegeben und aus Messwerten von 1981-1990 von Meteororm erstellt. Dabei gibt es für jede der vier Himmelsrichtungen einen Einstrahlungswert in W/m^2 .

3.3.1.2 Interne Lasten

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf das thermische Verhalten sind die internen Lasten, wie beispielsweise die Anwesenheit von Personen, die Wärmeerzeugung von Geräten aber auch die Belüftung des Gebäudes. In den Modellen werden diese über die beiden Terme des internen Gewinns und der Ventilation berücksichtigt. Beide werden aus der ÖNORM B8110-3 2012 entnommen:

Der interne Gewinn wird dort in W/m^2 angegeben und repräsentiert die spezifische Wärmelast der Haushaltsgeräte und anwesenden Personen. In der Norm ist dies in stündlicher Auflösung für einen typischen Tag gegeben. Für die Belüftung werden aus der Norm die stündlichen Werte des spezifischen hygenischen Luftvolumenstroms in m^3/m^2 verwendet. Da für die internen Lasten keine Messungen vorlagen werden sie direkt laut Norm verwendet und auch nicht variiert.

3.3.1.3 Warmwasserprofil

Für den Warmwasserverbrauch wurde im Projekt iWPP-Flex ein wöchentliches Profil mittels des Tools „DHW-calc“ der Universität Kassel generiert. Der Verbrauch ist dabei viertelstündlich in kg/s gegeben. Umgerechnet in Liter ergibt sich eine Abzapfmenge

3 Methode und analytisches Modell

zwischen 5.81 - 13.11 pro Viertelstunde. Für das gesamte Jahr ergibt dies mit Gleichung 3.7 einen Warmwasserverbrauch von rund 2600 kWh/a pro Gebäude. (Im Projekt iWPP-Flex wurde ein höherer Verbrauch von 3000 kWh/a angenommen, da dort eine Zapftemperatur von 55 °C verwendet wurde. Allerdings hat die Validierung in 3.2.2.2 gezeigt, dass für die linearen Modelle eine Zapftemperatur von 50 °C das thermische Verhalten des Warmwasserspeichers besser abbildet.) Um der Tatsache gerecht zu werden, dass verschiedene Haushalte jeweils zu unterschiedlichen Zeiten Warmwasser verbrauchen, werden zeitliche Permutationen des Profils verwendet. Es werden fünf unterschiedliche Profile generiert, die jeweils um eine Stunde zueinander verschoben sind.

3.3.2 Marktdaten

In dieser Arbeit wird mit dem Wärmepumpen Pools nur Tertiärregelreserve angeboten. Dieser hat wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben zum jetzigen Zeitpunkt die für Wärmepumpen am einfachsten zu erfüllenden Präqualifikationsbedingungen. Allerdings kann die hier entwickelte Methodik ab der Umstellung auf kürzere Vierstundenprodukte auch analog für den Sekundärregelenergiemarkt verwendet werden.

Für die Abbildung des Marktes werden in der Optimierung historische Daten verwendet. Wie eingangs erwähnt stellt dies ein best-case Szenario dar, indem angenommen wird, dass bereits vor der Optimierung alle Preise und Abrufwahrscheinlichkeiten bekannt sind. Für die Preisdaten werden die wöchentlichen Ausschreibungen vom Jahr 2016 verwendet. (Die tägliche Leistungsausschreibung wurde erst Mitte 2016 eingeführt und wird daher vereinfachend nicht berücksichtigt.) Für die Energie- und Leistungspreise werden jeweils die von der APG veröffentlichten mittleren Preise verwendet [29]. Es wird angenommen, dass dies in etwa dem Preis bei einer mittleren Position in der Merit Order entspricht. Der Verlauf der Preise für das Jahr 2016 ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

Die Annahmewahrscheinlichkeit um am Markt teilnehmen zu können, wird zwar als Variable in der Optimierung berücksichtigt, sie wird in dieser Arbeit allerdings auf 1 gesetzt, das heißt dass der Pool zur gesamten Zeit in der Leistungsauktion zum Zug kommt. Für den tatsächlichen Abruf der Energie werden die historischen Abrufwahrscheinlichkeiten herangezogen. Auch hier wird angenommen, dass sich der Pool immer in der Mitte der Merit Order befindet, das heißt er würde dann abgerufen werden, wenn mehr als die Hälfte der angebotenen Regelenergie abgerufen worden wäre. Die Abrufwahrscheinlichkeiten sind monatlich pro Vierstundenprodukt berechnet und werden vom Projekt iWPP-Flex [7] für diese Arbeit zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 3.10).

In dem Projekt wurde neben diesem mittleren Preisszenario auch ein Niedrigpreisszenario erstellt, bei dem angenommen wird, dass sich der Pool immer am untersten Ende der

3.3 Datengrundlage

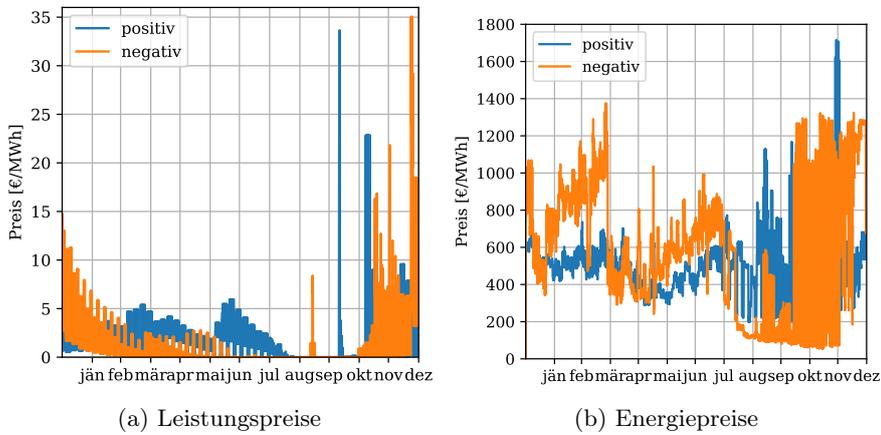


Abbildung 3.9: Mittlere Preise für Tertiärregelleistung bzw. -energie 2016 (Daten von [29])

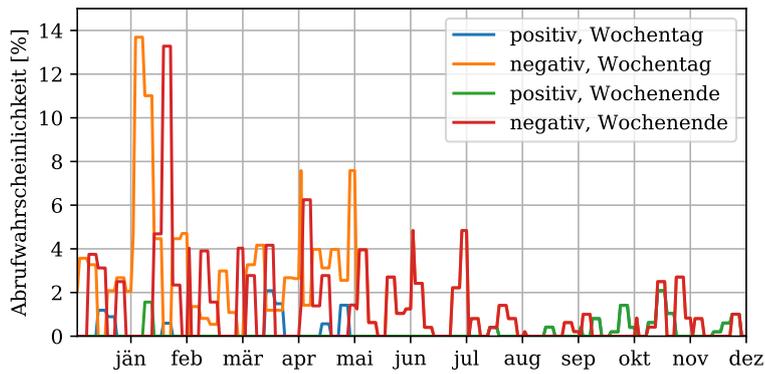


Abbildung 3.10: Abrufwahrscheinlichkeiten für Tertiärregelenergie 2016 (Daten von [29] und [7])

Merit Order befindet. Damit sind die erzielten Preise niedriger, aber die Abrufwahrscheinlichkeiten höher, da der Pool bei jedem Regelenergieabruf zum Zug kommt. Allerdings hat sich im Projekt gezeigt, dass die Erlöse für einen Wärmepumpen-Pool für das mittlere Szenario höher sind, weshalb in dieser Arbeit nur das mittlere Szenario betrachtet wird.

3.4 Pool Zusammensetzung

Im Vorgängerprojekt iWPP-Flex [7] wurden jeweils die Leistung eines Wärmepumpenmodells hochskaliert, um den gesamten Pool abzubilden. Eine der wesentlichen Verbesserungen dieser Arbeit ist es, ein möglichst realistisches Pool mit größerer Variabilität zu verwenden. Dies wird im folgenden Kapitel beschrieben.

In der Realität würde ein Pool aus kleinen Flexibilitäten aus mehreren hundert oder tausend Anlagen bestehen, um die geforderten Mindestleistungen für den Regelenenergiemarkt liefern zu können. Bei dieser großen Anzahl ist es nicht sinnvoll, jede der Einheiten separat zu modellieren. Zum einen ist der Rechenaufwand sehr hoch, zum anderen sind die thermischen Parameter der Gebäude und Anlagen oft nicht für alle KundInnen im Detail bekannt. Hinzu kommt die Unsicherheit durch fluktuierende Wetterbedingungen und die BenutzerInnen selbst, wie variierende Anwesenheitszeiten, Öffnen der Fenster, etc. die einen großen Einfluss auf das thermische Verhalten haben [30]. Allerdings ist es eine starke Vereinfachung wenn der gesamte Pool wie im Projekt iWPP-Flex [7] oder im schweizer Projekt WARMup [23] durch ein einziges, hochskaliertes Modell beschrieben wird, da so das variable Verhalten der einzelnen KundInnen gar nicht abgebildet wird.

Ein guter Mittelweg wird im Konferenzbeitrag „Residential buildings with heat pumps, a verified bottom-up model for demand side management studies“ von Patteeuw D. et al. beschrieben [25]: Dort wird erläutert, dass der elektrische Verbrauch von 70 Gebäuden bereits eine gute Repräsentation der Lastverteilung eines viel größeren Pools darstellt. In dem Beitrag wurde ein Gebäudemodell verwendet, aus dem durch Variation der Eingangsdaten 100 unterschiedliche Kunden abgebildet wurden. In dieser Arbeit werden zur Beschränkung der Rechenleistung und -zeiten als Kompromisslösung 40 verschiedene Kunden verwendet. Dadurch kann zwar kein perfekt divergentes Verhalten nachgebildet werden, jedoch eine akzeptable Mischung.

3.4.1 Gebäudereiner Pool

Wie in Kapitel 4.1 detaillierter beschrieben, werden zunächst einige Szenarien separat pro Gebäudetyp untersucht. Hier wird dementsprechend für alle 40 unterschiedlichen KundInnen das gleiche thermische Modell verwendet, nur die Eingangsparameter werden variiert. Unterscheidungsgrößen sind dabei die Wetterdaten der vier Standorte (Wien, Salzburg, Graz und Innsbruck) und die fünf zeitlich verschobenen Warmwasserverbrauchsprofile. Außerdem werden die Startwerte der Zustandsgrößen (Speicher- und Raumtemperaturen) zu Beginn des jeweiligen Optimierungszeitraums (= 1 Woche) variiert. Die Startwerte der Raumtemperatur werden innerhalb des Komfortbereichs variiert, der für das Standardszenario zwischen 20 °C und 23 °C liegt; für den Warmwasser- und Heizungsspeicher variieren die Temperaturen innerhalb des Betriebsbereichs von 50 °C und 60 °C. Bei der

3.4 Pool Zusammensetzung

Wahl der Startwerte wird jeweils zur oberen bzw. unteren Temperaturgrenze ein Sicherheitsabstand eingehalten, um zu verhindern, dass es bereits zu Beginn der Berechnung zu Grenzwertverletzungen kommt. In Tabelle 3.3 ist die Variation der Parameter der 40 modellierten KundInnen und die resultierende Zusammensetzung des Pools aufgelistet.

Wetterdaten		Wien					Graz					Innsbruck					Salzburg				
Warmwasserprofil		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
T_Raum(0)	T_Speicher(0)																				
20.5°C	50.5°C	x					x					x					x				
20.65°C	51°C		x					x					x					x			
20.8°C	52°C			x					x					x					x		
20.95°C	53°C				x					x					x					x	
21.1°C	54°C					x					x					x					x
21.25°C	55°C	x					x					x					x				
21.4°C	56°C		x					x					x					x			
21.55°C	57°C			x					x					x					x		
21.7°C	58°C				x					x					x					x	
21.85°C	59°C					x					x					x					x

Tabelle 3.3: Durchmischung des Wärmepumpen-Pools für den gebäudereinen Pool

Wie in Kapitel 3.2.2.3 beschrieben, wird die Leistung der Wärmepumpen als kontinuierlich angenommen, um ein lineares Optimierungsverfahren verwenden zu können. Da viele der Wärmepumpen in der Realität jedoch ein diskretes ein-aus Verhalten haben, wird jeder der individuell abgebildeten Fälle mit dem Faktor zehn multipliziert und repräsentiert somit zehn idente Einzelgebäude. Damit enthält der modellierte Wärmepumpen-Pool insgesamt 400 Einfamilienhäuser mit Wärmepumpen. Bei einer Leistung von etwa 1 - 3.5 kW pro Wärmepumpe ergibt das eine Gesamtleistung von 0.4 - 1.4 MW. Wie im Kapitel 2.1.1 beschrieben ist dies nicht ausreichend um die aktuelle Mindestleistung für den Regelenergiemarkt zu erfüllen. Es wird daher angenommen, dass der Aggregator neben den Wärmepumpen noch andere flexible Einheiten in seinem Pool hat, um die Mindestleistung und die notwendige Redundanz zu erfüllen. Allerdings wird angenommen, dass der Wärmepumpen-Pool alleine die zeitlichen Vorgaben des Regelenergiemarktes (Vorhaltung der Leistung über die gesamte Produktlänge von vier Stunden) erfüllen können muss.

3.4.2 Gemischter Pool

Neben der Untersuchung getrennt nach Gebäudetypen wird ein durchmischter Pool verwendet, der den österreichischen Gebäudebestand repräsentieren soll. Im Projekt iWPP-Flex [7] wurden dazu zwei unterschiedliche repräsentative Zusammensetzungen definiert, jeweils eine für einen Pool mit hohem Sanierungsanteil und eine mit hohem

3 Methode und analytisches Modell

Neubauanteil (siehe Abbildung 3.11). Die prozentuelle Aufteilung nach Gebäuden wird umgelegt auf den Pool mit 400 KundInnen bzw. 40 KundInnentypen und führt zu einer noch besseren, realistischeren Durchmischung.

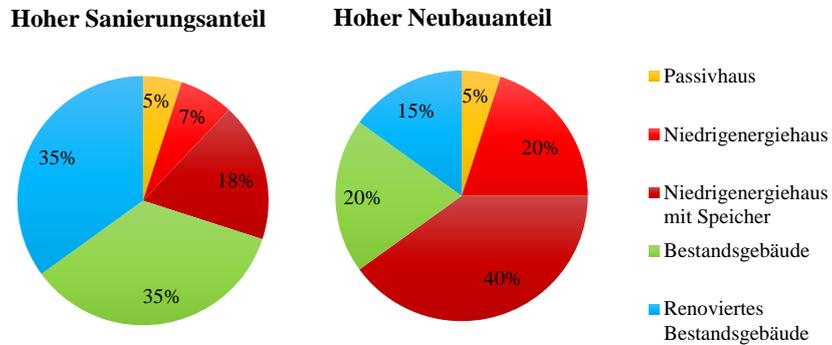


Abbildung 3.11: Verteilung der Gebäudemodelle für den Österreichischen Pool im Projekt iWPP-Flex (Abbildung nach: [7])

Wetterdaten		Wien					Graz					Innsbruck					Salzburg					
Warmwasserprofil		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	
T_Raum(0)	T_Speicher(0)																					
20.5°C	50.5°C	P					RB					B					N					
20.65°C	51°C		N					RB					RB					B				
20.8°C	52°C			NS					B					B					NS			
20.95°C	53°C				B					RB					RB					B		
21.1°C	54°C					RB					NS				B						RB	
21.25°C	55°C		NS					B					RB					RB				
21.4°C	56°C			B					NS					B					NS			
21.55°C	57°C				RB					B					RB					B		
21.7°C	58°C					RB					N				B						RB	
21.85°C	59°C					B						P					NS					RB

Tabelle 3.4: Durchmischung des Wärmepumpen-Pools für den Österreichischen Pool mit hohem Sanierungsanteil

In Tabelle 3.4 ist die Parametervariation für den Pool mit hohem Sanierungsanteil dargestellt, wobei jedes Kästchen wie auch schon oben einem KundInnentyp bzw. zehn diskreten KundInnen entspricht. Tabelle 3.5 zeigt die Variation für den Pool mit hohem Neubauanteil. Zur besseren Übersicht wird in dieser Arbeit an allen Stellen an denen ein Vergleich zwischen den Gebäudetypen gemacht wird, eine einheitliche Farbgebung gewählt: Orange entspricht dabei dem Passivhaus, hellrot dem Niedrigenergiehaus, dunkelrot dem Niedrigenergiehaus mit Speicher, grün dem Bestandsgebäude und blau dem renovierten Bestandsgebäude.

3.5 Beschreibung des Optimierungsmodells

Wetterdaten		Wien					Graz					Innsbruck					Salzburg				
Warmwasserprofil		-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2	-2	-1	0	1	2
T_Raum(0)	T_Speicher(0)																				
20.5°C	50.5°C	P					NS					B					N				
20.65°C	51°C		N					NS					NS					B			
20.8°C	52°C			NS					N					N					NS		
20.95°C	53°C				NS					RB					RB					N	
21.1°C	54°C					RB					NS					B					NS
21.25°C	55°C	NS						B				NS					RB				
21.4°C	56°C		B						NS				N					NS			
21.55°C	57°C			NS					B					RB					B		
21.7°C	58°C				N					N					NS					NS	
21.85°C	59°C					B					P					NS					RB

Tabelle 3.5: Durchmischung des Wärmepumpen-Pools für den Österreichischen Pool mit hohem Neubauteil

3.5 Beschreibung des Optimierungsmodells

Um die möglichen Erlöse des Wärmepumpen-Pools am Regenergiemarkt zu ermitteln, wird ein schrittweises lineares Optimierungsmodell in Pyomo, dem Optimierungstool von Python erstellt. Als Solver wird Gurobi verwendet. Da die Flexibilität am wöchentlichen Tertiärregenergiemarkt angeboten wird, erfolgt die Optimierung auch jeweils für eine Woche, auf einer 15 Minuten Zeitbasis. Um die Optimierungsvariablen, die das Modell berechnen soll, leichter von den vorgegebenen Parametern unterscheiden zu können, werden erstere in den folgenden (Un-)Gleichungen jeweils **fett** dargestellt.

3.5.1 Zielfunktion

Das Ziel der Optimierung ist eine Maximierung des Erlöses des gesamten Pools am Tertiären Regenergiemarkt. Die Optimierungsvariablen dabei sind die angebotene Leistung, sowohl für positive Regenergie, also eine Verringerung des Verbrauchs, als auch für negative Regenergie, also eine Erhöhung des Verbrauchs. Über die historischen mittleren Energie- und Leistungspreise sowie die Abrufwahrscheinlichkeiten bei einer Positionierung in der Mitte der Merit Order wird der Erlös in jeder Viertelstunde berechnet und für die gesamte Woche aufsummiert. Die Annahmewahrscheinlichkeit für die Leistungsauktion ist mit 1 angenommen. Der Faktor 4 kommt durch die zeitliche Auflösung in Viertelstundenwerten und der Faktor 1000 durch die Umrechnung von MWh auf kWh.

3 Methode und analytisches Modell

$$\begin{aligned} \max_{flex(+), flex(-)} \mathbf{Profit} = \frac{1}{4 \cdot 1000} \sum_{t=1}^{672} [& prob_{an}(+, t) \cdot preis_P(+, t) \cdot \mathbf{P}_{flex, pool}(+, t) + \\ & prob_{an}(-, t) \cdot preis_P(-, t) \cdot \mathbf{P}_{flex, pool}(-, t) + \\ & prob_{ab}(+, t) \cdot prob_{an}(+, t) \cdot preis_E(+, t) \cdot \mathbf{P}_{flex, pool}(+, t) + \\ & prob_{ab}(-, t) \cdot prob_{an}(-, t) \cdot preis_E(-, t) \cdot \mathbf{P}_{flex, pool}(-, t)] \end{aligned} \quad (3.16)$$

Profit	Wöchentliche Erlöse des gesamten Pools [€]
<i>t</i>	Zeit [15 min]
<i>preis_P</i>	viertelstündlicher Leistungspreis [€/MWh]
<i>preis_E</i>	viertelstündlicher Energiepreis [€/MWh]
<i>prob_{an}</i>	viertelstündliche Annahmewahrscheinlichkeit [1]
<i>prob_{ab}</i>	viertelstündliche Abrufwahrscheinlichkeit [1]
P_{flex, pool}	viertelstündlich angebotene flexible Leistung [kW]
+	positive Tertiärregelenergie
-	negative Tertiärregelenergie

An dieser Stelle seien noch zwei Anmerkungen zur Zielfunktion gegeben: In der verwendeten Version werden nur die Gewinne am Regelenergiemarkt berücksichtigt, jedoch keine Stromkosten für den regulären Betrieb der Wärmepumpen. Damit könnte der Fall auftreten, dass zwar viel Flexibilität angeboten werden kann (beispielsweise durch starkes Vorheizen des Gebäudes), dadurch jedoch insgesamt mehr Energie verbraucht wird und somit möglicherweise keine real kostenoptimale Gesamtlösung ermittelt wird. Dieser Fall wird in dieser Arbeit nicht abgedeckt, der Fokus liegt rein auf der Optimierung für den Regelenergiemarkt. In einer zukünftigen Arbeit könnte dies jedoch berücksichtigt werden, indem die Zielfunktion um einen Term für die Energiekosten erweitert wird. Auch könnte die Berücksichtigung weiterer kurzfristiger Märkte, wie des Day-Ahead- oder Intraday-Markts zusätzliche Gewinnmöglichkeiten schaffen.

Außerdem wird in dieser Arbeit die Effizienz der Wärmepumpen monatlich konstant angenommen. Durch häufiges Schalten bzw. operieren in einem nicht optimalen Temperaturbereich sinkt die Effizienz der Wärmepumpe. Dadurch wird für dieselbe Menge elektrischer Energie weniger Wärme erzeugt und es könnte auch hier sein, dass keine optimale Lösung für das Gesamtsystems ermittelt wird. Dies könnte zukünftig mittels einer Multi-Objective Optimierung verbessert werden, indem neben der Gewinnmaximierung auch eine Effizienzmaximierung berücksichtigt wird.

3.5.2 Thermische Nebenbedingungen

Der erste Teil an Nebenbedingungen des Optimierungsmodells betrifft die thermischen Randbedingungen. Diese hängen von den vier Indizes t , t_1 , k und r ab. t und t_1 sind die Zeitvariablen und werden für den Optimierungszeitraum von einer Woche von 1 bis 672 bzw. von 1 bis 673, also in Viertelstundenschritten, iteriert. k indiziert die verschiedenen KundInnentypen und geht daher von 1 bis 40. Der letzte Index r steht für das positive bzw. negative AbrufszENARIO des Regelenergiemarktes: Alle Nebenbedingungen sollen eingehalten werden, egal ob ein Regelenergieabruf stattfindet oder nicht. Somit werden immer die beiden Extremszenarien berechnet, in denen entweder die gesamte positive Regelleistung oder die gesamte negative Regelleistung abgerufen wird. Wenn in beiden Fällen alle Nebenbedingungen eingehalten werden kann garantiert werden, dass die Regelenergie immer geliefert werden kann. Diese Annahme stellt ein sehr konservatives Szenario dar. Zum einen war 2016 am Tertiärregelenergiemarkt die Abrufwahrscheinlichkeit wie in Abbildung 3.10 gezeigt wurde nur bei durchschnittlich 1.6% für negative bzw. 0.2% für positive Regelenergie (bei einer mittleren Position in der Merit Order Kurve). Zum anderen kann an den kurzfristigen Strommärkten (Day-Ahead und Intraday) Energie nachgekauft und der Fahrplan auf stündlicher Basis angepasst werden werden.

Thermische Gebäude- und Speichermodelle:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\text{Wand}}(k, r, t_1) \\ \mathbf{T}_{\text{Raum}}(k, r, t_1) \end{bmatrix} &= A_{\text{Raum}}(k) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\text{Wand}}(k, r, t_1 - 1) \\ \mathbf{T}_{\text{Raum}}(k, r, t_1 - 1) \end{bmatrix} \\ &+ B_{\text{Raum}}(k) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\text{Raum}}(k, r, t_1 - 1) \\ T_{\text{außen}}(r, t_1 - 1) \\ r_N(k, t_1 - 1) \\ r_O(k, t_1 - 1) \\ r_S(k, t_1 - 1) \\ r_W(k, t_1 - 1) \\ g_{\text{int}}(k, t_1 - 1) \\ g_{\text{vent}}(k, t_1 - 1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{T}_{\text{WWS}}(k, r, t_1) = A_{\text{WWS}}(k) \cdot \mathbf{T}_{\text{WWS}}(k, r, t_1 - 1) + B_{\text{WWS}}(k) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\text{WWS}}(k, r, t_1 - 1) \\ m_{\text{Zapf}}(k, r, t_1 - 1) \\ \mathbf{T}_{\text{Raum}}(k, r, t_1 - 1) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{T}_{\text{HS}}(k, r, t_1) = A_{\text{HS}}(k) \cdot \mathbf{T}_{\text{HS}}(k, r, t_1 - 1) + B_{\text{HS}}(k) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\text{HS}}(k, r, t_1 - 1) \\ \mathbf{Q}_{\text{Raum}}(k, r, t_1 - 1) \\ \mathbf{T}_{\text{Raum}}(k, r, t_1 - 1) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Die Erstellung der thermischen Gebäude- und Speichermodelle wurde bereits in Kapitel 3.2 detailliert beschrieben. Die Gleichungen werden für jeden KundInnentyp k , für

3 Methode und analytisches Modell

jeden Zeitschritt t_1 sowie für positiven und negativen Regelenergieabruf r erstellt. Für alle die thermischen Zustandsgrößen betreffenden (Un-)Gleichungen wird die Zeitvariable t_1 (1-673) anstelle von t (1-672) verwendet. Es wird auch noch ein Schritt nach dem eigentlichen Optimierungszeitraum (1-672) mitbetrachtet, da auch hier noch alle thermischen Systembedingungen eingehalten werden müssen. Sonst könnte der Optimierer im 672. Zeitschritt beispielsweise die gesamte Wärmemenge aus dem Heizungsspeicher entnehmen, da im 673. Zeitschritt keine Mindesttemperatur des Speichers mehr eingehalten werden müsste. Für Zeitpunkt 0 werden zudem Startwerte für die Zustandsgrößen \mathbf{T}_{Wand} , \mathbf{T}_{Raum} , \mathbf{T}_{WWS} und \mathbf{T}_{HS} vorgegeben, welche zur besseren heterogenen Verteilung unterschiedlich für die einzelnen KundInnen typen sind (siehe Tabelle 3.3 bis 3.5). Die Wärmeströme \mathbf{Q}_{Raum} , \mathbf{Q}_{WWS} und \mathbf{Q}_{HS} werden für den Zeitpunkt 0 auf 0 gesetzt. Je nach Gebäudetyp sind nicht nur die Eingänge und Zustände unterschiedlich, sondern auch die System- und Steuermatrizen. Für den Fall, dass ein Gebäude keinen Thermischen Pufferspeicher hat, wird $A_{HS} = 1$ gesetzt und $B_{HS} = [1, -1, 0]$. Damit bleibt die (fiktive) Heizungsspeichertemperatur zu allen Zeitpunkten konstant und der Wärmestrom von der Wärmepumpe wird direkt in den Raum weitergeleitet ($\mathbf{Q}_{\text{HS}} = \mathbf{Q}_{\text{Raum}}$).

Temperaturgrenzen:

$$\begin{aligned} \text{wenn } T_{\text{Raum},0}(k, t) < T_{\text{Raum},\text{max}}(k) \quad \text{und} \quad P_{\text{HS},\text{max}}(k) > 0 : \\ \mathbf{T}_{\text{Raum}}(k, r, t) \leq T_{\text{Raum},\text{max}}(k) \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \text{wenn } P_{\text{HS},\text{max}}(k) > 0 : \\ T_{\text{Raum},\text{min}}(k) \leq \mathbf{T}_{\text{Raum}}(k, r, t) \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \text{wenn } P_{\text{HS},\text{max}}(k) > 0 : \\ \mathbf{T}_{\text{HS}}(k, r, t) \leq T_{\text{HS},\text{max}}(k) \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \text{wenn } P_{\text{HS},\text{max}}(k) > 0 : \\ T_{\text{HS},\text{min}}(k) \leq \mathbf{T}_{\text{HS}}(k, r, t) \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\mathbf{T}_{\text{WWS}}(k, r, t) \leq T_{\text{WWS},\text{max}}(k) \quad (3.24)$$

$$T_{\text{WWS},\text{min}}(k) \leq \mathbf{T}_{\text{WWS}}(k, r, t) \quad (3.25)$$

Für alle KundInnen können unterschiedliche Temperaturgrenzwerte vorgegeben werden, je nach Heizungs- bzw. Speichertyp und nach individuellen Komfortgrenzen. Die Temperaturlimits für den Warmwasserspeicher (3.24) und (3.25) müssen im gesamten Jahr eingehalten werden. Die Grenzwerte für den Heizungsspeicher (3.22) und (3.23) gelten nur während der Heizperiode, das heißt in jenen Monaten, in denen die maximale elektrische Leistung für die Heizung $P_{\text{HS},\text{max}} > 0$. Im Sommer ist die Heizung und ein etwaiger

3.5 Beschreibung des Optimierungsmodells

Speicher nicht in Betrieb, womit $P_{HS,max} = 0$ ist und damit die Temperaturlimits nicht eingehalten werden müssen.

Die Grenzen für die Raumtemperatur müssen ebenfalls nur während der Heizperiode eingehalten werden. Bei der Untergrenze ist dies zum Beispiel für eine kalte Frühlingsnacht relevant, in der die Raumtemperatur kurzzeitig unter das untere Limit (z.B. 20 °C) fallen könnte, aber dennoch keine Heizung aktiviert werden soll. Ohne dieser Einschränkung wäre das Modell für diesen Fall auch nicht lösbar, da die Heizleistung zu diesem Beispielszeitpunkt mit $P_{HS,max} = 0$ immer gleich Null wäre.

Für die Obergrenze reicht die Einschränkung über $P_{HS,max}$ alleine nicht aus: Vor allem in gut isolierten Häusern kann die Raumtemperatur an Tagen mit starken Sonneneinstrahlungen über das obere Limit (z.B. 23 °C) ansteigen, obwohl diese Tage innerhalb der Heizperiode liegen und in der Nacht ein Heizen notwendig ist. Daher wird hier die Hilfsgröße $T_{Raum,0}(k, t)$ verwendet. Diese Zeitreihe wird für jeden KundInnentyp für die jeweilige Betrachtungswoche berechnet und gibt den Raumtemperaturverlauf ohne Heizung an. Wenn somit $T_{Raum,0}(k, t) > T_{Raum,max}(k)$ ist, heißt das, dass sich das Gebäude durch natürliche Einflüsse über die Temperaturobergrenze erwärmt und diese somit vom Optimierer nicht eingehalten werden muss (da die Gebäude ohne aktive Kühlung modelliert sind).

Heizregel:

$$\text{wenn } T_{Raum,0}(k, t) \geq T_{Raum,max}(k) \text{ oder } P_{HS,max}(k) = 0 : \quad (3.26)$$

$$\mathbf{Q}_{Raum}(k, r, t) = 0$$

Diese Nebenbedingung stellt sicher, dass der Wärmestrom in das Gebäude zu Zeiten außerhalb der Heizperiode ($P_{HS,max}(k) = 0$) bzw. in denen sich das Gebäude auf natürliche Weise über die Maximaltemperatur erwärmt ($T_{Raum,0}(k, t) \geq T_{Raum,max}(k)$) gleich Null ist. Da zu diesen Zeiten nach (3.20) und (3.21) keine Temperaturgrenzen für den Raum gelten, wäre das Optimierungsproblem ohne diese Bedingung nicht beschränkt.

Effizienz der Wärmepumpe:

$$\mathbf{Q}_{HS}(k, r, t) = \mathbf{P}_{HS}(k, r, t) \cdot COP_{HS}(k) \quad (3.27)$$

$$\mathbf{Q}_{WWS}(k, r, t) = \mathbf{P}_{WWS}(k, r, t) \cdot COP_{WWS}(k) \quad (3.28)$$

Über den Effizienzfaktor der Wärmepumpe COP werden die thermischen Wärmeströme in elektrische Leistung \mathbf{P}_{HS} bzw. \mathbf{P}_{WWS} umgewandelt. Der COP Wert hängt dabei vom jeweiligen Wärmepumpentyp und damit vom KundInnentyp k ab. Wie in Abschnitt 3.2.2.3 beschrieben ist die Effizienz auch monatlich unterschiedlich und hängt somit theoretisch auch vom Index t ab. Vereinfachend wird der COP Wert jedoch für den gesamten Optimierungszeitraum gleich angenommen, und ändert sich somit nur auf wöchentlicher Basis.

3.5.3 Elektrische Nebenbedingungen

Der zweite Teil an Nebenbedingung betrifft die verschiedenen Anteile der elektrischen Leistung der Wärmepumpen. Aus physikalischer Sicht hat jede Wärmepumpe wie schematisch in Abbildung 3.3 dargestellt zu jedem Zeitpunkt genau eine elektrische Leistung, \mathbf{P}_{el} . Allerdings ist es für die mathematische Beschreibung im Optimierungsmodell hilfreich, diese Größe in mehrere Teilleistungen zu spalten, um ein korrektes Verhalten nachbilden zu können.

Elektrische Gesamtleistung je KundIn:

$$\mathbf{P}_{\text{el}}(k, r, t) = \mathbf{P}_{\text{plan}}(k, t) + \mathbf{P}_{\text{flex}}(k, r, t) \quad (3.29)$$

Die gesamte elektrische Leistung \mathbf{P}_{el} wird in die Leistung nach Fahrplan \mathbf{P}_{plan} und den flexiblen Leistungsanteil \mathbf{P}_{flex} aufgeteilt. \mathbf{P}_{plan} beschreibt jene Leistung, die die Wärmepumpe ohne Marktteilnahme verbrauchen würde; sie hängt somit nur vom KundIn-entyp k und dem Zeitpunkt t ab. \mathbf{P}_{flex} ist jener Anteil, welcher am Regelenergiemarkt angeboten werden kann; dieser kann für das positive und negative Regelenergieszenario unterschiedlich sein und hängt daher zusätzlich von r ab.

Somit darf sich die elektrische Leistung der Wärmepumpe in den beiden Regelenergie-abrufszenarien r nur zu jenen Zeiten unterscheiden, in denen auch Regelenergie \mathbf{P}_{flex} angeboten wird. Zu allen anderen Zeiten muss die Leistung in beiden Abrufszenarien dem Fahrplan \mathbf{P}_{plan} entsprechen. Damit wird verhindert, dass es aufgrund von Nachholeffekten zu einem späteren Zeitpunkt zu Fahrplanabweichungen kommt.

Auf der anderen Seite heißt dies aber auch, dass nicht die gesamte Flexibilität des Systems ausgenutzt werden kann, da der Fahrplan immer für die gesamte Woche als fix angenommen wird, unabhängig des Abrufszenarios. Es kann wahrscheinlich mehr Flexibilität angeboten werden, wenn eine tägliche oder sogar stündliche Fahrplananpassung in Kombination mit der Beteiligung an den kurzfristigen Spotmärkten berücksichtigt wird.

Teilleistungen:

$$\mathbf{P}_{\text{HS}}(k, r, t) = \mathbf{P}_{\text{flex,HS}}(k, r, t) + \mathbf{P}_{\text{plan,HS}}(k, t) \quad (3.30)$$

$$\mathbf{P}_{\text{WWS}}(k, r, t) = \mathbf{P}_{\text{flex,WWS}}(k, r, t) + \mathbf{P}_{\text{plan,WWS}}(k, t) \quad (3.31)$$

Wie in Gleichungen (3.27) und (3.28) beschrieben ergeben sich aus den thermischen Strömen die von der Wärmepumpe in das Heizsystem bzw. in den Warmwasserspeicher gehen auch zwei elektrische Leistungsgrößen \mathbf{P}_{HS} und \mathbf{P}_{WWS} . Diese werden genau wie die elektrische Gesamtleistung aufgeteilt in einen flexiblen Anteil und einen fixen bzw. Fahrplananteil. Ziel dabei ist, einen indirekten Austausch zwischen den beiden Systemen durch den Optimierer zu verhindern. Die Steuerung weiß nicht, ob bzw. wann ein Regelleistungsabruf stattfinden wird; daher sollen sich die Heizung und der Warmwasserspeicher sowohl

3.5 Beschreibung des Optimierungsmodells

für den Fall eines Abrufs, als auch für den Fall keines Abrufs gleich verhalten ($\mathbf{P}_{\text{plan,HS}}$ und $\mathbf{P}_{\text{plan,WWS}}$). Ohne dieser Aufteilung wird der Optimierer vorausschauend handeln und beispielsweise vor einem negativen Regelleistungsabruf den Warmwasserspeicher komplett leeren und dafür zwischenzeitlich mehr Energie in den Raum speichern.

Somit setzen sich auch der fixe und flexible Leistungsanteil \mathbf{P}_{plan} und \mathbf{P}_{flex} jeweils aus den beiden Teilleistungen für die Heizung und den Warmwasserspeicher zusammen:

$$\mathbf{P}_{\text{plan}}(k, t) = \mathbf{P}_{\text{plan,HS}}(k, t) + \mathbf{P}_{\text{plan,WWS}}(k, t) \quad (3.32)$$

$$\mathbf{P}_{\text{flex}}(k, r, t) = \mathbf{P}_{\text{flex,HS}}(k, r, t) + \mathbf{P}_{\text{flex,WWS}}(k, r, t) \quad (3.33)$$

Leistungsgrenzen:

$$0 \leq \mathbf{P}_{\text{WW}}(k, r, t) \leq P_{\text{WWS,max}}(k) \quad (3.34)$$

$$0 \leq \mathbf{P}_{\text{HS}}(k, r, t) \leq P_{\text{HS,max}}(k) \quad (3.35)$$

$$0 \leq \mathbf{P}_{\text{el}}(k, r, t) \leq \max(P_{\text{HS,max}}(k), P_{\text{WWS,max}}(k)) \quad (3.36)$$

Wie bereits in Kapitel 3.2.2.3 beschrieben, gibt es für den elektrischen Verbrauch der Heizung und des Warmwasserspeichers jeweils unterschiedliche Obergrenzen, die zudem vom jeweiligen Gebäude- bzw. Wärmepumpentyp abhängen (3.34) und (3.35).

In der Realität und in den detaillierten Modellen kann die Wärmepumpe nur entweder den Warmwasserspeicher oder den Heizungsspeicher mit Wärme beliefern. Um dies im Optimierungsmodell abbilden zu können, bräuchte man allerdings eine binäre Entscheidungsvariable. Da aus Rechenzeitgründen eine lineare Optimierung verwendet werden soll, wird dies im Modell nicht abgebildet. Es können sowohl Warmwasser- als auch Heizungsspeicher gleichzeitig befüllt werden; allerdings wird die elektrische Gesamtleistung des Systems auf die jeweils größere der beiden Teilleistungen beschränkt, damit die Wärmepumpe nicht mit mehr als ihrer Nennleistung betrieben wird (3.36).

Gesamtleistungen des Pools:

$$\mathbf{P}_{\text{flex,pool}}(r, t) = \sum_k \mathbf{P}_{\text{flex}}(k, r, t) \cdot N(k) \quad (3.37)$$

$$\mathbf{P}_{\text{plan,pool}}(t) = \sum_k \mathbf{P}_{\text{plan}}(k, t) \cdot N(k) \quad (3.38)$$

Schließlich wird sowohl die verbrauchte Leistung laut Fahrplan \mathbf{P}_{plan} , als auch die angebotene Regelleistung \mathbf{P}_{flex} jeweils mit der Anzahl N an identen Gebäuden je Typ multipliziert. (N kann zwar theoretisch als Eingangsgröße je KundInnentyp k variiert werden, wird jedoch in dieser Arbeit einheitlich auf 10 festgelegt.) Danach werden die Leistungen über alle KundInnentypen k aufsummiert und ergeben somit die gesamte Fahrplanleistung $\mathbf{P}_{\text{flex,pool}}$ und die verfügbare Regelenergie $\mathbf{P}_{\text{plan,pool}}$ des Pools.

3.5.4 Ökonomische Nebenbedingungen

Der dritte Teil an Nebenbedingungen betrifft die Beschränkungen und Vorgaben durch den Tertiärregelenergiemarkt und bezieht sich daher immer auf die angebotene Regelleistung \mathbf{P}_{flex} .

Positive und negative Regelenergie:

$$\mathbf{P}_{\text{flex}}(k, +, t) \leq 0 \quad (3.39)$$

$$\mathbf{P}_{\text{flex,HS}}(k, +, t) \leq 0 \quad (3.40)$$

$$\mathbf{P}_{\text{flex,WWS}}(k, +, t) \leq 0 \quad (3.41)$$

$$\mathbf{P}_{\text{flex}}(k, -, t) \geq 0 \quad (3.42)$$

$$\mathbf{P}_{\text{flex,HS}}(k, -, t) \geq 0 \quad (3.43)$$

$$\mathbf{P}_{\text{flex,WWS}}(k, -, t) \geq 0 \quad (3.44)$$

Bei der Regelenergie muss zwischen der positiven und negativen unterschieden werden. In der gesamten Arbeit wird ein einheitliches Verbraucherzählpeilsystem verwendet. Somit muss die positive Regelenergie, also die Möglichkeit den Verbrauch zu reduzieren, stets kleiner gleich Null sein und die negative Regelenergie, also eine Erhöhung des Verbrauchs größer gleich Null.

Vierstundenprodukte:

$$\begin{aligned} & \text{wenn } t \bmod 16 \neq 1 : \\ & \mathbf{P}_{\text{flex,pool}}(t-1, r) = \mathbf{P}_{\text{flex,pool}}(t, r) \end{aligned} \quad (3.45)$$

Wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben können am Tertiärregelenergiemarkt aktuell nur Vierstunden Produkte angeboten werden (0-4 Uhr, 4-8 Uhr, 8-12 Uhr, 12-16 Uhr, 16-20 Uhr, 20-24 Uhr). Die Regelleistung des gesamten Pools muss daher für die Länge eines dieser Produkte konstant sein. In den Nebenbedingungen wird dies mithilfe des Modulo Operators mathematisch abgebildet.

Wochentags- bzw. Wochenendprodukte:

$$\begin{aligned} & \text{wenn } 96 < t < 480 \text{ oder } t > 576 : \\ & \mathbf{P}_{\text{flex,pool}}(t-96, r) = \mathbf{P}_{\text{flex,pool}}(t, r) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Eine weitere Beschränkung des Regelenergiemarktes ist, dass die Produktdauern jeweils für die gesamte Arbeitswoche oder das gesamte Wochenende gelten. Das heißt, wenn man beispielsweise von 0-4 Uhr Regelenergie anbieten möchte, muss man dies entweder von Montag bis Freitag oder von Samstag bis Sonntag tun. Mathematisch wird dies wie folgt beschrieben: Von Dienstag bis Freitag ($96 < t < 480$) bzw. am Sonntag ($t > 576$) muss die Regelleistung zu jeder Stunde gleich sein, wie zur selben Stunde am jeweiligen Vortag ($t - 96$).

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der ökonomisch-technischen Optimierung präsentiert. Dabei werden unterschiedliche Einflussparameter, wie der Gebäude- und Wärmepumpentyp und zusätzliche Pufferspeicher untersucht. Verglichen werden jeweils die Flexibilität die der Wärmepumpen-Pool bereitstellen kann und die Erlöse, die damit am Tertiärregelenergiemarkt erzielt werden können.

4.1 Untersuchte Szenarien

Mit dem erstellten Optimierungsmodell werden unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Erlöse und verfügbare Flexibilität des Wärmepumpen-Pools untersucht. Dazu wird jeweils eine Jahressimulation mit einem Pool aus 400 KundInnen berechnet, bei der einzelne Faktoren variiert werden.

Zunächst wird in Kapitel 4.2 jeweils ein Pool aus 400 Wärmepumpen und Gebäuden mit demselben thermischen Modell analysiert. Das heißt, der Gebäude- und Wärmepumpentyp sowie der thermische Speicher sind jeweils für alle KundInnen gleich, variiert werden nur die Eingangsgrößen (siehe Tabelle 3.3). Die jeweiligen Temperaturkomfortgrenzen sind für diese erste Untersuchung für alle KundInnen gleich. Dabei wird untersucht, wie viel Regelenergie die jeweiligen Pools anbieten können und über welche Zeiträume die Flexibilität zur Verfügung gestellt werden kann. Dies wird detailliert für den Pool mit Niedrigenergiehäusern ausgewertet.

In Abschnitt 4.3 werden die Auswirkungen eines zusätzlichen Heizungspufferspeichers anhand des Pools aus Niedrigenergiehäusern untersucht. In Kapitel 4.4 wird der Einfluss des Wärmepumpentyps ermittelt. Dazu wird wieder das Niedrigenergiehaus verwendet und einmal mit einer Luft-Wasser Wärmepumpe und einmal mit einer Sole-Wasser Wärmepumpe berechnet.

In Kapitel 4.5 wird der Einfluss des Heizungssystem qualitativ untersucht. Es werden Radiatoren und Fußbodenheizung miteinander verglichen. Danach werden in Kapitel 4.6 die Komfortgrenzen für die Raumtemperatur variiert.

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

In Kapitel 4.7 wird der Gebäudetyp variiert. Es werden vier gebäudereine Pools verglichen, mit Passivhäusern, Niedrigenergiehäusern, Bestandsgebäuden und renovierten Bestandsgebäuden. Schließlich werden in Kapitel 4.8 zwei realistisch gemischte Pools für Österreich simuliert, bei denen alle Gebäudetypen inkludiert sind.

4.2 Niedrigenergiehaus-Pool

Zunächst wird ein gebäudereiner Pool aus Niedrigenergiehäusern untersucht. Diese verfügen über Sole-Wasser Wärmepumpen mit Fußbodenheizung ohne Heizungsspeicher. Daraus werden durch Variation der Eingangsgrößen 400 KundInnen mit 40 verschiedenen Charakteristika erzeugt. Die Durchmischung erfolgt analog zu Abbildung 3.3. Es werden vier typische Wochen, eine pro Jahreszeit, untersucht und danach die Ergebnisse der Ganzjahressimulation analysiert.

4.2.1 Winterwoche

Der erste betrachtete Zeitraum ist Kalenderwoche 5 (1.-7.2.2016), eine typische Winterwoche während der Heizperiode. Die erzielbaren Erlös in dieser Woche liegen bei 2040.43 € für den gesamten Pool, bei einer vermarkteten Flexibilität von 18.5 MWh. Abbildung 4.1 zeigt die angebotene Regelenergie und die Leistung des Pools ohne Regelenergieabruf, also den Fahrplan. Es werden zwei Vierstundenprodukte werktags (0-8 Uhr) und eines am Wochenende (12-16 Uhr) angeboten, beide für negative Regelenergie. Die maximale Regelleistung wird werktags von 0-4 Uhr angeboten mit 512.4 kW. Die theoretische Maximalleistung des Pools beträgt zwischen 484 kW (bei Heizbetrieb) und 716 kW (bei Warmwasserbetrieb). Somit wird praktisch die gesamte verfügbare Leistung für jeweils vier Stunden pro Tag als Flexibilität angeboten und zusätzlich werktags etwa die Hälfte der maximalen Flexibilität für weitere vier Stunden. Die durchschnittliche Leistung des Pools laut Fahrplan beträgt 94.1 kW und die gesamte verbrauchte Energie in dieser Woche 15.8 MWh.

Man sieht in Abbildung 4.1 (b), dass der Optimierer den Fahrplan zu den Stunden, wo Regelenergie angeboten wird, meist auf annähernd Null setzt, um die maximale Flexibilität des Pools für den Abruf zur Verfügung zu haben. Jeweils nach dem Abruf entstehen Leistungsspitzen, die einem Nachholen des fehlenden Heizens entsprechen. Dies sieht man nach den Angebotszeiträumen am Montag und Donnerstag recht deutlich Abbildung 4.1 (b). Ein solches Verhalten könnte in der Realität jedoch Probleme verursachen: Die Regelreserve soll dabei helfen, das Stromsystem zu stabilisieren; durch die relativ hohen Lastspitzen des Nachheizens könnten jedoch zusätzliche Probleme im Stromnetz verursacht werden.

4.2 Niedrigenergiehaus-Pool

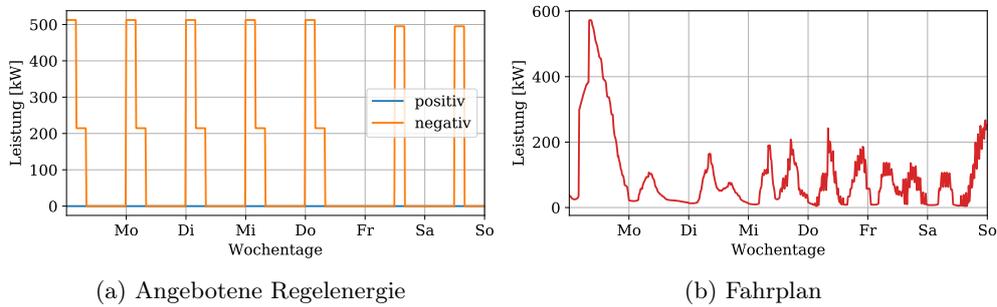


Abbildung 4.1: Angebotene Regelernergie und Fahrplan des Pools in einer Winterwoche für das Niedrigenergiehaus

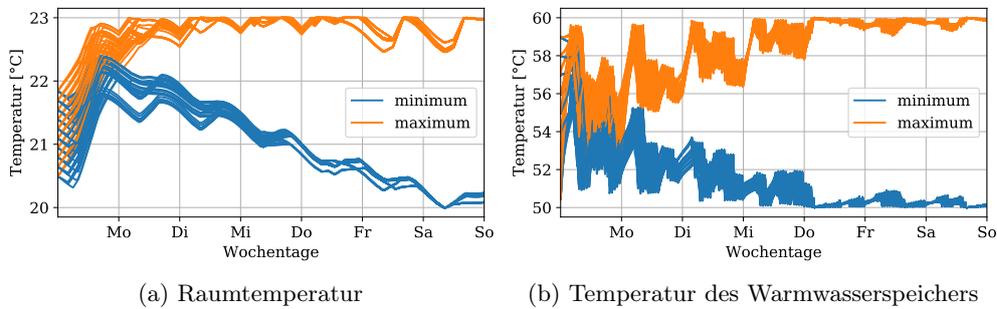


Abbildung 4.2: Raumtemperatur und Temperatur des Warmwasserspeichers der einzelnen Gebäude in einer Winterwoche für das Niedrigenergiehaus

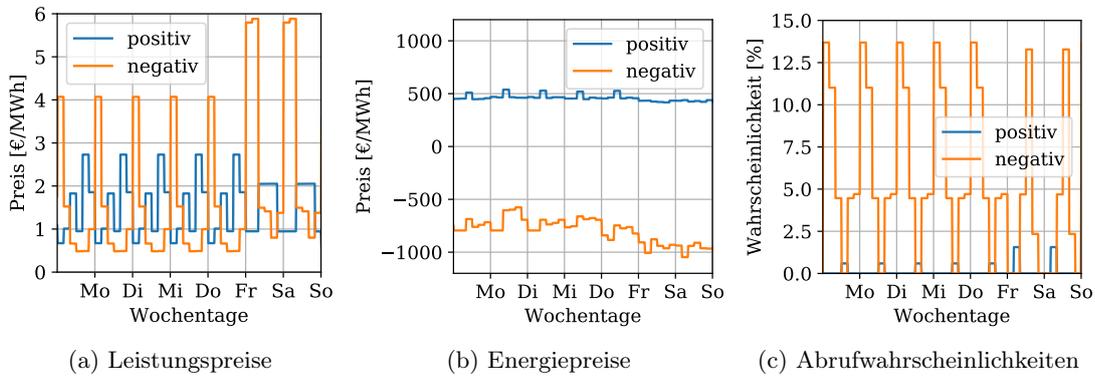


Abbildung 4.3: Energie- und Leistungspreise sowie Abrufwahrscheinlichkeit am Tertiärregelenergiemarkt für eine mittlere Position auf der Merit Order Kurve in Kalenderwoche 5, 2016

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

Abbildung 4.2 zeigt die Raum- und Speichertemperatur über die ganze Woche, für alle der 40 KundInnentypen. Dabei zeigen die orangen Kurven die maximalen Temperaturen, also das Verhalten wenn die gesamte negative Regelennergie abgerufen würde und die blauen Kurven die minimalen Temperaturen, also das Verhalten ohne Regelennergieabruf. Man sieht, dass die Nebenbedingungen zu allen Zeitpunkten für beide Extremfälle immer eingehalten werden können. Insbesondere beim Speicher sieht man deutlich die Zeitpunkte der Regelennergie in den orangen Kurven: Zu den jeweiligen Regelennergiezeiten wird der Speicher geladen und die Temperatur steigt somit stark an.

Auffällig insbesondere an den Raumtemperaturkurven ist, dass trotz unterschiedlicher Startpunkte und Außenbedingungen, alle Gebäude am Ende des Betrachtungszeitraums ein synchrones, marktoptimiertes Verhalten aufweisen. Die Endwerte der Raumtemperaturen liegen wie erwartet an den beiden möglichen Extrempunkten des Lösungsraums, da der Optimierer die volle Flexibilität ausnutzt. Dies bedeutet, dass in diesen beiden Extremfällen mit vollem bzw. keinem Abruf am Ende der Woche keine Flexibilität mehr zur Verfügung steht. Wenn kein Abruf stattgefunden hat, müssen am Ende der Woche alle Wärmepumpen eingeschaltet werden, da alle Gebäude an ihr unteres Limit abgekühlt sind. Somit kann in der folgende Woche Regelennergie nur sehr eingeschränkt angeboten werden. Dies stellt neben dem oben bereits beobachteten Nachheizen einen Nachholeffekt dar, der durch die verwendete Lastverschiebung zustande kommt. In der Realität kann dies verhindert werden, indem am Spot Markt entsprechende Energie nachgekauft wird und die Gebäude so regelmäßig nachheizen. In der Simulation wird dieser Nachholeffekt nicht berücksichtigt; es wird angenommen, dass alle Gebäude zu Beginn jeder Woche immer im selben Anfangszustand sind.

Um zu überprüfen, wodurch die Zeitpunkte der angebotenen Regelleistung entschieden werden, werden in Abbildung 4.3 die Leistungs- und Energiepreise sowie die Abrufwahrscheinlichkeiten für Tertiärregelennergie (bei einer mittleren Position in der Merit Order) dargestellt: Die Angebote an den Werktagen (0-4 Uhr) werden von der Optimierung an Zeitpunkte mit hohen Leistungspreise und gleichzeitig hohen Abrufwahrscheinlichkeiten gelegt. Von 4-8 Uhr sind die Leistungspreise zwar geringer, aber die Abrufwahrscheinlichkeiten hoch. Am Wochenende wären die Leistungspreise von 0-8 Uhr sogar noch höher, jedoch wird hier von 12-16 Uhr angeboten. Allerdings ist zu dem Zeitpunkt die Abrufwahrscheinlichkeit hoch und zusätzlich ist der Preis für negative Regelennergie am Wochenende höher als unter der Woche. Insgesamt wird in der betrachteten Woche die Abrufwahrscheinlichkeit als primäres Optimierungskriterium verwendet.

4.2.2 Sommerwoche

Als zweiter Betrachtungszeitraum wird Kalenderwoche 30 gewählt, der 25.-31. Juli 2016. In diesem Zeitraum ist die Heizung deaktiviert und die Wärmepumpen heizen lediglich die Warmwasserspeicher. Dementsprechend ist sowohl der Energiebedarf auch die verfügbare Flexibilität des Pools wesentlich geringer. Abbildung 4.4 zeigt die angebotene Regelleistung und den Fahrplan ohne Regelenergieabruf. Die durchschnittliche Leistung für den gesamten Pool beträgt 38.9 kW, der gesamte Energieverbrauch des Pools in der Woche liegt bei 6.5 MWh, was weniger als der Hälfte des Wertes aus der Winterwoche (15.8 MWh) entspricht. Auch in dieser Woche wird nur negative Regelleistung angeboten; die verfügbare Flexibilität erreicht mit 26.1 kW nur etwa 4 % der Flexibilität in der Winterwoche. Der erzielte Erlös für diese Woche beläuft sich daher auch auf nur 19.84 €, was etwa 1 % der Erlöse aus der betrachteten Winterwoche entspricht. Die angebotene Flexibilität in dieser Woche beträgt 606 kWh. Dies zeigt, dass der Wärmepumpenpool nur während der Heizperiode gewinnbringend am Regelenergiemarkt partizipieren kann. Die Wärmespeicherkapazität des Gebäudes hat größeren Einfluss auf die Flexibilität des Systems als der Warmwasserspeicher.

In dieser Woche ist ebenfalls am berechneten Fahrplan in Abbildung 4.4 (b) sichtbar, dass der Optimierer die Leistung zu den Zeitpunkten an denen Regelenergie angeboten wird absenkt, um sie im Falle eines Abrufs so weit wie möglich erhöhen zu können. Abbildung 4.5 zeigt die wesentlichen Systemzustände für alle 40 KundInnentypen, die Raumtemperatur und die Warmwasserspeichertemperatur. Man sieht, dass die Raumtemperatur in diesem Fall durch die Optimierung nicht beeinflusst wird, sie steigt aufgrund der Sonneneinstrahlung und Außentemperatur über den Betrachtungszeitraum an. In den Temperaturen der Speicher sieht man Stufen zu den Zeitpunkten der Regelenergieabrufe.

Abbildung 4.6 zeigt die Energie- und Leistungspreise sowie die Abrufwahrscheinlichkeiten für diese Woche. Man sieht, dass die Regelleistung zu Zeitpunkten hoher Abrufwahrscheinlichkeit angeboten wird. An Wochentagen ist hier auch der Leistungspreis an seinem zweithöchsten Wert, daher wird hier mehr Leistung angeboten als am Wochenende. Am Wochenende ist der Leistungspreis Null, die Erlöse werden hier über den Energieanteil Erlöse erzielt.

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

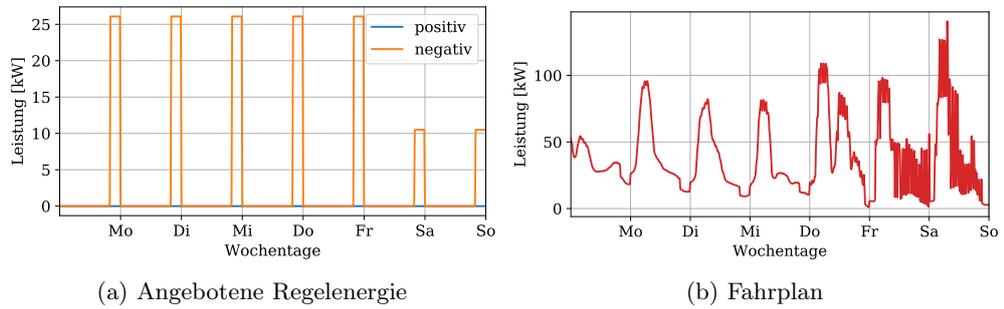


Abbildung 4.4: Angebotene Regelernergie und Fahrplan des Pools in einer Sommerwoche für das Niedrigenergiehaus

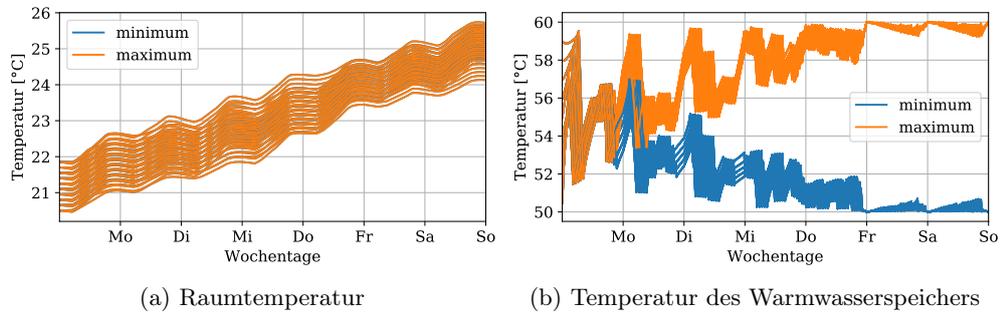


Abbildung 4.5: Raumtemperatur und Temperatur des Warmwasserspeichers der einzelnen Gebäude in einer Sommerwoche für das Niedrigenergiehaus

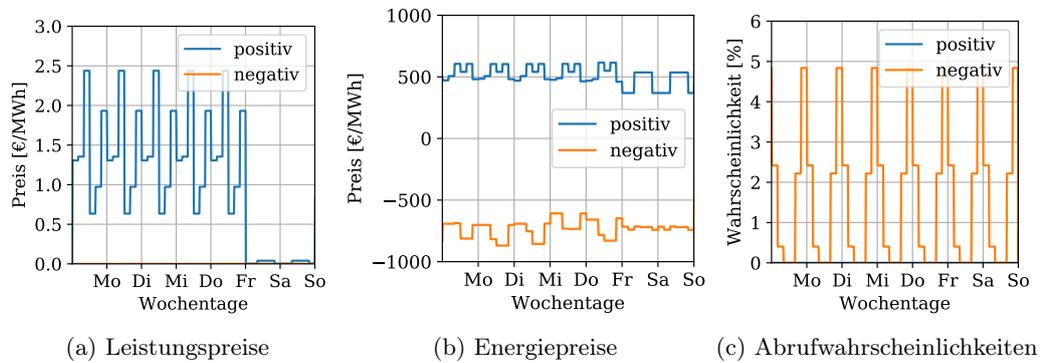


Abbildung 4.6: Energie- und Leistungspreise sowie Abrufwahrscheinlichkeit am Tertiärregelenergiemarkt für eine mittlere Position auf der Merit Order in Kalenderwoche 30, 2016

4.2.3 Frühlingswoche

Als dritter Betrachtungszeitraum wird eine Frühlingswoche gewählt, Kalenderwoche 15 (4.-10. April 2016). In diesem Zeitraum wäre ein Heizen der Niedrigenergiehäuser, wie man in Abbildung 4.8 sieht, nicht mehr notwendig: Auch im Minimum-Szenario steigen die Raumtemperaturen über den Betrachtungszeitraum hinweg an, die Gebäude heizen sich aufgrund der Wetterbedingungen von selbst auf.

Manche der Gebäude überschreiten sogar im Minimum-Szenario (also ohne negative Regelenergie) die obere Temperaturgrenze, bei anderen ist jedoch noch teilweises Heizen möglich. Inwieweit es in diesem Fall real sinnvoll ist zu heizen obwohl dies gar nicht notwendig ist, ist fraglich. Wenn jedoch der finanzielle Anreiz gegeben ist, mehr Energie zu verbrauchen, stellt dies möglicherweise eine attraktive Möglichkeit für die KundInnen dar. Es ist jedoch insofern eine Vereinfachung, als dass alle Gebäude am Ende der Woche im oberen Bereich des Temperaturbandes ankommen und somit in der nächsten Woche (aufgrund der fehlenden aktiven Kühlung) geringere bzw. keine Flexibilität zur Verfügung steht. In der Simulation startet jedoch jede Woche wie oben erläutert mit denselben Anfangswerten. Damit wird die verfügbare Flexibilität in der Übergangszeit durch die getroffene Vereinfachung etwas überschätzt werden.

Die Abbildungen 4.7 bis 4.9 zeigen die Ergebnisse der Optimierung für die Kalenderwoche 15. Die durchschnittliche Leistung des Fahrplans ist 43.0 kW; der gesamte Energieverbrauch mit 7.2 MWh deutet darauf hin, dass kein Heizen mehr notwendig ist. Allerdings können trotzdem 2.3 MWh an Flexibilität für den negativen Regelenergiemarkt angeboten werden, was etwa einem Achtel der angebotenen Flexibilität in der Winterwoche entspricht. Damit kann in dieser Woche ein Erlös von 49.30 € erzielt werden. Dies ist nur knapp 2.5% des Erlöses in der Winterwoche, was aber unter anderem auch an den niedrigeren Abrufwahrscheinlichkeiten und Leistungspreisen liegt. Die geringere vorhandene Flexibilität zeigt sich auch dadurch, dass am Wochenende eine viel größere Leistung angeboten wird als unter der Woche. Für die Wochenendprodukte muss die Leistung nur für zwei Tage vorgehalten werden, was mit weniger Flexibilität im Gebäude leichter einzuhalten ist.

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

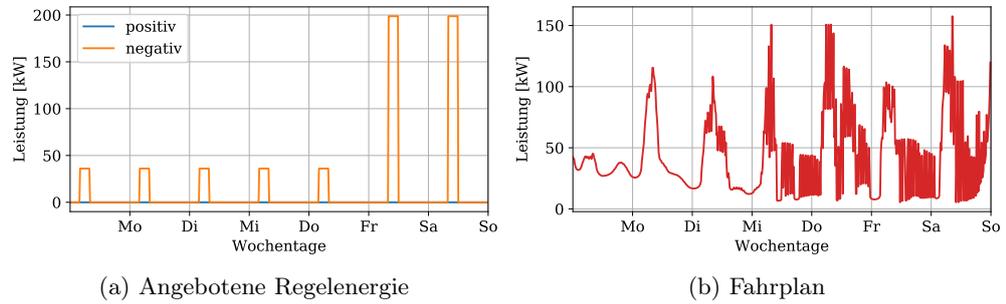


Abbildung 4.7: Angebotene Regelernergie und Fahrplan des Pools in KW 15 für das Niedrigenergiehaus

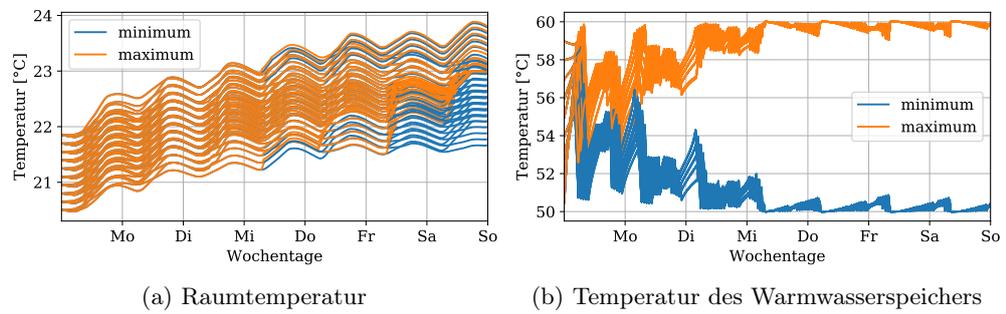


Abbildung 4.8: Raumtemperatur und Temperatur des Warmwasserspeichers der einzelnen Gebäude in KW 15 für das Niedrigenergiehaus

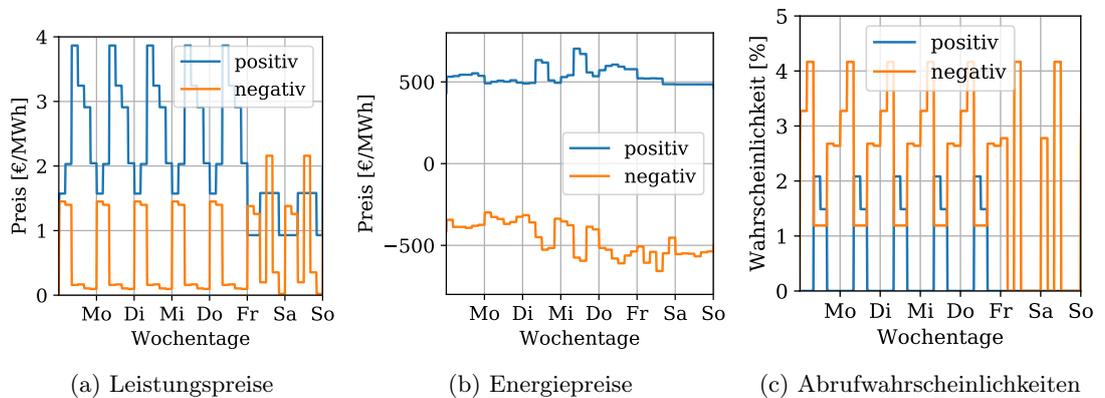


Abbildung 4.9: Energie- und Leistungspreise sowie Abrufwahrscheinlichkeit am Tertiärregelenergiemarkt für eine mittlere Position auf der Merit Order Kurve in Kalenderwoche 15, 2016

4.2.4 Herbstwoche

Als letztes wird Kalenderwoche 45 (7.-13. November) analysiert. Diese ist interessant da hier sowohl negative als auch positive Regelernergie angeboten werden (siehe Abbildung 4.10). Insgesamt werden 9.2 MWh positive und 1.77 MWh negative Regelleistung angeboten. Die durchschnittliche Leistung laut Fahrplan beträgt 100.6 kW und der wöchentliche Energieverbrauch 16.9 MWh. In Abbildung (a) sieht man, dass die positive Flexibilität von bis zu 440.6 kW ermöglicht wird, indem in diesen Stunden der Fahrplan auf Leistungen weit über dem Durchschnitt gesetzt wird. So steht dem Optimierer für den Abruf die maximal mögliche Flexibilität zur Verfügung.

Ob dies ein sinnvolles Verhalten für das Gesamtsystem ist, ist jedoch fraglich; die entstehenden Leistungsspitzen zum Zeitpunkt des Regelernergieangebots könnten einen im System bestehenden Lastüberschuss noch verstärken. Dieser Lastüberschuss müsste dann womöglich mit Regelernergie ausgeglichen werden, die wiederum durch die Wärmepumpen geliefert werden könnte. Sie würden ihren Verbrauch verringern und die Systemprobleme lösen; allerdings hätte es diese ohne der Lastspitze der Wärmepumpen überhaupt erst nicht gegeben. Der Interessenskonflikt könnte verringert werden, indem der Fahrplan separat berechnet und nicht für das maximale Regelleistungsangebot optimiert wird: Man könnte den Fahrplan beispielsweise aus Messreihen von klassischen (nicht flexiblen) Wärmepumpen berechnen und diesen dann dem Optimierungsmodell als externe Größe vorgeben. Damit stünde zwar weniger Flexibilität zur Verfügung, ein systemschädliches Verhalten durch das Regelleistungsangebot könnte jedoch verhindert werden.

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

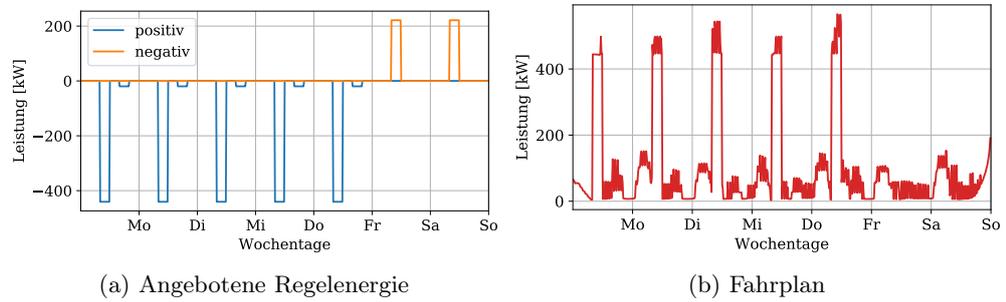


Abbildung 4.10: Angebotene Regelernergie und Fahrplan des Pools in KW 45 für das Niedrigenergiehaus

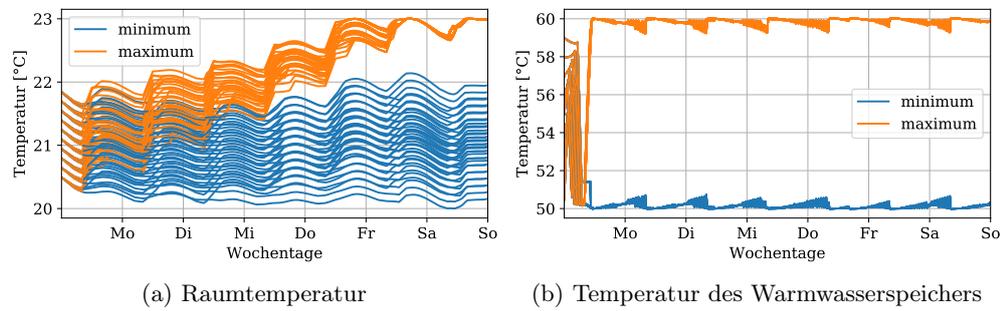


Abbildung 4.11: Raumtemperatur und Temperatur des Warmwasserspeichers der einzelnen Gebäude in KW 45 für das Niedrigenergiehaus

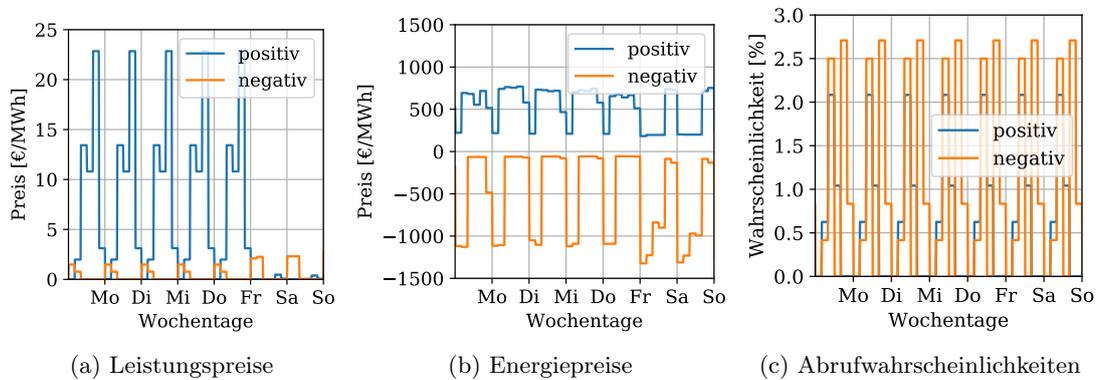


Abbildung 4.12: Energie- und Leistungspreise sowie Abrufwahrscheinlichkeit am Tertiärregelenergiemarkt für eine mittlere Position auf der Merit Order Kurve in Kalenderwoche 45, 2016

4.2.5 Jahressimulation

Die Optimierung des Niedrigenergiehaus-Pools am Regelenergiemarkt wird für das gesamte Jahr 2016 wöchentlich durchgeführt. Somit werden insgesamt 51 unterschiedliche Wochen simuliert (in der 52. Woche startet bereits das Jahr 2017). Abbildung 4.13 zeigt die angebotene Regelleistung für das gesamte Jahr: Insgesamt wird deutlich mehr negative Regelleistung angeboten, insbesondere in der ersten Hälfte des Jahres. In den letzten 9 Wochen des Jahres wird sowohl negative als auch positive Regelleistung angeboten. Man sieht deutlich die Sommerperiode in der nicht geheizt wird und somit nur wenig Flexibilität zur Verfügung steht. Im Winter kann am meisten Regelleistung angeboten werden. Im gesamten Jahr werden 320.20 MWh negative und 71.82 MWh positive Regelernergie angeboten.

Abbildung 4.14 zeigt die wöchentlichen Erlöse, aufgeteilt in die Erlöse durch positive bzw. negative Regelleistung und die Anteile durch positive bzw. negative Regelernergie. In der linken Grafik sieht man, dass in der ersten Jahreshälfte der bei weitem größte Teil der Erlöse von der negativen Regelernergie stammt. Dies deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus den oben untersuchten Kalenderwochen 5, 15 und 30. In diesem Zeitraum hat der Optimierer jeweils jene Zeiten ausgewählt, in denen die Abrufwahrscheinlichkeit am höchsten ist. Die extrem hohen Erlöse im Februar werden demnach durch überdurchschnittlich hohe Abrufwahrscheinlichkeiten ermöglicht (siehe Abbildung 3.10).

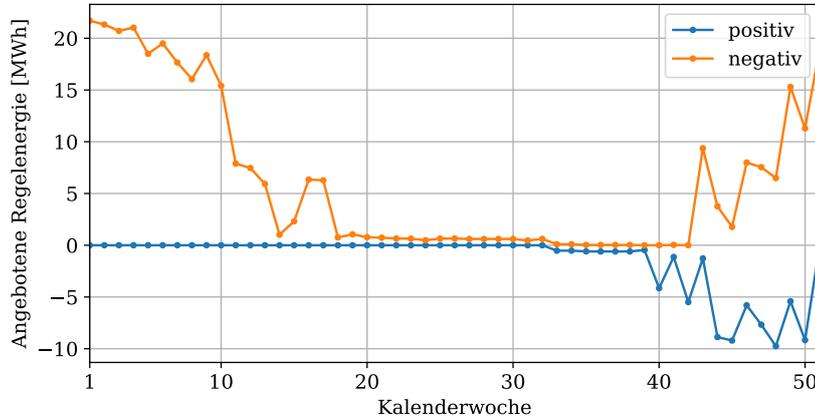


Abbildung 4.13: Wöchentlich angebotene Regelleistung für das Niedrigenergiehaus

Abbildung 4.14 (b) zeigt ebenfalls die wöchentlichen Ergebnisse in vergrößerter Darstellung. Man sieht, dass die Erlöse im Sommer fast ausschließlich durch den Energieanteil verursacht werden; die Erlöse durch die Leistungsvorhaltung sind wegen der geringen

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

Flexibilität vernachlässigbar. Ab Kalenderwoche 40 (Anfang Oktober) ist wieder Heizen möglich und damit sind auch die Erlöse größer. Hier sind die negativen Abrufwahrscheinlichkeiten nicht mehr übermäßig hoch und der Optimierer bietet auch positive Regelleistung an. Auffällig ist auch Kalenderwoche 51, in der besonders hohe Erlöse durch negative Regelleistung erzielt werden. Dies ist auf die hohen Preise für Flexibilität während der Weihnachtsfeiertage zurückzuführen.

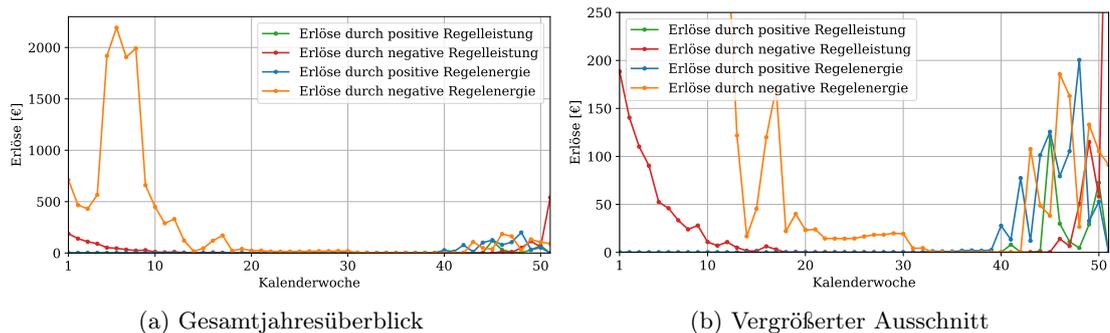


Abbildung 4.14: Wöchentliche erzielte Erlöse je Regelleistungsanteil für das Niedrigenergiehaus

4.3 Einfluss eines Pufferspeichers

In diesem Abschnitt wird anhand des gebäuderreinen Pools aus Niedrigenergiehäusern der Einfluss eines zusätzlichen Heizungspufferspeichers untersucht. Es wird der gleiche Pool wie in Kapitel 4.2 verwendet, aber zusätzlich ein Pufferspeicher von 500l für jedes der 400 Gebäude inkludiert. Für den Speicher wird das lineare Modell, beschrieben in Abschnitt 3.2.2.2 verwendet. Der einzige Unterschied ist, dass der erlaubte Temperaturbereich auf 30-40 °C festgelegt wird statt 50-60 °C, da die Fußbodenheizung eine niedrigere Betriebstemperatur hat als die Radiatoren. Da das vorige Kapitel gezeigt hat, dass die Marktteilnahme primär in der Heizperiode möglich ist, werden die Ergebnisse für die Winter- und Herbstwoche genauer analysiert, gefolgt von der Gesamtjahressimulation.

In Abbildung 4.15 und 4.16 werden die Ergebnisse der Optimierung für die Winterwoche KW 5 für den Pool mit Pufferspeichern (durchgezogene Linien) mit dem zuvor analysierten Ergebnissen ohne Pufferspeicher (strichlierte Linien) verglichen. Man sieht, dass der Einfluss des zusätzlichen Speichers auf das Poolverhalten sehr gering ist. Mit Speicher kann von 4-8 Uhr etwas mehr Flexibilität angeboten werden, was die gesamte negative Regelenenergie in dieser Woche von 18.5 MWh auf 18.9 MWh erhöht. Dies entspricht lediglich einer 2.1% mehr Flexibilität. Die maximal mögliche Regelleistung verändert sich durch

4.3 Einfluss eines Pufferspeichers

den Speicher praktisch nicht. Die Erlöse für den gesamten Pool erhöhen sich damit von 2040 € auf 2075 €.

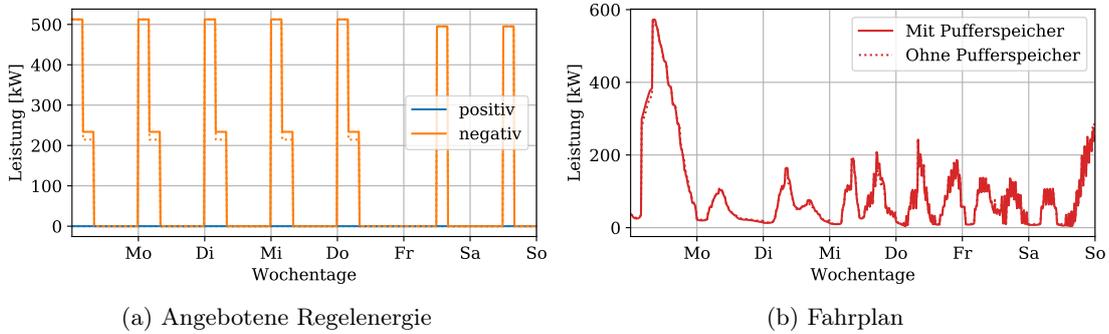


Abbildung 4.15: Angebotene Regelenergie und Fahrplan des Pools in KW 5 für den Niedrigenergiehaus-Pool mit Pufferspeicher und ohne (strichliert)

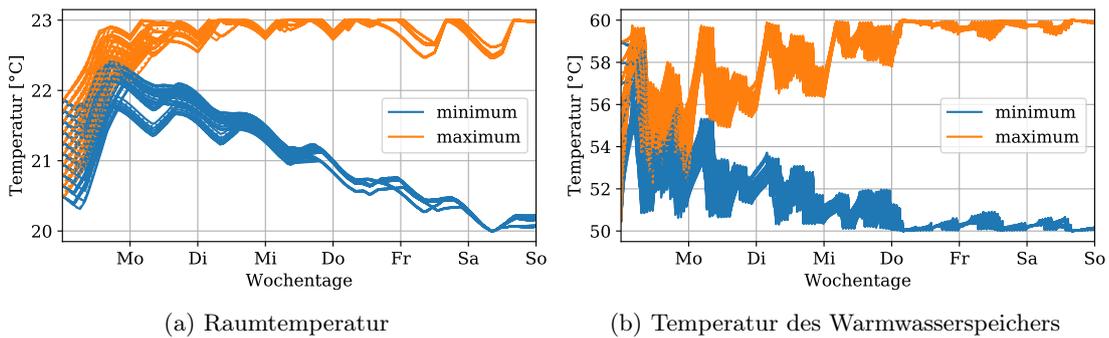


Abbildung 4.16: Raumtemperatur und Temperatur des Warmwasserspeichers der einzelnen Gebäude in KW 5 für den Niedrigenergiehaus-Pool mit Pufferspeicher und ohne (strichliert)

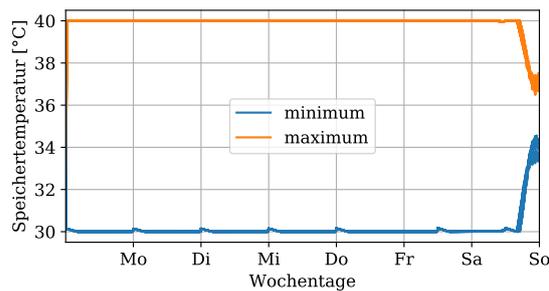


Abbildung 4.17: Temperatur des Heizungsspeichers der einzelnen Gebäude in KW 5 für den Niedrigenergiehaus-Pool mit Pufferspeicher

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

Dieser nur geringe Effekt lässt sich über den Verlauf der Speichertemperatur in Abbildung 4.17 erklären: Man sieht, dass die Temperatur über den gesamten Zeitraum hinweg praktisch konstant ist. Während des ersten Regelenergieabrufs am Montag wird die gesamte Speicherkapazität ausgenutzt und die Temperatur im Maximal-Szenario bleibt danach praktisch konstant auf 40 °C. Es gibt zu den weiteren Regelenergiezeitpunkten minimale Temperaturerhebungen im Verlauf der Minimaltemperatur, um mögliche Abrufe negativer Regelenergie auszugleichen. Außerdem wird der Speicher am Ende der Woche für einen kurzen Zeitraum verwendet. Ansonsten gibt es jedoch keine Änderungen im Temperaturverlauf, das heißt der Speicher wird wenig genutzt.

Zum Vergleich ist in Abbildung 4.18 das Ergebnis der Optimierung für die Herbstwoche KW 45 dargestellt. Hier erhöht sich die angebotene negative Regelenergie durch den Speicher von 1.77 MWh auf 1.81 MWh und die positive von 9.21 MWh auf 9.46 MWh. Die wöchentlichen Erlöse steigen auch hier um nur 2.5%. Allerdings sieht man das Be- und Entladeverhalten des Speichers deutlicher im dargestellten Temperaturverlauf in Abbildung 4.18 (b), vor allem bei den positiven Regelenergieabrufen. Wenn kein positiver Abruf stattfindet (maximum) wird der Speicher jeweils nachgeladen, wenn ein positiver Abruf stattfindet wird der Speicher entladen. Auch wenn der Effekt in dieser Woche deutlicher sichtbar ist, wird der Speicher nicht oft vollständig genutzt.

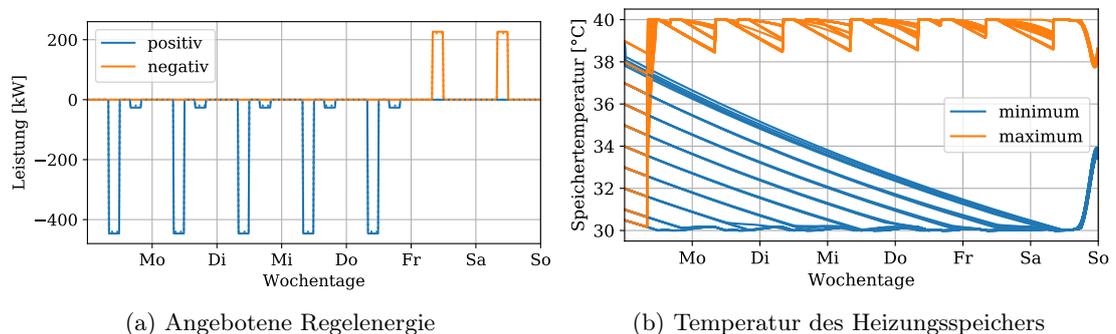


Abbildung 4.18: Angebotene Regelenergie und Temperatur des Heizungsspeichers der einzelnen Gebäude in KW 45 für den Niedrigenergiehaus-Pool mit bzw. ohne (strichliert) Pufferspeicher

Abbildung 4.19 zeigt den Gesamtjahresvergleich der angebotenen Regelenergie. Dargestellt ist die Differenz zwischen der Optimierung mit Pufferspeicher und der Optimierung ohne Pufferspeicher, jeweils separat für positive und negative Regelenergie für jede einzelne Kalenderwoche. Die Flexibilität kann durch den Speicher um etwa 0.4 MWh erhöht werden, was rund 2% der Gesamtflexibilität entspricht. Die Erlöse für den Pool ohne Speicher sind für die 51 Wochen 16 821 € und für den Pool mit Speicher 17 183 €.

4.3 Einfluss eines Pufferspeichers

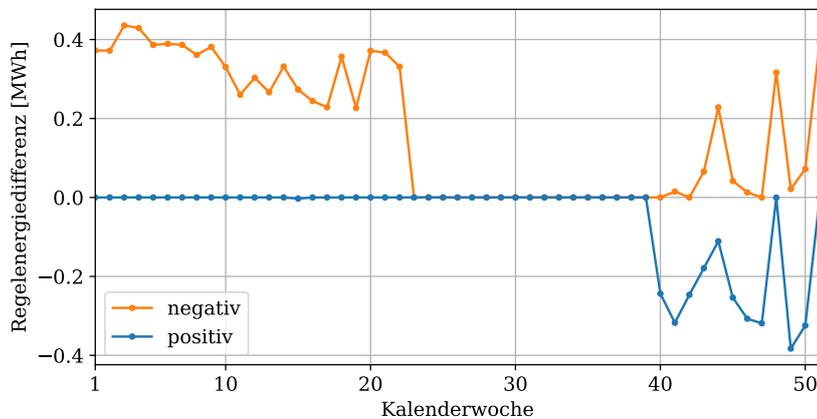


Abbildung 4.19: Differenz der wöchentlich angebotene Regelenergie mit und ohne Pufferspeicher

Es wird angenommen, dass der Grund für die geringe Speichernutzung die konservative Modellannahme ist, dass der elektrische Verbrauch der Heizung zu allen Zeiten, in denen keine Regelenergie angeboten wird, für beide Regelenergieszenarien gleich sein muss. Das heißt, dass egal ob Regelenergie abgerufen wurde oder nicht, der elektrische Verbrauch zu jedem Zeitpunkt der Woche ident sein muss. Somit kann der Speicher aber effektiv kaum genutzt werden: Es ist kein Vor- oder Nachladen möglich. Nachdem der Speicher einmal komplett gefüllt wurde, wie beispielsweise in KW 5 am Montag (Abbildung 4.17), kann er die restliche Woche praktisch nicht mehr genutzt werden; ein Entladen würde eine Abweichung vom Fahrplan bedeuten, was in den Nebenbedingungen der Optimierung nicht erlaubt ist. Somit ist anzunehmen, dass unter Berücksichtigung kurzfristiger Märkte, wie dem Day-Ahead und Intraday-Markt oder auch bei täglicher Leistungsausschreibung deutlich mehr Flexibilität des Pufferspeichers nutzbar ist.

Es wird angenommen, dass auch die Flexibilität des Gebäudes bei Berücksichtigung kurzfristiger Märkte oder täglicher Ausschreibungen besser nutzbar ist. Allerdings ist anzunehmen, dass der Effekt beim Gebäude nicht so stark ist wie beim Pufferspeicher. Der Pufferspeicher hat eine viel geringere Speicherkapazität und thermische Trägheit als das Gebäude und könnte daher durch Marktabrufe mehrmals pro Tag be- und entladen werden. Er profitiert daher besonders stark von kurzfristigen Vermarktungsoptionen. Der Abkühlvorgang beim Gebäude dauert dagegen je nach Isolierung ein oder mehrere Tage. Somit sind auch mit anderen Marktbedingungen nur wenige Be- und Entladezyklen pro Woche möglich.

4.4 Einfluss des Wärmepumpentyps

Als nächstes wird der Einfluss des Wärmepumpentyps untersucht. Der Vergleich wird anhand des Pools an Niedrigenergiehäusern mit Pufferspeicher gezogen, einmal mit Sole-Wasser Wärmepumpen (=Erdwärmepumpen) und einmal mit Luft-Wasser Wärmepumpen. Der erste Fall entspricht dem in Kapitel 4.3 analysierten Pool; für den zweiten bleiben Gebäude und Speicher gleich, lediglich die Wärmepumpe wird geändert. Im mathematischen Modell heißt das, dass sich die Effizienzfaktoren COP_{HS} und COP_{WWS} sowie die maximalen elektrischen Leistungen $P_{HS,max}$ und $P_{WWS,max}$ ändern. In Tabelle 4.1 sind die jährlichen Durchschnittswerte der geänderten Größen aufgelistet, die wie in Kapitel 3.2.2.3 aus den detaillierten Modellen berechnet wurden. Im Modell werden wieder monatliche Durchschnittswerte verwendet.

Die vorigen Analysen in Kapitel 4.3 haben gezeigt, dass der für die Flexibilität wesentliche Speicher das Gebäude selbst ist. Somit sind vor allem die Änderungen der Effizienz und Maximalleistung für den Heizbetrieb wichtig. Wie man in der Tabelle 4.1 sieht hat die Luft-Wasser Wärmepumpe im Heizbetrieb eine geringere Effizienz und eine höhere maximale elektrische Leistung als die Sole-Wasser Wärmepumpe. Die maximale thermische Leistung ist theoretisch für beide Fälle gleich, da das Gebäude und somit der Heizungsbedarf ident ist. Die rechnerische Überprüfung zeigt jedoch einen Unterschied, die thermische Maximalleistung für Sole-Wasser beträgt rund 7 kWh und für Luft-Wasser 6 kWh. Es wird vermutet, dass der Fehler durch das vereinfacht linear angenommene Wärmepumpenverhalten und die temperaturunabhängigen, monatlich konstanten Effizienzwerte zustande kommt.

	COP_{HS}	COP_{WWS}	$P_{HS,max}[kW]$	$P_{WWS,max}[kW]$
Sole-Wasser	5.86	3.04	1.19	1.84
Luft-Wasser	3.59	3.38	1.66	2.33

Tabelle 4.1: Unterschiede in Effizienz (COP) und maximaler elektrischer Leistung zwischen der Sole-Wasser und der Luft-Wasser Wärmepumpe; angeführt sind jeweils die jährlichen Durchschnittswerte.

Zunächst wird wieder die Beispielwoche im Winter KW 5 analysiert. Die Abbildungen 4.20 bis 4.22 zeigen die Ergebnisse der Optimierung, wobei die Erdwärmepumpen mit strichlierten und die Luftwärmepumpen mit durchgezogenen Linien dargestellt sind. Der Luftwärmepumpen-Pool hat einen höheren Gesamtenergieverbrauch mit 21.3 MWh im Gegensatz zu 15.9 MWh für den Erdwärmepumpen-Pool. Dafür ist jedoch auch die Flexibilität deutlich höher: Mit den Luftwärmepumpen können 30.6 MWh Regelenergie angeboten werden, das sind 62% mehr als zuvor mit dem Erdwärmepumpen-Pool (18.9 MWh). Interessant ist auch, dass der Heizungsspeicher für die Luftwärmepumpen offensichtlich häufiger genutzt wird, als für die Erdwärmepumpen (vgl. auch 4.17).

4.4 Einfluss des Wärmepumpentyps

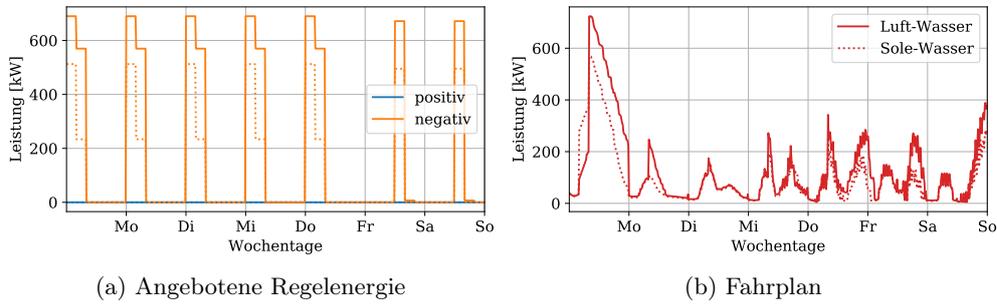


Abbildung 4.20: Angebotene Regelenergie und Fahrplan des Pools in KW 5 für den Niedrigenergiehaus-Pool mit Luft-Wasser und Sole-Wasser Wärmepumpe (strichliert)

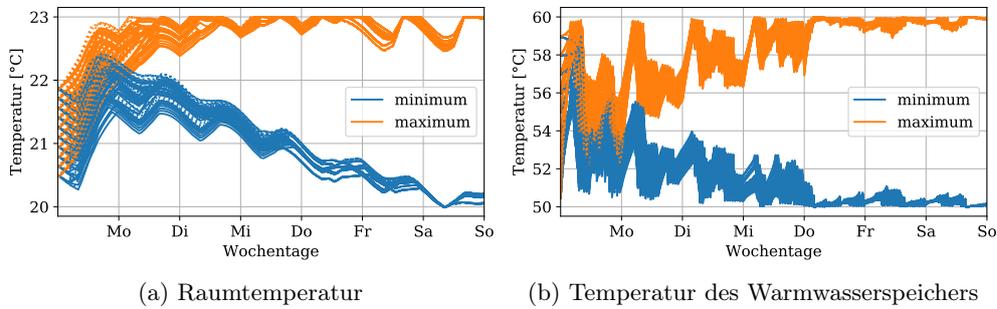


Abbildung 4.21: Raumtemperatur und Temperatur des Warmwasserspeichers der einzelnen Gebäude in KW 5 für den Niedrigenergiehaus-Pool mit Luft-Wasser und Sole-Wasser Wärmepumpe (strichliert)

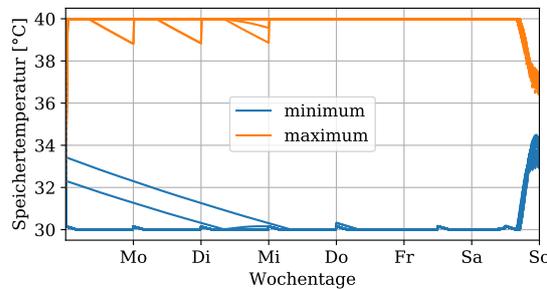


Abbildung 4.22: Temperatur des Heizungsspeichers der einzelnen Gebäude in KW 5 für den Niedrigenergiehaus-Pool mit Luft-Wasser und Sole-Wasser Wärmepumpe (strichliert)

Abbildung 4.23 zeigt die wöchentlich angebotene Regelenergie für das gesamte Jahr. Man sieht, dass die Kurvenverläufe für die Luft- und Erdwärmepumpen ähnlich sind und für die Luftwärmepumpe lediglich um einen gewissen Faktor vergrößert sind. Die

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

Flexibilität ist für den Luftwärmepumpen-Pool erhöht, da diese eine höhere elektrische Leistung haben. Da die restlichen Rahmenbedingungen (Gebäude, Benutzerverhalten, etc.) gleich bleiben, bewirkt dies eine proportionale Skalierung der Regelenergiemenge. Der Gesamtjahreserlös für den Luftwärmepumpen-Pool beträgt 26 671 €, was eine Erhöhung von 55% im Vergleich zum Erdwärmepumpen-Pool (17 183 €) darstellt.

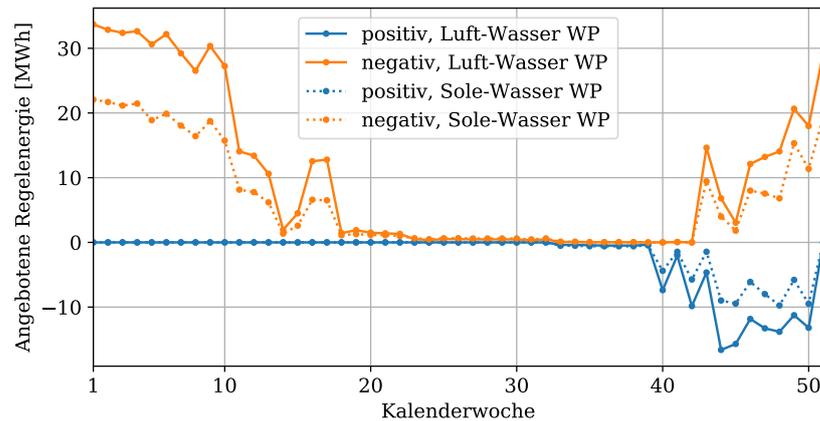


Abbildung 4.23: Wöchentlich angebotene Regelenergie für das gesamte Jahr mit Luft-Wasser und Sole-Wasser Wärmepumpe (strichliert)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine höhere elektrische Leistung mehr vermarktbar Flexibilität am Regelenergiemarkt bedeutet. Die Luftwärmepumpen sind zwar ineffizienter als die Erdwärmepumpen, allerdings ist das für eine Vermarktung der Flexibilität ein Vorteil. Luftwärmepumpen haben zudem geringere Investitionskosten und sind leichter zu installieren als Erdwärmepumpen; daher sind sie die in Österreich im Wohnbereich am weitesten verbreitete Technologie [3]. Die Vermarktungsmöglichkeiten wie etwa durch den Regelenergiemarkt könnten die geringere Effizienz mit Zusatzerlösen durch den Markt ausgleichen und daher einen guten Business Case darstellen.

4.5 Einfluss des Heizungssystems

Wie in Kapitel 3.2.2.1 beschrieben, ist das Heizungssystem in den vereinfachten linearen Gebäudemodellen nicht abgebildet. Der Wärmestrom geht in der Simulation von der Wärmepumpe oder dem Heizungspufferspeicher direkt in den Luft- und Wandknoten des Gebäudes. In diesem Kapitel wird daher qualitativ beschrieben, welchen Einfluss die unterschiedlichen Heizungssysteme auf die Flexibilität und die Erlöse des Wärmepumpen-Pools haben können.

4.5.1 Fußbodenheizung

Das Niedrigenergie- und das Passivhaus sind mit einer Fußbodenheizung ausgestattet. Da die gesamte Raumfläche dabei mit Heizungsrohren unterlegt ist, stellt diese einen großen zusätzlichen Speicher dar. Wie auch die Validierung des linearen Modells in Kapitel 3.2.2.1 zeigt, hat das reale System somit mehr Trägheit als das linear angenommene. Wenn die Wärmezufuhr von der Wärmepumpe abgeschaltet wird, heizt sich der Raum noch weiter auf, da die Heizungsrohre nach wie vor Wärme in den Raum abgeben. Auch der Aufheizvorgang ist durch diesen zusätzlichen Speicher verlangsamt. Das bedeutet, dass die Wärmepumpe bei einer Fußbodenheizung für längere Zeit abgeschaltet werden kann ohne die Komfortgrenzen im Raum zu verletzen. Somit hat das Gebäude länger Flexibilität zur Verfügung; die errechnete Regelenergie und damit auch die Erlöse werden mit dem vereinfachten Modell daher vermutlich unterschätzt.

4.5.2 Radiatorheizung

Das reguläre und das renovierte Bestandsgebäude haben Radiatoren als Heizung. Deren Wasservolumen und somit Speicherkapazität ist nicht so groß wie die der Fußbodenheizung. Die Flexibilität und damit die Erlöse werden mit dem vereinfachten Modell für diese Gebäudetypen somit vermutlich nur leicht unterschätzt.

4.5.3 Regelung

Zusätzlich zu beachten ist die Regelung eines realen Heizungssystems: Bei der Fußbodenheizung wird die Heizung im detaillierten thermischen Modell nach einer fixen Hysterese um einen vorgegebenen Sollwert geregelt (Abbildung 3.2). Um die Flexibilität des Raumes nutzbar zu machen, muss jedoch auch das Ein- und Ausschalten der Heizung von außen vorgegeben werden können. Noch stärker kommt dies zum Tragen bei der Radiatorheizung: Hier wird im detaillierten Modell mittels Thermostatventil auf einen fixen Sollwert geregelt. Der Raum wird also kontinuierlich nachgeheizt und ein Verschieben der Heizzeit ist so nicht möglich.

Falls die Regelung der Heizung real nicht von außen übernommen werden kann, gibt es die Möglichkeit den Sollwert anzupassen. Wenn negative Regelenergie abgerufen wird, kann die Solltemperatur während des Abrufs erhöht werden und sich der Regler somit auf diese höhere Temperatur einstellen. Umgekehrt kann bei einem negativen Abruf zwischenzeitlich eine niedrigere Solltemperatur eingestellt werden. Allerdings geht dadurch die direkte Ansteuerung und Kontrollierbarkeit des Systems ein Stück verloren.

4.6 Variation der Raumtemperaturgrenzen

Als nächstes werden die Komfortgrenzen für die Raumtemperatur variiert. Auch dazu wird der Pool aus Niedrigenergiehäusern verwendet und es werden jeweils für alle Gebäude des Pools dieselben Temperaturgrenzen festgelegt. Die Berechnungen in Kapitel 4.2 bis 4.4 haben als Temperaturbereich $21.5 \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ berechnet; als Variationen in diesem Kapitel wird $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgerechnet.

Im Unterschied zu den bisherigen Analysen, bzw. zur Poolbeschreibung in Tabelle 3.3 werden diesmal die Startwerte für alle KundInnen im Pool auf $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Da das engste Temperaturband nur $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt, ist hier eine Variation der Starttemperatur zwischen den TeilnehmerInnen nicht möglich. Um dieselben Bedingungen für alle 5 Varianten zu haben, wird daher auch bei den breiteren Temperaturbereichen auf die Variation verzichtet. Dies bedeutet zwar eine etwas weniger realistische Pooldurchmischung, allerdings liegt der Fokus in diesem Kapitel primär auf dem relativen Vergleich zwischen den verschiedenen Temperaturbereichen.

Abbildung 4.24 zeigt die optimal angebotene Regelenergie für die Winterwoche KW 5. Bei $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\pm 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ kann pro Tag nur ein Vierstundenprodukt angeboten werden und dies auch nur mit einem Teil der verfügbaren Leistung. Ab $\pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ kann für ein Vierstundenprodukt bereits die maximal mögliche elektrische Leistung angeboten werden. Daher wird ab dieser Temperaturspanne auch ein zweites Produkt mit geringerer Leistung angeboten. Bei Grenzen von $\pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ kann schließlich sogar für 12 Stunden pro Tag Regelenergie angeboten werden, wenn auch für das dritte Produkt nur mit sehr geringer Leistung.

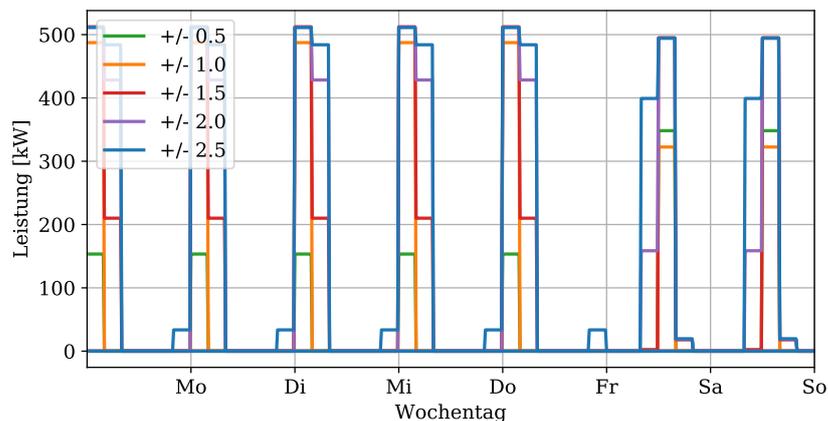


Abbildung 4.24: Angebotene Regelenergie in KW 5 für den Niedrigenergiehaus-Pool mit verschiedenen Komfortgrenzen der Raumtemperatur

4.6 Variation der Raumtemperaturgrenzen

Für jede der fünf Varianten werden für das gesamte Jahr die optimalen Regelenergieangebote berechnet. Abbildung 4.25 fasst die Ergebnisse zusammen: Abbildung 4.25 (a) ist die im gesamten Jahr angebotene positive und negative Regelenergie für jeden der fünf Temperaturbereiche dargestellt. Die angebotene Regelenergie steigt mit der Breite der Temperaturgrenzen; der ermittelte Zusammenhang ist relativ linear für beide Regelenergieprodukte.

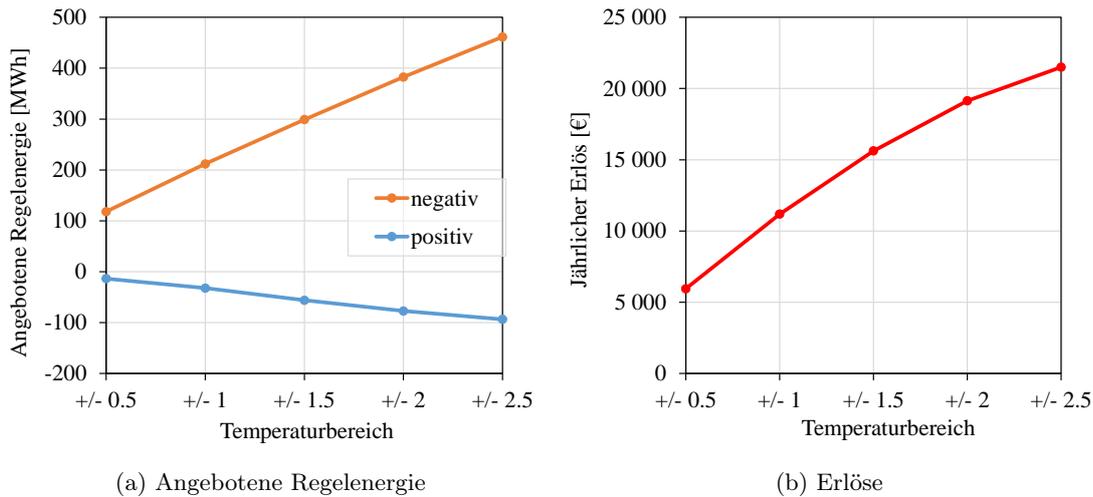


Abbildung 4.25: Vergleich der jährlich angebotenen Regelenergie und Erlöse für die verschiedenen Komfortgrenzen der Raumtemperatur

Abbildung 4.25 (b) zeigt die jährlichen Gesamterlöse für den jeweiligen Pool. Auch hier sieht man eine direkte Proportionalität zwischen der Größe des Komfortbereichs und den erzielten Erlösen. Die Kurve flacht allerdings mit größer werdendem Temperaturbereich zunehmend ab. Während eine Vergrößerung von 0.5 auf 1 Grad eine Erhöhung des Erlöses um 88% bewirkt, bringt die Vergrößerung von 2 auf 2.5 Grad nur mehr eine Verbesserung von 12%. Das heißt über eine Ausweitung des Komfortbereichs kann keine beliebige Vergrößerung der Erlöse erzielt werden. Die Erklärung liegt nahe, dass ab einem gewissen Punkt zu allen besonders profitablen Stunden bereits die maximal mögliche Regelenergie angeboten wird; durch eine Vergrößerung der Komfortgrenzen kann zu diesen Stunden nicht mehr Regelenergie angeboten werden sondern nur zu anderen, weniger rentablen Stunden. Daher tritt der beobachtete Sättigungseffekt auf und die Erlöskurve flacht ab.

4.7 Vergleich der verschiedenen Gebäudetypen

Als letztes wird der Einfluss des Gebäudetyps auf die erzielbaren Erlöse und die Flexibilität der Anlagen untersucht. Dazu werden gebäudereine Pools mit jeweils 400 KundInnen und 40 verschiedenen Charakteristika separat für die vier verschiedenen Gebäudetypen untersucht. Die Ergebnisse mit einem Pool aus 400 Niedrigenergiehäusern werden verglichen mit einem Pool aus 400 Passivhäusern, einem aus 400 Bestandsgebäuden und einem aus 400 renovierten Bestandsgebäuden. Dabei sei angemerkt, dass sich die vier Fälle nicht nur durch das Gebäude, sondern teilweise auch wie in Tabelle 3.1 angeführt durch die verwendete Wärmepumpe, den Speicher und das Heizungssystem unterscheiden.

Als erstes werden wieder die vier Einzelwochen für jede der Jahreszeiten untersucht; Abbildung 4.26 zeigt die angebotene negative und positive Regelenergie für jedes der vier Pools. Man sieht wieder, dass die meiste Regelleistung in der Winterwoche KW 5 angeboten werden kann, gefolgt von der Herbstwoche KW 45 und der Frühlingswoche KW 15. Die angebotene Regelenergie in der Sommerwoche KW 30 ist vernachlässigbar gering für alle Gebäudetypen. In allen vier Wochen kann der Pool aus Bestandsgebäuden die höchste Flexibilität anbieten, gefolgt von dem Pool aus renovierten Bestandsgebäuden und dem Pool aus Niedrigenergiehäusern. Die maximal mögliche Flexibilität hängt insbesondere von der Nennleistung der installierten Wärmepumpe ab, die im Bestandsgebäude am größten ist (siehe Tabelle 3.1).

Allerdings kann im Bestandsgebäude immer nur ein Vierstundenblock pro Tag angeboten werden, während im Niedrigenergiehaus und im renovierten Bestandsgebäude meistens zwei Vierstundenblöcke angeboten werden. Der Passivhaus-Pool hat die größte zeitliche Flexibilität: Hier können in KW 5 drei Vierstundenblöcke pro Tag angeboten werden, wenn auch der jeweils dritte mit sehr geringer Leistung. Da die Wärmepumpe aber die geringste Nennleistung hat, ist die angebotene Regelleistung für diesen Pool auch am niedrigsten.

Abbildung 4.27 zeigt die angebotene Regelenergie je Kalenderwoche für das gesamte Jahr 2016. Insgesamt zeigt sich für die verschiedenen Gebäudetypen ein ähnliches Bild: Die meiste Regelenergie wird während der Heizperiode angeboten. Damit bietet das Passivhaus nur relativ wenige Wochen im Jahr größere Mengen Regelenergie an, da hier nur bis etwa Kalenderwoche 10 bzw. ab Kalenderwoche 45 die Heizung eingeschaltet wird. In den ersten zehn Wochen wird mit dem Pool aus renovierten Bestandsgebäuden die meiste Regelenergie angeboten: Die Kombination aus besserer Dämmung und relativ großer installierter Leistung ist hier ausschlaggebend. Generell haben das renovierte und reguläre Bestandsgebäude eine ähnlich hohe Flexibilität, wobei letzteres durch die länger notwendige Heizung in den Übergangszeiten länger Regelenergie anbieten kann.

4.7 Vergleich der verschiedenen Gebäudetypen

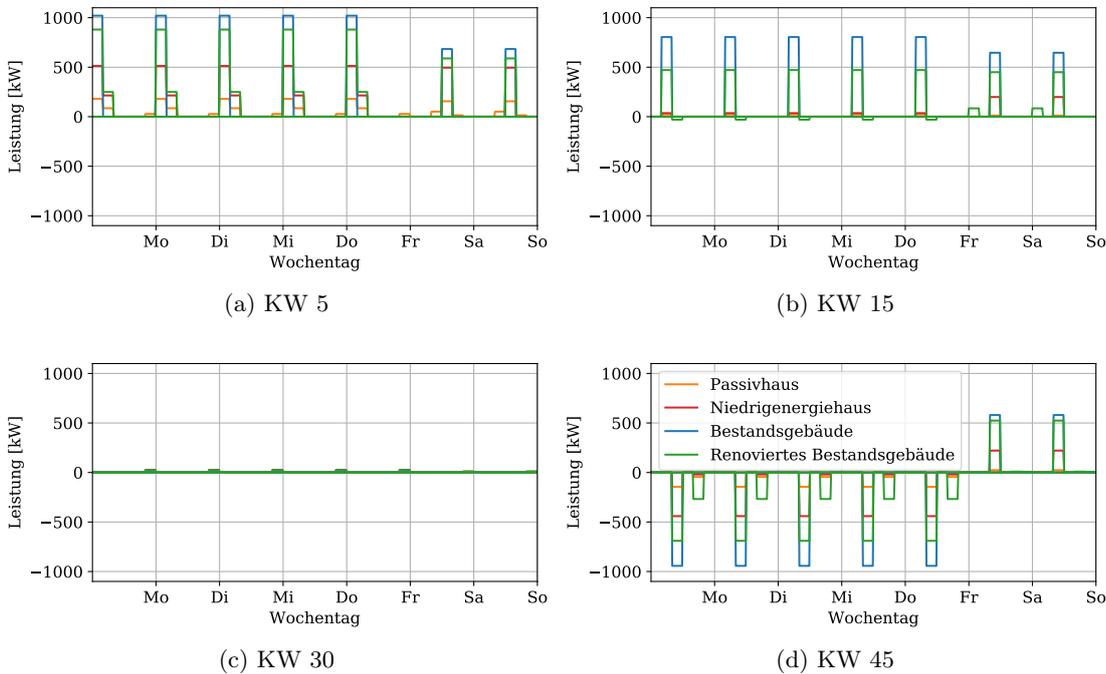


Abbildung 4.26: Angebotene Regelleistung für die verschiedenen gebäudereinen Pools in einer Beispielwoche je Jahreszeit

Als letzter Vergleich sind in Abbildung 4.28 die wöchentlich erzielten Erlöse pro Gebäude-Pool dargestellt. Auch hier zeigen die verschiedenen Gebäudetypen ein ähnliches Bild wie das zuvor analysierte Niedrigenergiehaus: Die größten Erlöse werden im ersten Quartal erzielt; hier waren die Abrufwahrscheinlichkeiten für negative Regelleistung im Jahr 2016 besonders hoch. Dadurch sind auch die Erlöse in diesem Zeitraum überproportional groß im Vergleich zur angebotenen Flexibilität. Die Erlöse für das renovierte und reguläre Bestandsgebäude sind über das gesamte Jahr hinweg sehr ähnlich. Sie erzielen fast 50% mehr Erlöse als der Pool aus Niedrigenergiehäusern. Das Passivhaus hat die niedrigsten Erlöse die mehr als 50% unter denen des Niedrigenergiehauses liegen. Insgesamt erzielt in den 51 analysierten Wochen der Pool an Passivhäusern Erlöse von 7112 €, die Niedrigenergiehäuser 16 821 €, die Bestandsgebäude 28 277 € und die renovierten Bestandsgebäude 27 127 €.

Der Vergleich der Gebäudetypen zeigt, dass die maximal mögliche Regelleistung umso höher ist, je größer die Leistung der installierten Wärmepumpe ist. Die mögliche Dauer der angebotenen Regelleistung ist länger, je besser das Gebäude isoliert ist. Auf der anderen Seite ist die Marktteilnahme nur während der Heizperiode ökonomisch sinnvoll. Hier ist

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

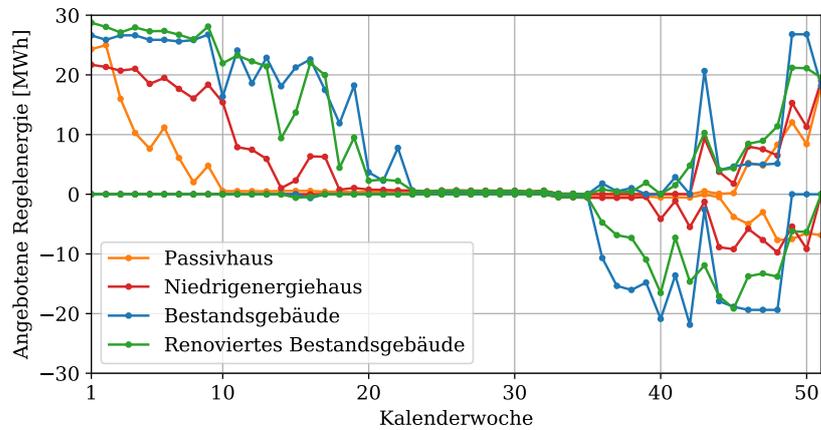


Abbildung 4.27: Wöchentlich angebotene Regelenenergie für das gesamte Jahr für die verschiedenen gebäudereinen Pools

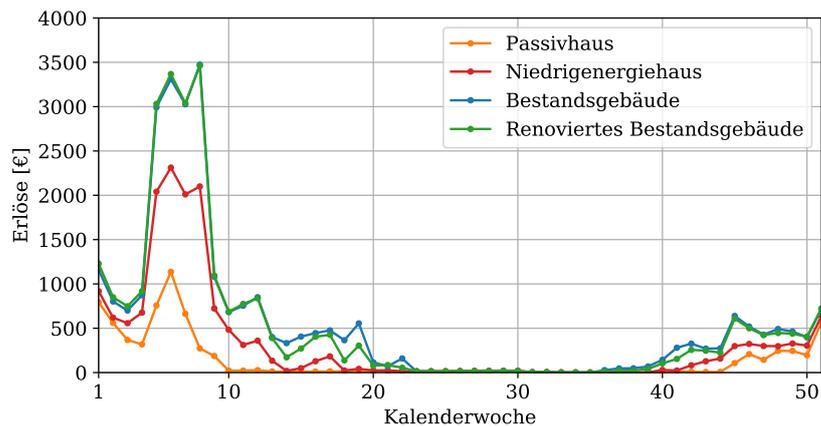


Abbildung 4.28: Wöchentlich erzielte Gesamterlöse für die verschiedenen gebäudereinen Pools

insbesondere das Passivhaus im Nachteil, da es die kürzeste Heizperiode hat und daher nur wenige Wochen im Jahr Regelenenergie anbieten kann. In allen Fällen wird mehr negative als positive Regelenenergie angeboten. Wenn die Wärmepumpe positive Regelenenergie anbietet muss sie eingeschaltet sein um ihre Leistung bei einem Abruf reduzieren zu können. Dagegen erhöht die Wärmepumpe bei einem negativen Regelenenergieabruf ihre Leistung und bekommt den zusätzliche Verbrauch vergütet. Es ist daher zu erwarten, dass noch mehr negative als positive Regelenenergie angeboten wird, wenn die Opportunitätskosten für das Heizen (regulärer Strompreis oder Spot Markt Preis) mitberücksichtigt werden.

4.8 Realistisch gemischte Pools für Österreich

Nach den diversen Einzelanalysen separiert nach Gebäudetypen werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Berechnung eines gemischten Wärmepumpen-Pools gezeigt. Wie in Abbildung 3.11 dargestellt werden zwei verschiedene Poolzusammensetzungen analysiert, eine mit einem hohen Neubauanteil und eine mit einem hohem Sanierungsanteil. Diese beiden Szenarien wurden im Projekt iWPP-Flex [7] als für Österreich repräsentative Pools erstellt. Neben den vier im vorigen Kapitel gezeigten Gebäudetypen, beinhalten die Pools als fünfte KundInnengruppe Niedrigenergiehäuser mit Pufferspeichern und Luftwärmepumpen. Dieser KundInnentyp wurde in Kapitel 4.4 ebenfalls in einem gebäudereinen Pool analysiert .

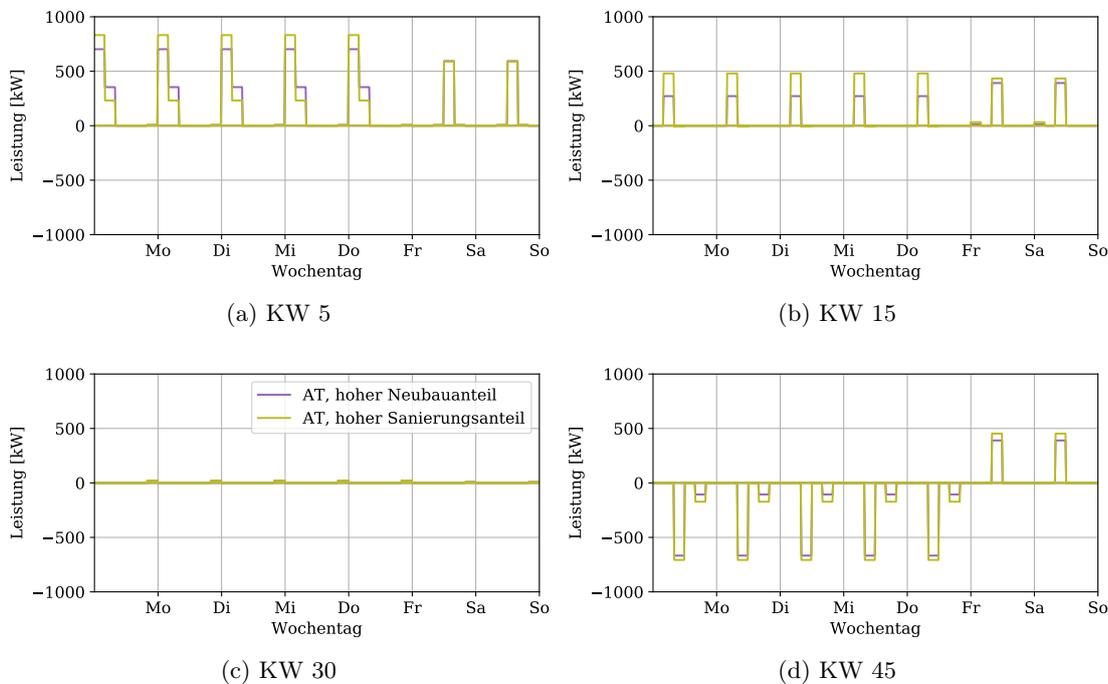


Abbildung 4.29: Angebotene Regelleistung der beiden gemischten Pools in einer Beispielwoche je Jahreszeit

Abbildung 4.29 zeigt die in der Optimierung ermittelten Regelenenergiegebote für die vier Beispielwochen für die beiden gemischten Pools. Der Pool mit höherem Sanierungsanteil erreicht überall die höhere maximale Flexibilität, da die Bestandsgebäude eine größere Wärmepumpenleistung installiert haben als die Neubauten. Allerdings wird dieser Vorteil durch längere Flexibilitätsdauern bei Neubauten teilweise ausgeglichen. Dadurch

4 Ergebnisse der techno-ökonomischen Optimierung

können beispielsweise in KW 5 beide Pools mit 26.2 MWh für den Pool mit hohem Sanierungsanteil und 26.1 MWh für den Pool mit hohem Neubauanteil annähernd gleich viel Regelernergie anbieten. Dennoch kann der Pool mit hohem Sanierungsanteil hier etwas mehr Erlöse erzielen (2897 € zu 2829 €), da er mehr Flexibilität während des profitabelsten Vierstundenprodukts anbieten kann. In den beiden Wochen der Übergangszeit KW 15 und KW 45 kann der Pool mit hohem Neubauanteil weniger Regelernergie anbieten, da die Neubauten kürzere Heizperioden haben, als die Bestandsgebäude.

Auch für die beiden gemischten Pools werden die wöchentlich angebotene Regelernergie und die Erlöse für das ganze Jahr 2016 errechnet. Abbildungen 4.30 und 4.31 zeigen die Ergebnisse der Optimierung. Wie bereits zuvor sieht man dass die beiden Pools vor allem im Winter sehr ähnliche Regelergienmengen und Erlöse erzielen. Hier gleichen sich die größere maximale Flexibilität der Bestandsgebäude mit der längeren Flexibilitätsdauer der Neubauten offensichtlich weitgehend aus. In der Übergangszeit wird mit dem Pool mit höherem Sanierungsanteil mehr Regelernergie angeboten und somit werden auch etwas mehr Erlöse erzielt. Insgesamt betragen die Erlöse für die 51 Wochen 25 297 € für den Pool mit hohem Sanierungsanteil und 24 359 € für den Pool mit höherem Neubauanteil.

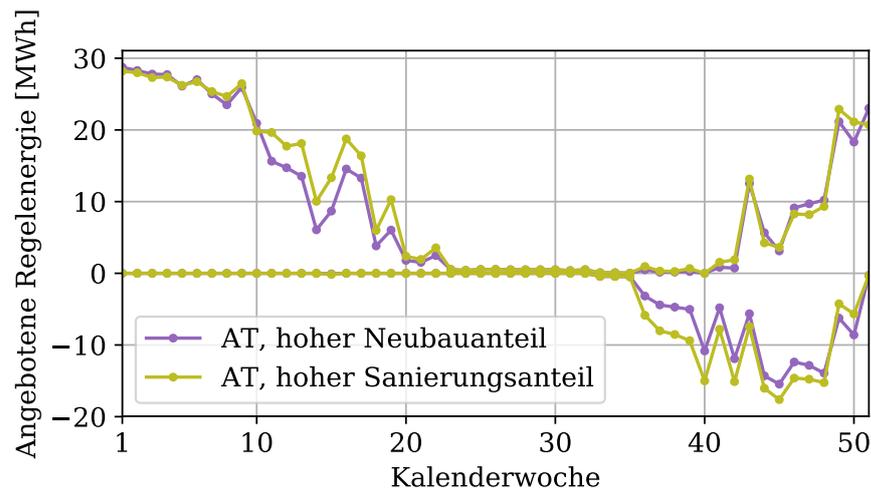


Abbildung 4.30: Wöchentlich angebotene Regelernergie der beiden gemischten Pools

4.8 Realistisch gemischte Pools für Österreich

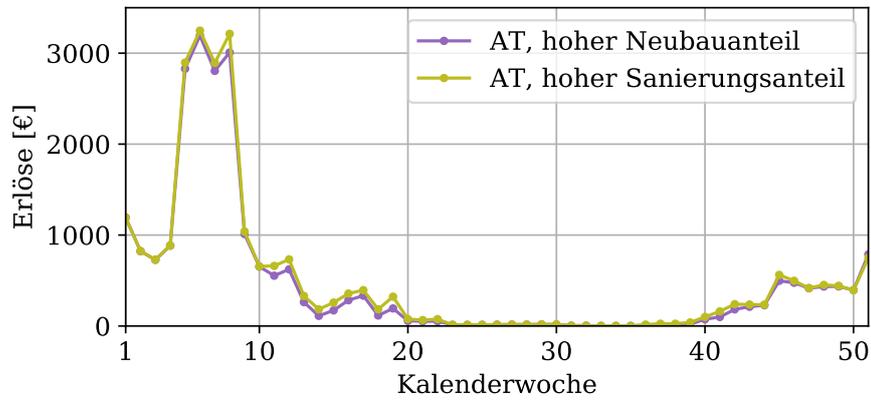


Abbildung 4.31: Wöchentlich erzielte Erlöse der beiden gemischten Pools

5 Synthese der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit gegenübergestellt und zusammengefasst. Es wird verglichen, wie viel Flexibilität eine einzelne Wärmepumpe pro Woche am Markt anbieten kann, abhängig von Gebäudetyp, Pufferspeicher und Wärmepumpentyp. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Flexibilität werden noch einmal herausgearbeitet. Im zweiten Teil werden die jährlich erzielbaren Erlöse am Tertiärregelenergiemarkt pro KundIn analysiert.

5.1 Flexibilitätsuntersuchung

Um einen Überblick über die verfügbare Flexibilität mit den einzelnen Gebäude- und Wärmepumpen Konstellationen zu schaffen, werden die Optimierungsergebnisse aller untersuchten gebäudereinen Pools neu ausgewertet und miteinander verglichen. Wie sich in den bisherigen Analysen gezeigt hat, ist die verfügbare Flexibilität über das Jahr hinweg sehr unterschiedlich. Daher werden die vier Jahreszeiten jeweils separat ausgewertet. Pro KundInnentyp und pro Jahreszeit wird der Mittelwert der wöchentlich angebotenen positiven und negativen Regelenergie ermittelt. Um die Flexibilität pro KundIn zu erhalten, wird dieser Wert noch durch die Anzahl der KundInnen im Pool, also 400, dividiert.

Das Ergebnis ist in Abbildung 5.1 dargestellt: Für jeden KundInnentyp gibt es vier Werte (blau, grün, gelb, orange) für die vier Jahreszeiten. Diese drücken aus, wie viel Regelenergie in kWh durchschnittlich pro Woche von diesem Gebäude angeboten wird. Die Ergebnisse sind nach wie vor spezifisch für die Tertiärregelenergiepreise und Abrufwahrscheinlichkeiten des analysierten Jahres 2016. Daher wird beispielsweise in allen sechs Szenarien primär im Herbst positive Regelenergie (schraffiert dargestellt) angeboten, da die Preise zu dieser Zeit besonders attraktiv waren. Dennoch bietet die Grafik auch eine allgemeinere Aussage über die Flexibilität der einzelnen KundInnen: Die Balkenhöhe der positiven und negativen Regelenergie gemeinsam bildet in etwa die effektiv pro Woche verfügbare Flexibilität ab. Diese Flexibilität kann auch in dieser Größenordnung in einem anderen Jahr oder für eine andere Anwendung angeboten werden.

Alle Gebäudemodelle haben die meiste Flexibilität im Winter, gefolgt von Herbst und Frühling; die Flexibilität im Sommer ist bei den meisten Gebäudemodellen vernachlässigbar gering. Zwischen dem Niedrigenergiehaus (NE-Haus) mit und ohne Speicher besteht

5 Synthese der Ergebnisse

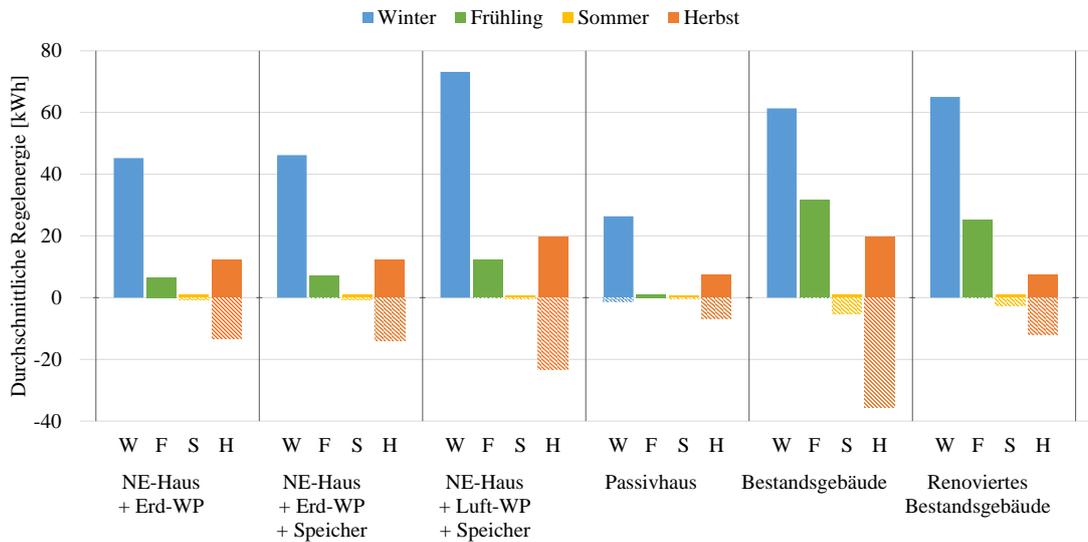


Abbildung 5.1: Wöchentlich angebotene Regelennergie pro Wärmepumpe. Abgebildet sind die wöchentlichen Durchschnittswerte pro Jahreszeit für die verschiedenen KundInnentypen. Die positive Regelennergie ist mit gefüllten, die negative mit schraffierten Balken dargestellt.

kein sichtbarer Unterschied. Wie zuvor beschrieben liegt die Erhöhung der Flexibilität durch den zusätzlichen Pufferspeicher nur im Bereich von 2-3%. Das Niedrigenergiehaus mit Luftwärmepumpe hat aufgrund der geringeren Effizienz einen höheren elektrischen Verbrauch und somit mehr vermarktbare Flexibilität. Es hat im Winter mit durchschnittlich 73 kWh/Woche die höchste Flexibilität aller untersuchten Gebäude. Die relativ hohe elektrische Nennleistung der Wärmepumpe ist zusammen mit den langen Flexibilitätszeiten durch die gute Gebäudedämmung eine gute Kombination.

Im Herbst liegt das Niedrigenergiehaus mit Luftwärmepumpe jedoch hinter dem Bestandsgebäude und im Frühling sogar hinter dem renovierten Bestandsgebäude. Hier wirken sich die längeren Heizperioden aufgrund der schlechteren Gebäudedämmung positiv auf deren verfügbare Flexibilität aus. Das renovierte Bestandsgebäude hat durch die bessere Dämmung im Winter ebenfalls mehr Flexibilität als das konventionelle Bestandsgebäude; im Frühling und Herbst ist es umgekehrt, da hier die schlechtere Dämmung zu einer längeren Heizperiode führt. Das Passivhaus hat aufgrund der sehr kleinen installierten Wärmepumpe und der sehr kurzen Heizperiode die geringste Flexibilität.

In Abbildung 5.2 ist die gleiche Auswertung von zuvor dargestellt, allerdings für die verschiedenen Komfortgrenzen der Raumtemperatur aus Kapitel 4.6. Durch die breiteren Temperaturgrenzen können die Gebäude über längere Zeit Flexibilität liefern, wodurch sich auch die flexible Energie erhöht. Wenn die Grenzen $\pm 0.5^\circ\text{C}$ sind, ist die Flexibilität

5.2 Jährliche Erlöse pro KundIn

nur 15 kWh pro Woche im Winter, was sogar geringer ist als im oben gezeigten Passivhaus. Dafür ist die Flexibilität bei Raumtemperaturgrenzen von $\pm 2.5\text{ °C}$ im Winter durchschnittlich mehr als 67 kWh pro Woche; dies ist größer als die Flexibilität der den beiden Bestandsgebäude. Neben der installierten Nennleistung der Wärmepumpe und der Isolation des Gebäudes haben die Komfortgrenzen der KundInnen einen großen Einfluss auf die verfügbare Flexibilität.

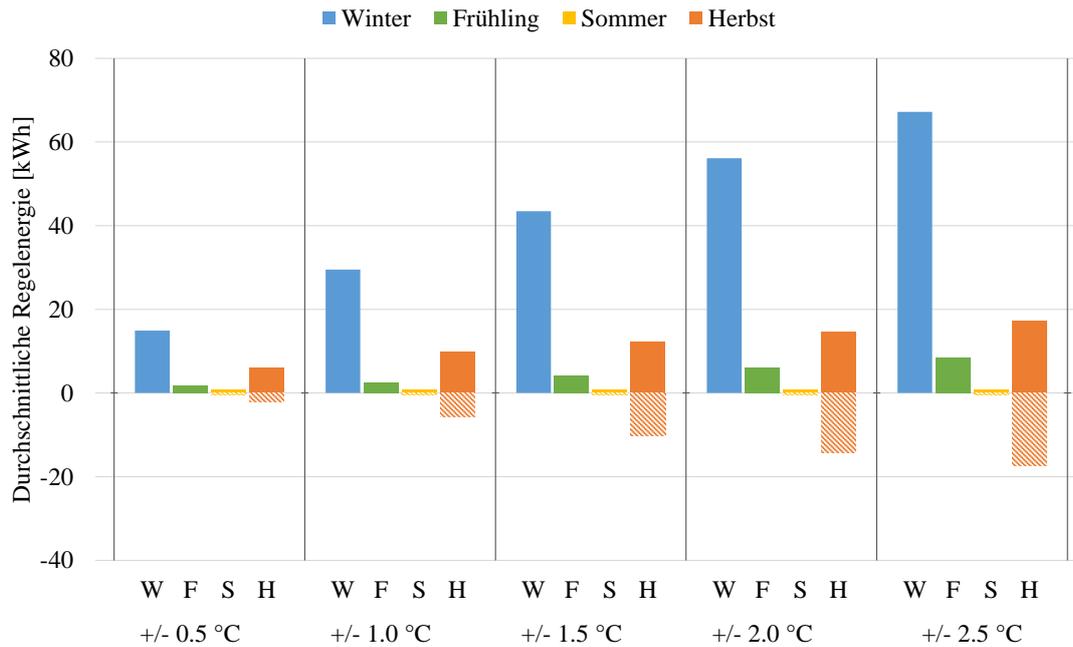


Abbildung 5.2: Wöchentlich angebotene Regelenergie pro Wärmepumpe. Abgebildet sind die wöchentlichen Durchschnittswerte pro Jahreszeit, für die verschiedenen Komfortbereiche. Die Gebäude und Heizsysteme sind idente Niedrigenergiehäuser mit Erdwärmepumpe. Die positive Regelenergie ist mit gefüllten, die negative mit schraffierten Balken dargestellt.

5.2 Jährliche Erlöse pro KundIn

Für zukünftige Geschäftsmodelle rund um die Nutzung der Flexibilität von Wärmepumpen braucht man vor allem eine Aussage über die jährlich erzielbaren Erlöse pro teilnehmende/r KundIn. Dazu werden die errechneten Jahreserlöse auf jeweils eine Wärmepumpe heruntergerechnet. In der Simulation wurden nur 51 Kalenderwochen berechnet, da die 52. Woche bereits teilweise im nächsten Jahr liegt. Daher wird für den Erlös dieser Woche der Mittelwert der Erlöse aller Winterwochen verwendet. Auf diese Weise wird für

5 Synthese der Ergebnisse

die verschiedenen Szenarien jeweils der Jahreserlös pro Wärmepumpe ermittelt und in Abbildung 5.3 dargestellt. Zur besseren Orientierung werden für die KundInnentypen die gleichen Farben wie im Ergebniskapitel verwendet.

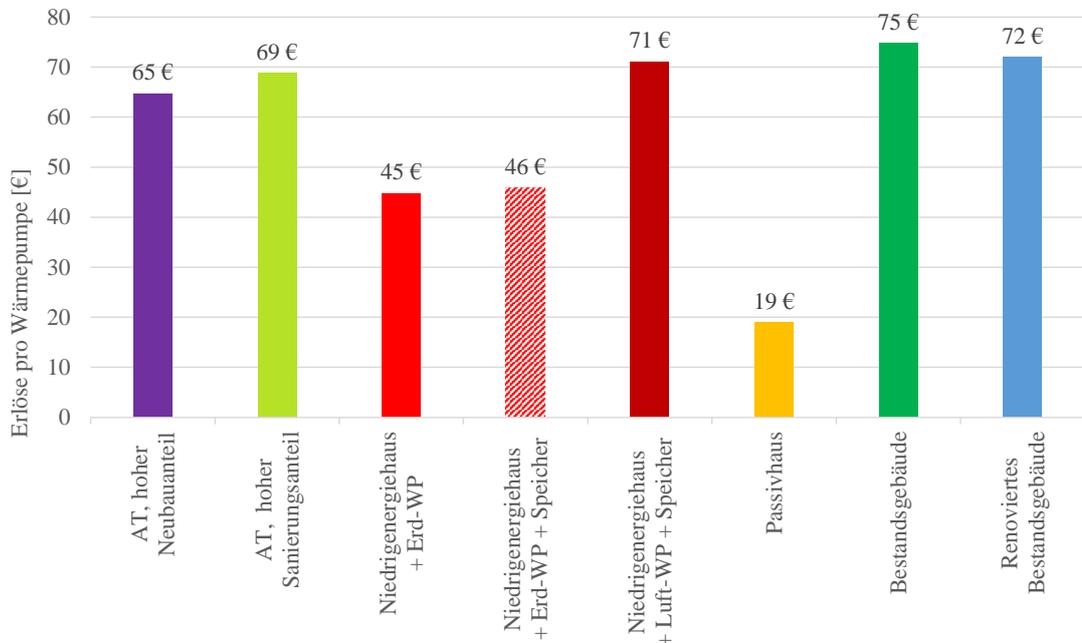


Abbildung 5.3: Jährliche Erlöse je Gebäude in den verschiedenen Szenarien, für das Jahr 2016

Die jährlichen Erlöse bewegen sich im Bereich zwischen 19€ für das Passivhaus und 75€ für das Bestandsgebäude. Das Niedrigenergiehaus mit Erdwärmepumpe hat die zweitniedrigsten Erlöse mit 45€ ohne bzw. 46€ mit Pufferspeicher. Mit Luftwärmepumpe erzielt das Gebäude um fast ein Drittel mehr Erlöse, nämlich 71€. Das renovierte Bestandsgebäude hat die zweithöchsten Erlöse mit 72€ pro Jahr. Auch die beiden Pools mit einer für Österreich realistischen Durchmischung sind beide im oberen Erlösbereich: 65€ sind es durchschnittlich bei einem Pool mit hohem Neubauanteil und 69€ bei einem Pool mit hohem Sanierungsanteil.

Dabei ist wichtig zu berücksichtigen, dass die ermittelten Werte stark von den jeweiligen Preisen und Abrufwahrscheinlichkeiten am Regelenergiemarkt abhängen. Außerdem handelt es sich dabei um die reinen Erlöse. Die Energiekosten für den regulären Betrieb der Wärmepumpe sind nicht berücksichtigt. Auch die Installations- und Betriebskosten für die Messgeräte und Kommunikationsinfrastruktur sind nicht berücksichtigt. Für eine reale Anwendung muss außerdem noch die Aufteilung der Erlöse zwischen Aggregator und KundIn geklärt werden.

6 Schlussfolgerungen

Die gewählte Methode der bottom-up Erstellung eines techno-ökonomischen Optimierungsmodells liefert interessante Ergebnisse, zeigt aber auch Nachteile: Die Flexibilität des Pools kann gut abgebildet werden, indem 40 voneinander unabhängige KundInnentypen in der Optimierung berücksichtigt werden. Allerdings führt dies zu einer erhöhten Komplexität der Berechnung und zu längeren Rechenzeiten. Auch das Erstellen der linearen Gebäude- und Heizsystemmodelle ist komplex. Die direkte Linearisierung der nichtlinearen Dymolamodelle funktioniert nur bedingt. Da das Heizungssystem nicht inkludiert ist, wird vor allem im Fall der Fußbodenheizung die Flexibilität der Gebäude unterschätzt. Generell liefert die verwendete Methodik eine sehr konservative Flexibilitätsabschätzung in der Simulation. Ein Nachkaufen an anderen Märkten wird nicht berücksichtigt und es wird vom Worst Case eines vollen Abrufs am Regelenergiemarkt ausgegangen. Auf der anderen Seite ist die Verwendung von historischen Preis- und Wetterdaten und Abrufwahrscheinlichkeiten eine Best Case Abschätzung, bei der der Aggregator im Vorhinein alle Informationen für die nächste Woche hat.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass mit Wärmepumpen in Einfamilienhäusern Regelenergie für vier bis acht Stunden pro Tag angeboten werden kann. Zwölf Stunden sind nur für die Passivhäuser möglich, allerdings mit geringerer Leistung. Die Teilnahme am Tertiärregelenergiemarkt mit Vierstundenprodukten ist also grundsätzlich möglich. Nach den aktuellen Richtlinien ist eine Teilnahme am Sekundärregelenergiemarkt mit den Zwölfstundenprodukten nicht möglich, bzw. nur wenn der Pool sehr groß ist. Wenn die Produktlänge allerdings ebenfalls auf vier Stunden verringert wird (wie zum Zeitpunkt der Arbeit für Juli 2018 geplant), könnte der Pool auch hier teilnehmen. Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik kann dann direkt auf Sekundärregelenergie umgelegt werden.

Eine weitere Erkenntnis aus der Arbeit ist, dass die Kombination aus Regelenergiemärkten mit anderen kurzfristigen Märkten (Day-Ahead- und Intraday-Markt) sinnvoll ist. Diese können genutzt werden um im Bedarfsfall Energie nachkaufen zu können. So kann mehr Regelenergie angeboten und ein weniger konservatives Bietverhalten angewendet werden. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sowohl bei keinem, als auch bei einem hundertprozentigen Regelenergieabruf über die gesamte Woche alle Temperaturgrenzen eingehalten werden müssen. Wenn hingegen am Vortag oder sogar innerhalb eines Tages der Fahrplan angepasst und Ausgleichskäufe getätigt werden können, kann diese Bedingung gelockert werden.

6 Schlussfolgerungen

Die Simulationen zeigen, dass die Poolteilnahme vor allem für KundInnen mit Luftwärmepumpen profitabel sein kann, da diese normalerweise einen größeren elektrischen Verbrauch haben, als Erdwärmepumpen. Dies ist in dem Zusammenhang interessant, da die Luftwärmepumpe der in Österreich am weitesten verbreitete Wärmepumpentyp ist und deren Absatz weiterhin ansteigt [3]. Generell sind mehr Erlöse erzielbar, je größer die Heizlast des Gebäudes und somit die installierte elektrische Leistung der Wärmepumpe ist. Die höchsten flexiblen Leistungen können daher mit schlecht isolierten Bestandsgebäuden erzielt werden. Auf der anderen Seite kann mit gut isolierten Niedrigenergiehäusern über längere Zeit pro Tag Flexibilität angeboten werden.

Im Durchschnitt kann pro typischem österreichischen Haushalt mit Wärmepumpe ein Erlös von 65-69€ pro Jahr durch die Teilnahme am Regelenergiemarkt erzielt werden. Neben einer Refundierung für die KundInnen selbst, müssen von diesem Betrag aber auch sämtliche Kosten des Aggregators und der Anbindung abgedeckt werden. Die für das Pooling notwendige IT-Infrastruktur zur Kommunikation und Ansteuerung der Wärmepumpe muss daher sehr günstig sein. Dies ist eine der noch offenen Herausforderungen für die Aggregation von HaushaltskundInnen, da eine sehr große Anzahl an Geräten zu sehr günstigen Konditionen angebunden werden muss. Daher ist auch eine Definition einer standardisierten Schnittstelle zur Steuerung der Wärmepumpe besonders wichtig. Das derzeit vorhandene Smart Grid Ready Label [4] ist für die Teilnahme der Geräte am Regelenergiemarkt noch nicht ausreichend.

Außerdem müssen noch einige regulatorische und technische Fragestellungen zu diesem Thema geklärt werden: Die Festlegung einer Baseline zur Ermittlung der erbrachten Regelenergie ist für HaushaltskundInnen derzeit noch nicht definiert. Auch die Auswirkung möglicher Nachholeffekte muss noch genauer analysiert werden. Außerdem ist es wichtig, den Einfluss einer marktbasierter Steuerung auf die Effizienz und die Lebensdauer der Wärmepumpe zu berücksichtigen. Nur wenn das Gesamtsystem betrachtet wird, kann ein optimaler Betrieb erreicht werden.

Da die Anzahl an fluktuierenden erneuerbaren Energieträgern im Stromsystem immer weiter steigt, wird die Verfügbarkeit von Flexibilität immer wichtiger. Nachdem die Zahl der Wärmepumpen im Haushaltssektor ebenfalls steigt und diese außerdem über thermische Speicher und schnelle Schaltcharakteristika verfügen, können Wärmepumpen einen signifikanten Beitrag zur Flexibilitätsbereitstellung liefern. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell zeigt die möglichen Erlöse und die entscheidende Einflussparameter auf die verfügbare Flexibilität. Zukünftig könnte es auch um andere Geräte wie Elektroautos und Batteriespeicher sowie um andere Marktsegmente erweitert werden. Für einen positiven Business Case des Poolings im Haushaltssektor wird vor allem die günstige, standardisierte Kommunikationsinfrastruktur ausschlaggebend sein. Diese ist insbesondere auch notwendig, um konkurrenzfähig zu den in Österreich bisher als Flexibilitätsanbieter vorherrschenden Pumpspeicherkraftwerken sein zu können.

Literatur

- [1] E-Control. *Tätigkeitsbereich 2015*. 2015 (siehe S. 1).
- [2] WienEnergie. *Wie funktioniert Wiens größter Wasserkocher?* 20. Okt. 2017. URL: <https://blog.wienenergie.at/2017/10/20/wie-funktioniert-wiens-groesster-wasserkocher/> (siehe S. 1).
- [3] M. Hartl u. a. *Österreichische Technologie Roadmap für Wärmepumpen*. Wien: bmvit, Aug. 2016 (siehe S. 1, 58, 74).
- [4] Bundesverband Wärmepumpe e.V. *Regularium für das label "SG Ready" für elektrische Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen*. 2013 (siehe S. 1, 74).
- [5] Urs Binder. *Smart heizen und dabei sparen*. 14. Okt. 2016. URL: <https://www.swisscom.ch/de/storys/technologie/heizenergie-intelligent-ausgleichen.html> (siehe S. 2, 5).
- [6] David Fischer u. a. »Business Models Using the Flexibility of Heat Pumps - A Discourse«. In: 12th IEA Heat Pump Conference 2017. Rotterdam, Juni 2017. ISBN: 978-90-9030412-0 (siehe S. 3, 8).
- [7] Tara Esterl. *iWPP-Flex Projekt Endbericht*. Österreichisches Forschungsprojekt (FFG-Nummer 848894). 29. Juli 2016 (siehe S. 3, 9, 12–14, 27–32, 65).
- [8] A1 Energy Solutions. *Der Pool*. URL: <https://www.a1energysolutions.at/der-pool/> (besucht am 24.03.2018) (siehe S. 5).
- [9] NEXT Kraftwerke. *Regelenergie / Demand Side Management*. URL: <https://www.next-kraftwerke.at/stromverbraucher/stromverbraucher-regelenergie> (besucht am 24.03.2018) (siehe S. 5).
- [10] aWATTar. *SYNCER*. URL: <https://www.awattar.com/services/syncer> (besucht am 24.03.2018) (siehe S. 5).
- [11] ENERGIE AG Oberösterreich. *Heimvorteil smart flex: Das flexible Preismodell für Ihre Wärmepumpe ab 0,00 ct/kWh*. URL: <https://www.energieag.at/Privat/Strom/Heimvorteil-smart-flex> (besucht am 24.03.2018) (siehe S. 5).
- [12] APG Austrian Power Grid. *Erläuterungen Regelreserve*. 9. Okt. 2015 (siehe S. 6, 7).
- [13] Wolfgang Gawlik. »Energieversorgung; Skriptum zur Vorlesung 370.002«. 21. Sep. 2017 (siehe S. 6, 7).

Literatur

- [14] APG Austrian Power Grid. *Netzregelung*. URL: <https://www.apg.at/de/markt/netzregelung> (besucht am 24.03.2018) (siehe S. 6, 7).
- [15] Krzysztof Piechurski, Małgorzata Szulgowska-Zgrzywa und Jan Danielewicz. »The impact of the work under partial load on the energy efficiency of an air-to-water heat pump«. In: 9th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering (EKO-DOK 2017). Boguszów-Gorce, Poland, 23. Apr. 2017 (siehe S. 7).
- [16] Riegler Markus und Eder Matthias. »Regelreserve - Internationale Entwicklungen«. Marktforum Regelenergie. 17. Okt. 2017 (siehe S. 7, 8).
- [17] Vögel Stefan. »Netznutzungsentgelt für Regelreserve - Ausweitung auf Netzebene 7 angestrebt«. Marktforum Regelenergie. 17. Okt. 2017 (siehe S. 8).
- [18] E-Control. *Sonstige Marktregeln Strom; Kapitel 10 - Informationsübermittlung von Netzbetreibern und anderen Marktteilnehmern; Grundsätze des 1. und 2. Clearings*. 2017 (siehe S. 8).
- [19] EPEX SPOT. *Day-ahead-Auktion mit Lieferung in den deutschen/österreichischen Regelzonen*. URL: <https://www.epexspot.com/de/produkte/auktionshandel/deutschland-oesterreich> (besucht am 14.04.2018) (siehe S. 8).
- [20] APG Austrian Power Grid. *Information zur SRL-Kooperation Deutschland/Österreich*. URL: <https://www.apg.at/de/markt/netzregelung/sekundaerregelung/Kooperation> (besucht am 14.04.2018) (siehe S. 8).
- [21] Daniel Schwabeneder, Andreas Fleischhacker und Georg Lettner. »Qualitative Analyse von Geschäftsmodellen für Aggregatoren«. In: 15. Symposium Energieinnovation. Graz, Austria, 14. Feb. 2018 (siehe S. 9).
- [22] Jakob Fölser. »Sequenzielle dynamische Einsatzoptimierung aggregierter elektrischer Lasten«. Master Thesis. Wien: TU Wien, Nov. 2016 (siehe S. 9).
- [23] Samuel Pfaffen und Karl Werlen. *WARMup; Optimale Verwertung der Flexibilität von thermischen Speichern - Schlussbericht*. Schlussbericht. Bundesamt für Energie BFE, 29. Nov. 2013 (siehe S. 9, 30).
- [24] Samuel Pfaffen. »Tertiärregelenergie im Wärmepool für den Schweizer Markt«. Master Thesis. Visp, Switzerland: ETH Zürich, 31. Aug. 2012 (siehe S. 9, 21).
- [25] Dieter Patteeuw und Lieve Helsen. »Residential buildings with heat pumps, a verified bottom-up model for demand side management studies«. In: 9th International Conference on System Simulation in Buildings. Liege, Belgium, 2014 (siehe S. 10, 30).
- [26] Kersting, W. H. *Distribution system modeling and analysis*. CRC press, 2012 (siehe S. 10).

- [27] T. Blochwitz u. a. »The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models«. In: 8th International Modelica Conference. 2011 (siehe S. 13).
- [28] Meteonorm. *Einstrahlungsdaten für jeden Ort des Planeten*. URL: <http://www.meteonorm.com/de/> (besucht am 14.04.2018) (siehe S. 27).
- [29] APG Austrian Power Grid. *Ausschreibungssystem - Regelenergiemarkt*. URL: <https://www.apg.at/emwebapgreem/startApp.do> (besucht am 25.03.2018) (siehe S. 28, 29).
- [30] Benjamin Biegel u. a. »Electricity Market Optimization of Heat Pump Portfolio«. In: 2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA). Hyderabad, India, 28. Aug. 2013 (siehe S. 30).

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct, insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, am _____

Johanna Spreitzhofer