

Erweiterung der Optimierung eines Energiemanagementsystems zum Handel von Leistungsquoten

Bachelorarbeit

von

Jonas Möck

Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen

Matrikelnummer: 2231330

Institut für Angewandte Informatik und Formale
Beschreibungsverfahren (AIFB)

KIT-Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Prüfer: Prof. Dr. Hartmut Schneck

Zweiter Prüfer: Prof. Dr. Andreas Oberweis

Betreuer: Ariane Heling

Eingereicht am: 25. September 2023

Zusammenfassung

Diese wissenschaftliche Arbeit mit dem Titel „Erweiterung der Optimierung eines Energiemanagementsystems zum Handel von Leistungsquoten“ befasst sich mit der Ergänzung eines Gebäudeenergiemanagementsystems (GEMS) aus dem flexQgrid-Projekt, um die Möglichkeit des Handels mit Leistungsquoten auf einem Sekundärmarkt in prognostizierten Netzengpasssituationen. Grundlage dafür bildet die bestehende Zielfunktion aus dem Projekt. Ziel des flexQgrid Projektes ist es, prognostizierte Engpässe zu vermeiden, indem Haushalte und ihre Anlagen vernetzt und die Flexibilität intelligent gesteuert wird. Dabei basiert das Projekt auf dem Ampelkonzept des BDEW's. Die Zielfunktion wird in dieser Arbeit um Entscheidungsvariablen, Parameter und Nebenbedingungen erweitert. Sie ermöglichen den Handel und begrenzen ihn auf ein praktikables Maß. Darüber hinaus wird ein Algorithmus beschrieben und implementiert, der vier voneinander verschiedene Gebote für eine Erhöhung bzw. Senkung der Quote berechnet und damit die Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Zusammenführens zwischen Angebot und Nachfrage auf dem Sekundärmarkt erhöht. Durch diesen Ansatz wird die Netzstabilität in Engpassphasen verbessert und den Marktteilnehmern die Möglichkeit gegeben, in prognostizierten Engpassphasen durch eine Reduzierung der Quote Gewinne zu erzielen bzw. die über die Quote hinausgehende Nachfrage zu decken.

Inhaltsverzeichnis

0.1	Motivation	1
0.2	Ziel der Arbeit	2
1	Grundlagen	4
1.1	Netzampel	4
1.2	Flexibilität	5
1.3	Smart Market	6
1.3.1	Gestaltungsinstrumente eines Smart Market	7
1.3.2	Geschäftsmodelle von Smart Markets	8
2	Projekt flexQgrid	10
2.1	Engpassermittlung	10
2.2	Quotenmodell	11
2.3	Sekundärmarkt	11
2.4	Zeitlicher Ablauf des Handels	12
2.5	Abgabe von Geboten auf dem Sekundärmarkt	13
2.6	Flexibilitätshandel	13
3	Erweitern der mathematischen Optimierung	15
3.1	Definition der Modellparameter	15
3.2	Basiszielfunktion	16
3.3	Erweiterung der Zielfunktion	17
3.4	Abgabe mehrerer Gebote	20
4	Implementierung	22
4.1	Solver	22
4.2	Pyomo	22
4.3	Erweiterung des Service für die Gebotsabgabe	23
5	Ergebnisse	27
5.1	Einfluss auf den Zielfunktionswert	27

5.2	Preis als Steuerungselement	30
5.3	Verringerung der Spitzenlast in Engpassphasen	30
5.4	Variation der Gebote	32
5.5	Einhalten der gesetzten Quoten	35
6	Fazit	37
6.1	Netzstabilität	37
6.2	Senkung der Kosten eines Haushaltes	38
6.3	Variable Tarife auf dem Sekundärmarkt	38
6.4	Einschränkungen des Ansatzes	39
6.5	Zukunftsausblick	40
7	Schlussbetrachtung	43

0.1 Motivation

Durch den Klimawandel und die daraus folgende notwendige Transformation der Energielandschaft ergeben sich neue Anforderungen an das Verteilnetz. Die Art der Energieerzeugung verändert sich, von großen Kraftwerken, wie z. B. Kohlekraftwerke oder Atommeiler hin zu kleinen dezentralen Produktionsanlagen, wie z. B. Fotovoltaikanlagen auf Wohnhäusern. Dies führt zu einer Verlagerung der Stromerzeugung in das Verteilnetz und ein daraus entstehender erhöhter Lastfluss. Das Verteilnetz ist dafür momentan nicht ausgelegt und muss ausgebaut werden, um diesen Lastfluss zu bewältigen und damit die Netzstabilität gewährleisten zu können. Lange Genehmigungsverfahren ziehen den Ausbau des Netzes in die Länge. Allerdings kann die Belastung in Engpasshasen auch durch eine intelligente Steuerung der Last reduziert werden.

Die nötigen Anpassungen werden auch noch einmal im folgenden Zitat thematisiert. „So stellt die wachsende Zahl der dezentralen Erzeugungskapazitäten die Übertragungsnetze und insbesondere die Verteilnetze vor immer größere Herausforderungen. Durch den Zubau von u. a. Fotovoltaik- und Windkraftanlagen auf der Erzeugerseite wird Strom auf allen Netzebenen produziert und in das Netz eingespeist. Dadurch häufen sich die Lastschwankungen oder es entstehen Prozesse der Lastflussumkehr durch z. B. Rückspeisung der über der örtlichen Stromnachfrage eingespeisten Leistung aus erneuerbaren Energien. [De12] Die Verteilnetzbetreiber (VNB) agieren zunehmend als Systemdienstleister, um die durch volatile Erzeugung hervorgerufenen Spannungsschwankungen auszugleichen. Insgesamt entsteht ein Adaptionsbedarf der Verteilnetze an die veränderte Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur.“[11, Seite 14]

Die Veränderungen beschränken sich nicht nur auf die Energieerzeugung, sondern auch auf den Stromverbrauch. Weitere Sektoren wie zum Beispiel der Wärme- und Verkehrssektor werden zunehmend elektrifiziert. Somit wird der Bedarf an elektrischer Leistung weiter steigen. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien, z. B. Solaranlagen, verändern sich die klassischen Konsumenten. Haushalte produzieren nun über Solaranlagen erneuerbare Energie, die sie selbst nutzen oder ins Netz einspeisen können. Diese werden auch Prosumer (1) genannt, eine Mischung aus Konsumenten und Produzenten von Strom. Durch diese Veränderungen werden Kunden von passiven zu aktiven Teilnehmern, die für die Steuerung ihres Stromverbrauchs und die Optimierung ihrer Stromkosten auf neue digitale Technologien wie ein Gebäudeenergiemanagementsystem (GEMS) zurückgreifen. Der Einsatz dieser Technologie und die Vernetzung aller Beteiligten eröffnet Chancen und Möglichkeiten, um die steigende Komplexität durch die Dezentralisierung der Energieerzeugung zu bewältigen.

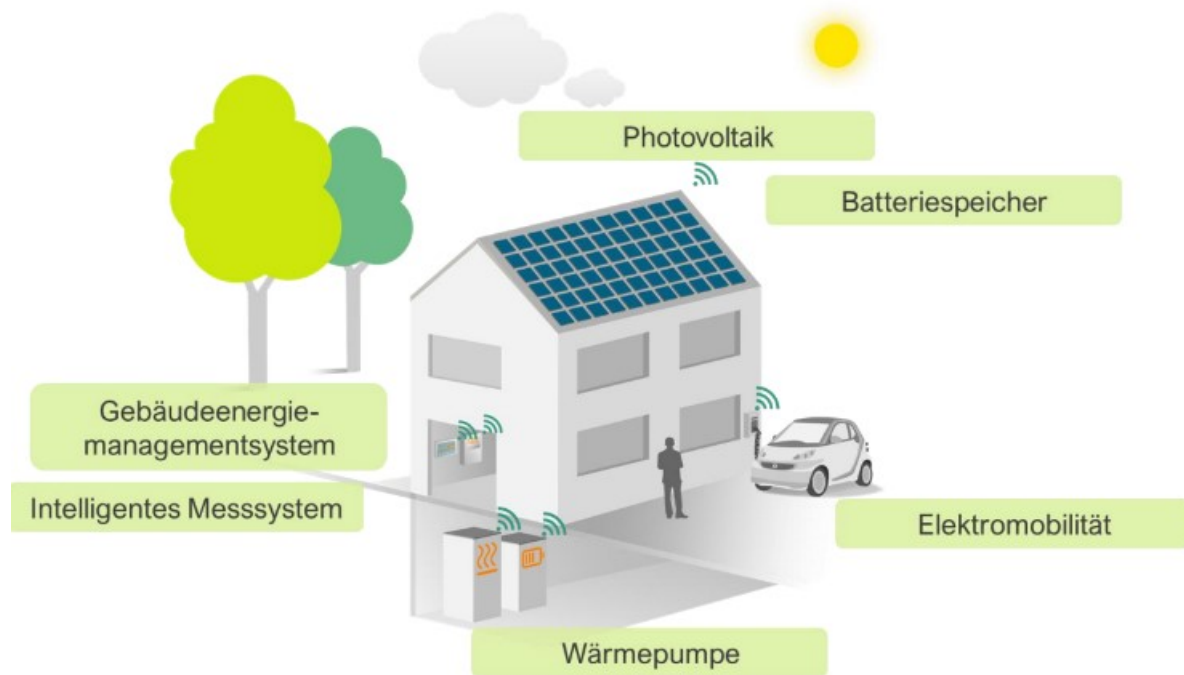


Abbildung 1: Prosumer, Quelle: Konzeptpapier flexQgrid

Die Herausforderung der Energiewende besteht darin, eine sichere und wirtschaftliche Stromversorgung zu ermöglichen, die gleichzeitig erneuerbare Energien optimal nutzt und so den erhöhten Energieverbrauch durch die Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors deckt. Um diese zu bewältigen, müssen wir unser Netz modernisieren und intelligente Steuerungssysteme im Netz implementieren, die Lastspitzen frühzeitig erkennen und diese verhindern.

0.2 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Konzept des Energiemanagements in Zeiten von Engpässen erarbeitet. Dieses Konzept baut auf der Zuweisung von Energiequoten an Haushalte, während Engpassphasen, auf. Die zugewiesenen Quoten beinhalten Limits für die Bezugs- oder Einspeiseleistung und sollen sicherstellen, dass das Netz in kritischen Situation stabil bleibt. Darüber hinaus wird ein Sekundärmarkt geschaffen, auf dem Haushalte ihre Energiequoten, durch Handel, anpassen können. Haushalte, die weniger Energie benötigen als in der Quote enthalten, haben die Möglichkeit, überschüssige Energie auf diesem Markt zu verkaufen. Haushalte mit höherem Bedarf können zusätzliche, über die Quote hinausgehende Bezugsrechte erwerben.

Ziel der Arbeit ist es, die Zielfunktion aus dem Projekt flexQgrid um einen quotenbasierten Sekundärmarkt auf Verteilnetzebene zu erweitern, mit der Intension, die Stabilität des Verteilnetzes stärken, um prognostizierte Netzengpässe abwenden zu können. Für die

Charakterisierung des Netzzustandes wird im Projekt flexQgrid auf dem Netzaampelkonzept des BDEW's [3] aufgebaut. Die Ampelphasen und ihre Auswirkungen auf den Markt werden in Abbildung (2) nochmals genauer beschrieben. Sobald ein Engpass prognostiziert wird, erhält jeder Haushalt eine Quote für den Bezug oder die Einspeisung von Energie, diese können auf dem quotenbasierten Sekundärmarkt untereinander gehandelt werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Abgabe von Geboten der Haushalte auf dem Sekundärmarkt. Jeder Marktteilnehmer soll vier voneinander verschiedene Gebote auf dem Markt platzieren, um die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenführens zwischen Angebot und Nachfrage zu erhöhen. Dabei wird die vorhandene Optimierungsfunktion um Entscheidungsvariablen und Parameter erweitert, die den Haushalten diesen Handel ermöglichen. Die Optimierungsfunktion ermittelt einen optimalen Fahrplan für die Anlagen eines Haushaltes und daraus die optimale Quotenanpassung, die auf dem Sekundärmarkt angeboten oder nachgefragt wird. Durch das Einführen neuer Nebenbedingungen wird die ermittelte Menge der Quotenanpassung ausgeschlossen und ein neuer optimaler Fahrplan für die Anlagen ermittelt, dieser Mechanismus wird iterativ wiederholt, um vier voneinander verschiedene Gebote zu generieren.

1 Grundlagen

Um ein Konzept für einen quotenbasierten Sekundärmarkt zur Steigerung der Netzstabilität während Engpassphasen zu entwickeln, ist es entscheidend, zunächst einige grundlegende Konzepte und Zusammenhänge zu erläutern. Diese Grundlagen legen den notwendigen Rahmen fest und ermöglichen es, die Thematik in ihren verschiedenen Facetten zu erörtern.

1.1 Netzaampel

Das Smart Grid Ampelkonzept des BDEW's [3] ist ein Ansatz, zur Charakterisierung des Netzzustands. Dieser Ansatz gibt für einen bestimmten Zeitraum und ein bestimmtes Netzsegment, die Auslastung des Netzes, anhand von Ampelfarben, an. Dabei werden die Farben „grün“, „gelb“ und „rot“ verwendet, um den aktuellen Zustand des Netzes zu charakterisieren. In jeder Ampelphase gelten für alle Marktteilnehmer, wie Lieferanten, Aggregatoren, Erzeuger, Speicherbetreiber und Netzbetreiber, unterschiedliche Regeln. Das vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) vorgestellte Ampelkonzept beschreibt die verschiedenen Stufen der Interaktion dieser unterschiedlichen Marktteilnehmer, in den einzelnen Netzzuständen.

Netzaampel	Netzzustand	Auswirkung
	Normaler Netzzustand	<ul style="list-style-type: none"> • Uneingeschränkter Flexibilitätshandel aller Marktteilnehmer. • VNB greift nicht in Marktgeschehen ein.
	Kritischer Netzzustand	<ul style="list-style-type: none"> • Haushalte bekommen Quote zugeteilt. • Flexibilitätshandel findet statt, Quoten können gesenkt oder zu erhöht werden.
	Gefährlicher Netzzustand	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Handel auf dem Sekundärmarkt möglich. • VNB kann aktiv den Bezug einzelner Anlagen sowie Marktteilnehmern beschränken.

Abbildung 2: Netzaampelkonzept des BDEW's; Quelle: in Anlehnung an [3]

Grüne Ampelphase: In der grünen Phase gibt es keinen prognostizierten kritischen Netzzustand im Betrachtungszeitraum. Infolgedessen kann jeder Marktteilnehmer die vom GEMS berechnete Menge an Energie beziehen sowie einspeisen. Der Netzbetreiber greift nicht in den Markt, durch das Setzen von Quoten, ein. Alle Anlagen können entsprechend ihrer Planung agieren. Konsumenten, Erzeuger und Speicherbetreiber können ihre Handlungen unabhängig vom Netzbetreiber ausführen und ihre Strategien an den aktuellen Marktbedingungen ausrichten.

Gelbe Ampelphase: In der gelben Ampelphase des Smart Grids Ampelkonzepts wird ein Netzengpass im definierten Netzsegment prognostiziert. Der Netzbetreiber gibt Rahmenbedingungen vor, um den Engpass zu bewältigen. Im Projekt erfolgt dies durch die Festlegung einer Quote, die angibt, wie viel Strom am Netzanschlusspunkt eingespeist oder bezogen werden darf. Die Gebäudeenergiemanagementsysteme (GEMS) der Haushalte und Aggregatoren müssen daraufhin ihre Planung an die Quote anpassen. Durch die Erweiterung der Zielfunktion in dieser wissenschaftlichen Arbeit bekommen Marktteilnehmer in der gelben Ampelphase die Möglichkeit, ihre Quote auf einem Sekundärhandel durch Handel zu senken oder zu erhöhen. Dabei wird keine elektrische Leistung gehandelt, sondern nur Leistung im Sinne der Erhöhung oder Senkung der Quote. Die gelbe Ampelphase symbolisiert eine Phase der Kollaboration zwischen Verbrauchern, Erzeugern, Speicherbetreibern und Netzbetreibern auf dem Sekundärmarkt zur Bewältigung des Netzengpasses.

Rote Ampelphase: Die rote Ampelphase wird eingeleitet, wenn trotz der getätigten Maßnahmen in der gelben Ampelphase ein Netzengpass auftritt. In diesem Fall ergreift der Netzbetreiber unmittelbar steuernde oder regulierende Maßnahmen, um den Engpass zu beheben. Der Netzbetreiber greift dabei auf eigene Betriebsmittel, Betriebsmittel von nachgelagerten Netzbetreibern und den Markt zurück. Im Rahmen des flexQgrid Lösungsansatzes geschieht dies, durch im Netz installierte Systeme wie Ortsnetzstationen oder Schaltwerke. Diese Systeme erkennen den Engpass anhand von Messdaten und einer kontinuierlichen Prognosenerstellung und lösen ihn durch Sollwertvorgaben an den Netzanschlusspunkten. In dieser Phase findet kein Handel am Sekundärmarkt statt.

1.2 Flexibilität

Flexibilität ist steuerbare und kurzfristig abrufbare Leistung aus Erzeugungs-, Verbrauchs- oder Speicheranlagen und kann auf unterschiedliche Weise genutzt werden[9]. Wenn ein Verteilungsnetzbetreiber (VNB) Flexibilität einsetzt, um lokale kritische Netzsituationen zu bewältigen, spricht man von netzdienlicher Flexibilität. Ein gezielter Einsatz dieser Flexibilität, ermöglicht es, den erforderlichen Ausbau des Netzes durch intelligente Systeme zu reduzieren. Eine weitere Form von Flexibilität wäre die systemdienliche Flexibilität, diese wird vom Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) genutzt, um die Stabilität des gesamten Energieversorgungssystems sicherzustellen. Im Projekt flexQgrid liegt der Schwerpunkt auf der Nutzung der netzdienlichen Flexibilität, die während der gelben Ampelphase unter den Vorgaben des Netzbetreibers gehandelt werden kann.

1.3 Smart Market

„Zweifelsohne wird das Geschehen im Energiesektor immer deutlicher von der zunehmenden Volatilität des Elektrizitätsangebots und der damit gleichzeitig eng verknüpften Anforderung an eine gesteigerte Flexibilität aller Marktteilnehmer dominiert. Angesichts dieser Rahmenbedingungen eröffnet vor allem die Schaffung regionaler Märkte einen praktikablen Weg zum effizienten Ausgleich von regional erzeugter Energie und regionalem Verbrauch. Der erforderliche Abgleich zwischen den jeweiligen Ein- und Ausspeisemengen könnte im Smart Market unter anderem mittels lokaler bzw. virtueller Bilanzkreise, die dann den lokalen Marktplatz bilden, erfolgen.“ [1, Seite 26]

Ein Smart Market besteht aus drei Gestaltungselementen:

Akteure : Zu den Akteuren gehören alle am Markt teilnehmenden Personen, Organisationen und Institutionen.

Komponenten : Repräsentieren die grundlegenden Bausteine eines Smart Markets. Aus diesen entstehen durch Ausgestaltung die „Instrumente“ eines Smart Markets, bis hin zu den Geschäftsmodellen.

Instrumente : Die funktionale Kombination aus Akteuren und Komponenten ergibt die noch nicht marktspezifischen Instrumente.

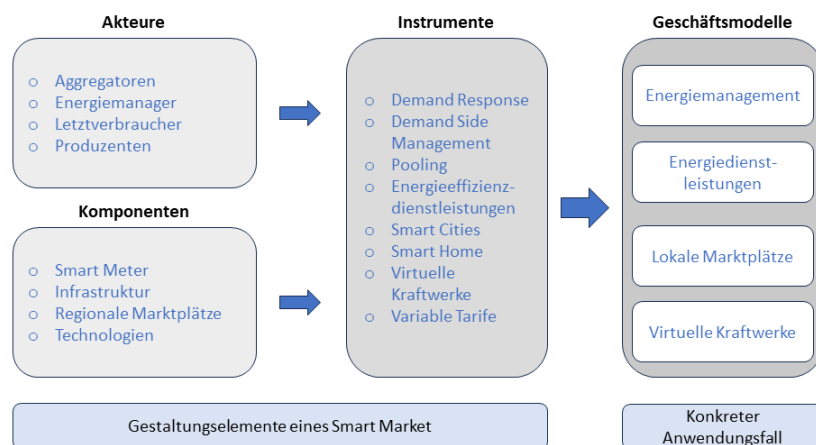


Abbildung 3: Gestaltungselemente eines Smart Markets, Quelle: in Anlehnung an [1]

Das Geschäftsmodell eines Smart Market, ergibt sich aus der Kombination der drei zuvor genannten Gestaltungselemente. „Im Gegensatz zu den Instrumenten handelt es sich bei den Geschäftsmodellen um deren markttaugliche, konkrete Umsetzung. Das bedeutet die Integration aller, für den wettbewerblichen Erfolg relevanten, Einzelaspekte derart, dass die so entwickelten Geschäftsmodelle erfolgreiche Lösungen für das Management von Energiemengen sowie der Steigerung der Energieeffizienz ermöglichen“.[2, Seite 20]

1.3.1 Gestaltungsinstrumente eines Smart Market

Im folgenden Abschnitt werden die Gestaltungsinstrumente eines Smart Marktes definiert.

Demand Response

Demand Response (DR) bezieht sich auf die zeitliche Verschiebung der bedingten Leistung, basierend auf den tatsächlich verfügbaren Energiemenge im Verteilnetz. Hierbei liegt der Fokus ausschließlich auf der Beeinflussung des Verhaltens und der entsprechenden Reaktion von Marktteilnehmern auf Preissignale, nicht jedoch auf der aktiven Steuerung von Anlagen. [13] Verbraucher reagieren auf spezifische Preissignale und passen ihr Verbrauchsverhalten entsprechend an.

Demand Side Management

Demand Side Management (DSM) beschreibt eine technische Lösung zur direkten Steuerung der entnommenen elektrischen Leistung zu einem gewissen Zeitpunkt. Bei dem DSM Ansatz kann der Netzbetreiber, im Falle eines prognostizierten Netzengpass, die Steuerung aller Arten von Verbrauchsanlagen übernehmen. Im Hinblick auf das Ziel eines optimierten Verbrauchs- und Einspeiseverhaltens kann DSM sogar so weit gehen, dass einzelne Verbraucher gedrosselt oder bestimmte Anlagen vollständig abgeschaltet werden. Somit liegt der Unterschied zwischen den beiden Ansätzen in der Art, wie der Netzbetreiber in den Markt und in die Anlagen der Marktteilnehmer eingreifen darf. Beim Demand Response Ansatz beeinflusst der Netzbetreiber das Konsumentenverhalten über den Preis. Konsumenten reagieren selbständig, indem sie ihren Verbrauch zeitlich verschieben. Bei dem Demand Side Management Ansatz kommt es in Netzengpasssituationen zur direkten Steuerung der Anlagen der Marktteilnehmer vom Netzbetreiber.

Pooling

Beim Pooling werden kleinere Lasten, die durch einzelne Verbrauchs- bzw. Erzeugungskapazitäten entstehen, von Aggregatoren zusammengefasst. Das Ziel des Poolings ist eine optimierte Steuerung des Lastflusses sowie eine verbesserte Vermarktung, durch die höhere Menge an angebotener bzw. nachgefragter Last.

Energiedienstleistungen

Ein möglicher Bestandteil eines Smart Markets sind Dienstleistungen, die auf die Erhöhung der Energieeffizienz abzielen. Diese Dienstleistungen umfassen Technologien, Produkte sowie Services, die zur Reduzierung des Energieverbrauchs oder zur Steigerung der Energieeffizienz dienen.

Smart Cities

Im Kontext von Smart Markets zielt der Begriff Smart Cities auf den effizienten Umgang, einer kompletten Stadt, mit Energie ab. Dies wird durch die Gestaltung von transparenten Prozessen, intelligenten Steuerungen sowie integrierten Informationsflüssen in der gesamten städtischen Infrastruktur ermöglicht.

Smart Home

Durch Technologie, die bis jetzt nur in Industrie- und Gewerbeumfeld eingesetzt wurde, können auch einzelne Haushalte an einem Smart Market teilnehmen. In den Haushalten wird ein Energiemanagementsystem (GEMS), dieses kann automatisiert die Geräte im Haushalt steuern und somit die Energienutzung an Preissignale oder Limits vom Netzbetreiber anpassen. Die Grundlage dafür bildet einen integrierten Informationsfluss aller Geräte im Haushalt.[4]

Virtuelle Kraftwerke

Im Kontext von Smart Markets bezieht sich ein virtuelles Kraftwerk auf einen Zusammenschluss kleiner dezentraler Energieerzeugungsanlagen und -speicher, die als ein Verbund agieren. Dadurch können Schwankungen in der Energieproduktion, die besonders durch erneuerbare Energien entstehen, geglättet werden. Die Anlagen werden nach Möglichkeit so miteinander vernetzt, dass ein gleichbleibender Output erreicht wird. Dies bringt eine bessere Planbarkeit und verhindert, dass Probleme im Verteilnetz überhaupt vorkommen.

Variable Tarife

Variable Tarife gehören zu den grundlegendsten Instrumenten eines Smart Market. Durch Preissignale kann eine Anpassung des Nachfrageverhaltens erreicht werden. Somit kann der Markt an die tatsächlich vorhandene Menge an Energie angepasst werden. Falls wenig Energie vorhanden ist oder die Nachfrage sehr hoch, steigt der Preis. Der Preis sinkt wieder, sobald sich das Angebot im Vergleich zur Nachfrage erhöht.

1.3.2 Geschäftsmodelle von Smart Markets

Aus der Kombination der drei Gestaltungselemente: Komponenten, Akteure und Instrumente determiniert das Geschäftsmodell eines Smart Markets. Im Weiteren werden drei

bestehende Geschäftsmodelle eines Smart Markets beschrieben.

Energiemanagement-Services

Dezentrales Energiemanagement spielt eine entscheidende Rolle bei der nachhaltigen Verbesserung der Energieeffizienz und der praktischen Steuerung regelbarer Verbrauchseinheiten. Es lassen sich zwei wesentliche Handlungsfelder im Zusammenhang mit Energiemanagement differenzieren. Zum einen bezieht sich modernes Energiemanagement primär auf die Implementierung geeigneter Strukturen sowie Software zur Effizienzsteigerung, wie beispielsweise Gebäudeenergiemanagementsysteme. Zum anderen können Energiemanagement-Services intelligente Mess- und Regeltechnik benutzen, um den Energieverbrauch einzelner Verbraucher zu analysieren, zu optimieren und diese dann aktiv zu steuern. Neben der Laststeuerung bieten diese Services auch zusätzliche Leistungen an, darunter die strukturierte Energiebeschaffung und die optimale Vermarktung überschüssiger Erzeugungskapazitäten gegenüber virtuellen Kraftwerken oder anderen Abnehmern.[12]

Virtuelle Kraftwerke

Mit zunehmendem Anteil kleinteiliger und dezentraler Erzeugungsstrukturen im Energiemix erhöht sich die Komplexität und Volatilität in den Stromnetzen. Diese Entwicklung bringt Herausforderungen mit sich, da die isolierte Steuerung dieser kleinen Anlagen technisch aufwendig ist und insbesondere nicht geeignet, um die inhärenten Erzeugungsschwankungen der regenerativen Energieträger effektiv zu bewältigen. Um diese Problematik zu lösen, werden virtueller Erzeugungszusammenschlüsse gegründet, bekannt als virtuelle Kraftwerke oder „virtual power plants“. In diesem Kontext bezieht sich der Begriff „virtuell“ darauf, unterschiedliche Erzeugungstechnologien intelligent miteinander zu vernetzen, um die natürlichen Schwankungen der Stromproduktion bei regenerativen Energieträgern kontinuierlich auszugleichen und volatilitätsbedingte Engpässe sowie Spannungsprobleme in den Netzen von vornherein zu vermeiden.[5]

Lokale Marktplätze

Das Geschäftsmodell lokaler Marktplätze im Kontext von Smart Markets basiert auf der Schaffung eines Marktes, auf der lokale Energieerzeuger und -verbraucher miteinander handeln können. Dabei wird die Größe des Marktplatzes bewusst klein gehalten, was eine leichtere Steuerung mit sich bringt. Smart-Metering-Technologien ermöglichen das Erfassen von Verbrauch und Energieerzeugung in Echtzeit, dies ermöglicht ein Handel in Echtzeit. [8]

2 Projekt flexQgrid

Im folgenden Abschnitt wird das Projekt flexQgrid beschrieben. Das Projekt befasst sich mit der intelligenten Steuerung des Verteilnetzes der Zukunft, um die wachsenden Menge an Strom in dieser Netzebene bewältigen zu können. Dafür wurde eine Feldstudie in der Gemeinde Freiamt durchgeführt. Teilnehmende Haushalte sind mit einem GEMS ausgestattet. Beteiligt waren Parteien aus der Forschung, Industrie sowie der Netzbetreiber Netze BW.

2.1 Engpassermittlung

Ein Gebäudeenergiemanagementsystem (GEMS) erstellt eine Prognose für den zukünftigen Energieverbrauch und der Energieerzeugung eines Haushaltes. Um diese Vorhersagen zu erstellen, analysiert das GEMS verschiedene Informationen wie z. B. den Speicherstand der Batterie, ob ein Elektrofahrzeug an der Wallbox angeschlossen ist oder nicht sowie Wetterdaten. Das GEMS beachtet Wetterdaten, um daraus die Menge an selbst produziertem Strom durch eine Fotovoltaikanlage zu prognostizieren. Darüber hinaus erstellt das GEMS detaillierte Prognosen für den Energieverbrauch sowie die Energieerzeugung eines Haushalts für die nächsten vierundzwanzig Stunden in fünf-Minuten-Intervallen und generiert einen sogenannten Fahrplan für seine im Haus installierten Anlagen. Dieser Fahrplan wird anschließend an den Netzbetreiber übermittelt, dieser aggregiert die Fahrpläne aller am Netz angeschlossenen Teilnehmer und erstellt somit eine Prognose für die Netzauslastung. Diese wird benötigt, um Netzenspässe zu erkennen und somit eine genaue Netzsteuerung zu ermöglichen. Neben Haushalten erstellen auch Aggregatoren, die mehrere Energieerzeugungsanlagen betreiben, Fahrpläne für ihre Anlagen. Aggregatoren kombinieren verschiedene erneuerbare Energiequellen und tragen durch die Übermittlung ihrer Fahrpläne ebenfalls zur Netzstabilität bei. Der Netzbetreiber nutzt nicht nur die Fahrpläne von GEMS, sondern integriert auch weitere Prognosen, die entweder von ihm selbst oder von Drittanbietern erstellt wurden. Diese zusätzlichen Prognosen umfassen Informationen zum Gesamtenergiebedarf, erwarteten Lastspitzen, erneuerbaren Energieeinspeisungen und anderen relevanten Faktoren. Durch die Kombination dieser Prognosen mit den Fahrplänen der GEMS ist der Netzbetreiber in der Lage, Netzenspässe präzise zu prognostizieren. Die Aktualisierung der Prognosen und Netzberechnungen vom Netzbetreiber erfolgt in regelmäßigen Abständen von sechs Stunden, um sicherzustellen, dass aktuelle Daten und Entwicklungen berücksichtigt werden.

2.2 Quotenmodell

Falls der Verteilnetzbetreiber anhand der erhaltenen Informationen feststellt, dass ein Netzengpass in einer bestimmten Zeitperiode bevorsteht, werden den Haushalten entsprechende Quoten zugewiesen und die Netzampel des BDEW's wechselt von grün auf gelb. Eine Quote besteht aus zwei Komponenten, einem vom Netzbetreiber gesetzten Limit, zu einer gewissen Zeitperiode. Das Limit kann entweder ein Konsumlimit oder ein Einspeiselimit enthalten. Ein Konsumlimit beschränkt die maximale bezogene Leistung, ein Einspeiselimit die maximal zulässige Einspeiseleistung, in einer gewissen Periode. Diese Quoten legen fest, wie viel Energie jeder Haushalt in einem spezifischen fünf-Minuten-Intervall am Netzanschlusspunkt beziehen oder einspeisen darf. Jeder Marktteilnehmer muss sich an seine Quote halten, dadurch wird der Lastfluss im Netz geringer und das Netz bleibt stabil. Die Quote dient als Limit sowohl für die Aggregatoren als auch die GEMS der Haushalte, um ihre Fahrpläne entsprechend anzupassen. Dabei haben die GEMS die Flexibilität, verschiedene Maßnahmen zu ergreifen, um die Quote einzuhalten. Beispielsweise können sie die Ladezeit von Elektrofahrzeugen verschieben oder in diesem Zeitraum Energie aus den Energiespeichern beziehen. Die konkrete Umsetzung liegt im Ermessen der GEMS und ihrer individuellen Konfiguration und somit bei den Hausbesitzern. Insgesamt bietet die Implementierung einer Quote den GEMS und Aggregatoren eine klare Richtlinie für den Energiebezug und die Einspeisung, während gleichzeitig Flexibilität bei der Anpassung der Fahrpläne gegeben ist. Dadurch kann ein effizientes und ausgewogenes Energiemanagement erreicht werden, das die Netzstabilität stärkt.

2.3 Sekundärmarkt

Im Rahmen der Erweiterung des flexQgrid Projektes, wird ein quotenbasierter Sekundärmarkt konzeptioniert, der den Marktteilnehmern ermöglichen soll, ihre Energiebezugs- und Einspeiselimits aus ihrer Quote, bei einem prognostizierten Engpass, anzupassen. Falls der Energiebedarf eines Haushalts über das festgelegte Bezugslimit hinausgeht oder das Einspeiselimit in der Quote nicht vollständig genutzt wird, können die Haushalte ihre Limits entsprechend, durch Handel mit anderen Marktteilnehmern, erhöhen oder senken. Diese Anpassungen sind jedoch abhängig von der Bereitschaft anderer Haushalte, ihre Bezüge entsprechend zu reduzieren oder weniger einzuspeisen, um das Gleichgewicht im Netz aufrechtzuerhalten. Der quotenbasierte Sekundärmarkt schafft Anreize für die Haushalte, Energieeinsparungen zu realisieren, indem sie ihre Flexibilität gezielt einsetzen. Durch die Bereitstellung von zusätzlicher Energie bei Netzengpässen oder durch das Zurückhalten von Einspeisungen zu Spitzenzeiten können die Haushalte zur Netzstabilität beitragen. Auf diesem Sekundärmarkt wird keine tatsächliche Leistung gehandelt, sondern nur Bezugs- bzw. Einspeiserechte im Sinne einer Erhöhung oder Senkung der Quote.

Der Markt soll mithilfe einer Blockchain-Technologie umgesetzt werden, sodass alle Transaktionen sicher und transparent durchgeführt werden können. Aus zeitlichen Gründen konnte dieser im Projekt flexQgrid nicht wie geplant simuliert werden und bietet somit ein großes Potenzial für weitere wissenschaftliche Arbeiten. Neben der technischen Umsetzung können rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen untersucht werden. Außerdem können Anreize identifiziert werden, die die Attraktivität einer Teilnahme am Sekundärmarkt erhöhen.

2.4 Zeitlicher Ablauf des Handels

Nachdem die Prognosen (24 Stunden in fünf-minütigen Intervallen) an den Netzbetreiber übermittelt wurden, startet der Netzbetreiber die Netzberechnung. Dabei wird das Netz auf mögliche Engpässe überprüft und falls ein Engpass prognostiziert wird, die Quoten für die jeweiligen Zeitperioden, für die nächsten sechs Stunden berechnet. Diese Quoten werden an GEMS und Aggregatoren zurückgemeldet. Auf dem Sekundärmarkt ist es höchstens möglich, Quoten für die nächsten sechs Stunden zu handeln. Die Informationen, die über diese sechs Stunden hinausgehen, sammelt der Netzbetreiber und nutzt sie als Vorabinformation, um Prognosen für die Auslastung zu erstellen.



Abbildung 4: zeitlicher Verlauf des Handels, Quelle: Konzeptpapier flexQgrid

Ein Markt mit einer höheren Anzahl von Zeitperioden und somit auch kürzeren Intervallen, beispielsweise auf Sekundenbasis, wäre nur sinnvoll, wenn sichergestellt werden kann, dass alle Teilnehmer ihre Fahrpläne zuverlässig liefern können. Dies ist im Projekt noch nicht machbar. Derzeit wird davon ausgegangen, dass jeder potenzielle Marktteilnehmer zuverlässig Werte in fünfzehn-minütiger Granularität liefern kann. Die Quote wird ebenfalls auf fünf-minütiger Basis berechnet und als Eingabe für den Markt verwendet.

2.5 Abgabe von Geboten auf dem Sekundärmarkt

Jedes GEMS gibt eine Kombination aus einem Preis und Menge für die Erhöhung bzw. Senkung der Quote ab, nach dem Bid und Ask Prinzip, ab. Dabei haben die Marktteilnehmer keine Informationen über bereits platzierte Gebote von anderen Marktteilnehmern. Um gewährleisten zu können, dass jedes Tupel aus Menge und Preis auf dem Sekundärmarkt mit einer passenden Nachfrage zusammengeführt wird, gibt jedes GEMS vier verschiedene Tupel aus Preis und Menge ab. Da sich der Preis allerdings erst über das Zusammenführen von Angebot und Nachfrage in einer Periode ergibt und darüber hinaus bis jetzt kein Markt dieser Art besteht, somit auch keine historischen Daten existieren, nehmen wir einen konstanten Referenzpreis von 0.002 Euro pro Watt an und variieren nur die angebotene beziehungsweise nachgefragte Leistung. Es kann entweder Leistung am Sekundärmarkt bezogen oder verkauft werden, beides in einer Periode ist nicht möglich.

2.6 Flexibilitätshandel

Flexibilitätshandel in der grünen Phase: In der grünen Phase, in der keine Quoten vorliegen und Haushalte unbegrenzt Leistung beziehen oder einspeisen können, spielt der Handel mit Flexibilität über den Sekundärmarkt keine Rolle. Während dieser Ampelphase können die Marktteilnehmer ihre Leistung frei nutzen, ohne Einschränkungen durch vorgegebene Quoten. Somit ist der Sekundärmarkt auf dem die Quote erhöht oder gesenkt werden kann, in dieser Phase, inaktiv.

Flexibilitätshandel in der gelben Phase: Sobald der Netzbetreiber einen Engpass in einem bestimmten Netzabschnitt prognostiziert, wechselt die Ampel auf Gelb und die Marktteilnehmer werden aufgefordert, die vom Netzbetreiber übermittelte Quote einzuhalten. In dieser gelben Phase, auch als Interaktionsphase bezeichnet, gewinnt der Flexibilitätshandel seine größte Bedeutung. Die Haushalte haben nun die Möglichkeit, untereinander zu handeln und ihre Flexibilität auszutauschen, um ihre Limits aus der vorgegebenen Quote zu erhöhen oder zu senken. Die maximale Flexibilität, die ein Haushalt auf dem Markt anbieten kann, entspricht der Differenz des Limits und der benötigten bedingten Leistung. Unter unbedingter Leistung ist die Leistung zu verstehen, bei der der Verbrauch zeitlich nicht verschoben werden kann, wie z. B. bei Kühlschränken oder Wärmepumpen.

Flexibilitätshandel in der roten Phase: In der roten Phase tritt ein Engpass im Netz auf, wodurch der Netzbetreiber aktiv eingreifen muss, um die Stabilität des Netzes mit anderen Betriebsmitteln wie z. B. Gaskraftwerken sicherzustellen. Während dieser Phase ist kein Handel von Quoten auf dem Sekundärmarkt erlaubt. Der Schwerpunkt liegt vielmehr auf den Maßnahmen des Netzbetreibers, um den Engpass zu bewältigen

und die Netzstabilität zu gewährleisten. In dieser kritischen Phase steht die Sicherung der Netzstabilität im Vordergrund.

3 Erweitern der mathematischen Optimierung

Die Zielfunktion aus dem Projekt flexQgrid (3.1) bildet die Basis für die Optimierung des Fahrplans eines Haushaltes und ermöglicht die systematische Suche nach dem kostengünstigsten Einsatz aller installierten elektrischen Anlagen eines Haushaltes. Der Horizont der Optimierung sind die nächsten vierundzwanzig Stunden, die jeweils in 288 fünf Minutenblöcke eingeteilt sind. Das Ziel der Optimierung ist es, den kostengünstigsten Fahrplan für die nächsten vierundzwanzig Stunden zu entwickeln.

Ziel dieser Arbeit ist es, die bestehende Zielfunktion (3.1) um einen quotenbasierten Sekundärmarkt zu erweitern und somit den Haushalten die Möglichkeit zu geben, auf einem regionalen Marktplatz für Quoten aktiv zu werden, sobald ein Netzengpass prognostiziert wird. Der Fokus liegt dabei, auf der Erweiterung der Zielfunktion. Diese soll die Gebotsmenge auf dem quotenbasierten Flexibilitätsmarkt ermitteln können. Auf diesem Markt wird allerdings keine tatsächliche Energie gehandelt, sondern die Limits aus der Quote können durch Handel mit anderen Marktteilnehmern, erhöht oder gesenkt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wird die bestehende Zielfunktion um neue Elemente erweitert, darunter Entscheidungsvariablen, Parameter und Nebenbedingungen. Durch diese Erweiterungen ist es den GEMS möglich, auf Grundlage der Quote und des tatsächlichen Energieverbrauchs, die potenzielle Anpassung der Quote zu ermitteln, sei es eine Reduzierung oder Erhöhung. Die Summe aller Quoten entspricht der maximalen Belastung, die das Netz verkraften kann, wodurch die Netzstabilität sichergestellt wird. Haushalte haben die Möglichkeit, durch intelligentes Management ihres Energieverbrauchs auf einem quotenbasierten Sekundärmarkt Kosten einzusparen. Darüber hinaus wird ein Mechanismus implementiert, der sicherstellen soll, dass genügend voneinander unterschiedliche Gebote auf dem Markt abgegeben werden. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Zusammenführens zwischen Angebot eines Haushaltes und Nachfrage eines anderen. Dieser Mechanismus sorgt für eine Stabilisierung des Marktes und trägt somit zur Netzstabilität in Engpasssituationen bei.

3.1 Definition der Modellparameter

C_t = Consumption in Periode t . [W]

F_t = Feedin in Periode t . [W]

$c_{\text{grid},\text{consum}_t}$ = Bezugstarif pro Kilowattstunde aus dem Netz in Periode t . [$\frac{EUR}{kwh}$]

$c_{\text{grid},\text{feedin}_t}$ = Einspeisetarif pro Kilowattstunde in das Netz in Periode t . [$\frac{EUR}{kwh}$]

$P_{\text{market},\text{feedin}_t}$ = Einspeiseleistung, die auf dem Sekundärmarkt gehandelt wird. [W]

$P_{\text{market},\text{consum}_t}$ = Bezugsleistung, die auf dem Sekundärmarkt gehandelt wird. [W]

$c_{\text{market},\text{consum}_t}$ = Preis für Bezugsleistung auf dem Sekundärmarkt. [$\frac{cent}{W}$]

$c, \text{market}, \text{feedin}_t$ = Preis für Einspeiseleistung auf dem Sekundärmarkt. $[\frac{\text{cent}}{\text{W}}]$

$\text{Limit}, \text{feedin}_t$ = Einspeiselimit, falls in Quote enthalten. [W]

$\text{Limit}, \text{consum}_t$ = Bezugslimit, falls in Quote enthalten. [W]

$\text{activelimit}, \text{consum}_t$ = Binärvariable, die modelliert, ob Konsumlimit aktiv ist. [0,1]

$\text{activelimit}, \text{feedin}_t$ = Binärvariable, die modelliert, ob feedin limit aktiv ist. [0,1]

$C, \text{unconditonal}_t$ = bedingte Leistung [W] (z.B Kühlschränke betreiben)

$C, \text{conditonal}_t$ = unbedingte Leistung [W] (z.B E-Auto laden)

3.2 Basiszielfunktion

$$\min \sum_{t=1}^{288} \left(\frac{C_t}{1000} * c, \text{grid}, \text{consum}_t - \frac{F_t}{1000} * c, \text{grid}, \text{feedin}_t \right) * \frac{\text{duration_timestep}}{3600} \quad (3.1)$$

Die Zielfunktion (3.1) aus dem Projekt flexQgrid ermittelt den kostengünstigsten Fahrplan für die elektrischen Anlagen eines Haushaltes auf vierundzwanzig Stunden Basis, indem die Summe der Kosten über die einzelnen fünfminütigen Intervalle berechnet wird. Die Kosten pro Periode setzen sich zusammen aus der bezogenen Leistung und dem aktuellen Strompreis, sowie der eingespeisten Leistung und ihrer Einspeisevergütung. Somit wird für jede fünfminütige Periode der kostengünstigste Fahrplan aller Anlagen eines Haushaltes, der technisch umsetzbar ist, ermittelt.

Dabei sind die bezogene Leistung C_t und die eingespeiste Leistung F_t Entscheidungsvariablen, die für jede Periode t , verschiedene Werte annehmen können. Die Kosten pro bezogener Kilowattstunde $c, \text{grid}, \text{consum}_t$ sind Modellparameter, die vom Netzbetreiber festgelegt werden, einzelne Haushalte haben keinen Einfluss darauf und müssen ihn als extern gegeben hinnehmen. Produzenten von Strom können diesen in das Verteilernetz einspeisen und erhalten dafür eine Vergütung pro eingespeister Kilowattstunde. Die sogenannte Einspeisevergütung $c, \text{grid}, \text{feedin}_t$. Solange kein Engpass vom Netzbetreiber prognostiziert wurde, bestehen keine Restriktionen über den Bezug bzw. das Einspeisen von Leistung in das Netz, jeder Marktteilnehmer kann zu den jeweiligen Kosten in Periode t Energie einspeisen oder beziehen. Diese Zielfunktion ist in der grünen Ampelphase, nach dem Konzept des BDEW's, aktiv.[3]

Der Zielfunktionswert der Optimierungsfunktion entspricht nicht exakt den Gesamtkosten eines Haushaltes. Bestimmte technische Restriktionen, die bereits im Projekt flexQgrid definiert wurden und auf die im Weiteren aus Komplexitätsgründen nicht eingegangen wird, werden per Strafterm in die Zielfunktion mit einbezogen. Dadurch entspricht der Wert der Zielfunktion nicht den exakten Kosten eines Haushaltes, nähert sich aber stark an.

3.3 Erweiterung der Zielfunktion

Sobald nun ein Netzengpass in einer Periode t prognostiziert wird, wechselt die Ampel des BDEW's auf Gelb. Dies bedeutet automatisch, dass den Haushalten eine Quote vom Netzbetreiber zugeteilt wird. Die Quote enthält ein Limit, entweder für die maximale Einspeiseleistung oder die maximale Bezugsleistung. Die festgelegte Quote regelt das Verhältnis zwischen dem Energiebedarf eines Haushalts und den erlaubten Energieeinsparungen, die auf dem Sekundärmarkt als Quotenerhöhung gehandelt werden können. Dabei gibt es eine Mindestlast, die ein Haushalt aufrechterhalten muss, um seinen grundlegenden Energiebedarf zu decken. Aus dem grundlegenden Energiebedarf eines Haushaltes, lässt sich dann die mögliche Quotenanpassung über Nebenbedingung (3.3) im Falle eines Bezugslimits, ermitteln. Um diese Erweiterung der Zielfunktion zu modellieren, wird die Zielfunktion um weitere Entscheidungsvariablen, Parameter und Nebenbedingungen erweitert.

$$\begin{aligned}
 &+ (c, \text{market}, \text{consum}_t * P, \text{market}, \text{consum}_t \\
 &+ c, \text{market}, \text{feedin}_t * P, \text{market}, \text{feedin}_t) * \frac{1}{100}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Dieser Term (3.2) erweitert die bestehende Zielfunktion (3.1) um die Entscheidungsvariablen $P, \text{market}, \text{consum}_t$ und $P, \text{market}, \text{feedin}_t$. Diese modellieren die Möglichkeit, das vorgegebene Limit aus der Quote, über den Handel mit anderen Marktteilnehmern zu erhöhen oder zu senken. Wenn ein Haushalt seine Bezugsleistung reduziert und die Differenz zwischen dem Limit und der Bezugsleistung auf dem Sekundärmarkt anbietet, führt dies zu einer negativen Ausprägung von $P, \text{market}, \text{consum}_t$ und damit zu einer Verringerung des Zielfunktionswerts. Reicht das Limit nicht aus, kann das Bezugslimit erhöht werden, dies wirkt sich allerdings negativ auf die Energiekosten aus und treibt den Zielfunktionswert in die Höhe.

Wenn eine Quote ein Einspeiselimit enthält, ist die maximal einzuspeisende Leistung pro Haushalt begrenzt. Falls ein Haushalt dieses Limit nicht vollständig ausnutzt, indem er z. B. überschüssige Energie speichert oder sie nicht benötigt, kann die Differenz auf dem Sekundärmarkt angeboten werden. Dies führt dazu, dass die Variable $P, \text{market}, \text{feedin}_t$ eine negative Ausprägung annimmt und damit die Gesamtkosten senkt.

Wenn die mögliche Einspeiseleistung eines Haushalts das in der Quote enthaltene Limit übersteigt, kann die Quote erhöht werden, um mehr Energie ins Netz einzuspeisen, zu können. Dies würde jedoch nur erfolgen, wenn die Einspeisevergütung $c, \text{grid}, \text{consum}_t$ höher ist als die Kosten für die Erhöhung des Limits auf dem Sekundärmarkt. $c, \text{market}, \text{consum}_t$ und $c, \text{market}, \text{feedin}_t$ sind dabei die Tarife, zu denen auf dem quotenbasierten Sekundärmarkt gehandelt wird. Da bis jetzt kein Markt dieser Art existiert und es dadurch keine

historischen Daten gibt, wird eine gleichbleibende Vergütung für jede Periode t in Höhe von 0.002 Euro pro Watt angenommen. Um sicherzustellen, dass jeder Haushalt auf dem quotenbasierten Flexibilitätsmarkt nur die Energiemengen anbietet, die er tatsächlich nicht benötigt, werden neue Nebenbedingungen in das Modell integriert. Diese Nebenbedingungen dienen dazu, den Spielraum des GEMS bei der Angebotsabgabe zu begrenzen und sicherzustellen, dass nur die überschüssigen Energiemengen angeboten werden.

Falls die Quote eines Haushaltes ein Bezugslimit enthält, stellt folgende Nebenbedingung (3.3) sicher, dass maximal die Differenz zwischen dem Limit und dem tatsächlichen Konsum auf dem Sekundärmarkt angeboten wird.

$$P, market, consum_t = (C_t - Limit, consum_t) * activelimit, consum_t \quad (3.3)$$

Die Nebenbedingung determiniert die Ausprägung der angebotenen Bezugsleistung $P, market, consum_t$. Die Binärvariable $activelimit, consum_t$ gibt an, ob in Periode t eine Engpassprognose vorliegt, wodurch die Haushalte eine Quote mit einem Bezugslimit erhalten würden.

$$activelimit, consum_t = \begin{cases} 1, & Limit, consumption_t \in [C, unconditional_t, \\ & (C, unconditional_t + C, conditional_t)] \\ 0, & Limit, consumption_t \\ & = (C, unconditional_t + C, conditional_t) \end{cases} \quad (3.4)$$

In dieser Nebenbedingung (3.4) wird zwischen bedingter und unbedingter Energie unterschieden. Unbedingte Energie ist Leistung, die für den Betrieb von Geräten benötigt wird, die kontinuierlich Strom benötigen und keine Möglichkeit zur zeitlichen Verschiebung ihres Energieverbrauchs haben. In diese Kategorie fallen z. B. Kühlschränke und Wärmepumpen. Auf der anderen Seite gibt es viele Verbraucher, die nicht kontinuierlich Strom benötigen und man die Nutzung zeitlich verschieben kann, wie z. B. Waschmaschinen oder das Laden eines E-Auto. Deren Betrieb ist zeitlich verschiebbar, diese Verbraucher benutzen somit bedingte Leistung. Wenn kein Netzengpass prognostiziert ist, das Netz sich also in der grünen Phase befindet, liegt den Haushalten aus Gründen der Modellierung, trotzdem ein Limit vor. Dieses entspricht der Summe aus unbedingter und bedingter Leistung. Liegt also keine Quote vor, entspricht der Wert $Limit, consum_t$ der Summe aus bedingter und unbedingter Leistung, durch die Nebenbedingung (3.4) wird die Binärvariable $activelimit, consum_t$ null. Dadurch wird die Entscheidungsvariable $P, market, consum_t$ entsprechend auch null. Liegt das Limit zwischen der unbedingten Leistung und der Summe von bedingter und unbedingter Leistung, wird die Binärvariable eins und ermöglicht

somit, dass $P, \text{market}, \text{consum}_t$ einen von null unterschiedlichen Wert annehmen kann.

Enthält die Quote ein Einspeiselimit, stellt die folgende Nebenbedingung (3.5) sicher, dass die Entscheidungsvariable $P, \text{market}, \text{feedin}_t$ höchstens der Differenz zwischen Einspeiselimit und der aktuellen Einspeiseleistung ins Netz, entspricht.

$$P, \text{market}, \text{feedin}_t = (F_t - \text{Limit}, \text{feedin}_t) * \text{activelimit}, \text{feedin}_t \quad (3.5)$$

Darüber hinaus gibt es in der Nebenbedingung (3.5) analog zu dem Bezugsfall eine Binärvariable $\text{activelimit}, \text{feedin}_t$, diese modelliert, in welcher Periode Einspeiseleistung auf dem Sekundärmarkt platziert werden darf. Ist die Binärvariable $\text{activelimit}, \text{feedin}_t$ eins, befinden wir uns in einem prognostizierten Engpass mit Einspeiselimit und es darf maximal die Differenz zwischen dem Einspeiselimit und der aktuellen Einspeiseleistung am Markt platziert werden. Die Definition der Binärvariable $\text{activelimit}, \text{feedin}_t$ lautet wie folgt (3.6).

$$\text{activelimit}, \text{feedin}_t = \begin{cases} 1, & \text{Limit}, \text{feedin}_t < M. \\ 0, & \text{Limit}, \text{feedin}_t = M. \end{cases} \quad (3.6)$$

Ist kein Netzengpass prognostiziert, das Netz befindet sich also in der grünen Phase, wird ein extrem hoher Wert M für das Einspeiselimit angenommen. Dies wird aus Modellierungsgründen getan. Erkennt der Netzbetreiber nun einen Engpass und setzt den Haushalten eine Quote mit einem Einspeiselimit, ist das gesetzte Limit somit kleiner als M , dadurch wird die Binärvariable $\text{activelimit}, \text{feedin}_t$ eins und ermöglicht somit der Entscheidungsvariable $P, \text{market}, \text{feedin}_t$ ein Abweichen von null.

Der Definitionsbereich der Entscheidungsvariablen, sowie der Parameter lautet wie folgt:

$$C_t; F_t \in \mathbb{R}_0^+ \quad (3.7)$$

$$P, \text{market}, \text{feedin}_t; P, \text{market}, \text{consum}_t \in \mathbb{R} \quad (3.8)$$

$$\text{Limit}, \text{feedin}_t \in [0; M] \quad (3.9)$$

$$\text{Limit}, \text{consumption}_t \in [C, \text{unconditional}_t; (C, \text{unconditional}_t + C, \text{conditional}_t)] \quad (3.10)$$

$$c, \text{grid}, \text{consum}_t \in \mathbb{R}_0^+ \quad (3.11)$$

$$c, \text{grid}, \text{feedin}_t \in \mathbb{R}_0^+ \quad (3.12)$$

$$c, \text{market}, \text{consum}_t \in \mathbb{R}_0^+ \quad (3.13)$$

$$c, \text{market}, \text{feedin} \in \mathbb{R}_0^+ \quad (3.14)$$

$$t \in T \quad (3.15)$$

3.4 Abgabe mehrerer Gebote

Um die Wahrscheinlichkeit des Zusammenführens zwischen Angebot und Nachfrage zu erhöhen, gibt jeder Haushalt bis zu vier verschiedene Gebote auf dem Markt ab. Diese Gebote bestehen aus Preis und Menge. Im Projekt flexQgrid wird dabei der Preis auf dem Sekundärmarkt konstant gehalten, es variieren ausschließlich die Gebote in ihrer Menge. Der Grund für den angenommen konstanten Preis sind fehlende historische Daten in Bezug auf einen quotenbasierten Sekundärmarkt. Um sicherzustellen, dass tatsächlich vier voneinander unterschiedliche Gebote abgegeben werden, wird abhängig davon, ob das Limit gesenkt oder erhöht werden soll, eine neue Nebenbedingung eingeführt. Die in der ersten Iteration ermittelte optimale Menge der Entscheidungsvariable $P, \text{market}, \text{consum}_t$ wird durch Einführen einer unteren Schranke ausgeschlossen. Eine der folgenden Nebenbedingungen (3.16) wird eingeführt.

$$P, \text{market}, \text{consum}_{t;1.\text{Iteration}} < P, \text{market}, \text{consum}_{t;2.\text{Iteration}} \quad (3.16)$$

Durch Einführen einer Schranke für die Entscheidungsvariable $P, \text{market}, \text{consum}_t$, werden die optimalen Mengen, für jede Periode t , der vorherigen Optimierung ausgeschlossen. Dies ermöglicht einen Fahrplan für die Anlagen eines Haushaltes zu erstellen, mit der Bedingung, dass $P, \text{market}, \text{consum}_t$ eine andere Ausprägung annimmt. Auf diese Weise wird meist der nächst kleinere Wert für die Entscheidungsvariable als optimaler Wert ermittelt. Dieses Prinzip wird iterativ wiederholt, bis vier verschiedene Fahrpläne erstellt sind. Liegt in der Quote ein Einspeiselimit vor, kommt dasselbe Prinzip zu tragen. Um auch hier zu ermöglichen, dass vier voneinander verschiedene Werte für die Entscheidungsvariable $P, \text{market}, \text{feedin}_t$ ermittelt werden, muss erneut nach jedem Optimierungslauf eine der beiden Nebenbedingung nur für $P, \text{market}, \text{feedin}_t$ eingeführt werden. Diese beiden Va-

rianten schließen, die in der ersten Iteration ermittelte optimale Menge aus. Im Falle einer Senkung der Einspeiseleistung muss der Wert, der in der nächsten Iteration ermittelt wird, höher sein als der zuvor ermittelte Wert. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass die Entscheidungsvariable $P_{\text{market,feedin}_t}$ eine negative Ausprägung zeigt, wenn das Einspeiselimit reduziert wird. Wenn ein Haushalt sein Einspeiselimit erhöht, müssen die Werte für die nächsten Gebote auch höher sein als die aus der vorherigen Optimierung, da $P_{\text{market,feedin}_t}$ dann eine positive Ausprägung besitzt. Dadurch wird die Quote stärker als in der letzten Iteration erhöht und somit sichergestellt, dass die ermittelten Fahrpläne umgesetzt werden können. In der ersten Iteration wird bei einer Erhöhung der Quote die kleinstmögliche Erhöhung der Quote ermittelt. Durch die erneute Optimierung ändert sich die Ausprägung von $P_{\text{market,feedin}_t}$ für die entsprechenden Zeiträume. Die Einführung einer der Nebenbedingungen stellt sicher, dass im nächsten Optimierungsdurchlauf keine identischen Mengen auf dem Sekundärmarkt angeboten werden. Die Nebenbedingungen werden nach jedem Optimierungsdurchlauf entsprechend der aktuellen optimalen Menge aktualisiert und schließen diese für den folgenden Durchlauf aus dem Wertebereich aus. Dieses Vorgehen lässt sich iterativ für beide Fälle wiederholen und somit X beliebige Gebote generieren. Für jedes Gebot benötigen wir einen eigenen Optimierungsdurchlauf, der wiederum eine Summe über 288 Perioden optimiert. Im Projekt haben wir uns auf vier Gebote geeinigt. Dies stellt einen guten Kompromiss zwischen der Laufzeit des Programms und der Anzahl der Gebote dar.

4 Implementierung

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Implementierung des zuvor beschriebenen mathematischen Optimierungsproblem. Dabei wird der ausgewählte Solver, sowie das Modellierungs-Framework Pyomo beschrieben. Des Weiteren wird, der implementierte Pythoncode für die Variation der angebotenen bzw. nachgefragten Mengen auf dem Sekundärmarkt erläutert und als Pseudocode angegeben.

4.1 Solver

Im Projekt kam der GLPK (GNU Linear Programming Kit) Solver zum Einsatz. Dieser kann lineare und gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsprobleme lösen. Der GLPK Solver kann kostenlos benutzt werden und kann so ohne weitere Kosten im Projekt verwendet werden.[6] Weitere Vorteile des GLPK Solvers sind:

Benutzerfreundlich: Der GLPK-Solver verfügt über eine intuitive und leicht zu bedienende Schnittstelle, die die Modellierung und Lösung von Optimierungsproblemen erleichtert.

Effizient: Der Solver ist in der Lage, eine breite Palette von Problemen effizient zu lösen. Allerdings kann es sein, dass ihn andere Solver in Bezug auf Leistung und Geschwindigkeit übertrumpfen.

Vielseitigkeit: Er unterstützt eine Vielzahl von Optimierungsproblemen, insbesondere lineare Optimierung (LP) und gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (MILP). Diese Problemklassen sind in vielen Anwendungsbereichen weit verbreitet, z. B. in der Produktionsoptimierung, Logistik, Finanzplanung und Energieplanung. Im Projekt wird ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem gelöst.

4.2 Pyomo

Pyomo ist ein leistungsstarkes Modellierungs-Framework in Python. Der Hauptfokus liegt bei Pyomo auf der Lösung und Modellierung komplexer wissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Optimierungsprobleme, einschließlich in der Energiewirtschaft, Produktion, Logistik, Finanzen und vielen weiteren Bereichen. Es bietet eine benutzerfreundliche Möglichkeit, Probleme zu formulieren, indem mathematische Ausdrücke für Zielfunktionen, Nebenbedingungen und Variablen verwendet werden. Pyomo deckt eine breite Palette von Optimierungsfunktionen ab, einschließlich lineare, nicht lineare und gemischt-ganzzahlige Funktionen. Pyomo ermöglicht die Verwendung verschiedener Optimierungssolver oder

sogar die Implementierung eigener Algorithmen. Darüber hinaus kann es nahtlos mit anderen Python-Bibliotheken wie NumPy, pandas und Matplotlib kombiniert werden, was die Analyse und Visualisierung von Optimierungsergebnissen erleichtert. Pyomo ist eine open source Software und durch die aktive Entwicklergemeinschaft wird es ständig weiterentwickelt und verbessert. [7]

4.3 Erweiterung des Service für die Gebotsabgabe

Um sicherzustellen, dass ein Netzengpass in der gelben Ampelphase durch die Anpassung der Quoten auf dem Sekundärmarkt vermieden werden kann, ist es von entscheidender Bedeutung, eine ausreichende Anzahl von Geboten auf dem Sekundärmarkt zu platzieren. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass für jede Nachfrage auch ein entsprechendes Angebot besteht. Durch Einfügen neuer Nebenbedingungen in das konkrete Optimierungsmodell lassen sich bestimmte Wertebereiche von Entscheidungsvariablen ausschließen. Im Projekt benutzen wir diesen Mechanismus, um verschiedene Gebote mit unterschiedlicher Ausprägung der angebotenen bzw. nachgefragten Menge auf dem Sekundärmarkt zu platzieren. Dies geschieht über das iterative Lösen der Optimierungsfunktion, dabei wird die bereits ermittelte optimale Menge, über Einführen einer Nebenbedingung, vom Wertebereich ausgeschlossen. In der nächsten Iteration wird die nächstbeste Lösung ermittelt, wobei die angebotene Menge auf dem Sekundärmarkt von dem zuvor ermittelten Gebot abweicht.

Der folgende Algorithmus (1) ermittelt für jede Periode t , abhängig von den festgelegten Limits, ob die Quote erhöht oder gesenkt werden soll und welche spezifische Nebenbedingung eingeführt werden muss, welche Nebenbedingung eingeführt werden soll.

Algorithm 1: Nebenbedingung, die Gebot für Sekundärmarkt ausschließt ($model, T$)

```

1  $Limit\_F \leftarrow \text{getattr}(model, "feedin\_limit\_active");$ 
2  $Limit\_C \leftarrow \text{getattr}(model, "consum\_limit\_active");$ 
3  $C \leftarrow \text{getattr}(model, "P\_market\_consum");$ 
4  $F \leftarrow \text{getattr}(model, "P\_market\_feedin");$ 
5 for  $t \leftarrow 1$  to  $T$  do
6   if  $Limit\_C[t] = 1$  then
7     if  $C[t] = 0$  then
8       return  $C[t] \geq 0;$ 
9     else if  $C[t] \leq -1$  then
10      return  $C[t] \geq (C[t] + 1);$ 
11     else if  $C[t] \geq 1$  then
12      return  $C[t] \geq (C[t] + 1);$ 
13   if  $Limit\_F[t] = 1$  then
14     if  $F[t] = 0$  then
15       return  $F[t] \geq 0;$ 
16     else if  $F[t] \leq -1$  then
17       return  $F[t] \geq (F[t] + 1);$ 
18     else if  $F[t] \geq 1$  then
19       return  $F[t] \geq (F[t] + 1);$ 
20   else if  $Limit\_C[t] = 0$  then
21     return Constraint.Skip;
22 end

```

Dieser Algorithmus (1) wird in Engpasssituationen nach jedem Optimierungslauf aufgerufen und schließt die zuvor ermittelte Quotenanpassung aus. In den Zeilen (1) bis (4) werden Instanzvariablen initialisiert und mit den benötigten Werten aus der letzten Optimierung deklariert. Der Algorithmus (1) durchläuft alle 288 Zeitperioden und überprüft für jede dieser Perioden, inwiefern ein Limit für die Periode existiert. Dies wird über die

Binärvariablen „Limit_C“ und „Limit_F“ modelliert, nur eine dieser Variablen kann für eine Periode t den Wert eins annehmen, dann besteht entweder ein Konsum- bzw. ein Einspeiselimit. Existiert für eine Periode t kein Bezugs- bzw. Einspeiselimit, dann sind beide Binärvariablen gleich null. In diesem Fall springt der Algorithmus direkt in Zeile (21) und legt keine Nebenbedingung für diese Periode fest. Dieser Fall tritt ein, wenn kein Netzengpass prognostiziert ist, das Netz sich also in der grünen Phase befindet oder sobald ein Netzengpass nicht mehr abwendbar ist, das Netz sich also in der roten Phase befindet.

In Zeile (6) wird zunächst überprüft, ob ein Konsumlimit für eine Periode t existiert, also die Binärvariable $\text{Limit_C}[t]$ gleich eins ist. Ist dies der Fall, wird in den Zeilen (7) bis (12), je nach der Ausprägung von $C[t]$ entschieden, wie die Nebenbedingung gesetzt werden muss. Liegt ein Konsumlimit vor und der Haushalt möchte seine Quote senken, also Konsumleistung auf dem quotenbasierten Sekundärmarkt anbieten, so wird die angebotene Menge in der nächsten Iteration durch die Nebenbedingung in Zeile (10) verringert. Falls solch ein Limit vorliegt, ist es für einen Haushalt optimal, so viel Bezugsleistung, wie technisch umsetzbar, abzugeben. Der Rahmen dafür wird durch den eigenen Verbrauch des Haushaltes vorgegeben und dem gesetzten Limit vorgegeben. Die maximal anzubietende Bezugsleistung determiniert sich aus der Differenz zwischen dem Limit und dem Verbrauch eines Haushaltes. Um nun eine andere Angebotsmenge zu ermitteln, wird über eine untere Schranke der zuletzt ermittelte Wert ausgeschlossen. Liegt ein Konsumlimit vor und der Haushalt benötigt mehr Leistung als in der Quote angegeben, so stellt sich ein Haushalt am besten, wenn es genau die Differenz zwischen der tatsächlich benötigten Leistung und dem Limit auf dem Sekundärmarkt einkauft. Um nun die Gebotsmenge zu variieren, wird eine untere Schranke durch die Nebenbedingung in Zeile (12) eingeführt. Diese schließt den zuletzt ermittelten Wert aus. Somit würde ein Haushalt in der nächsten Iteration mehr Bezugsleistung auf dem Sekundärmarkt nachkaufen und somit würden seine Kosten steigen. Weniger kann in dieser Situation ein Haushalt nicht nachfragen, da sonst die benötigte Leistung aller Anlagen im Haus nicht gedeckt werden kann.

In Zeile (13) erfolgt zunächst die Prüfung auf das Vorhandensein eines Einspeiselimits für einen bestimmten Zeitraum t , indem überprüft wird, ob die binäre Variable $\text{'Limit_F}[t]$ den Wert eins aufweist. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, wird basierend auf dem Wert von $\text{'F}[t]$ in den Zeilen (14) bis (19) eine Entscheidung getroffen, um die Formulierung einer Nebenbedingung zu bestimmen. Falls ein Einspeiselimit besteht und ein Haushalt sein Einspeiselimit nicht komplett ausreizen kann, wird die Differenz zwischen Limit und der tatsächlich eingespeisten Leistung auf dem Sekundärmarkt platziert. Diese Menge wird dann durch die Nebenbedingung in Zeile (17) für die nächste Iteration ausgeschlossen. In solchen Fällen ist es für einen Haushalt optimal, so viel Einspeisekapazität wie technisch möglich anzubieten. Die Höhe dieser Zuweisung ist begrenzt durch die Fähigkeit

des Haushalts zur Einspeisung, die durch seine Fähigkeit der Stromproduktion bestimmt wird. Die maximal anzubietende Einspeiseleistung ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Limit und der tatsächlichen möglichen Einspeiseleistung in einer bestimmten Periode ,t‘.

Im Falle eines Einspeiselimits und der Möglichkeit eines Haushalts, mehr Leistung in das Netz einspeisen zu können, als im Limit angegeben, hat der Haushalt die Möglichkeit, die Differenz zwischen dem Limit und der möglichen Einspeiseleistung in Periode ,t‘ auf dem Sekundärmarkt nachzukaufen, um somit seine tatsächlich mögliche Leistung in das Netz einzuspeisen. Dies ergibt für einen Haushalt Sinn, solange die Kosten pro zugekaufter Wattstunde nicht den zusätzlichen Erlös durch das zusätzliche Einspeisen übersteigen. Um sicherzustellen, dass nicht nur ein Gebot auf dem Sekundärmarkt platziert wird, führt die Nebenbedingung in Zeile (19) eine untere Schranke ein, die den in der vorherigen Iteration ermittelten Wert ausschließt. So wird der nächst höhere Wert für die Quotenerhöhung ermittelt.

5 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Erweiterung der Zielfunktion, aus dem flexQgrid Projekt, um den Handel mit Leistungsquoten beschrieben und mit den Ergebnissen des flexQgrid Projektes ohne Sekundärmarkt verglichen. Ziel des Ansatzes ist es, die Netzstabilität in Engpasssituationen zu erhöhen und dennoch den Marktteilnehmern Anpassung an ihren Limits, durch Handel, auf dem quotenbasierten Sekundärmarkt zu ermöglichen. Das Netzcluster, für welches ein Engpass prognostiziert wird, bleibt stabil, solange sich in Summe alle Haushalte an ihre Quoten halten. Zusätzlich bietet die Erweiterung des Modells den Haushalten die Option, mehr Energie zu beziehen als in ihrer Quote angegeben. Um das gesetzte Limit zu erhöhen, muss ein anderer Haushalt sein Limit um denselben Betrag verringern. Über den Markt wird dann Angebot und Nachfrage zusammengeführt. Grundsätzlich erfolgt der Vergleich der verschiedenen Ansätze unter gleichbleibenden äußeren Bedingungen. Aufgrund des Mangels an Echtzeitdaten wurde im Vorfeld ein Datensatz generiert, der sämtliche notwendigen Prognosen für die Berechnung der Zielfunktion enthält. Dieser beinhaltet z. B. Prognosen für die Stromerzeugung der Fotovoltaik Anlage einzelner Haushalte in spezifischen Zeiträumen. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der erweiterten Zielfunktion. Falls während des Untersuchungszeitraums keine prognostizierten Engpasssituationen auftreten, ergeben sich keine Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen. Um die Auswirkungen der Zielfunktionserweiterung zu analysieren, wird eine prognostizierte Netzengpasssituation simuliert. Dies geschieht durch das Festlegen von Quoten durch den Netzbetreiber. Die zugeteilte Quote beschränkt in den ersten siebenundvierzig Zeitperioden, die einzuspeisende Leistung auf 3000 Watt. Danach gilt ein Konsumlimit von 7000 Watt für die nächsten zwölf Perioden, gefolgt von einem Konsumlimit von 6000 Watt für die darauf folgenden zwölf Perioden. Unter diesen gleichbleibenden Voraussetzungen werden die Ansätze miteinander verglichen.

5.1 Einfluss auf den Zielfunktionswert

Der Zielfunktionswert, ohne den Handel von Leistungsquoten, ergibt sich aus der Summe der Differenzen zwischen den Verbrauchskosten und den Erlösen aus der Einspeisung von Energie der insgesamt 288 Zeitperioden. Der Zielfunktionswert setzt sich nicht nur aus den Kosten und dem Erlös eines Haushaltes zusammen und kann deswegen nicht als reine Energiekosten bzw. Gewinn interpretiert werden. Die Funktion wird zusätzlich um Strafterme erweitert, die technische Restriktionen modellieren und damit Einfluss auf den Zielfunktionswert nehmen. Diese Restriktionen können den Zielfunktionswert erhöhen oder senken.

$$\min \sum_{t=1}^{288} \left(\frac{C_t}{1000} * c, grid, consum_t - \frac{F_t}{1000} * c, grid, feedin_t \right) * \frac{duration_timestep}{3600} \quad (5.1)$$

Die im Rahmen des Projekts flexQgrid bereits definierte Zielfunktion 5.1 ergibt sich in erster Linie aus der Aggregation der Prognosen für die Kosten des Energiebezugs sowie der Erlöse aus der eingespeisten Leistung. Diese Berechnung erstreckt sich über einen Zeitraum von insgesamt 288 Zeitperioden. Der Hauptanteil des Zielfunktionswerts resultiert aus der Summe der Differenzen zwischen den Verbrauchskosten und den Erlösen aus der Energieeinspeisung. Zusätzlich beeinflussen bereits erwähnte Strafterme, die technische Beschränkungen modellieren, den Wert der Zielfunktion. In die Berechnung gehen C_t und F_t als Watt ein. Die Einspeisetarife $c, grid, feedin_t$ sowie die Konsumtarife $c, grid, consum_t$ für das Einspeisen bzw. den Konsum aus dem Netz sind in $\frac{Euro}{Kwh}$ angegeben. Die Entscheidungsvariablen werden, durch das Teilen durch tausend, in Kilowatt umgerechnet werden. Die Tarife werden grundsätzlich vom Netzbetreiber gesetzt, im Projekt wird eine Ausprägung der Einspeisevergütung $c, grid, feedin_t$ von $0.15 \frac{Euro}{Kwh}$ angenommen. Für den Bezug einer Kilowattstunde werden Kosten in Höhe von $0.29 \frac{Euro}{Kwh}$ angenommen. Durch den letzten Term $\frac{duration_timestep}{3600}$ ermittelt die Zielfunktion die Kosten auf fünf Minuten Basis. Unter diesen Bedingungen ergibt sich ein Zielfunktionswert, ohne die Erweiterung um den Handel mit Leistungsquoten, von 10,463.

Durch die Erweiterung des Modells um einen quotenbasierten Sekundärmarkt wird eine Senkung des Zielfunktionswertes erreicht, indem den Haushalten ermöglicht wird, unter Rahmenbedingungen des Netzbetreibers, ihre Quoten durch Handel zu erhöhen bzw. zu senken. Dies wird ermöglicht durch die Einführung der beiden Entscheidungsvariablen $P, market, consum_t$ und $P, market, Feedin_t$, wie bereits in Abschnitt (3.3) beschrieben. Der Preis pro Watt für die Erhöhung oder Senkung der Quote also, $c, market, feedin_t$ falls ein Einspeiselimit vorliegt und $c, market, consum_t$ für ein Bezugslimit beträgt $0.002 \frac{EURO}{Watt}$. Die Ausprägung der beiden Entscheidungsvariablen ergibt sich aus dem Zustand des Netzes. Wird kein Netzengpass prognostiziert, sind beide null und es kommt nur die Basiszielfunktion (3.1) zum Einsatz. Erst wenn ein Netzengpass prognostiziert wird und damit der Netzbetreiber Quoten an die Marktteilnehmer übermittelt, kann eine der beiden Variablen einen von null unterschiedlichen Wert annehmen und somit den Zielfunktionswert beeinflussen.

Falls ein Netzengpass prognostiziert wird und die Quote ein Bezugslimit enthält, hängt die Möglichkeit eines Haushalts, sein Bezugslimit zu senken oder zu erhöhen und somit die Menge an Bezugsleistung, die er auf dem Sekundärmarkt platzieren kann oder nachfragen muss, von der erforderlichen unbedingten Leistung ab. Dieser Zusammenhang wird durch die Nebenbedingung 3.3 modelliert. Basierend auf dem Projekt flexQgrid ist be-

reits modelliert, dass ein Haushalt stets seine unbedingte Leistung decken muss. Erhält ein Haushalt ein Bezugslimit, wird somit höchstens die Differenz zwischen Limit und der benötigten unbedingten Leistung auf dem Markt platziert. Der Haushalt verschiebt somit seine bedingte Leistung zeitlich und kann damit Gewinne am Sekundärmarkt erzielen. Diese Gewinne tragen dazu bei, die Gesamtkosten zu reduzieren und somit den Wert der Zielfunktion zu verringern. Dies bietet einen Anreiz für Haushalte, ihre Nachfrage nach Energie in prognostizierten Engpassphasen einzuschränken, um auf diese Weise ihre Quote durch Handel zu senken und somit Gewinn zu erwirtschaften. Ein Haushalt platziert somit in einer Periode t die maximale Differenz zwischen dem Limit und der Prognose der unbedingten Leistung auf dem Sekundärmarkt und erzielt somit eine Verringerung des Zielfunktionswertes. In den Zeitperioden, in denen ein Einspeiselimite aktiv ist, darf höchstens die vom Netzbetreiber übermittelte Grenze für die Einspeisung ins Netz erreicht werden. Falls ein Haushalt dieses Limit nicht vollständig ausnutzt, sei es aufgrund von begrenzten Stromerzeugungskapazitäten oder weil der erzeugte Strom gespeichert oder für den Betrieb elektrischer Geräte verwendet wird, kann die Differenz zwischen dem Limit und der tatsächlich eingespeisten Energie auf dem Sekundärmarkt angeboten werden. Auf diese Weise senkt der Haushalt seine Quote und erzielt Gewinne, die Gesamtkosten und somit den Wert der Zielfunktion reduzieren. Wenn der Einspeisetarif $c_{\text{grid,feedin}_t}$ die Kosten für eine Erhöhung des Einspeiselimits $c_{\text{market,feedin}_t}$ übersteigt, würde ein Haushalt sein Limit so erhöhen, dass er seine maximal erzeugbare Energie in das Netz einspeisen darf. Auf diese Weise würde er einen Gewinn pro zusätzlich eingespeister Wattstunde erzielen, der der Differenz zwischen den beiden Tarifen entspricht.

Wir vergleichen nun den Zielfunktionswert unter der Bedingung, dass sämtliche Prognosen und gesetzten Limits identisch sind. In diesem Szenario ist der einzige Unterschied zwischen den Ansätzen die Existenz eines quotenbasierten Sekundärmarktes. Der Zielfunktionswert nach der Ergänzung um einen quotenbasierten Sekundärmarkt beträgt 7,123. Die Ausprägung des Zielfunktionswerts wird in erster Linie durch die festgelegten Preise beeinflusst. Da diese in diesem Ansatz angenommen und konstant gehalten wurden, hängt die Höhe des Zielfunktionswerts größtenteils von den angenommenen Parametern ab. Auch die vom Netzbetreiber gesetzten Limits wurden für diesen Ansatz angenommen, auch diese haben einen massiven Einfluss auf die Ausprägung des Zielfunktionswertes. Zusätzlich wird angenommen, dass alle auf dem Markt platzierten Gebote problemlos mit passenden Nachfrage- bzw. Angebotsanfragen zusammengeführt werden können. Es sollte jedoch beachtet werden, dass dies in der Realität nicht immer der Fall sein wird. Daher ist die Senkung des Zielfunktionswerts als maximal mögliche Senkung anzusehen, da in der Praxis möglicherweise nicht alle Gebote erfolgreich zusammengeführt werden können.

5.2 Preis als Steuerungselement

Im Rahmen des flexQgrid Projekts wird aufgrund der nicht vorhandenen historischen Datenlage eines quotenbasierten Smart Markets der Preis für den Bezug sowie die Einspeisung von Leistung auf dem Sekundärmarkt in allen Zeitperioden t , konstant gehalten. Eine Veränderung des Preises auf dem Sekundärmarkt hat großen Einfluss auf die Ausprägung des Zielfunktionswertes. Im Falle, dass ein Haushalt Leistung auf dem Sekundärmarkt in Form von Bezugsleistung oder Einspeiseleistung anbietet, ergibt sich folgender Zusammenhang: Je höher der Preis pro Wattstunde ist, desto niedriger wird der Zielfunktionswert und somit die Kosten. Wenn jedoch zusätzliches Limit auf dem Markt erworben werden muss, gilt dieser Zusammenhang umgekehrt. Somit ist ein Steuerungselement des Sekundärmarktes der Preis für eine Erhöhung oder Senkung der Quote. Der Preis als Steuerungselement würde insbesondere bei der Nachfrage von Energie eine Rolle spielen. Wenn ein Haushalt Energie anbietet, wird er tendenziell immer die maximale nicht benötigte Leistung auf dem Markt platzieren, da dies für ihn unabhängig vom Preis immer vorteilhaft ist. Ein Haushalt würde somit zu jedem Preis, Leistung auf dem Markt platzieren. Bei einem Haushalt, der Energie nachfragt, hängt die Entscheidung, wie viel Energie er kaufen möchte, von dem aktuellen Preis ab. Wenn seine Zahlungsbereitschaft niedriger ist, als der aktuelle Preis pro Watt auf dem Markt, wird der Haushalt seine nachgefragte Menge reduzieren und falls möglich versuchen, den Verbrauch auf andere Zeitperioden zu verschieben. Insgesamt zeigt dieses dynamische Zusammenspiel zwischen Angebot, Nachfrage und Preis, wie die Preissetzung auf dem Markt das Verhalten der Marktteilnehmer beeinflussen kann. Dies verdeutlicht die Bedeutung des Preises als zentrales Element, dass sich aus Verhältnis aus Angebot und Nachfrage ergibt, bei der Steuerung des Sekundärmarktes.

5.3 Verringerung der Spitzenlast in Engpassphasen

Durch die Einführung eines quotenbasierten Sekundärmarktes eröffnen wir den Marktteilnehmern die Möglichkeit, in prognostizierten Engpassphasen, ihre vom Netzbetreiber festgelegte Quote zu senken oder zu erhöhen. Im Falle eines Bezugslimits bietet es den Haushalten einen Anreiz, ihren Energiebezug möglichst weit einzuschränken, sodass ein möglichst hoher Teil des Limits auf dem Sekundärmarkt platziert werden kann und sich dadurch Gewinne erzielen lassen. Dies führt dann zu einem geringeren Zielfunktionswert.

In Abbildung (5) sind die Leistungsbezüge der beiden Ansätze pro Zeitperiode dargestellt. Es ist wichtig anzumerken, dass sowohl die Lösung aus dem Projekt flexQgrid als auch der in dieser Arbeit behandelte Ansatz, der die Erweiterung der Zielfunktion des Projekts flexQgrid um einen quotenbasierten Sekundärmarkt betrifft, Haushalte die vom Netzbetreiber festgelegten Limits einhalten müssen. In den Perioden fünfzig bis einundsechzig

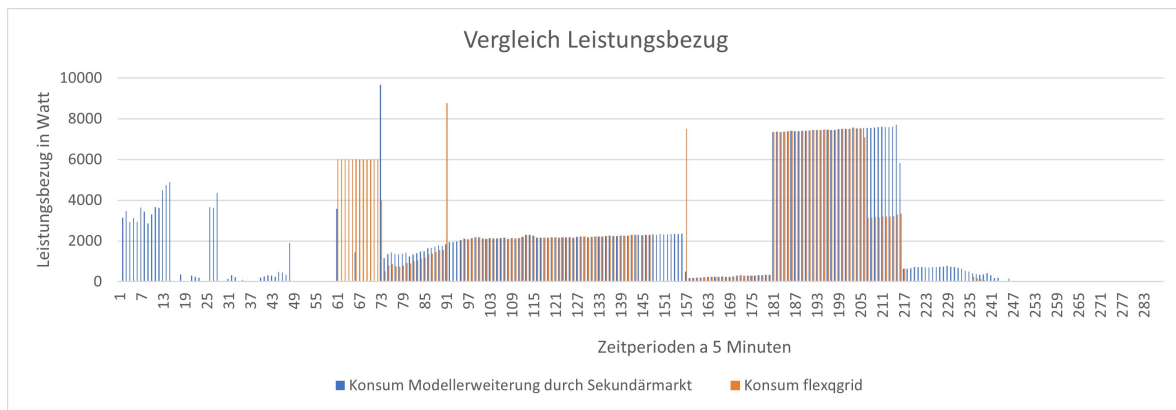


Abbildung 5: Vergleich des Leistungsbezuges

besteht ein Konsumlimit von 7000 Watt, und in beiden Ansätzen wird in dieser Zeit keine Leistung aus dem Netz bezogen. Dies könnte darauf hinweisen, dass der im Haus vorhandene Energiespeicher in dieser Zeit die Versorgung der elektrischen Anlagen übernimmt. Die beiden Ansätze unterscheiden sich jedoch in den Perioden fünfzig bis einundsechzig hinsichtlich der Möglichkeit, zusätzliche Gewinne durch den Handel mit Quoten auf dem Sekundärmarkt zu erzielen, wenn die Quote nicht komplett ausgeschöpft wird. In den Perioden zweiundsechzig bis einschließlich zweiundsiebzig gilt ein Bezugslimit von 6000 Watt. In diesen Perioden bezieht der Ansatz aus dem flexQgrid Projekt, die vollen 6000 Watt. Im Vergleich bezieht der in dieser wissenschaftlichen Arbeit erarbeitete Ansatz, nur in zwei dieser Perioden Energie aus dem Netz. In den anderen Perioden wird das komplette Limit auf dem Sekundärmarkt als Quotenerhöhung für andere Marktteilnehmer platziert. Dadurch entstehen zusätzliche Gewinne für den Haushalt. In der Periode zweiundsechzig wird 3578 Watt bezogen und daraus folgend nur 2421 Watt auf dem Sekundärmarkt als Quotenerhöhung für andere Marktteilnehmer platziert. Sowie in Periode siebenundsechzig 1442 Watt aus dem Netz bezogen wird und damit 4557 Watt auf dem Sekundärmarkt platziert wird. Diese beiden Perioden verdeutlichen anschaulich, wie die Höhe der möglichen Quotensenkung von der benötigten Leistung eines Haushaltes abhängt. Dies wird durch die Nebenbedingung (3.3) realisiert, die die Anpassung der Quote in Abhängigkeit vom Konsum in einer bestimmten Periode regelt. Durch diesen Ansatz erreichen wir einen geringeren Lastfluss in Engpasssituationen. Haushalte neigen dazu, Energie für Engpassphasen vorzuhalten, um eine höhere Senkung ihrer Quote zu ermöglichen. In der Grafik (5) ist besonders in den ersten Zeitperioden ein erhöhter Energieverbrauch im Vergleich zu ermittelten Werten für den Leistungsbezug aus dem flexQgrid-Projekt zu beobachten. Voraussichtlich wird diese Energie gespeichert oder als bedingte Leistung genutzt, um in Engpassphasen mehr einsparen zu können und somit eine höhere Quotensenkung und mehr Gewinn zu erzielen. Da für diesen Ansatz konstante Preise über alle Perioden angenommen wird, lässt sich keine Aussage treffen, in welche Periode sich der Konsum eines Haushaltes verschiebt.

5.4 Variation der Gebote

Um die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenführens zwischen Angebot und Nachfrage auf dem Sekundärmarkt zu erhöhen, soll jeder Haushalt mehrere Gebote auf dem Markt platzieren. Sollte dies nicht der Fall sein, besteht die Gefahr eines nicht abwendbaren Netzenspasses. In einem solchen Szenario ist der Verteilnetzbetreiber gezwungen, in das Netz einzugreifen, um die Leistung aktiv zu steuern. Dies umfasst die Begrenzung sowohl des Strombezugs als auch der eingespeisten Leistung von Haushalten. Um diesem Problem entgegenzuwirken, sieht dieser Ansatz vor, dass jeder Haushalt vier verschiedene Gebote auf dem Sekundärmarkt platziert. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit des Zusammenführens von Angebot und Nachfrage erhöht. Zu Beginn des Optimierungsprozesses wird für jede Zeitperiode t die optimale Menge an abzugebender oder nachgefragter Leistung berechnet. Die erneute Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung von unteren Schranken, die den zuletzt ermittelten Wert begrenzen. Dieser neue Wert nähert sich dem vorherigen optimalen Wert an, erreicht ihn jedoch nicht exakt. Dadurch entstehen sehr ähnliche Lösungen, allerdings mit unterschiedlichen Ausprägungen der angebotenen Leistung auf dem Sekundärmarkt.

Im Fall einer Quotenerhöhung führt Iteration zwei dazu, dass mehr Bezugs- bzw. Einspeiseleistung auf dem Sekundärmarkt gekauft wird als in Iteration eins. Dies führt zu höheren Gesamtkosten in Iteration zwei im Vergleich zu Iteration eins. Dann wird der in Iteration zwei ermittelte Fahrplan als optimal angenommen und das Verfahren wird wiederholt. Auf diese Weise generieren wir vier zulässige, aber unterschiedliche Fahrpläne, die darauf basieren, dass sich die nachgefragte Leistung für die Quotenerhöhung unterscheidet. Da sich dieser Ansatz auf die Abgabe der Gebote fokussiert und ein Haushalt grundlegend besser abschneidet, wenn er eine Leistungserhöhung auf dem Sekundärmarkt platziert, kommt es nur dann zu einer Erhöhung, wenn ein Hausbesitzer aktiv bedingte Leistung einschaltet, beispielsweise indem er sein Elektroauto lädt oder die Waschmaschine startet. Diese Eingriffe sind von einem GEMS ohne Interaktion mit dem Hausbesitzer nicht vorhersehbar und werden daher nicht in die Optimierung einbezogen, bis das Gerät tatsächlich gestartet wird. Erst dann kann ein GEMS seine Prognosen für die nächsten Perioden darauf anpassen. Die Untersuchung der Auswirkungen eines menschlichen Eingreifens in das System bietet großes Potenzial für weitere wissenschaftliche Arbeiten.

Im Falle einer Senkung des Einspeiselimits bzw. Konsumlimits wird zunächst erneut der optimale Fahrplan ermittelt. Bei einer Quotensenkung weist einer der beiden Variablen $P_{\text{market,feedin}_t}$ und $P_{\text{market,consum}_t}$ basierend darauf, ob ein Bezugs- oder Einspeiselimit vorliegt, eine negative Ausprägung auf. Nach der Optimierung wird eine untere Schranke eingeführt, um die Höhe der Quotensenkung ins Negative zu begrenzen. Dies wird iterativ wiederholt, bis vier voneinander unterschiedliche Lösungen generiert wurden. In der Tabelle (1) sind beispielshalber, die ermittelten Quotensenkungen unter den

gegebenen Limits für die Perioden fünfzig bis zweiundsiebzig abgebildet.

Tabelle 1: Vergleich der platzierten Bezugsleistung in Watt auf dem Sekundärmarkt

Periode	Konsumlimit	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4
49	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
50	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
51	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
52	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
53	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
54	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
55	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
56	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
57	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
58	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
59	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
60	7000	-7000	-6999	-6998	-6997
61	6000	-2421,602	-2420,602	-2419,602	-2418,602
61] 62	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
63	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
64	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
65	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
66	6000	-4557,404	-4556,404	-4555,404	-4554,404
67	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
68	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
69	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
70	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
71	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
72	6000	-6000	-5999	-5998	-5997
height Zielfunktionswert		7,1224	7,1240	7,1257	7,1273

In Iteration eins wird der niedrigste Zielfunktionswert ermittelt und somit die optimale Lösung unter den gegebenen Limits. Dabei wird in einundzwanzig von dreiundzwanzig untersuchten Perioden exakt das vom Netzbetreiber gesetzte Limit als Quotenerhöhung für andere Marktteilnehmer auf dem Sekundärmarkt platziert. Basierend auf diesem optimalen Ergebnis aus Iteration eins wird nun für die Iteration zwei die zuvor erreichte Ausprägung der Variable $P_{\text{market}, \text{consum}_t}$ ausgeschlossen. In Iteration eins und Zeitperiode fünfzig würde die eingeführte Nebenbedingung wie folgt aussehen:

$$P_{\text{market}, \text{consum}_{50}} > -7000 \quad (5.2)$$

Der Wert von -7000, der in Iteration eins für $P_{\text{market}, \text{consum}_{50}}$ ermittelt wurde, dient als Ausgangspunkt. In der nächsten Iteration wird erneut eine Optimierung durchgeführt, wobei die Bedingung (5.2) beachtet wird, dabei steht die -7000 für die ermittelte Quotensenkung aus der Iteration zuvor. Da das Ergebnis aus der ersten Iteration in den nachfolgenden Iterationen nur durch untere Schranken begrenzt wird, verringert sich der

Lösungsraum. Durch das Einfügen einer unteren Schranke in Höhe des optimalen Wertes wird der nächste Wert höher, da er unter der Berücksichtigung der neuen Nebenbedingung optimal ist. Dieser iterative Prozess generiert dadurch voneinander unterschiedliche Lösungen, die sich allerdings an die in Iteration eins ermittelte optimale Lösung annähern.

5.5 Einhalten der gesetzten Quoten

Betrachten wir erneut die eingeführte Nebenbedingung (3.3), die uns die Höhe der auf dem Sekundärmarkt zu platzierenden Leistung basierend auf dem eigenen Bedarf und dem gesetzten Limit in Periode t berechnet, um zu zeigen, dass die vom Netzbetreiber gesetzten Quoten eingehalten werden. Dafür betrachten wir die Grafik (6):

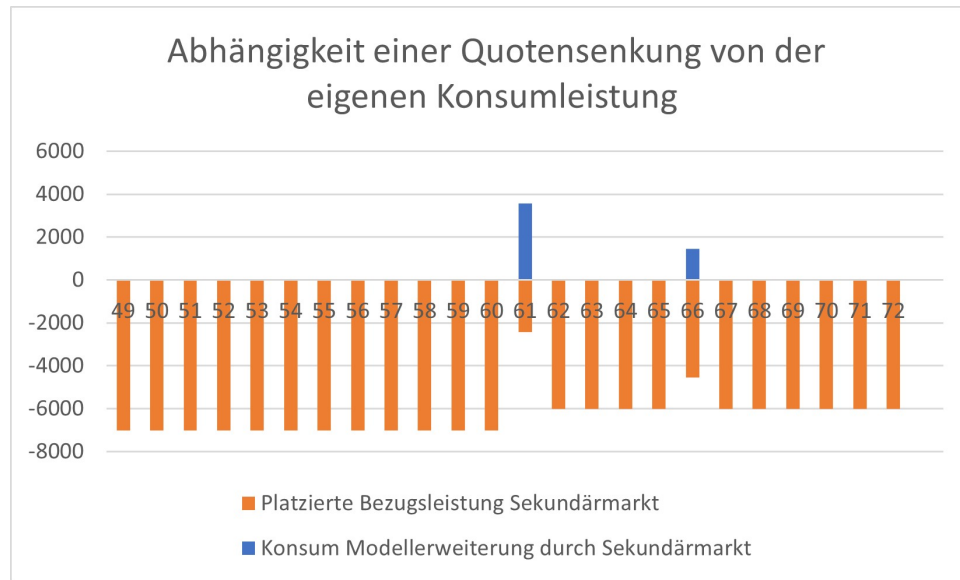


Abbildung 6: Abhängigkeit einer Quotensenkung von der eigenen Konsumleistung

Diese Grafik (6) zeigt die Perioden neunundvierzig bis zweiundsiebzig. In den Perioden neunundvierzig bis sechzig gilt ein Konsumlimit von 7000 Watt. In diesen Perioden wird keine Leistung aus dem Netz bezogen, was eine Senkung der Quote um 7000 Watt ermöglicht. Somit wird die Nebenbedingung (3.3) nicht verletzt, da keine Leistung aus dem Netz bezogen wird und ein Limit von 7000 Watt eine mögliche Abgabe von 7000 Watt auf dem Sekundärmarkt erlaubt. In den Perioden einundsechzig bis zweiundsiebzig gilt ein Konsumlimit von 6000 Watt. Bis auf die Perioden einundsechzig und sechsundsechzig beträgt der Bezug von Leistung aus dem Netz null, was wiederum ermöglicht, die gesamte Quote auf dem Sekundärmarkt zu platzieren. Wenn wir uns nun die Perioden einundsechzig und sechsundsechzig genauer in Tabelle (2) ansehen, fällt auf, dass in diesen Perioden nicht das gesamte Limit auf dem Sekundärmarkt platziert wird. In diesen Perioden wird Energie aus dem Netz bezogen, wodurch die Menge, die auf dem Sekundärmarkt platziert werden kann, gemäß der Nebenbedingung (3.3) begrenzt wird.

Periode	Konsum	Platzierte Bezugsleistung Sekundärmarkt	Konsumlimit
61	3578,397569	-2421,602431	6000
66	1442,595659	-4557,404341	6000

Tabelle 2: Quotensenkung basierend auf dem Konsum

Wenn wir die negativen Vorzeichen bei der platzierten Bezugsleistung außer Acht lassen, die sich daraus ergeben, dass sie negativ in die Zielfunktion einfließen, erkennen wir, dass die Gesamtsumme aus der tatsächlich bezogenen Leistung und der platzierten Quotensenkung genau dem zuvor festgelegten Limit entspricht. Die beiden Perioden in Tabelle (2) verdeutlichen das besonders gut. Mit anderen Worten, wir nutzen das Limit effektiv aus, indem wir die Quotensenkung als Anreiz verwenden, um die Bezugsleistung zu senken und sicherzustellen, dass wir das festgelegte Limit nicht überschreiten.

6 Fazit

Im folgenden Abschnitt werden die erarbeiteten Ergebnisse diskutiert und eingeordnet. Mögliche Verbesserungen sowie Einschränkungen des Ansatzes werden beleuchtet.

6.1 Netzstabilität

Durch einen quotenbasierten Sekundärmarkt, der aktiv wird, sobald ein Engpass vom Verteilnetzbetreiber prognostiziert wird, kann die Stabilität und Resilienz eines Verteilnetzes gestärkt werden. Durch das frühzeitige Erkennen von potenziellen Netzengpässen und die anschließende Intervention des Netzbetreibers durch das Setzen von Quoten für die Marktteilnehmer in einem Netzcluster kann verhindert werden, dass vorhergesagte Engpässe eintreten. Die Gesamtsumme aller Quoten entspricht dabei der maximalen zulässigen Last, im entsprechenden Netzabschnitt. Somit wird durch das koordinierte Zuteilen der Leistung an Marktteilnehmer ein Zusammenbruch des Netzes verhindert. Durch das Beschränken der Leistung durch die Quote kommt es zu einer Verschiebung des Lastbezuges in andere Perioden. Besonders da Haushalte in Engpassphasen Gewinne durch das Senken ihrer Quote erzielen können, halten sie Leistung für Engpassphasen zurück, um dann die Quote maximal senken zu können. Durch diesen finanziellen Anreiz senken Haushalte ihre Nachfrage nach Leistung in Engpassphasen und tragen somit zur Netzstabilität bei. Die Verlagerung des Leistungsbezuges wird in (5) deutlich. Um weiterhin den Marktteilnehmern Flexibilität zu gewährleisten, können diese untereinander handeln und somit ihre Quote erhöhen oder senken. Dieser Mechanismus funktioniert in der Realität allerdings begrenzt, denn dafür wird angenommen, dass für jede Nachfrage, bestehend aus Menge in Watt und Preis pro Watt, auch ein passendes Angebot besteht und somit jede Nachfrage sowie jedes Angebot gedeckt wird. Diese Annahme wurde im Projekt flexQgrid zur Vereinfachung getroffen.

In Fällen, in denen auf einem quotenbasierten Sekundärmarkt in einer Netzengpasssituation Angebot und Nachfrage nicht im Gleichgewicht stehen, besitzt der Verteilnetzbetreiber in der Praxis die Fähigkeit, zusätzliche Kraftwerke, falls vorhanden, hochzufahren. Dadurch kann er zusätzliche Leistung auf dem quotenbasierten Sekundärmarkt anbieten und auf diese Weise die Differenz zwischen Angebot und Nachfrage schließen. Im umgekehrten Szenario hat der Verteilnetzbetreiber die Option, überschüssige Energie aus dem Markt zu entnehmen und diese zu speichern. Dies geschieht insbesondere in Phasen, in denen das Netz durch eine hohe Energieproduktion stark belastet wird, z. B. wenn der Wind weht und die Sonne scheint. Somit kann der Verteilnetzbetreiber durch gezielte Eingriffe in den Markt aktiv zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität beitragen.

6.2 Senkung der Kosten eines Haushaltes

Ein Haushalt hat in prognostizierten Engpassphasen, die Möglichkeit seine Quote durch Handel zu senken oder zu erhöhen, dadurch wird den Haushalten ermöglicht, ihren Energiebezug zeitlich zu verschieben und dadurch Kosten einzusparen. Besonders in Phasen, in denen ein Haushalt einen geringen Stromverbrauch hat, z. B. wenn die Besitzer im Urlaub sind, ermöglicht das einem Haushalt besonders große Einsparungen. Darüber hinaus können Verbraucher ihre Stromnutzung anpassen, z.B Trockner nachts einschalten, um von niedrigeren Preisen zu profitieren. Bei hohen Strompreisen könnten Haushalte ihre Stromnachfrage reduzieren, indem sie die Nutzung von nicht dringend benötigte Geräte wie z. B. Geschirrspüler und Waschmaschinen in eine andere Zeitperiode mit günstigeren Tarifikosten verschieben. Die Einführung eines Sekundärmarktes für Leistungsquoten bietet Haushalten den Anreiz, ihre Nachfrage nach bedingter Flexibilität zeitlich in Phasen mit einer hohen Stromproduktion durch erneuerbare Energien zu verlegen und somit von einem geringeren Strompreis zu profitieren. Besitzt ein Haushalt dazu noch einen Energiespeicher, kann dieser in Phasen mit günstigen Tarifen oder durch die eigene Stromproduktion gespeist werden, um in einer prognostizierten Engpasssituation weniger Strom beziehen zu müssen und damit seine Quote absenken zu können. Dadurch kann auch ein neues Bewusstsein der Verbraucher gegenüber ihrem Stromverbrauch entstehen.

Allgemein lässt sich über die Höhe der Ersparnis schwer eine Aussage treffen, da die Annahme eines konstanten Referenzpreises in Höhe von 0.002 Euro pro Watt, für den Handel von Quoten auf einem Sekundärmarkt für alle Perioden t , nicht realitätsnah ist. Strompreise variieren erheblich von Region zu Region sowie zu verschiedenen Tageszeiten. Diese Preisunterschiede ergeben sich vor allem durch den Zustand des Stromnetzes und den Anteil der erneuerbaren Energien. Regionen mit gut ausgebauten Netzen und einem hohen Anteil erneuerbarer Energien weisen tendenziell niedrigere Strompreise auf. Regionen mit erhöhtem Netzausbaubedarf weisen tendenziell höhere Preise auf. Diese regionalen Preisunterschiede bieten einen Anreiz, besonders in Regionen mit einem hohen Stromtarif, die Energieeffizienz durch den Einsatz von Energiedienstleistungen zu erhöhen und damit besser mit der Ressource zu wirtschaften. Somit bietet die Erweiterung des Gebäudeenergiemanagementsystems (GEMS) um einen quotenbasierten Sekundärmarkt besonders in Regionen mit teuren Stromtarifen, sowie häufiger auftretenden Netzengpässen ein großes Potenzial. Allerdings muss ein bestimmtes Level an Vernetzung zwischen Marktteilnehmern schon vorhanden sein.

6.3 Variable Tarife auf dem Sekundärmarkt

Wie bereits in Abschnitt (1.3.1) „Gestaltungsinstrumente eines Smart Markets“ erwähnt wurde, stellen variable Tarife ein wesentliches Steuerungselement eines Smart Markets

dar. In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird keine Analyse von variablen Tarifen als Steuerungselement durchgeführt. Dies liegt daran, dass die Preise auf dem Markt aus dem Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage entstehen, und dieser Ansatz sich aus Komplexitätsgründen auf die Abgabe von Geboten mit konstanten Preisen konzentriert. Daher können keine belegten Aussagen darüber getroffen werden, wie sich das System verhält, wenn Tarife flexibel sind. In der Realität könnte der Netzbetreiber durch Zuschalten von externen Anlagen zur Stromproduktion im Falle eines Bezugslimits oder die gezielte Speicherung von Leistung im Falle eines Einspeiselimits, in kritischen Situationen auf den Preis Einfluss zunehmen. Durch die Veränderung des Preises sollten Haushalte dann ihr Verhalten dementsprechend anpassen. Die Preisfestlegung auf einem zukünftigen Sekundärmarkt erfolgt durch das Zusammenführen von Angebot und Nachfrage. Wenn das Angebot eingeschränkt oder die Nachfrage gesteigert wird, führt dies in der Realität, zu einem Anstieg des Preises pro Watt auf dem Markt. Der Preis steigt auch, wenn das Angebot erhöht oder die Nachfrage reduziert wird. Durch Einflussnahme auf das Angebot oder die Nachfrage werden vom Netzbetreiber der Preis beeinflusst. Daraufhin passen Marktteilnehmer dementsprechend ihr Verhalten an. In Zeiten, in denen die Nachfrage auf dem Sekundärmarkt nach Leistung höher als das Angebot ist (Bezugslimit), könnten zusätzliche Produktionskapazitäten vom Netzbetreiber zugeschaltet werden, die die Differenz zwischen Angebot und Nachfrage auf dem Markt ausgleichen. Dadurch wird das Angebot erhöht und der Preis sinkt. In Zeiten mit höherer Stromproduktion als Nachfrage nach Leistung (Einspeiselimit), kann der Netzbetreiber die überschüssige Energie günstig einkaufen und speichern, dadurch wird die Nachfrage erhöht und der Preis steigt. Die gezielte Steuerung des Sekundärmarktes mithilfe variabler Tarife über das Eingreifen in Angebot und Nachfrage, insbesondere inwiefern die Marktteilnehmer dadurch ihr Verhalten ändern, eröffnet ein vielversprechendes Forschungsfeld für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten. Aufbauend darauf können Marktstrategien für einzelne Marktteilnehmer getestet und evaluiert werden. Durch eine Simulation des Marktes könnten Daten generiert werden, mit diesen könnte dann ein neuronales Netz trainiert werden, welches in Zukunft dann in ein GEMS integriert werden kann, um Verbrauchsmuster von Haushalten hervorzusagen.

6.4 Einschränkungen des Ansatzes

Im folgenden Abschnitt werden die Einschränkungen des Ansatzes erläutert.

Konstante Preise auf dem Sekundärmarkt:

In dieser Arbeit wird angenommen, dass konstante Preise auf dem Sekundärmarkt gelten. Da kein Markt dieser Art bereits in der Realität existiert, fehlen historische Daten, die erlauben würden, Rückschlüsse auf den aktuellen Preis pro Watt auf dem Sekundär-

markt zu schließen, basierend auf der gesetzten Quote und der platzierten Leistung auf dem Sekundärmarkt. Darüber hinaus ergibt sich ein Preis basierend auf Angebot und der Nachfrage auf einem Markt. Dieser Ansatz fokussiert sich dabei auf die Abgabe von Geboten unter der Bedingung, dass genügend Marktteilnehmer am Markt handeln und somit alle Gebote mit einem passenden Angebot zusammengeführt werden können.

Ausreichende Beteiligung, um alle Gebote zu erfüllen:

In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird angenommen, dass genügend viele Marktteilnehmer am Markt teilnehmen, dass für jedes getätigte Angebot von Leistung auch die passende Nachfrage besteht. Diese Annahme entspricht nicht der Realität, wurde aber aus Komplexitätsgründen angenommen. Somit wird in dieser Arbeit die maximale Auswirkung eines solchen Marktes für einen Haushalt untersucht.

Optimierungshorizont:

Der Optimierungshorizont entspricht vierundzwanzig Stunden. Somit werden die Prognosen für z. B. Wetterdaten, die über die vierundzwanzig Stunden hinaus gehen, nicht in der Optimierung berücksichtigt. Ein verlängerter Optimierungshorizont könnte die Kosten der Haushalte weiter senken und man könnte durch eine frühere Erkennung eines prognostizierten Engpasses Gegenmaßnahmen ergreifen. Damit könnten die Ermittlung der Quoten länger als für die nächsten sechs Stunden durchgeführt werden. Grundlage hierfür ist der Ausbau unseres Stromnetzes hin zum Smart Grid, um die benötigten Daten zu erfassen.

technische Restriktionen:

In der Realität gibt es noch sehr viele technische Restriktionen, die überwunden werden müssen, um den Ansatz großflächig ausrollen zu können. Der in der Einleitung definierte Prosumer (1) steht nicht für einen durchschnittlichen deutschen Haushalt. Viele dieser Haushalte heizen z. B. mit Gas. Auch die Anzahl der E-Autos beläuft sich in Deutschland noch auf einen Bruchteil im Vergleich zu Verbrennern. Eine weitere Restriktion ist, dass es bis heute nicht genau möglich ist, den Ladestand eines E-Autos mithilfe der Wallbox zu ermitteln. Würde dies ermöglicht, könnte die Batterie eines E-Autos als Zwischenspeicher genutzt werden.

6.5 Zukunftsausblick

In den kommenden Jahren wird der Bedarf des Netzausbaues durch den zunehmenden Anteil an erneuerbaren Energien weiter stark steigen. Der BDEW beziffert die Kosten des Netzausbaues auf ca. 102 Milliarden Euro. Davon 55 Milliarden Euro für das Übertragungsnetz und 47 Milliarden Euro für die Verteilernetze. [3] Durch lange Genehmigungsverfahren wird der Ausbau sich allerdings noch Jahre hinziehen und somit den Ausbau der erneuerbaren Energieträger bremsen. Um weiterhin den Ausbau der erneuerbaren Energi-

en zu ermöglichen, kann das Netz durch intelligente Steuerung entlastet werden und somit der Bedarf an Netzausbau verringert werden. In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird die Erweiterung eines Energiemanagementsystems zum Handel von Leistungsquoten behandelt. Dieser Ansatz zielt darauf ab, die Netzstabilität und Effizienz zu steigern, indem er Leistungsquoten in vorhergesagten Engpassphasen einführt. Darüber hinaus gibt dieser Ansatz den Marktteilnehmern durch den Handel mit diesen Leistungsquoten die Möglichkeit, Gewinne zu erzielen, indem sie ihre Quoten reduzieren. Dieser Anreiz, Energie in Engpassphasen einzusparen, kann bei den Marktteilnehmern zu einer nötigen Bewusstseinsveränderung, bezüglich der Verfügbarkeit von elektrischer Leistung, führen. Aufbauend auf diesem Thema eröffnen sich viele weitere Forschungsthemen, denn die Schaffung eines quotenbasierten Smart Markets ist nur eine Komponente des Energienetzes der Zukunft und muss um weitere Komponenten ergänzt werden, um den Anforderungen standhalten zu können. Um eine intelligente Steuerung eines Stromnetzes zu ermöglichen, muss zunächst Transparenz im Netz geschaffen werden. Dies geschieht unter anderem durch Sensoren, die am Netz angebracht werden, um die Auslastung an bestimmten Knotenpunkten zu bestimmen. Darüber hinaus müssen verbaute Komponenten, in Echtzeit miteinander kommunizieren können. Diese dynamische Zweiwege-Kommunikation zwischen den Akteuren im Netz ist eins der Merkmale eines von Smart Grids. Die Kommunikation zwischen einzelnen Anlagen und Akteuren ermöglicht automatisiert, den Energiefluss in Echtzeit zu überwachen und anzupassen. Dadurch können frühzeitig Netzenspässe erkannt und vermieden werden.

Eine weitere wichtige Anforderung an ein Smart Grids ist die Fähigkeit, so viel wie möglich Leistung aus erneuerbaren Energien in das Netz zu integrieren. Dafür sind Energiespeichersysteme ein wichtiger Bestandteil von Smart Grids. Durch die Möglichkeit, überschüssige Energie zu speichern und bei Bedarf auf dem Sekundärmarkt anzubieten, wird nicht nur die Netzstabilität erhöht, sondern auch die optimale Nutzung erneuerbarer Energien gefördert. Die installierten Sensoren, sowie die über das Netz kommunizierenden Anlagen sorgen dafür, dass eine Menge zusätzlicher Daten generiert wird. Diese können analysiert werden, um Trends zu erkennen, Prognosen früher zu erstellen sowie den Betrieb von Anlagen zu optimieren.

Durch das Umsetzen eines quotenbasierten Sekundärmarktes in einem Verteilnetz, muss weniger Leistung, in Engpasssituationen, von externen Erzeugern wie Kraftwerken eingespeist werden. Prosumer, Aggregatoren und Konsumenten innerhalb eines Verteilnetzes führen zunächst ihr Überangebot und die Nachfrage, die ihre Quoten übersteigen, auf dem Sekundärmarkt zusammen. Dies führt dazu, dass keine oder weniger externe Energie über die Übertragungsnetze in das Verteilnetz eingespeist werden muss. In Anbetracht der veränderten Energieerzeugung und der daraus resultierenden Dezentralisierung der Energielandschaft stellt ein solcher Markt eine vielversprechende Strategie dar, um diesen

Entwicklungen entgegenzuwirken. Die Einführung eines quotenbasierten Sekundärmarkts auf Verteilnetzebene in Deutschland stellt eine Komponente dar, um die Energiewende erfolgreich zu meistern.

Ein neuronales Netzwerk kann, basierend auf der wachsenden Datenmenge, die für das Training eines neuronalen Netzes notwendig ist, die Steuerung des Netzes verbessern und dadurch die Stabilität des Verteilnetzes erhöhen. Denn durch die erhöhte Anzahl an Prosumer, sowie der Umstieg der Wärmeerzeugung auf elektrische Energie und weitere Bereiche, die in Zukunft auf Strom setzen werden, steigen die Lastflüsse im Netz und damit die Komplexität des Systems. Die steigende Komplexität führt dazu, dass Menschen diese Aufgabe nicht mehr effizient lösen können, sowie die Optimierungsdauer eines Optimierungsproblems sich drastisch erhöhen kann. Neuronale Netze werden in Zukunft die Steuerung der Leistung eines Haushaltes bis hin zur Steuerung der Netze auf regionaler, nationaler oder sogar europäischer Ebene übernehmen können. In Haushalten könnten neuronale Netze dabei helfen, den Energieverbrauch im Haus zu optimieren, indem sie individuelle Verbrauchsmuster erkennen und Empfehlungen zur effizienteren Nutzung geben können.[10] Automatisches Erkennen von Verbrauchsmustern ist mit einer Optimierungsfunktion nicht möglich. Ein Sekundärmarkt zum Handeln von Leistungsquoten könnte auch Teil dieses neuronalen Netzes sein. Ein neuronales Netzwerk könnte über eine genaue Datenanalyse, Vorschläge für einen effizienten Ausbau des Verteilnetzes geben. Auf europäischer Ebene könnten sie dazu beitragen, die Integration von erneuerbaren Energien zu koordinieren und den grenzüberschreitenden Energiefluss zu optimieren.

7 Schlussbetrachtung

Diese wissenschaftliche Arbeit beschäftigt sich mit der Erweiterung eines bestehenden GEMS um die Möglichkeit der Gebotsabgabe auf einem quotenbasierten Sekundärmarkt. Durch die Einführung neuer Entscheidungsvariablen $P_{\text{market},\text{consum}_t}$ und $P_{\text{market},\text{feedin}_t}$, sowie Parametern und Nebenbedingungen wird die mögliche Anpassung der Quote ermittelt. Durch die Prüfung, ob eine Bezugs- oder Einspeisegrenze in der Quote vorliegt, wird die entsprechende Nebenbedingung in das Modell eingeführt und daraus die mögliche Quotenanpassung berechnet.

Darüber hinaus erhöht der Algorithmus (1) die Anzahl der abgegebenen Gebote für eine Quotenanpassung auf dem Sekundärmarkt, da er den zuvor in der Iteration ermittelten Wert für die Menge der Quotenanpassung durch Einfügen einer unteren Schranke ausschließt. Dadurch wird in der nächsten Iteration ein anderer Wert für die auf dem Sekundärmarkt zu platzierende Quotenanpassung ermittelt, sodass mit diesem Algorithmus vier voneinander verschiedene Fahrpläne für die Anlagen eines Haushalts mit unterschiedlich hohen Quotenanpassungen ermittelt werden. Durch eine steigende Anzahl an Geboten steigt die Wahrscheinlichkeit des erfolgreichen Zusammenführens von Angebot und Nachfrage. Durch die erhöhte Anzahl an Geboten wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass alle Gebote auf dem Sekundärmarkt befriedigt werden können. Es wird nicht berücksichtigt, ob es für jedes Angebot einen Abnehmer gibt. Da dies in der Realität nicht zutrifft, müsste ein Markt simuliert werden, um dies genauer zu untersuchen.

Da sich der Preis auf einem Markt aus dem Verhältnis von Angebot und Nachfrage ergibt und diese Arbeit es den GEMS ermöglicht, auf einem sekundären Markt für Leistungsquoten zu bieten, wird ein konstanter Referenzpreis pro gehandeltem Watt für die Quotenanpassung angenommen. Die Simulation eines solchen Marktes wäre der nächste Schritt, um einen regionalen Marktplatz für Leistungsquoten in die Realität umzusetzen. Die Analyse des Preises basierend auf Angebot und Nachfrage auf dem Sekundärmarkt bietet Potenzial für weitere wissenschaftliche Arbeiten. Dies könnte für Netzbetreiber von großem Interesse sein, da sie durch Eingriffe in Angebot und Nachfrage den Preis und damit das Verbraucherverhalten beeinflussen können.

Grundsätzlich bietet die in dieser wissenschaftlichen Arbeit thematisierte Erweiterung der Zielfunktion die Möglichkeit der Gebotsabgabe auf einem quotenbasierten Sekundärmarkt und bildet damit die Grundlage für einen späteren Handel mit Leistungsquoten. Dieser Ansatz muss jedoch an einem Markt getestet und analysiert werden, um weitere Erkenntnisse über den Einfluss von Angebot und Nachfrage sowie die Wirkung des Preises als Steuerungselement auf das Verhalten der Marktteilnehmer zu analysieren. Der Handel mit Leistungsquoten bietet eine gute Möglichkeit, der Dezentralisierung der Energieerzeugung und dem damit verbundenen Anstieg der bidirektionalen Lastflüsse im Verteilnetz

entgegenzuwirken. Lastspitzen können durch den Handel vermieden werden. Haushalte erhalten die Möglichkeit, an diesem Markt teilzunehmen und im besten Fall durch den Handel Gewinne zu erzielen. Darüber hinaus kann es zu einer zukünftig notwendigen Bewusstseinsänderung der Marktteilnehmer in Bezug auf die Verfügbarkeit von Strom führen. Diese wissenschaftliche Arbeit bietet dafür einen Baustein, muss aber durch weitere ergänzt werden, um einen solchen Markt in der Realität zu etablieren und seine Auswirkungen zu verstehen.

Literatur

- [1] AHLERS, E. *Smart Grids und Smart Markets – Roadmap der Energiewirtschaft*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014, pp. 97–123.
- [2] AICHELE, C., AND DOLESKI, O. D. *Smart market: Vom smart grid zum intelligenten energiemarkt*. Springer-Verlag, 2014.
- [3] BDEW. Konkretisierung des ampelkonzepts im verteilungsnetz. diskussionspapier, 2017.
- [4] BÜHNER, V., BUCHHOLZ, B. M., AND PROBST, A. Neue dienstleistungen und geschäftsmodelle für smart distribution und smart markets. In *VDE-Kongress, Berlin und Offenbach: VDE-Verlag* (2012).
- [5] DÜRR, T., AND HEYNE, J.-C. Virtuelle kraftwerke für smart markets. *Herausforderung Utility 4.0: Wie sich die Energiewirtschaft im Zeitalter der Digitalisierung verändert* (2017), 653–681.
- [6] GEARHART, J. L., ADAIR, K. L., DURFEE, J. D., JONES, K. A., MARTIN, N., AND DETRY, R. J. Comparison of open-source linear programming solvers.
- [7] HART, W. E., LAIRD, C. D., WATSON, J.-P., WOODRUFF, D. L., HACKEBEIL, G. A., NICHOLSON, B. L., SHIROLA, J. D., ET AL. *Pyomo-optimization modeling in python*, vol. 67. Springer, 2017.
- [8] KOLIOU, E., EID, C., CHAVES-ÁVILA, J. P., AND HAKVOORT, R. A. Demand response in liberalized electricity markets: Analysis of aggregated load participation in the german balancing mechanism. *Energy* 71 (2014), 245–254.
- [9] LEHMANN, N., KRAFT, E., DUEPMEIER, C., MAUSER, I., FÖRDERER, K., AND SAUER, D. Definition von flexibilität in einem zellulär geprägten energiesystem. *Zukünftige Stromnetze 2019*, 30 (2019), 459–469.
- [10] ROCHA, H. R., HONORATO, I. H., FIOROTTI, R., CELESTE, W. C., SILVESTRE, L. J., AND SILVA, J. A. An artificial intelligence based scheduling algorithm for demand-side energy management in smart homes. *Applied Energy* 282 (2021), 116145.
- [11] SAATMANN, S., AND MAEDING, S. Energiewende und regulierung–wie werden sonne und wind im stromnetz integriert und reguliert? *Leipzig, Germany, 23-24 September 2013*, 13.

-
- [12] SCHNEIDER, J., RAECK, M., AND REICHENBACH, F. Die bedeutung des energiehandels für smart energy-geschäftsmodelle. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 63 (2013), 10–12.
- [13] SIANO, P. Demand response and smart grids—a survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30 (2014), 461–478.

Erklärung

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Arbeit selbstständig verfasst, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderungen entnommen wurde sowie die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung beachtet zu haben.

Karlsruhe, 25. September 2023

Jonas Möck