

Bericht des Zukunftslabor Energie über das AP 1.4 des Teilprojekts 1



Eingereicht von: Laura Niemann, Zukunftslabor Energie
Autor*in: Sarah Fayed , Sarah K. Lier, Jan Philipp Hörding , Tobias Lege, Annika Ofenloch,
FernandoPeñaherrera, Jan Petznik, Alejandro Rubio, Ihsan Ünal, Henrik Wagner

Sprecherin: Prof. Dr.-Ing. Astrid Nieße
Zentrum für digitale Innovationen Niedersachsen (ZDIN)

Beteiligte Institutionen:

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg/OFFIS e.V. (Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff, Prof. Dr.-Ing. Astrid Nieße)

DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme (Prof. Dr. Carsten Agert)

Leibniz Universität Hannover (Prof. Dr. Michael H. Breitner)

Technische Universität Braunschweig (Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel)

Ostfalia Hochschule (Prof. Dr.-Ing. Lars Kühl)

Hochschule Emden/Leer (Prof. Dr. Johannes Rolink)

Im vorliegenden Dokument wird der Zeitraum von 01.04.2023 bis 30.06.2024 dargestellt.

Der vorliegende Bericht gehört zum Teilprojekt „TP1: Erforschung von IKT-Abhängigkeiten in Quartiersversorgungssystemen“

Inhaltsverzeichnis

1	Generelle Informationen.....	4
2	Erforschung von IKT-Abhängigkeiten in Quartiersversorgungssystemen.....	5
2.1	Durchstichszenario E-Mobilität.....	6
2.2	Durchstichszenario Netzbetrieb.....	8
2.3	Durchstichszenario Gebäude.....	11
2.3.1	Einleitung.....	11
2.3.2	Forschungsziel.....	11
2.3.3	Vorgehensweise.....	12
2.3.4	Modellierung.....	13
2.3.5	Simulationsergebnisse.....	19
2.3.6	Ausblick.....	25
2.4	Durchstichszenario IKT-Störungen.....	27
2.4.1	Einleitung.....	27
2.4.2	Forschungsziele.....	27
2.4.3	Vorgehensweise.....	27
2.4.4	Modellierung.....	31
2.4.5	Simulationsergebnisse.....	34
2.4.6	Ausblick.....	38
2.5	Durchstichszenario Flexibilität.....	40
2.5.1	Einleitung.....	40
2.5.2	Flexibilität in thermischen Komponenten.....	40
2.5.2.1	Forschungsziel.....	40
2.5.2.2	Vorgehensweise.....	41
2.5.2.3	Modellierung.....	41
2.5.2.4	Simulationsergebnisse.....	43
2.5.2.5	Ausblick.....	44
2.5.3	Flexibilität in elektrischen Komponenten.....	45
2.5.3.1	Forschungsziel.....	45
2.5.3.2	Vorgehensweise.....	45
2.5.3.3	Modellierung.....	45
2.5.3.4	Simulationsergebnisse.....	48
2.5.3.5	Ausblick.....	51
3	Veröffentlichungen.....	52
4	Literaturverzeichnis.....	54

1 Generelle Informationen

Dieser Bericht sammelt die Ergebnisse von AP 1.4 im Zeitraum von April 2023 bis Juni 2024. Die Ergebnisse werden entsprechend ihrer Ausarbeitungsform in diesem Dokument sowohl textlich als auch in Visualisierungen dargestellt. Die entwickelten Methoden, Software, Modelle und Simulationsumgebungen werden über das ZDIN-ZLE GitLab dokumentiert bereitgestellt (Link: <https://gitlab.com/zdin-zle/scenarios>).

Im Rahmen des Teilprojekts TP1 erfolgt eine Untersuchung der IKT-Abhängigkeiten in Quartiersversorgungssystemen sowie deren komplexe Wechselwirkungen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei auf der Entwicklung dynamischer Szenarien, welche eine Wiederverwendung ermöglichen und relevante Elemente von Quartiersversorgungssystemen berücksichtigen.

Im Rahmen des Arbeitspakets 1.4 erfolgt eine systematische Untersuchung und Dokumentation von Quartiersversorgungsszenarien und Anwendungsfällen. Diese Untersuchung basiert auf den in den vorherigen Arbeitspaketen entwickelten fünf Durchstichszenarien, für die in AP1.3 bereits Szenari entwürfe erstellt und teilweise Modellimplementierungen vorgenommen wurden. In AP 1.4 wurden diese Szenarien weiterentwickelt und verfeinert, um Simulationen zu ermöglichen. Die Simulationsmodelle wurden durch Experimente und gegebenenfalls iterative Anpassung weiter optimiert.

AP1.4

Verantwortlich: UOL/OFFIS

Kurzbeschreibung

Die Szenarien- und Modellparametrierung wird konsolidiert. Sind qualifizierte Annahmen für spezifizierte Bereiche nicht möglich, werden Sensitivitätsstudien über plausibel anzunehmende Parameterbereiche durchgeführt mit dem Ziel, Instabilitäten oder Phasenübergänge zu identifizieren. Die Experimente werden auf der Basis statistischer Versuchsplanung (unter Verwendung systematisch reduzierter teilfaktorierter Experimente) durchgeführt. Dies erlaubt Flexibilität bei der Berücksichtigung unterschiedlich (Laufzeit-) effizienter Simulationen und Experimente in Abhängigkeit der verwendeten Simulations- und Labormodelle bzw. -komponenten.

Start	Ende
M37	M54
Erforderliche Inputs	Outputs
Ergebnisse aus AP1.1-1.3: <ul style="list-style-type: none"> - Szenari entwürfe aus AP1.1 - Modellimplementierungen und Co-Simulationplattform aus AP1.3 - Lauffähige Co-Simulationsszenarien aus TA1.4.1 - Durchstichimplementierung inkl. sämtlicher Modelle (in Teilen noch als Stubs) aller Partner 	D1.4, M1.4

2 Erforschung von IKT-Abhängigkeiten in Quartiersversorgungssystemen

Das Teilprojekt 1 befasst sich mit der „Erforschung von IKT-Abhängigkeiten in Quartiersversorgungssystemen“. Gegenstand der Untersuchung sind die Informations- und Kommunikationstechnologien sowie die Energieversorgungsinfrastruktur in digitalisierten Wohnquartieren. Das dem Teilprojekt untergeordnete Arbeitspaket 1.4 fokussiert die Durchführung von systematischen Experimenten, Tests und Analysen zur Untersuchung der Quartiersversorgungsszenarien und Anwendungsfälle.

Die bereits in Arbeitspaket 1.3 thematisierten fünf themenfokussierten Durchstichszenarien (Gebäude, Flexibilität, E-Mobilität, IKT-Störungen und Netzbetrieb) wurden einer Verfeinerung und Weiterentwicklung unterzogen. Diesbezüglich wurde auch das Übersichtsbild aktualisiert, welches die Szenarien, ihre Aufgaben und ihre Komponenten darstellt (siehe Abbildung 1).

Szenario 1 GEBÄUDE HOCHSCHULE OSTFALIA	Szenario 2 FLEXIBILITÄT UNIVERSITÄT OLDENBURG	Szenario 3 E-MOBILITÄT TU BRAUNSCHWEIG	Szenario 4 IKT-STÖRUNGEN OFFIS	Szenario 5 NETZBETRIEB DLR-VE
Quartierssimulation mit 5R1C-Gebäudemodellen in einer Co-Simulation	Multimodale Flexibilitätsnutzung im Quartier zur Lösung von Problemen im Stromnetz	Netzaufnahmefähigkeit für E-Mobilität in Quartieren mit energetischem Sanierungsbedarf	Auswirkungen von Ausfällen und Verzögerungen in der Kommunikation auf die Energieversorgung	Laborvernetzte Co-Simulation zum robusten Betrieb hoch digitalisierter Niederspannungsnetze
Gebäudemodell Hochschule Ostfalia Wärmepumpe, PV-Modell OFFIS Co-Simulation OFFIS	Flexibilitätsmodellierung Universität Oldenburg Netzsimulation, PV-Modell Hochschule Emden/Leer Gebäudesimulation Hochschule Ostfalia Co-Simulation OFFIS	E-Mobilität & Speichermodell TU Braunschweig statische Daten, Netzsimulation Hochschule Emden/Leer Co-Simulation, PV-Modell OFFIS Entwicklung Method Universität Hannover	Co-Simulation, PV-Modell OFFIS Kommunikationsmodelle OFFIS statische Daten, Netzsimulation Hochschule Emden/Leer Speichermodell TU Braunschweig Flexibilitätsmodelle Universität Oldenburg	Robuster Netzbetrieb, Co-Simulation DLR-VE Netz(ebenen)simulation, Laborschnittstellen Hochschule Emden/Leer Wärmepumpe, Laborschnittstellen Hochschule Ostfalia

Abbildung 1: Übersicht der fünf Durchstichszenarien

Aufgrund der erkannten inhaltlichen und technischen Abhängigkeiten zwischen den Szenarien wurde eine sequenzielle Bearbeitung der Durchstichszenarien durchgeführt. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung wurden die Szenarien E-Mobilität und Netzbetrieb als besonders geeignet identifiziert, um den Bearbeitungsprozess zu beginnen. Die Auswahl von E-Mobilität erfolgte aufgrund seiner Verknüpfung mit einer Vielzahl von Arbeiten, die auch in anderen Durchstichszenarien verwendet werden können. Netzbetrieb wurde aufgrund seiner relativen Eigenständigkeit priorisiert. Diese Vorgehensweise ermöglichte eine umfassende Darstellung der beiden Szenarien in dem Bericht zum Arbeitspaket 1.3.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass sich die Bearbeitung der weiteren Szenarien an den Erkenntnissen aus dem E-Mobilitäts-Szenario orientieren konnten. Dabei wurde besonderer Wert auf die Wiederverwendbarkeit der Modelle gelegt, die nicht nur in weiteren Szenarien genutzt, sondern durch ihre Veröffentlichung auch über das Projekt hinaus angewendet werden können. Die Ausarbeitung der Szenarien Gebäude, Flexibilität und IKT-Störungen konnte somit auf bisherigen Arbeiten aufbauen, diese weiterentwickeln und an die spezifischen Fragestellungen der jeweiligen Durchstichszenarien anpassen und erweitern.

In Konsequenz dessen wurde der weitere Aufbau des Berichts derart konzipiert, dass in den Kapiteln 2.2 und 2.3 die nachfolgenden Arbeiten der Szenarien E-Mobilität und Netzbetrieb dargelegt werden.

Die Kapitel 2.4 bis 2.6 umfassen die ausführlich bearbeiteten Szenarien Gebäude, IKT-Störungen und Flexibilität. Zu Beginn jedes Szenarios wird ein Link bereitgestellt, der auf einen Tag in GitLab für das jeweilige Szenario verweist.

2.1 Durchstichszenario E-Mobilität

Gitlab Tag: [D1.3 Zukunftslabor Energie ZN3488](#)

Das Durchstichszenario E-Mobilität wurde bereits im vorherigen Bericht zum Arbeitspaket 1.3 ausführlich erläutert. Hierbei wurde die Zielstellung, die fertig entwickelte Co-Simulation und die erzielten Ergebnisse vorgestellt und somit schlussendlich die Wirksamkeit der entwickelten Modelle zur Analyse und Erhöhung der Netzaufnahmefähigkeit von Wohnquartieren für E-Mobilität nachgewiesen. Folglich ist der Stand des Repositorys mit dem Tag für D1.3 noch aktuell.

Anschließend wurde im Durchstichszenario eine Best Practice bzw. Method zur Abbildung des gewählten Forschungsprozesses entwickelt. Hierbei sind zwei Publikationen entstanden. Zum einen ein Short Paper mit dem Titel „Efficient Collaboration in Interdisciplinary Teams – an Electromobility Research Example“ (doi: 10.5281/zenodo.11570770). Zum Anderen wurden aus dieser Veröffentlichung wesentliche Kernergebnisse unter gleichem Titel im Rahmen einer Posterpräsentation (doi: 10.5281/zenodo.11567933) auf dem „6th Workshop on Applied Science“ in Hannover präsentiert. Die entwickelte Best Practice / Method wird darüber hinaus als Inhalt auf der im Rahmen von TP2 entwickelten Forschungsplattform bereitgestellt. Die wesentlichen Kernaspekte der entwickelten Best Practice / Method werden im Folgenden verkürzt dargestellt.

Ziel der entwickelten Best Practice / Method ist es, Forschungsprozesse in interdisziplinären Teams zu optimieren und zu verbessern. Grundlage war die Forschung des Durchstichszenarios E-Mobilität bezüglich der Netzintegration von Elektrofahrzeugen in Wohnquartieren. Der Ansatz basiert auf offenen Wissenschaftsstandards, die den Wissenstransfer, die Transparenz und die Wiederverwendbarkeit von (Co-)Simulationsmodellen und Szenarien sicherstellen. Der entwickelte methodische Rahmen umfasst fünf verschiedene Phasen. Diese sind in der nachfolgenden Abbildung 2 dargestellt und werden anschließend sukzessiv erläutert.

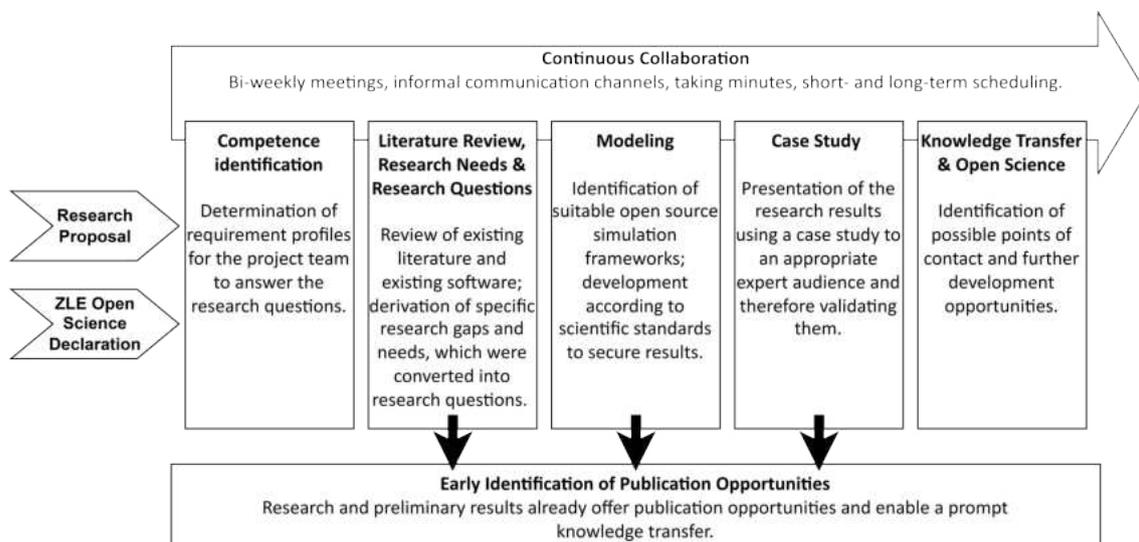


Abbildung 2: Abbildung der fünf Phasen der entwickelten Best Practice / Method zur Nachbildung des Forschungsprozesses des Durchstichszenarios E-Mobilität [25]

(1) Kontinuierliche Zusammenarbeit und frühzeitige Identifizierung von Publikationsmöglichkeiten

Das Team des Durchstichszenarios E-Mobilität pflegte eine systematische Organisation und Planung, indem eine Person mit der Führung betraut wurde. Regelmäßige zweiwöchentliche Treffen (Jour-Fixes) dienten dazu, Zwischenergebnisse zu präsentieren und die nächsten Schritte zu besprechen. Diese Treffen wurden dokumentiert, um den Fortschritt zu verfolgen. Agile Projektmanagement-Tools, einschließlich Gantt-Diagrammen, erleichterten die Projektverfolgung und -planung. Informelle digitale Kommunikationskanäle, z.B. Mattermost, ermöglichten den fortlaufenden Ideenaustausch, Feedback und die Organisation von virtuellen Treffen bzw. Online-Meetings, was die frühzeitige Identifizierung von Publikationsmöglichkeiten förderte. Dies führte schlussendlich zu einer Reihe von Veröffentlichungen in verschiedenen Phasen des Forschungsprozesses im Durchstichszenario E-Mobilität.

Insgesamt wurde der Transfer in die wissenschaftliche Literatur an vier Punkten im Forschungsprozess sichergestellt. In der ersten Veröffentlichung wurde ein systematisches Literature-Review durchgeführt, um Forschungslücken, Forschungsbedarfe und Anforderungen zu identifizieren [4]. Darüber hinaus wurde aus den Ergebnissen der Literaturrecherche die Forschungsagenda für den weiteren Forschungsprozess abgeleitet. In der zweiten Veröffentlichung wurden der entwickelte Modellierungsansatz und die damit verbundene Tool-Auswahl einem breiten Fachpublikum aus dem Bereich der (Energie-)Informatik vorgestellt [21]. In der dritten Veröffentlichung wurde der entwickelte Steuerungsmechanismus zur Netzintegration der Elektrofahrzeuge publiziert, um das notwendige Detailniveau darstellen zu können [7]. In der vierten und wichtigsten Veröffentlichung wurde die entwickelte Co-Simulation zur Analyse und Erweiterung der Netzaufnahmefähigkeit von Wohnquartieren für E-Mobilität zusammen mit einer anschaulichen Fallstudie vom „Am Ölper Berge“ Quartier in Braunschweig, Niedersachsen veröffentlicht [22]. Die Veröffentlichung umfasst die entwickelten Modelle, Szenarien und verwendeten Daten [23]. Alle Artikel wurden auf renommierten Konferenzen oder Fachzeitschriften veröffentlicht. Hierbei lag der Fokus auf Konferenzbeiträgen, um direkte Diskussionen mit anderen Wissenschaftlern zu fördern und den interdisziplinären Austausch weiter voranzutreiben.

(2) Kompetenzidentifikation

Eine Analyse der bestehenden Kompetenzen des interdisziplinären Teams wurde zu Beginn durchgeführt, um die individuellen Stärken und verschiedenen Wissensstände effektiv zu nutzen. Anschließend wurden Arbeitspakete basierend auf dem grundsätzlichen Forschungsziel der Analyse der Netzintegration von E-Mobilität in Wohnquartieren identifiziert und diese Arbeitspakete den Mitgliedern zugewiesen. Da dies basierend auf ihren Interessen und Kompetenzen geschah, wurde die intrinsische Motivation der Mitarbeitenden gefördert. Zudem wurden die Kompetenzen der Mitarbeitenden durch gezielte Schulungen, wie z.B. zur Softwarequalität, weiter erhöht.

(3) Literature-Review und Forschungsfragen

Im Kontext der Netzintegration von Elektrofahrzeugen in (Wohn-)Quartieren wurden mehr als 80 relevante Veröffentlichungen in den letzten zehn Jahren identifiziert. Mithilfe eines textmining-basierten Tools wurden Trends und Forschungslücken ermittelt. Die Häufigkeit ähnlicher Forschungsthemen zeigte das Potenzial von Open-Source-Software zur Vermeidung von doppelten Entwicklungen und zur Steigerung der Wiederverwendbarkeit. Inspiriert von Vorarbeiten [24] und verfeinert durch die Literature-Review wurden Forschungsfragen formuliert, um eine Open-Source Co-Simulation zur Analyse und Erweiterung der Netzaufnahmefähigkeit von Wohnquartieren für E-Mobilität zu entwickeln.

(4) Modellierung

Kenntnisse in Programmiersprachen, insbesondere Python, und zugehörige Analysewerkzeuge waren für die Phase der programmtechnischen Modellierung essenziell. Kriterien für die Auswahl des Simulationsrahmens und der Modelle umfassten Modularität, Wiederverwendbarkeit, Transparenz und Überprüfbarkeit. Daten und Modelle wurden aus Open-Access-Datenbanken bezogen, wobei die Wiederverwendbarkeit in der Gemeinschaft betont wurde. Das Co-Simulations-Framework mosaik wurde ausgewählt, um diesen Kriterien zu entsprechen [12].

(5) Fallstudie

Eine Fallstudie zur Analyse der Netzaufnahmefähigkeit wurde im Stadtteil „Am Ölper Berge“ in Braunschweig, Niedersachsen, Deutschland, durchgeführt. Eine detaillierte Analyse der Bedürfnisse des Stadtteils führte zur Entwicklung entsprechender Szenarien, inklusive datenspezifischer Sammlung. Die Simulationsszenarien ermöglichten Sensitivitätsanalysen zur Erhöhung der Netzaufnahmefähigkeit für Elektromobilität. Hierbei wurden nutzerorientierte Verbesserungsmöglichkeiten wie die kooperativen Energieerzeugung und -speicherung sowie zentrale Steuerungssysteme betrachtet.

(6) Wissenstransfer und Open Science Standard

Die Wissenschaftler:innen des ZDIN-ZLE-Projekts verpflichteten sich bereits zu Projektbeginn zu einem Open Science Standard, wie in ihrer „Open Science Declaration“ dargestellt ist [28]. Daher sind alle entwickelten Szenarien und Modelle des Durchstichszenarios E-Mobilität in einem öffentlichen Repository frei zugänglich, ebenso wie die für die Fallstudie gesammelten Daten. Dieser Ansatz gewährleistet Transparenz, erleichtert den Wissenstransfer und unterstützt die schnelle, kontinuierliche Entwicklung im Bereich der Energiesystemmodellierung.

2.2 Durchstichszenario Netzbetrieb

Gitlab Tag: [D1.4 Zukunftslabor Energie ZN3488](#)

In Bericht zum Arbeitspaket 1.3 wurden im Szenario Netzbetrieb Anwendungsfälle gezeigt, in denen Simulationen mit Labor-Hardware in geografisch getrennten Standorten miteinander gekoppelt wurden. Bisher wurde jedoch als Schnittstelle zur Hardware jeweils noch eine Matlab/Simulink Umgebung eingebunden. Mit der Integration des Wärmesektors soll diese Zwischenebene nun vermieden werden und ein Datenaustausch direkt auf Anlagen bzw. Feldebene erfolgen. Ziel ist es eine Wärmepumpe im Labor der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften als flexible Last mit einzubinden. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Vortests dargestellt.

Aufbau

Die für die Versuche geplante Wärmepumpe besitzt keine eigene Kommunikationsschnittstelle. Daher erfolgt die Ansteuerung und Überwachung über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) mit Analog- und Digitalsignalen. Die SPS ersetzt wie in Abbildung 3 gezeigt eine Simulation. Es findet nun eine direkte Kommunikation zwischen Simulink und der Steuerung über UDP statt.

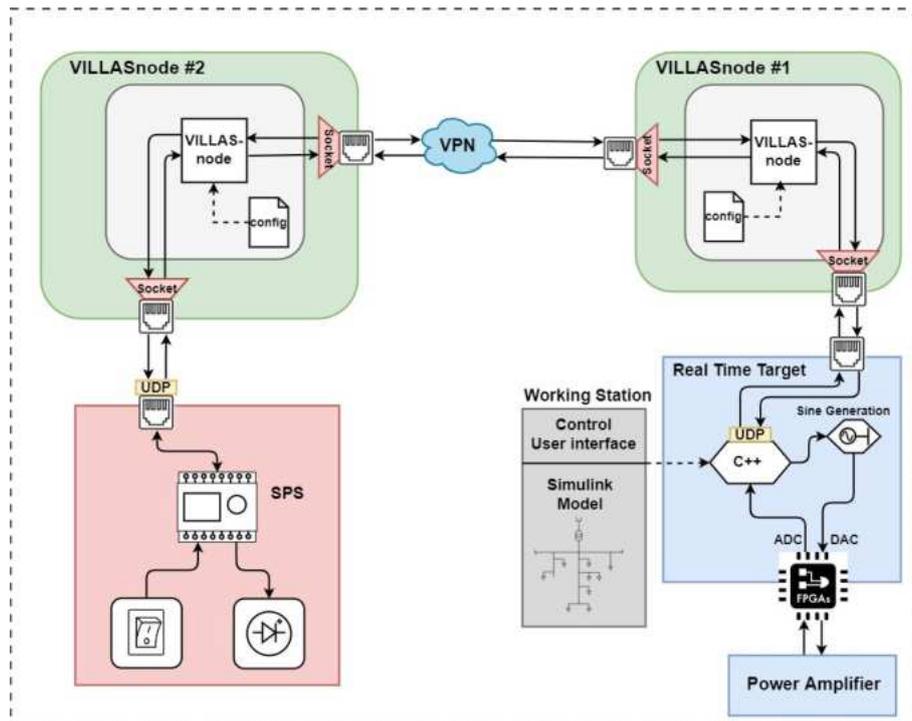


Abbildung 3: Die Einbindung der SPS der Wärme erfolgt nun direkt mit dem Kopplungsframework und nicht über eine Simulations-Zwischenebene.

Für die Versuche wurde erneut die MONA 1 Netzstruktur genutzt (siehe Abbildung 4). Anstelle der flexiblen Verbraucher in den Laboren der Hochschule Emden/Leer und dem DLR in Oldenburg wurden die Lasten im Netzmodell so verändert, dass die Steuerung über die SPS erfolgt. Daran angeschlossen sind drei Schalter mit denen zwei Lasten in ihrer Leistung auf 4,2 kW begrenzt werden und beim dritten ein dem Netzzustand angepasster Leistungsbezug aktiviert werden kann. Die Knoten 16 und 21 werden durch Schalter 1 und 2 gesteuert und mit dem dritten Schalter wird die dynamische Leistungsanpassung von Last 3 eingeschaltet.

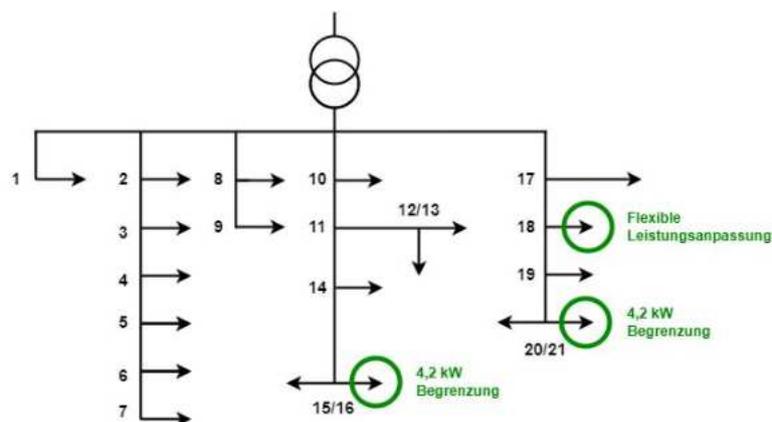


Abbildung 4: MONA 1 Netzstruktur mit Aufteilung der steuerbaren Lasten an den Knoten 16, 18, 21.

Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt eine Simulation, bei der die drei Schalter nacheinander betätigt wurden. In Phase II wird der Leistungsbezug an Knoten 16 über Schalter 1 zugeschaltet. Die Belastung führt zu einem Abfall der Spannung im Netzbereich. Mit Betätigung von Schalter 2 in Phase III wird Last 21 zugeschaltet, was wiederum zu einer Absenkung der Spannung führt. Mit Schalter 3 wird dann die dynamische Last aktiviert, die neben dem Bezug auch in der Lage ist Leistung einzuspeisen. Die träge

Regelung führt zu einem Ausgleich der Leistung von Knoten 21 und die Spannung kann auf das Niveau von Phase II stabilisiert werden. Mit eingeschalteter flexibler Last sind die Regelungseffekte auch beim Abschalten der Lasten von Knoten 16 und 21 in den Phasen V und VI zu erkennen.

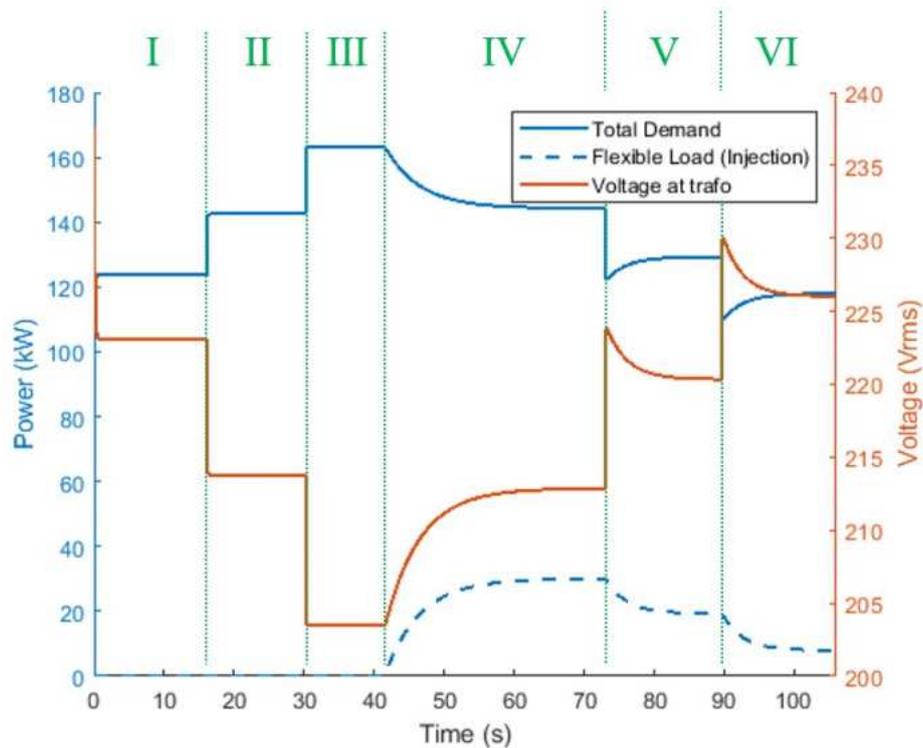


Abbildung 5: Steuerung der Lasten in der Simulation über Eingaben in die SPS

In den nächsten Schritten wird die Aufmerksamkeit verstärkt dem sicheren Betrieb und der Einbindung der Wärmepumpe gewidmet. Die SPS darf bei Unterbrechungen der Internetverbindung nicht in einen instabilen Zustand geraten, was in bisherigen Simulationen nur durch die Simulationsebene in Simulink verhindert wurde. Weitere gemeinsame Untersuchungen des Gesamtsystems, bestehend aus den drei Laboren der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, der Hochschule Emden/Leer und dem DLR, sollen die Effekte unterschiedlich schneller Energiesektoren auf die Bereitstellung von Flexibilitäten aufzeigen.

2.3 Durchstichszenario Gebäude

GitLab Tag: [D1.4 Zukunftslabor Energie_ZN3488](#)

2.3.1 Einleitung

Die Bundesregierung hat beschlossen, dass Deutschland bis zum Jahr 2045 klimaneutral werden soll [2]. Dies bedeutet, dass sämtliche fossile Energieträger durch regenerative Energien ersetzt werden müssen. Damit dies gelingen kann, muss der Energiebedarf allgemein gesenkt und die Energienetze samt ihrer Erzeuger-, Verbraucher-, Speicher- und Verteilsysteme für das dynamische Verhalten regenerativer Energiequellen ertüchtigt werden. Dabei spielt der Gebäudebestand eine entscheidende Rolle. Mit einem Anteil von 27,6 % für die Raumheizung und weiteren 5,1 % für die Warmwasserbereitung macht der Energieverbrauch etwa ein Drittel des Gesamtenergieverbrauchs Deutschlands aus [18]. Insbesondere beim Gebäudebestand aus den Jahren vor 1990 ist nach einer energetischen Sanierung mit einem erheblichen Einsparpotenzial zu rechnen. Der Großteil der im Gebäudebestand eingesetzten Energieträger besteht aus Heizöl und Erdgas, deren Substitution durch regenerativ betriebene Erzeugeranlagen, wie z.B. Wärmepumpen, zu einer erheblichen Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen kann.

Im Rahmen des Durchstichszenario Gebäude wird ein Stadtquartier mit Bestandsgebäuden aus den Baujahren 1941 bis 1954 bestehend aus ca. 400 Wohneinheiten und einer Wohnfläche von ca. 25.000 m² betrachtet. Der Fokus liegt hierbei auf der thermischen Gebäudesimulation in Abhängigkeit von Wetter, dem Nutzerverhalten und der Beschaffenheit der Hüllfläche sowie der für die Versorgung benötigten Energiesysteme.

2.3.2 Forschungsziel

Die simulationsgestützte Ermittlung des Energiebedarfs von Gebäuden ist nicht nur für Eigentümer oder Verwalter von Interesse, auch Energieversorger und Kommunen müssen sich im Zuge der kommunalen Wärmeplanung mit dem jeweiligen Gebäudebestand auseinandersetzen und entsprechende Bedarfsanalysen aktuell und in Zukunft durchführen. Die Ergebnisse aus den Energiebedarfsanalysen bilden die Grundlage für die Konzeptionierung der übergeordneten Versorgungssysteme wie z.B. die Strom- oder Wärmenetze. Ein Ziel ist es eine Simulationsgrundlage für die zuvor angesprochenen Energiebedarfsanalysen zu erstellen.

Im Rahmen des Durchstichszenarios wird ein Gebäudemodell entwickelt, welches umfangreich über Parameterangaben angepasst wird, und so ein breites Spektrum von Wohngebäuden im Bestand abbilden kann. Durch die Anpassung des Modells an die Co-Simulationsplattform mosaik wird der Funktionsumfang für weitere Durchstichszenarien, wie z.B. zur Untersuchung der Flexibilität, zur Verfügung gestellt. Ein weiteres Ziel des Szenarios ist es, das Quartier mithilfe des entwickelten Gebäudemodells hinsichtlich des Energiebedarfs zu analysieren. Dies dient als Grundlage für die Bearbeitung detaillierterer Forschungsfragen. Dabei werden im Quartier der Heizwärmebedarf für die Raumheizung und Warmwasserbereitung sowie der elektrische Energiebedarf in den einzelnen Wohneinheiten berücksichtigt.

In einem Referenzszenario (Baseline) wird der Energiebedarf im Bestand des Quartiers abgebildet. Ein weiteres Szenario beschreibt, wie das Quartier in Zukunft mit Energie versorgt werden könnte und welche Energieverbräuche unter Berücksichtigung weiterer energetischer Maßnahmen an der Gebäudehülle, wie z.B. durch eine Fassadendämmung oder den Austausch der Fenster, möglich sind.

In beiden Quartiersszenarien werden Wärmepumpen als Wärmequelle für die Raumheizung verwendet. Die Warmwasserbereitung wird zum Teil ebenfalls durch die Wärmepumpen bzw. mit elektrischen Durchlauferhitzern abgedeckt. Die damit einhergehende Elektrifizierung der

Wärmeversorgung und die damit verbundenen Auswirkungen auf das Stromnetz sollen ebenfalls im Durchstichszenario Gebäude untersucht werden. Um die Auswirkungen auf das Stromnetz umfänglich bewerten zu können wird das Laden von Elektrofahrzeugen ebenfalls in die Simulation integriert.

2.3.3 Vorgehensweise

Die oben genannten Ziele erfordern die Entwicklung eines Variantenvergleichs, bei dem mehrere Konfigurationen der Energiesysteme und des Gebäudebestands berücksichtigt und verglichen werden können. Für jedes Quartierszenario wird eine Simulation durchgeführt, und die Ergebnisse werden miteinander verglichen. Dabei werden die Auswirkungen auf verschiedene gekoppelte Modelle der Systemkomponenten, wie Energieverbraucher (z.B. Gebäude, Elektrofahrzeuge), Energiewandler, Energiespeichersysteme und das Stromnetz, bewertet.

Um diese Modelle zu verbinden, wird ein Co-Simulationsansatz gewählt. Das ermöglicht die Verwendung von Komponenten, die im vorherigen Szenario entwickelt wurden, und die Entwicklung neuer Modelle, die gemäß den Spezifikationen des im AP 1.2 entwickelten Anforderungskatalogs erstellt werden. Das für den Variantenvergleich gewählte Quartier „Am Ölper Berge“ in Braunschweig wird bereits in anderen Durchstichszenarien behandelt. Es verfügt über eine umfangreiche Dokumentation zum Gebäudebestand und dem elektrischen Versorgungsnetz und bildet so eine solide Basis, die nun um die Gebäudesimulation erweitert wird.

In einem ersten Schritt wird der Energiebedarf im Bestandsquartier bewertet. Die Parameter der Gebäudemodelle beschreiben in dieser Variante die physikalischen Eigenschaften und Baumaterialien der thermischen Hüllfläche, bestehend aus Fenstern, Wänden und dem Dach, so wie sie tatsächlich vorhanden sind. Diese Informationen werden für die verschiedenen im Quartier vorhandenen Gebäudetypen ermittelt und in Excel-Listen zusammengeführt. Die Excel-Listen werden für die Simulation in Eingangsdaten umgewandelt und anschließend für die Gebäudemodelle verwendet.

Das Ziel ist es, eine Grundlage für den Variantenvergleich zu gewährleisten. Hierbei werden zunächst weitere Zukunftsszenarien erstellt, in denen die Parameter der Gebäude und der Komponenten entsprechend angepasst werden. Ein Überblick über die im Simulationsmodell enthaltenen Komponenten des Energieversorgungssystems, bestehend aus Wärmeerzeugern, Wärmespeichern, elektrischen Speichern, Photovoltaiksystemen und Stromnetzversorgung, ist in Abbildung 6 dargestellt.

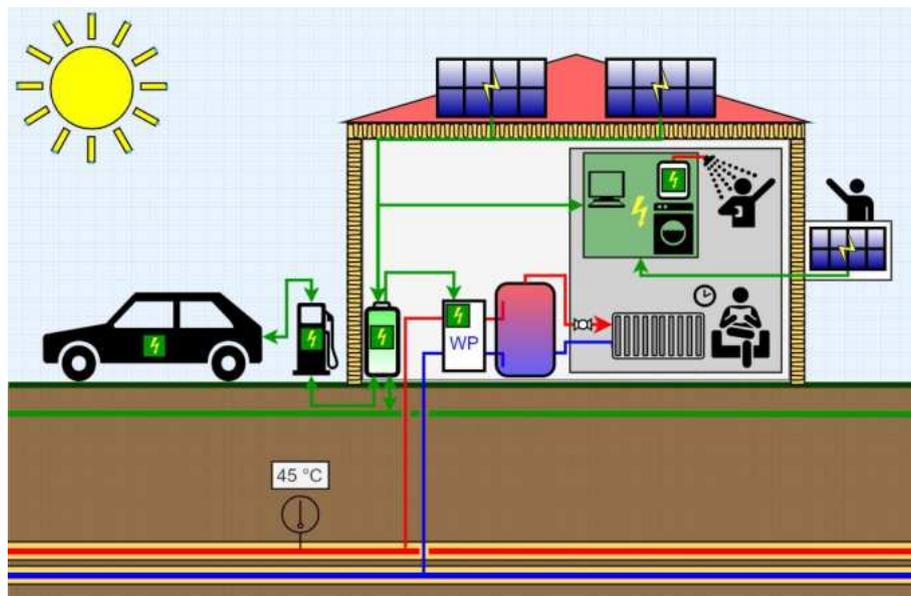


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Energiekonzepts für das Quartier

Darüber hinaus werden die verschiedenen Komponenten durch Regelungsmechanismen unterstützt, die eine Überwachung und Steuerung der Temperatursollwerte ermöglichen. Diese Regelungsmechanismen ermöglichen beispielsweise die Regulierung der Temperatur der Wärmeenergieversorgung, die Einstellung der gewünschten Innentemperatur im Gebäude und die Aufrechterhaltung eines Mindesttemperaturniveaus in den Wärmespeichern.

In Bezug auf den elektrischen Energiebedarf der Gebäude werden Ergebnisse aus einer Studie zum elektrischen Energiebedarf verschiedener Gebäudetypen verwendet und zusammengestellt [1]. Diese Informationen werden in ihre einzelnen Komponenten getrennt und zu verschiedenen zufälligen Profilen aggregiert, um Energiebedarfsprofile für jedes einzelne Gebäude zu erstellen. Die Dimensionierung der verschiedenen Komponenten erfolgt entsprechend dem jeweiligen Energiebedarf. Beispielsweise werden die PV-Komponenten basierend auf der verfügbaren Dachfläche jedes Gebäudes dimensioniert. Thermische Komponenten werden entsprechend dem thermischen Energiebedarf jedes Gebäudes ausgelegt.

Jedes Gebäude wird als eine Einheit betrachtet, in der die verschiedenen Komponenten für Energieversorgung und -bedarf integriert sind. Ein Gebäudeenergiemanagementsystem aggregiert Informationen über die Energieproduktion, den lokalen Bedarf und gleicht die lokalen Energieflüsse aus.

2.3.4 Modellierung

Für die Modellierung dieser Fallstudie wurde die Co-Simulation als Ansatz gewählt. Dieses Modellierungsverfahren ermöglicht den Aufbau einzelner Komponenten und die Kopplung der Ein- und Ausgaben jedes Modells miteinander. Es bietet mehrere Vorteile für die Entwicklung der Fallstudie, insbesondere die Möglichkeit, verschiedene Komponenten unabhängig voneinander zu entwickeln und bestehende Komponenten zu integrieren. Die Ein- und Ausgaben jedes Modells werden mithilfe des Co-Simulationsframeworks verbunden. Das ermöglicht die Kopplung der Modelle und die Vermeidung einer monolithischen Entwicklung der verschiedenen Szenarien. Dadurch können mehrere Szenarien entwickelt werden, indem gezielt ausgewählt wird, welche Komponenten implementiert werden sollen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass mehrere Szenarien gemäß den Spezifikationen des Szenarios mithilfe eines Hauptkonfigurationsskripts konfiguriert und parametrisiert werden können. Im Folgenden wird eine Übersicht der implementierten Komponenten gegeben.

Gebäude

Basierend auf dem 5R1C-Widerstands-Kapazitäts-Modell (Resistance-Capacitor) wird ein Gebäudemodell entwickelt. Dieses Modell berechnet die thermischen Lasten, interne und externe Gewinne sowie den Wärmebedarf und das Wärmeangebot, um die Innentemperatur eines Gebäudes zu berechnen. Es basiert auf einer elektrischen Analogie, die mit den Prinzipien der Thermodynamik übereinstimmt. Das in Abbildung 7 dargestellte Modell besteht aus einer einzelnen internen Wärmekapazität und fünf Wärmewiderständen und entspricht dem 5R1C-Modell gemäß der Norm ISO 13790 [10]. Eingabedaten wie meteorologische Bedingungen, der vorherige thermische Zustand des Gebäudes sowie die physikalischen und geometrischen Eigenschaften des Gebäudes werden genutzt, um die Innentemperatur und den Wärmeenergiebedarf in jedem Zeitschritt zu berechnen.

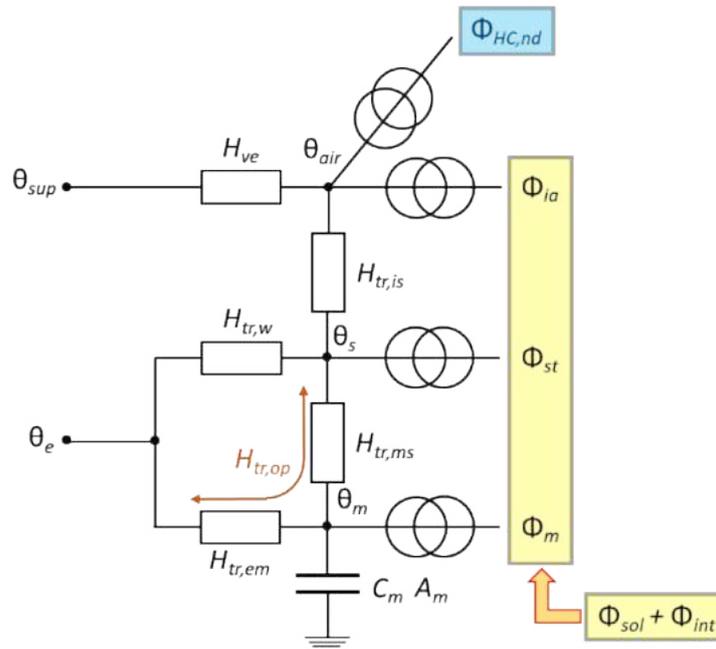


Abbildung 7: Darstellung des 5R1C-Widerstands-Kapazitäts-Modells

Die ursprüngliche Implementierung dieses Modells wurde angepasst und in das mosaik-Framework integriert. Dies ermöglicht die Erstellung mehrerer Modellinstanzen, bei denen die erforderlichen Parameter für jedes Gebäude spezifiziert werden können. Abbildung 8 bietet einen Überblick über die Parameter, die für die Simulation eines Gebäudes benötigt werden. Um die langfristige Zugänglichkeit der Modelle für externe Nutzer zu verbessern, wurde eine Excel-basierte Eingabemaske entwickelt. Mithilfe von Python-Skripten werden diese Informationen aus den Exceltabellen in JSON-Datenstrukturen umgewandelt und dann als Eingabeparameter bei der Erstellung der verschiedenen Modellinstanzen verwendet. Die Verknüpfung von Ein- und Ausgaben wird ebenfalls durch das mosaik-Framework ermöglicht. Die Weiterentwicklungen für jeden Zeitschritt werden von den Simulatoren orchestriert.

Beispiel: Nr. 9 Quartier „Am Ölper Berge“

Name	Beispielwerte/Standardwerte	Einheit	Beschreibung
Connected load heating	29,80	kW	Durchschnittliche Anschlussleistung Heizung
heat storage volume	282,86	Liter	Warmwasser-Speichervolumen
azimut_angel	-41	°	Der Azimutwinkel beschreibt die Abweichung der Nordausrichtung in Winkelgrad
window_area_north	5,05	m ²	Gläserne Fläche der Nordfassade mit Kontakt zur Außenluft
window_area_east	32,39	m ²	Gläserne Fläche der Ostfassade mit Kontakt zur Außenluft
window_area_south	-	m ²	Gläserne Fläche der Südfassade mit Kontakt zur Außenluft
window_area_west	21,86	m ²	Gläserne Fläche der Westfassade mit Kontakt zur Außenluft
walls_area_north	87,55	m ²	Anteil der nicht verglaste Wandfläche der Nordfassade mit Kontakt zur Außenluft
walls_area_east	142,85	m ²	Anteil der nicht verglaste Wandfläche der Ostfassade mit Kontakt zur Außenluft
walls_area_south	-	m ²	Anteil der nicht verglaste Wandfläche der Südfassade mit Kontakt zur Außenluft
walls_area_west	142,85	m ²	Anteil der nicht verglaste Wandfläche der Westfassade mit Kontakt zur Außenluft
roof_area	198,95	m ²	Dachfläche
floor_area	306	m ²	Grundfläche der Zone (NUF nach DIN 277-1)
room_vol	673,2	m ³	internes Luftvolumen einer Zone (Netto-Rauminhalt "NRI" nach DIN277-1) Annahme: Lichtraumhöhe = 2,2 m
total_internal_area	1377	m ²	Fläche aller Wände, Böden und Decken die die Zone umschließen (NUF * 4,5)
lighting_load	0	W/m ²	Interne Gewinne durch Beleuchtung
lighting_control	300	Lx	Einschaltgrenze für die Beleuchtung
lighting_utilisation_factor	0,45		Ein Faktor, der bestimmt, wie viel natürliches Sonnenlicht in einem Raum effektiv genutzt wird. Environmental Science Handbook, SV Szokolay, Abschnitt 2.2.1.3 [1- volle Nutzung, 0- keine Nutzung]
lighting_maintenance_facotor (g-Wert)	0,78		Ein Faktor, der vom Verschmutzungsgrad der Fenster abhängt. Environmental Science Handbook, SV Szokolay, Abschnitt 2.2.1.3 [1- volle Transmission, 0- keine Transmission]

Abbildung 8: Excel-Eingabemaske für die Gebäudemodellparametrisierung

Basierend auf den vorliegenden Informationen zum Quartier wird der Gebäudebestand systematisch nach Gebäudetypen kategorisiert. Diese verschiedenen Gebäudetypen stehen in Korrespondenz zu den einzelnen Gebäuden, die später mit den einzelnen Komponenten verbunden werden, um Informationen zum Energiebedarf auszutauschen. Abbildung 9 zeigt die verschiedenen im Quartier berücksichtigten Gebäudetypen. Je nach Ausrichtung und der Unterscheidung zwischen Reihenmittel- und Reihenendhaus werden weitere Klassen innerhalb eines Gebäudetyps gebildet.



Abbildung 9: Gebäudetypen im Quartier am Ölper Berge

Für jedes Gebäude wurden mithilfe des Tools „DHWcalc“ Profile für die Warmwasserversorgung entwickelt [19]. „DHWcalc“ ist ein Softwarewerkzeug, das Trinkwasser-Zapfprofile auf statistischer Basis generiert. Der Bedarf wird auf Grundlage der Bewohneranzahl für jedes Gebäude ermittelt, wobei der durchschnittliche Warmwasserverbrauch pro Bewohner mit 39 Litern pro Tag angenommen wird. Dies führt zu einem täglichen Warmwasserbedarf von etwa 318 Litern pro Haus, der auf die Anzahl der Haushalte verteilt wird.

Die Profile werden unter Verwendung eines Zufallsfaktors und einer Standardverteilung erstellt, um parallele Profile zu vermeiden. Der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung kann entweder durch direkte elektrische Heizung oder durch einen an das Wärmeversorgungssystem angeschlossenen Warmwasserspeicher gedeckt werden. In den verschiedenen Szenarien wird der Anteil der Gebäude unterschieden, in denen die Warmwasserbereitung entweder dezentral über elektrische Durchlauferhitzer oder zentral über Fernwärme und Speicher erfolgt. Abbildung 10 zeigt ein Beispiel der Profile für den Warmwasserbedarf eines Mehrfamilienhauses über ein Jahr.

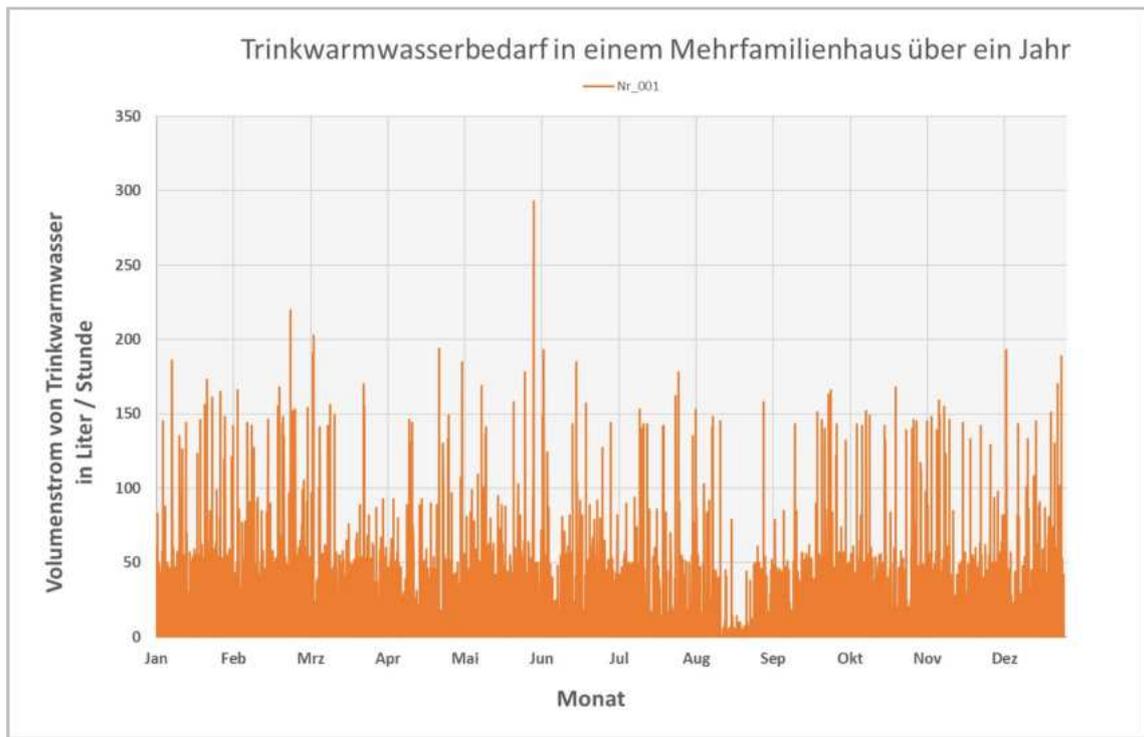


Abbildung 10: Profil für den Trinkwarmwasserbedarf eines Mehrfamilienhauses über ein Jahr

Modellierung der Wärmeversorgung

Die Wärmeenergieversorgung des Quartiers wird mithilfe einer Anordnung von Komponenten modelliert, um die Versorgung mit Heizwärme und Warmwasser je Gebäude simulativ zu untersuchen. Jedes Gebäudemodell verfügt dabei über eigene Speicher, Energieerzeuger, Verbraucher und ein Verteilsystem, das unabhängig voneinander in Abhängigkeit von Heizlast und Warmwasserbedarf gesteuert wird. Ein entsprechendes Energiesystem ist in Abbildung 11 dargestellt.

Heizkörper

Die Heizkörper werden verwendet, um den Energieeintrag in den Innenraum durch Warmwasser zu modellieren. Mithilfe eines LMTD-Modells werden die Vorlauf- und Rücklauf Temperatur sowie die erforderliche Durchflussmenge für die Raumheizung berechnet. Das Modell wird für dieses Szenario entwickelt und basiert auf den Formulierungen in [9]. Für die Integration in die Co-Simulation wird ein Mosaik-Adapter entwickelt.

Wärmespeicher

Wärmespeicher dienen als Puffer zwischen Energieerzeugern und Verbrauchern. Das dafür genutzte Modell stammt aus dem mosaik-heatpump-Paket [11]. Im Wärmespeicher kann der Temperaturverlauf über mehrere Schichten hinweg in Abhängigkeit von Beladung und Entnahme berechnet werden. Neben den Speicherverlusten bietet das Modell die Möglichkeit einer integrierten Warmwasserbereitung auf einem definierbaren Temperaturniveau.

Wärmepumpe

Das Wärmepumpenmodell wird ebenfalls dem mosaik-heatpump Paket entnommen. Es verwendet verschiedene Betriebskennlinien vordefinierter Wärmepumpen und wird zur Berechnung des Strombedarfs des Verdichters für die Wärmeenergieerzeugung verwendet. Das Modell benötigt Informationen zur Außenlufttemperatur, zum Wärmebedarf und zu den vordefinierten Kennlinien,

um die Vorlauftemperatur, die erforderliche Stromzufuhr, die Wärmeabgabe und die Betriebsparameter wie den Coefficient of Performance (COP) zu berechnen. Darüber hinaus kann das Wärmepumpenmodell direkt mit einem Wärmespeicher gekoppelt werden, um Daten wie die Speichertemperaturen in den einzelnen Schichten oder den Beladungszustand auszutauschen.

Steuerung

In diesem Szenario werden Steuereinheiten entwickelt, die den Wärmeenergiebedarf und die Speichertemperatur überwachen, um den optimalen Betriebsmodus auszuwählen. Ziel ist es, Mindesttemperaturniveaus im Speicher aufrechtzuerhalten, eine Überhitzung zu verhindern und den Betrieb der Wärmepumpe zu regeln, damit der Betrieb aufgenommen wird, wenn die Temperatur im System zu niedrig ist oder der Wärmebedarf steigt. Dies trägt zur Vergleichmäßigung des Betriebes, einer Vermeidung von Lastspitzen und damit zu einer Senkung von Stromverbrauchswerten in der Summe und den Spitzenwerten bei.

Elektrische Durchlauferhitzer

In einigen Varianten wird ein dezentrales Power-to-Heat-Gerät verwendet, um die direkte Bereitstellung des Warmwassers mit Strom in den Nuteinheiten zu simulieren.

Kopplung

Der elektrische Energieverbrauch der Wärmepumpe, des elektrischen Heizstabs im Speicher und des elektrischen Durchlauferhitzers wird mit den entsprechenden Lasten gekoppelt, die an den entsprechenden Bus jedes Gebäudes angeschlossen sind.

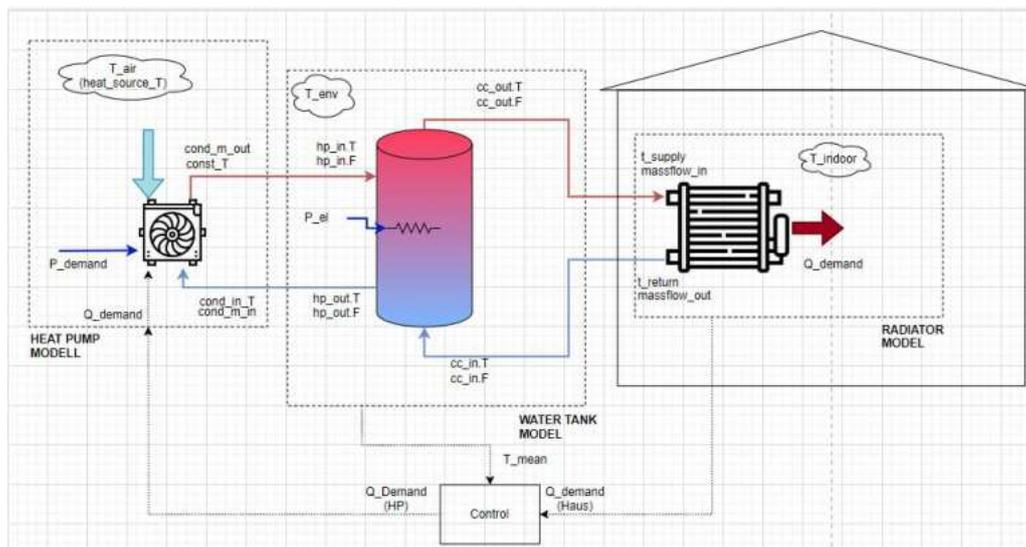


Abbildung 11: Konzept für ein Wärmeneversorgungssystem

Photovoltaikanlage

Jedem Gebäude wird eine Photovoltaikanlage (PV) zugewiesen. Ein Modell für diese Anlage wird auf Grundlage des mosaik-pv-Pakets erstellt [26]. Dieses Modell basiert auf dem Open-Source-Paket pvlb [6] mit einer Implementierung in die mosaik-API. Die PV-Anlagen werden auf Grundlage der geometrischen Informationen des Dachs erstellt, wobei Eigenschaften wie Fläche, Neigung und Ausrichtung verwendet werden. Zur Berechnung der Stromleistung jeder PV-Anlage werden meteorologische Daten von Braunschweig verwendet. Diese Informationen werden dann mit dem entsprechenden Bus des Niederspannungs-Stromverteilungsnetzes gekoppelt.

Elektrische Speicherung

Für die elektrischen Speichersysteme wird ein Modell verwendet, das bereits für das E-Mobilität-Szenario entwickelt wurde. Dieses Modell trägt zur Erhöhung der Flexibilität in der elektrischen Energieversorgung bei. Die Komponenten werden auf Grundlage des jährlichen Stromverbrauchs jedes Gebäudes gemäß den Spezifikationen in [16] dimensioniert. Dieses Modell berücksichtigt Ein- und Ausgänge elektrischer Energie und wird von einem Gebäude-Energiemanagementsystem betrieben, das die Ein- und Ausgänge des Stromverbrauchs in jedem Gebäude berücksichtigt. Jeder Speicher wird als „Storage“-Komponente in das Stromnetzmodell eingekoppelt, wobei Lade- und Entladeinformationen in das Netzmodell eingespeist werden.

Elektrofahrzeuge

Auch die Möglichkeiten der Einbeziehung der Elektromobilität in verschiedene Szenarien werden berücksichtigt. Das wird mit der Einbeziehung eines Automodells modelliert, das auf dem emobpy-Profilgenerator basiert [8] und mit einer Ladestation verbunden wird, die den Ladevorgang des Autos steuert. Diese Modelle sind ebenfalls mit dem Gebäudeenergiemanagementsystem verknüpft, das die Lasten im Gebäude steuert und ausgleicht, einschließlich der Berücksichtigung des PV-Systems, des Haushaltsstrombedarfs, des Strombedarfs der Ladestationen sowie des Status der Stromspeicher. Die Simulatoren wurden zuvor entwickelt und im E-Mobilität-Szenario verwendet.

Stromnetz

Für das Quartier wird ein Modell für das Stromnetz entwickelt. Das Paket mosaik-pandapower [5] wird angepasst, um ein Modell des Quartierstromnetzes zu erstellen. Es erfordert topologische Informationen über das Netz, die Kabeltypen, Transformatoren und Leitungstypen. Das Modell berücksichtigt eine zentrale Transformatorstation für das Quartier, die die Spannung des öffentlichen Netzes senkt und sie dann an jedes Gebäude verteilt. Jedem Gebäude wird ein Bus zugewiesen, und die verschiedenen modellierten Komponenten werden mit diesem Bus verbunden. Abbildung 12 zeigt diese Topologie. Die Informationen zur PV-Produktion, zu den Lade- und Entladelasten der elektrischen Speicher, zu den Ladelasten der EV-Ladestationen sowie zu den Lasten der Wärmepumpen und elektrischen Heizgeräte werden mit den entsprechenden Lastmodellen für jeden Bus gekoppelt. Dieses Modell wird verwendet, um das Netz auszugleichen, Leistungsflüsse zu berechnen und auch die potenziellen Probleme zu bewerten, die sich aus dem steigenden Strombedarf von Wärmepumpen und anderen thermischen Komponenten ergeben.

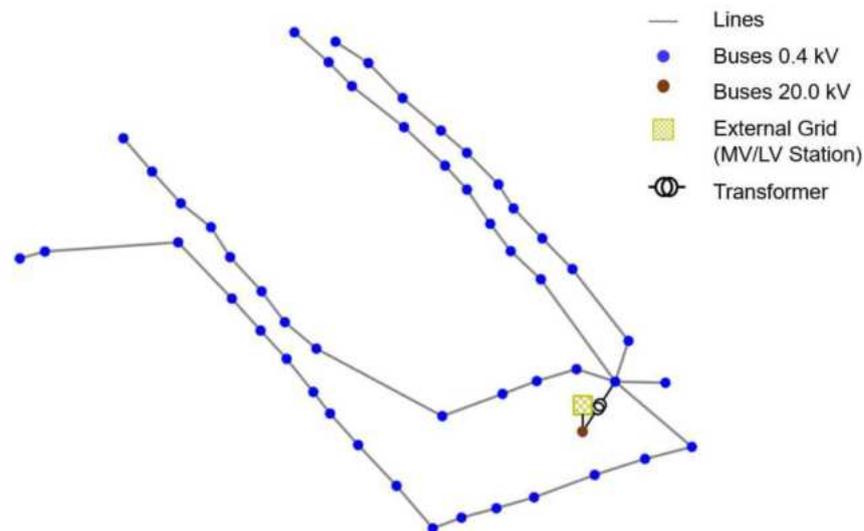


Abbildung 12: Topologie des Quartiersstromnetzes

Laufzeit und Simulationskonfigurationen

Die Simulation wird in 1-Stunden-Schritten über einen Zeitraum von einem Jahr gemäß der Norm ISO13790 ausgeführt [10]. Dadurch kann der Energiebedarf unter verschiedenen saisonalen Bedingungen analysiert und der jährliche Gesamtbedarf sowie weitere Indikatoren wie die äquivalenten CO₂-Emissionen berechnet werden.

Mithilfe mehrerer Skripte können verschiedene Konfigurationen für die Simulation erstellt und konstruiert werden, sodass mit dem Quartier und dessen Komponenten als Untersuchungsobjekt experimentiert werden kann. Ein Basisszenario (BASELINE_2015) berücksichtigt standardmäßige meteorologische Informationen für das Jahr 2015 und den aktuellen Status der Wärmedämmung der Gebäude. Ein zukünftiges Referenzszenario (TARGET_2045) umfasst meteorologische Daten für das Jahr 2045, Verbesserungen an Gebäudehüllen, eine erhöhte Verbreitung der Elektromobilität und einen geringeren Prozentsatz von Gebäuden, die direkte elektrische Heizungen für Warmwasserbereitung nutzen.

2.3.5 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Baseline-Variante werden verwendet, um den Energiebedarf des Systems und die Richtigkeit der gewählten Ansätze zu bewerten. Da sich die Gebäudetypen im Quartier nur geringfügig unterscheiden, sind die Profile des thermischen Energiebedarfs der Gebäude ähnlich. Der Hauptunterschied zwischen den verschiedenen Profilen resultiert aus der Art der Warmwasserbereitung. In Abbildung 13 sind diese Unterschiede zu sehen. Die Gebäude 1, 12 und 28 verfügen über elektrische Durchlauferhitzer für die Warmwasserbereitung, welche dem Strombedarf zugeordnet werden. Daher ist die Kurve der thermischen Energieversorgung dieser Gebäude flacher.

Das Gebäude 46 verfügt hingegen über eine Warmwasserbereitung die direkt in die Wärmepumpe integriert ist. Der dafür benötigte Leistungsbedarf wird entsprechend dem Wärmebedarf zugeordnet und sorgt für die täglichen Spitzen in der Lastkurve. Während die Leistung rein für den Raumwärmebedarf der Gebäude zwischen 2 und 10 kW schwankt, kann die Kombination aus Warmwasser- und Raumwärmebedarf in maximalen thermischen Leistungen von bis zu 18 kW führen.

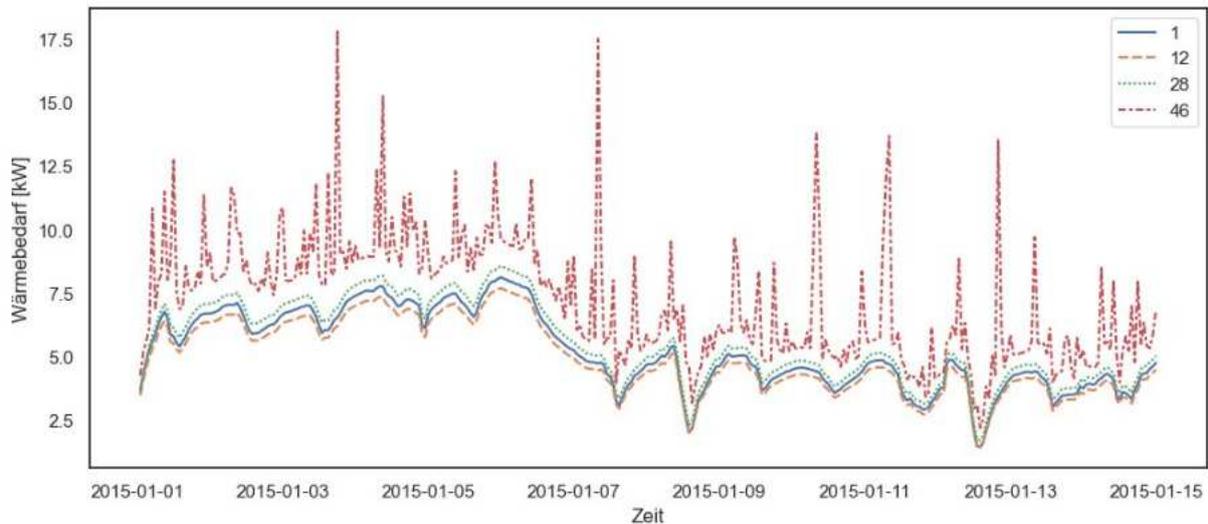


Abbildung 13: Wärmeenergiebedarf der Gebäude im Quartier

In Abbildung 14 ist die elektrische Leistungsaufnahme für verschiedene Haushalte dargestellt. Die Kurven dokumentieren die Verbraucher innerhalb der einzelnen Wohnungen, wie z.B. den Elektroherd, einen Fernseher oder die Raumbelichtung. Großverbraucher wie Wärmepumpen oder Elektroautos sind in diesen Profilen nicht enthalten. Dies dient der Validierung der Modelle und der Untersuchung der unterschiedlichen Profile der Gebäude. Die unterschiedlichen Spitzen stimmen mit den täglichen Mustern überein, die in den elektrischen Energieprofilen der Haushalte zu finden sind.

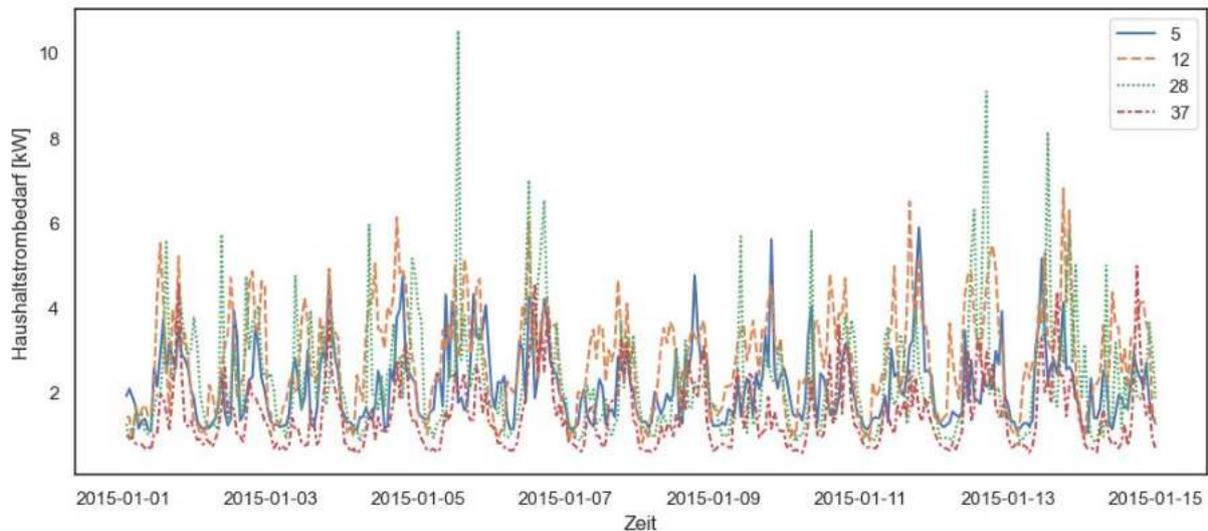


Abbildung 14: Haushaltsstrombedarf

Für den gesamten Stromverbrauch wurden mehrere Szenarien entwickelt, die die thermische Energieversorgung durch eine Wärmepumpe beinhalten. Die Energiebilanz variiert für jedes Gebäude, abhängig von der Systemkonfiguration und den unterschiedlichen Energieanforderungen. Abbildung 15 zeigt ein Beispiel für ein Gebäude, bei dem die Warmwasserversorgung in den Wärmespeicher integriert ist, sodass keine externe Warmwasserbereitung erforderlich ist. In diesem Fall werden die Lastspitzen durch das Laden der Elektrofahrzeuge verursacht, was zu weniger und geringeren Spitzen führt. Dies ist auf die höhere Effizienz der Wärmepumpe zurückzuführen, die dazu beiträgt, Bedarfsspitzen zu reduzieren. Abbildung 16 zeigt den Fall, bei dem die Warmwasserbereitung über elektrische Durchlauferhitzer realisiert wird. Dies führt zu einem höheren Strombedarf und häufigeren

Spitzen. In den Szenarien bleibt das Backup-Heizgerät aus dem Speicher inaktiv, was die Angemessenheit der Steuermechanismen zeigt.

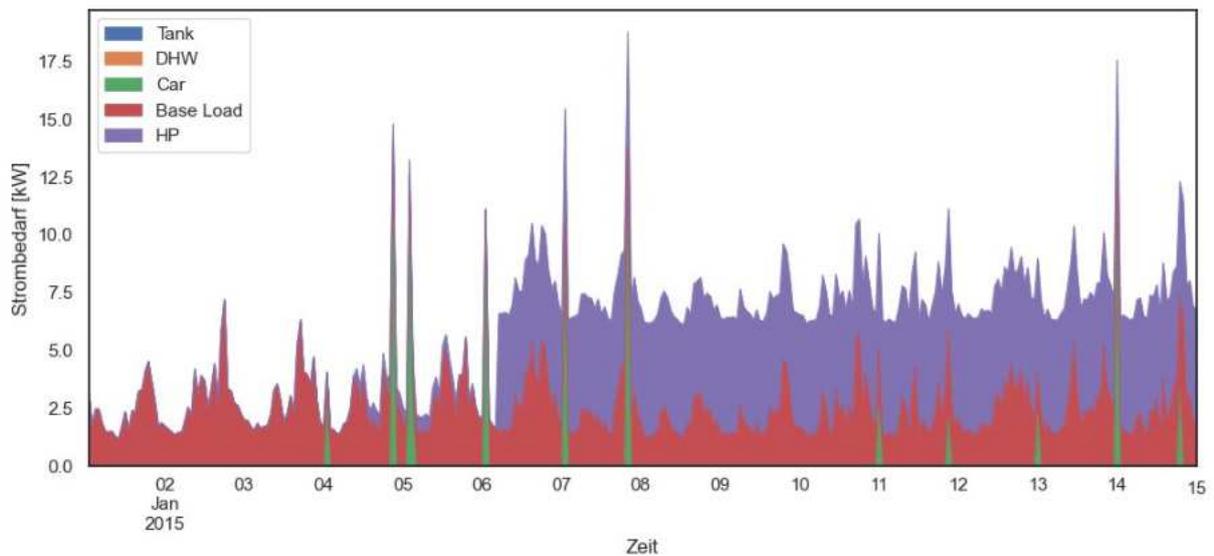


Abbildung 15: Stromverbrauch von Heizgeräten, deren Warmwasserbereitung über das Wärmenetz erfolgt.

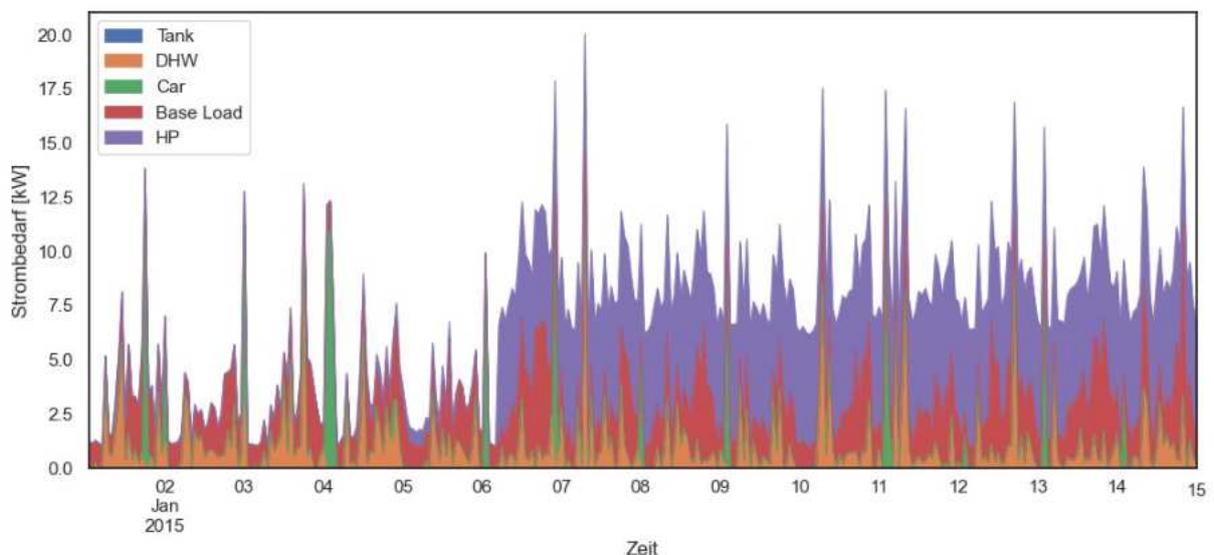


Abbildung 16: Stromverbrauch von Heizgeräten, deren Warmwasserbereitung nicht über das Wärmenetz erfolgt.

Bei der Bewertung des Verhaltens der Wärmepumpe fällt auf, dass das Modell zeigt, dass die Wärmepumpe nicht direkt in Reaktion auf den Wärmebedarf arbeitet, sondern in Abhängigkeit vom Temperaturniveau im Speichertank. Abbildung 17 veranschaulicht dies: Die Wärmepumpe lässt den Tank von seinem Ausgangszustand abkühlen und startet den Betrieb abhängig von den unterschiedlichen Temperaturniveaus des Tanks. Der Heizstab zur Warmwasserbereitung fungiert als Backup-System und wurde im beobachteten Zeitraum nicht aktiviert. Abbildung 18 zeigt, dass der COP des Systems unter 2,5 liegt, was auf die niedrigen Temperaturen im angezeigten Zeitraum zurückzuführen ist.

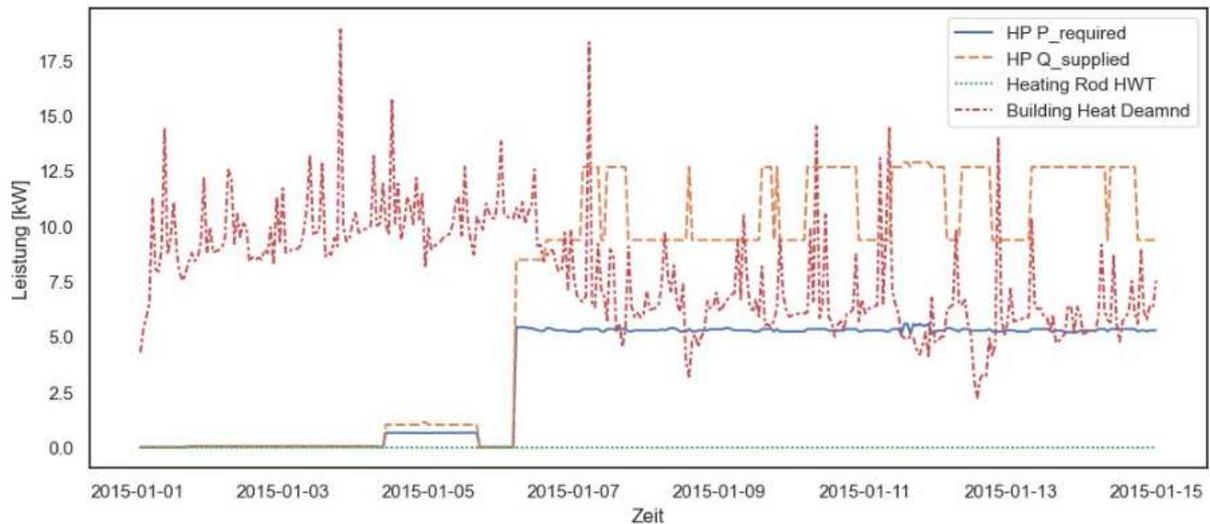


Abbildung 17: Von der Wärmepumpe abgegebene Wärmeenergie und benötigter Strombedarf

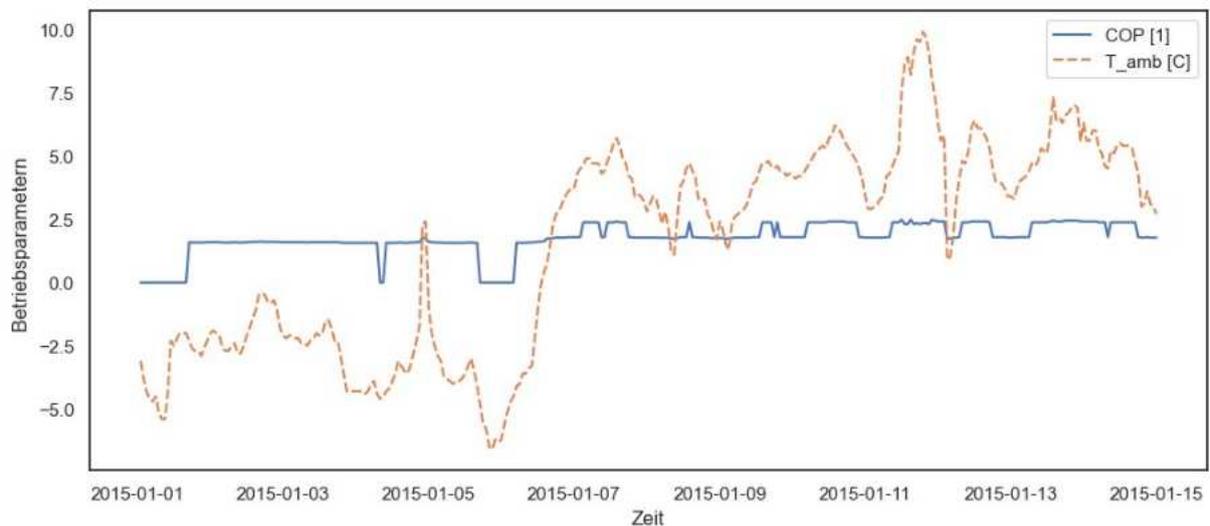


Abbildung 18: Wärmepumpe Betriebsparametern

Im thermischen Speichermodell werden fünf Temperaturen in unterschiedlichen Schichthöhen erfasst. Darüber lassen sich weitere Erkenntnisse zu den Betriebsbedingungen ableiten. Der untere Fühler (θ_0) weist Temperaturen auf, die dem Rücklauf aus dem Heizkreis entsprechen, der durch den Wärmeübergang von den Heizkörpern hin zur Raumluft abgekühlt wird. Die anderen Schichten weisen höhere Temperaturen auf, die durch die interne Durchmischung der Schichten im Speicher entstehen. Die mittlere Temperatur (T_{mean}) wird als primärer Regelparameter für den Betrieb und die Aktivierung der Wärmepumpe verwendet. Die mittlere Temperatur wird bei etwa 50 °C gehalten. Dies entspricht den Einstellungen der Simulation. Abbildung 19 zeigt die unterschiedlichen Temperaturen in den Speicherschichten. Nach dem Ausgangszustand kühlt der Speicher ab und bleibt dann mit Hilfe der Beladung durch die Wärmepumpe auf der Solltemperatur.

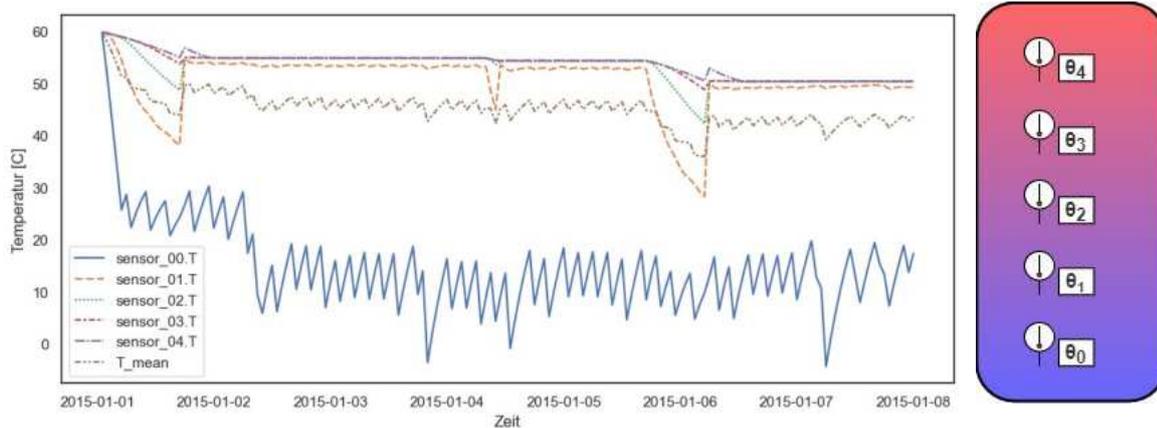


Abbildung 19: Temperaturen an den Tankschichten

Die Auswertung des gesamten Quartiers liefert Informationen zu den Spannungspegeln an den verschiedenen Knotenpunkten, die den einzelnen Gebäuden entsprechen. Abbildung 20 zeigt die Spannungspegel von mehreren Gebäuden. Es ist zu beachten, dass die PV-Energieproduktion zwar die Spannungspegel zur Mittagszeit erhöht, die kritischsten Auswirkungen jedoch oft durch die Überlastung des Netzes aufgrund von Energielasten außerhalb der Haushaltslast entstehen. Die meisten Spannungsbereichsverletzungen kommen von Bussen, bei denen die Warmwasserbereitung über elektrische Durchlauferhitzer, wie z. B. in den Bussen 0, 5 und 15, umgesetzt wird. Diese Geräte belasten das Stromnetz zusätzlich und führen zu Ereignissen, bei denen die Spannungspegel unter die festgelegten Schwellenwerte von 0.95 vm_pu gemäß der Norm DIN EN 50160 & VDE-AR-N 4105 fallen [3, 20]. Weitere Mechanismen zur Bewältigung dieser Spannungsprobleme, wie z. B. die Implementierung von Flexibilität im Netz, müssen untersucht werden.

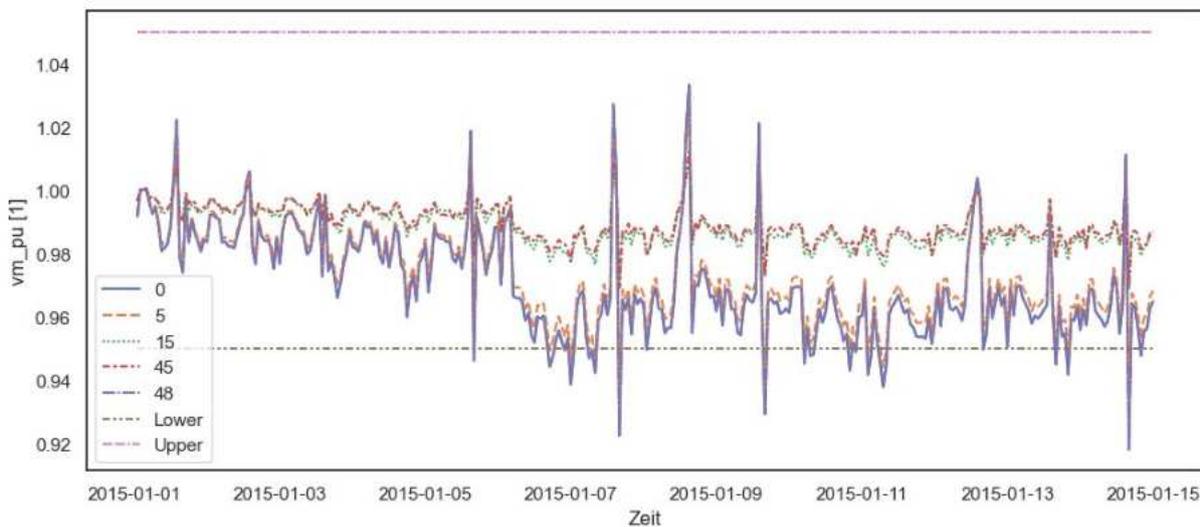


Abbildung 20: Spannungspegel an verschiedenen Bussen, die den Gebäuden des Quartiers entsprechen.

In der Gegenüberstellung der Varianten BASELINE_2015 und TARGET_2045 fallen große Unterschiede im Wärmebedarfs des Quartiers auf (siehe Abbildung 21). Dies sind zum einen auf die angenommenen Verbesserungen der Hüllfläche der Gebäude zurückzuführen. Des Weiteren wird für die Simulation 2045 ein Wetterdatensatz verwendet, der das prognostizierte Ansteigen der Außentemperatur berücksichtigt.

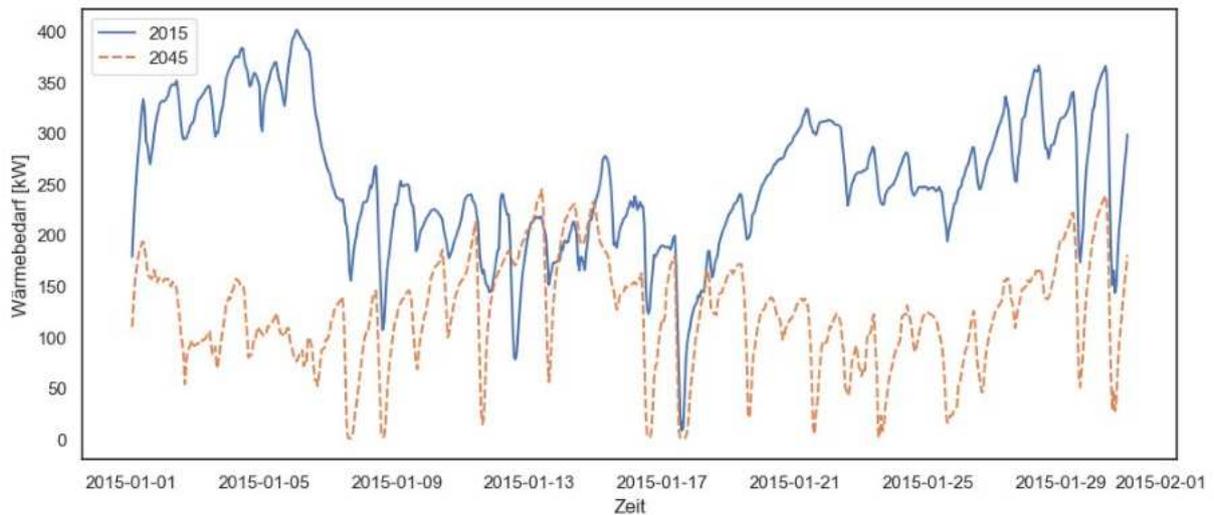


Abbildung 21: Gesamte Quartierswärmeenergiebedarf für die verschiedenen Szenarien

Dieser geringere Bedarf beeinflusst die Systemstabilität und die Fähigkeit des Niederspannungsnetzes, die potenziellen Lasten der Elektrofahrzeuge aufzunehmen. Abbildung 22 zeigt die Anzahl der Spannungsbereichsverletzungen in den verschiedenen Szenarien. Mithilfe der Verbesserungen an den Gebäudehüllen werden die Anzahl der Vorfälle von Niederspannungsbereichsverletzungen in den Bussen drastisch reduziert.

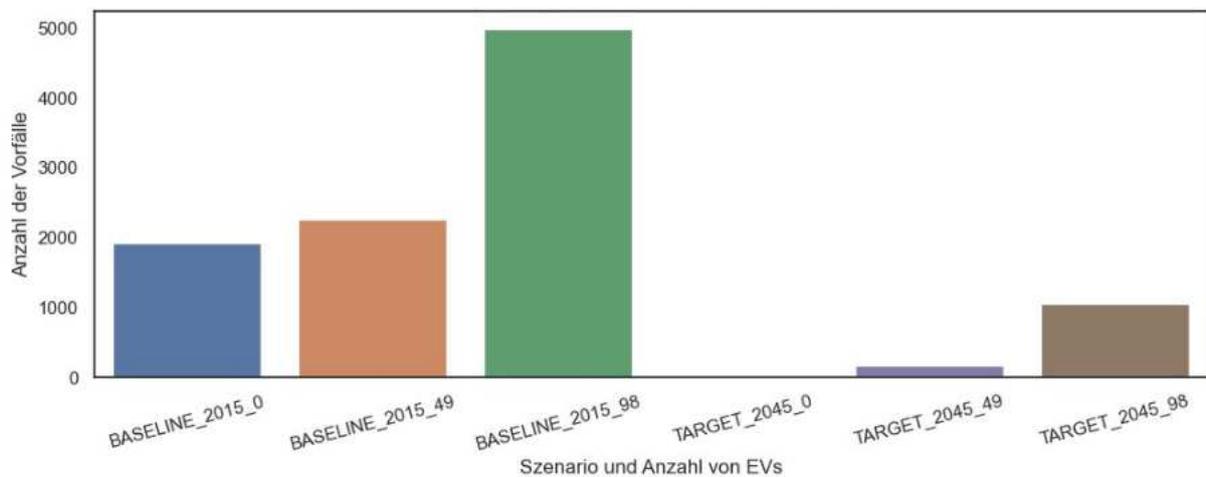


Abbildung 22: Anzahl der Spannungsvorfälle nach Szenario und Anzahl von EVs

In Abbildung 23 wird die Energiebilanz des Variantenvergleichs zwischen den Szenarien BASELINE_2015 und TARGET_2045 dargestellt. Diese zeigt, dass der Heizbedarf im Szenario TARGET_2045 auf etwa 55 % des Heizbedarfs im Szenario BASELINE_2015 reduziert wird. Dadurch können die Systemverluste um 25 % verringert und der Strombedarf um 41 % reduziert werden. Dies ist auf die verbesserte Systemkonfiguration, die effizientere Nutzung von PV-Strom mit Speichern, den effizienteren Betrieb der Wärmepumpe im Vergleich zur P2H-Warmwasserbereitung und vor allem auf den reduzierten Heizwärmebedarf im Szenario TARGET_2045 zurückzuführen.

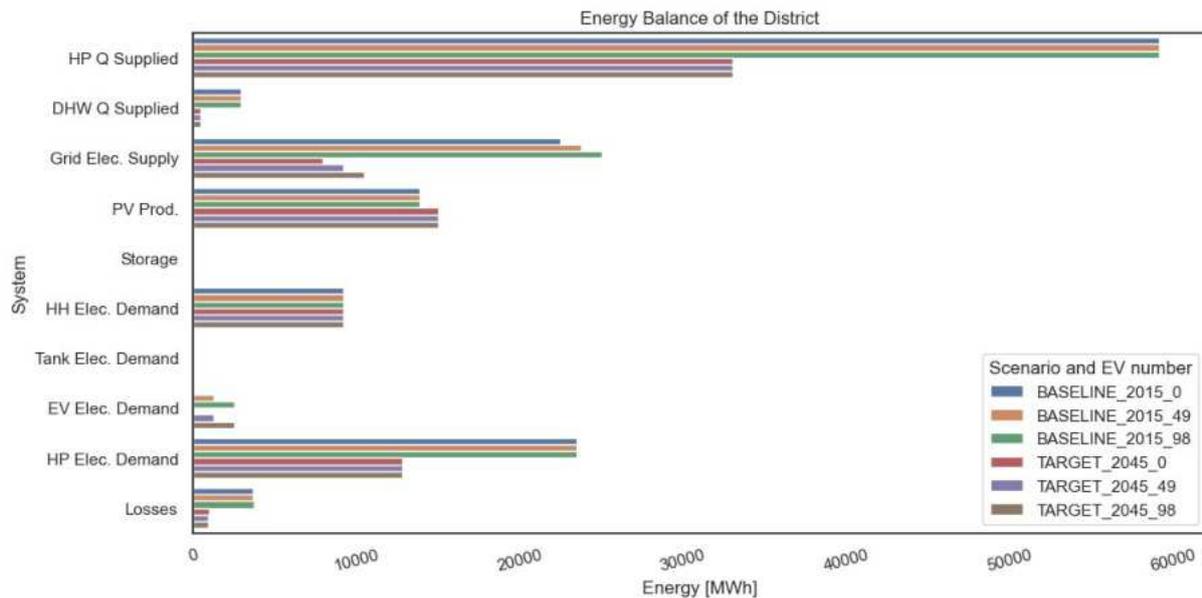


Abbildung 23: Energiebilanz des Bezirks für jede Szenariokonfiguration.

2.3.6 Ausblick

Die vorliegende Simulationsstruktur ermöglicht die Konstruktion verschiedener Varianten, in denen unterschiedliche Energiesystemkonfigurationen für das zu untersuchende Quartier bewertet werden können. Das ermöglicht die Durchführung von Leistungsflussanalysen, die Bewertung der Energieflüsse des Netzes und des Energiebedarfs verschiedener Konfigurationen. Ein wichtiger Aspekt war die Erstellung von Konfigurationen, in denen verschiedene Technologien wie Photovoltaik, Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen mit Wärmespeichern interagieren. Dies ermöglicht die Untersuchung von Netzproblemen, die in einem hochintegrierten Quartier auftreten können. Ein identifiziertes Problem sind die zunehmenden Spannungspegelverletzungen, die sich aus der parallelen Nutzung elektrischer Geräte im Quartier ergeben. Ein weiteres Problem ist der ineffiziente Energieverbrauch von Systemen mit elektrischen Durchlauferhitzern zur Warmwasserbereitung.

Diese hochintegrierten Szenarien verdeutlichen Probleme, für deren lokale Lösung die aktuellen Systeme nicht ausgelegt sind. Die Einbeziehung eines zentralisierten Energiemanagementsystems für das Quartier, das Leistungsflussprobleme durch die Nutzung von Systemflexibilitäten bewältigen kann, könnte ein wirksames Instrument zur Verwaltung und Verbesserung der Fähigkeiten des Smart Grids darstellen.

Die gesammelten Informationen ermöglichen eine Bewertung der technischen Aspekte des Systems, aber auch der Umweltaspekte. Informationen zum Energieverbrauch, gekoppelt mit Referenzwerten zu den damit verbundenen Emissionen von Energieträgern, können zur Bewertung der Nachhaltigkeitsaspekte des Netzes herangezogen werden. Darüber hinaus können mit Hilfe von Kosteninformationen die wirtschaftlichen Aspekte der verschiedenen Szenarien bewertet werden.

Das Durchstichsszenario Gebäude soll um eine ökologische Bewertung erweitert werden. Dazu werden Lebenswegmodule vom Typ B6 (Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes) verwendet. Für jeden eingesetzten Energieträger wird ein passender Datensatz aus der Ökobaudat sowie dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) verknüpft und mithilfe eines Summenverfahrens wird über den Betrachtungszeitraum die jeweilige Umweltwirkung bzw. das Treibhauspotential (GWP) bestimmt.

Zur Analyse der langfristigen Entwicklung der CO₂-Emissionen des Quartiers werden Varianten für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 erstellt. Ziel ist es, die Entwicklung des Treibhauspotenzials zu bestimmen und mit den Anforderungen der Bundesregierung für den Gebäudesektor zu vergleichen.

So lässt sich feststellen, ob die in den Szenarien vorgesehenen Einsparmaßnahmen und verwendeten Energieträger ausreichen, um Klimaneutralität zu erreichen, oder ob zusätzlicher Aufwand erforderlich ist, um die Ziele zu erfüllen. Das Quartier "Am Ölper Berge" eignet sich besonders gut für diese Analyse, da es mit seiner Gebäudetypologie einen Großteil typischer deutscher Stadtquartiere repräsentiert.

2.4 Durchstichszenario IKT-Störungen

GitLab Tag: [D1.4 Zukunftslabor Energie_ZN3488](#)

2.4.1 Einleitung

Die fortschreitende Komplexität von Smart Grids bedingt eine Zunahme an Herausforderungen hinsichtlich der Interoperabilität der verschiedenen Komponenten, die für die ordnungsgemäße Funktion der Subsysteme von Belang sind. Die zunehmende Dezentralisierung der Energiesysteme erfordert auch zunehmende Überwachungs- und Steuerungsinstrumente, damit die verschiedenen Teilsysteme nahtlos integriert werden können, um eine optimale Funktion des Energiesystems zu gewährleisten. Dies muss unter Minimierung von Aspekten wie Energieverlusten, Kosten oder Umweltauswirkungen erreicht werden. Zur Verwaltung moderner Smart Grid Infrastrukturen sind vollständige Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) Systeme erforderlich, damit nicht nur die Stabilität des Netzes gewährleistet ist, sondern auch die Interoperabilität zwischen den verschiedenen dezentralen Systemen möglich ist. Das Vorhandensein einer Kommunikationsschicht im Smart Grid führt zu potenziellen Problemen bei der Kommunikationsleistung und damit des gesamten Netzes. Diese Probleme können sich in Form von Latenzen in der Kommunikation zwischen Geräten, Informationsverlusten bei der Datenübertragung zwischen Akteuren oder im völligen Ausfall der Kommunikation zwischen zwei oder mehreren Geräten äußern. Dies kann Folgen für die Leistung des Energiesystems haben, wie z. B. Verzögerungen bei den Maßnahmen zur Netzverwaltung und Behebung von Netzproblemen oder die Nichterhaltung der Netzstabilität aufgrund von Problemen in der Kommunikation zwischen Komponenten. Darüber hinaus kann dies den optimalen Betrieb und die Stabilität des Netzes weiter beeinträchtigen und zu Kaskadeneffekten führen, wie beispielsweise der vollständigen Abschaltung von Steuergeräten aufgrund von Stromausfällen.

2.4.2 Forschungsziele

Das Durchstichszenario IKT-Störungen hat zwei Hauptziele. Das erste Ziel betrifft die technische Umsetzung eines Co-Simulationsmodells, welches eine Orchestrierung zwischen der Simulation des Stromversorgungssystems und der Simulation des Kommunikationssystems ermöglicht. Dieses Modell soll gekoppelt werden, um die Leistung des Energiesystems zu simulieren und um synchron die Übertragung von Daten zwischen den Kommunikationskomponenten zu simulieren, wenn Ereignisse auftreten, die eine Signalübertragung zur Überwachung und Steuerung des Netzes erfordern.

Sobald die Modelle gekoppelt sind, soll eine weitere Bewertung der Auswirkungen von Kommunikationsproblemen auf die Leistung des Netzes durchgeführt werden. Ziel ist es, Probleme im Kommunikationsmodell, wie etwa Latenzen, zu simulieren und die Auswirkungen dieser Probleme auf die Stabilität des Netzes zu bewerten. Mit einer Auswahl von Indikatoren im Zusammenhang mit Ausfällen in Energiesystemen können die Auswirkungen von Kommunikationsproblemen weiter quantifiziert werden.

2.4.3 Vorgehensweise

Aus den Anforderungen der Modellierung lässt sich ableiten, dass ein Mehrdomänensystem modelliert werden muss. Dieses System muss die Stromversorgung des Netzes, die Modelle für die Steuerungssysteme, die das Netz verwalten, sowie das Modell der bidirektionalen Kommunikation zwischen den Steuerungssystemen und den Geräten zur Stromversorgung berücksichtigen. Da zudem eine Bewertung der Auswirkungen von Kommunikationsproblemen ein Ziel ist, muss eine Fallstudie erstellt werden, um die Auswirkungen dieser Probleme in einer realen Umgebung quantifizieren zu können.

Eine Kopplung zwischen den verschiedenen Systemen erfolgt über ein Co-Simulationstool mit mosaik [17]. Die asynchrone Kopplung der Modelle ermöglicht den Austausch von Informationen zwischen ihnen sowie die Durchführung ereignisbasierter Simulationen, die bei Bedarf einen Datenaustausch in den Modellen durchführen. Zudem kann das Senden und Empfangen von Daten für die Kommunikationskomponenten als Ereignisse modelliert werden, sodass die von den Überwachungs- und Steuerungsgeräten ausgeführten Aktionen mit den entsprechenden Verzögerungen simuliert werden können. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass die Modellierung und Kopplung in einer Open-Source-Umgebung erfolgen können. Dadurch ist eine hohe Transparenz hinsichtlich aller entwickelten Artefakte und des Entwicklungsprozesses selbst gewährleistet.

Als erstes Untersuchungsobjekt wird, wie auch in den anderen Durchstichszenarien, das Quartier „Am Ölper Berge“ ausgewählt. Da die Komponenten zur Energieversorgung bereits in anderen Szenarien entwickelt und evaluiert wurden, ist eine Fokussierung der Simulationsarbeit auf die technische Kopplung des Quartiersmodells mit dem Kommunikationsmodell möglich. Darüber hinaus bietet es auch eine Vergleichsbasis mit vorhandenen Ergebnissen früherer Simulationen. Der Anwendungsfall dient als Experimentierobjekt, bei dem eine Evaluierung mehrerer verschiedener Konfigurationen erfolgt, um die Funktionalität der Kopplung der verschiedenen Subsysteme nachzuweisen. Zudem werden Experimente durchgeführt, um die Ergebnisse unter verschiedenen Bedingungen zu bewerten.

Abbildung 24 gibt einen Überblick über die globale Struktur des Szenarios. Die Architektur des Softwaremodells zur Simulation des Quartiers besteht aus einem Modell für das Energiesystem, einem Modell für das Steuerungs- und Überwachungssystem und einem Modell für das Kommunikationssystem.

Das Stromsystemmodell besteht aus Modellen verschiedener Komponenten, die im Quartier vorhanden sind, um Energie für den Strombedarf bereitzustellen. Dieses Modell des Stromnetzes hat die Aufgabe, den Energieausgleich für die dezentrale Energieversorgung jedes Gebäudes und den Leistungsfluss im Fernstromnetz auszugleichen. Das Gebäudeenergiemanagementsystem (BEMS) überwacht den Lastenausgleich der verschiedenen Energiequellen und der Lasten, wie z. B. Haushaltslast, Speicher oder Ladestation für Elektrofahrzeuge.

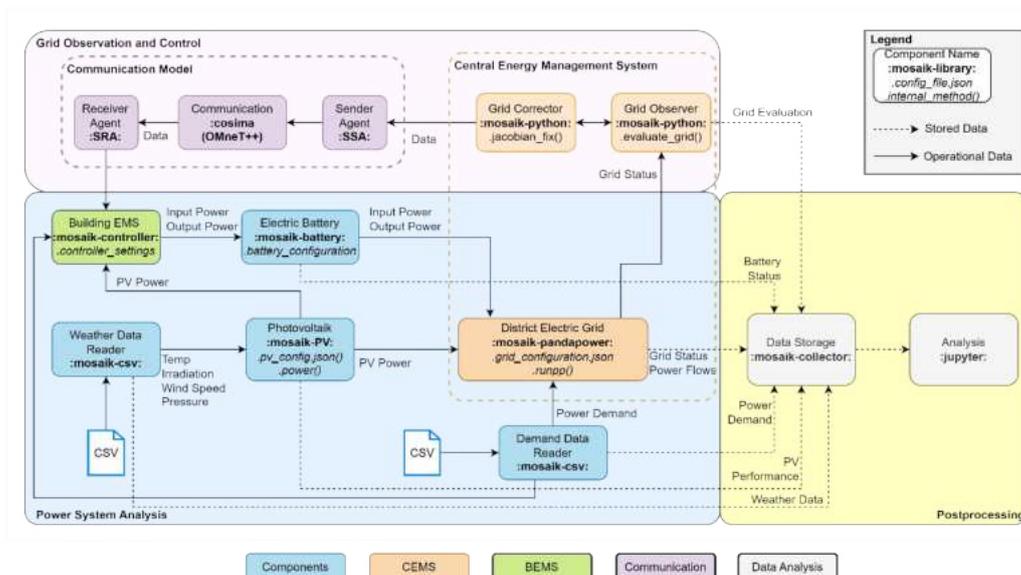


Abbildung 24: Architektur für das Mehrdomänen-Modell für das Smart Grid.

Das zentrale Quartierenergiemanagementsystem (Central Energy Management System, CEMS) wird implementiert, um das Netz zu überwachen und bei auftretenden Netzproblemen Lösungen zu finden. Hierzu wird das gesamte Quartier simuliert, sodass die Stromflüsse im Quartier modelliert werden können. Der zentrale Monitor prüft, ob es Probleme mit den Spannungsniveaus gibt (die auf eine Überlastung hinweisen) und versucht, die Flexibilität des Speichersystems und die verfügbare Ladung/Entladung an jedem dieser Geräte zu nutzen, um das Netz auszugleichen und Spannungsniveauprobleme zu beseitigen. Diese Informationen müssen an das Energiemanagementsystem jedes Gebäudes weitergeleitet werden, das wiederum Maßnahmen zum Laden/Entladen der entsprechenden Batterie ergreift, um das Netz auszugleichen.

Das implementierte Kommunikationsmodell dient der Modellierung der Datenübertragung zwischen den zentralen (CEMS) und den dezentralen Geräten (BEMS). Einerseits modelliert es die Übertragung der Informationen zwischen dem Überwachungssystem und dem zentralen Energiemanagementsystem, das Informationen über das Netz benötigt, um Berechnungen zur Optimierung der Leistungsflüsse durchzuführen. Sobald eine Lösung gefunden wurde, modelliert es andererseits die Informationsübertragung zwischen dem zentralen CEMS und dem dezentralen BEMS und simuliert den Datenaustausch, der die erforderliche Flexibilitätsleistung jedes Speichergeräts enthält.

Bei der Betrachtung der Konfiguration des Systems ist eines der ersten Bewertungsziele die Verzögerung zwischen dem Senden von Informationen zur Netzüberwachung und dem endgültigen Empfang von Daten, die den Flexibilitätsleistungsbedarf enthalten. Hinzu kommt die benötigte Rechenzeit zur Netzoptimierung (im „Grid Corrector“), was die Verzögerungen weiter erhöht. Abbildung 25 zeigt ein Sequenzdiagramm, das die für jeden Datenaustausch verstrichene Zeit veranschaulicht. Die angegebene „Antwortzeit“ ergibt sich aus den Verzögerungen aufgrund des Zeitaufwands für die Berechnung der optimalen Flexibilitätsleistung und der Übermittlung dieser Informationen vom zentralen Agenten an die dezentralen Gebäudeenergiemanagementsysteme. Da außerdem eine bidirektionale Kommunikation erforderlich ist, muss auch die Zeit für die Bestätigung des Datenempfangs berücksichtigt werden.

Konzeptionell liegt der Fokus des methodischen Ansatzes auf einer Simulation der Kommunikation der Optimierungsergebnisse an die verschiedenen Knoten (Abbildung 26). Hier werden zunächst die Ergebnisse der zentralen Energiemanagementsysteme berechnet. Die für diese Berechnung verwendete Zeit wird als erste Verzögerung betrachtet. Anschließend wird die Kommunikation der Ergebnisse dieser Berechnungen an die verschiedenen Knoten über ein Internetprotokoll simuliert. Anschließend werden die Latenzen zwischen der Kommunikation des Datenpakets zwischen dem zentralen Agenten und den dezentralen Agenten berechnet. Diese Datenpakete werden dann als Eingaben an die dezentralen Energiemanagementsysteme weitergegeben, wo eine ereignisbasierte Simulation die Durchführung eines Simulationsschritts zum Zeitpunkt des Eintreffens des Datenpakets ermöglicht. Unter Berücksichtigung dessen wird dann die Gesamtverzögerung des Optimierungs- und Kommunikationsprozesses in die Simulation einbezogen und die Ergebnisse der Latenzen können anschließend ausgewertet werden.

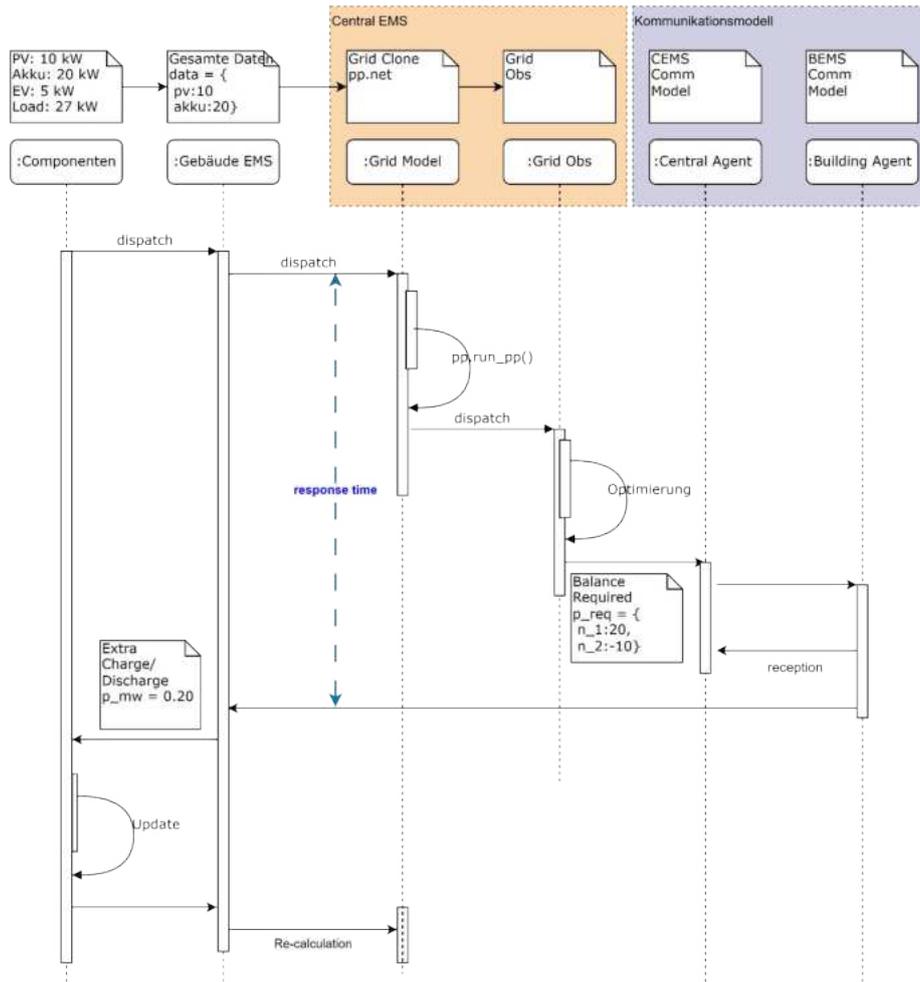


Abbildung 25: Ablaufdiagramm für die Übermittlung der Daten im Quartier.

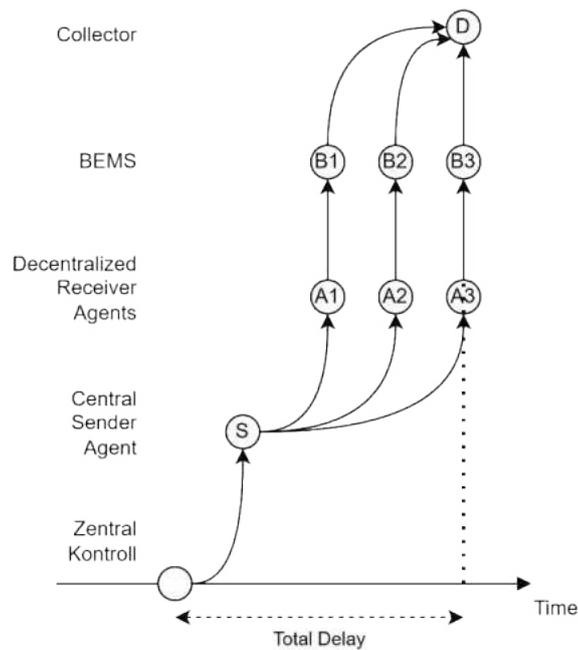


Abbildung 26: Informationsfluss zwischen den Agenten

2.4.4 Modellierung

Die Modellierung eines solchen Mehrdomänensystems erfordert die Simulation unterschiedlicher Komponenten. Auf einer übergeordneten Ebene kann die Modellierung in vier Ebenen unterteilt werden: dezentrale Energieversorgung und -steuerung, zentrale Energieversorgung und -steuerung, Kommunikationsebene und Datenschichtebene.

Dezentrale Energieversorgung und -steuerung

Die Modellierung des Energiesystems folgt dem für das Szenario „E-Mobilität“ etablierten Ansatz. Um die Konzeptualisierung zusammenzufassen, besteht dieser Ansatz in der Modellierung eines realen Quartiers, dessen topologische Konfiguration des Stromnetzes zur Entwicklung eines Modells für die Stromversorgung verwendet wurde. In diesem Quartier wurde jedes Gebäude als Einheit zur dezentralen Energieversorgung modelliert. Jedes Gebäude verfügt über ein Modell für den Strombedarf der Haushalte (modelliert auf der Grundlage standardisierter randomisierter Haushaltsprofile [1]), eine Photovoltaikanlage (modelliert unter Verwendung geometrischer Daten des Gebäudes und meteorologischer Informationen vor Ort), einen Stromspeicher (modelliert über Ladung- und Entladungsprozess für Batterien), und Ladestationen für Elektrofahrzeuge (einschließlich Verfahren für Ladestrategien) gekoppelt mit Modellen für Elektrofahrzeuge (modelliert unter Verwendung von Lade- und Entladeprofilen aus der Bibliothek emob.py [8]). Die Stromflüsse und Anforderungen dieser Geräte werden durch ein dezentrales BEMS verwaltet, dessen Aufgabe es ist, die Stromversorgung und das Laden/Entladen der elektrischen Geräte auszugleichen.

Zentrale Energieversorgung und -steuerung

Für jedes Gebäude gibt es zudem ein Modell zur Stromversorgung auf Basis des Quartiernetzes. Um alle Gebäudemodelle mit einem Niederspannungsnetz zu verbinden, wurde ein auf pandapower basierendes Netzmodell erstellt. Dieses Niederspannungsnetz besteht aus einem Stromnetz, das auf der geografischen und physikalischen Topologie des Quartiers basiert. Das Modell für dieses Netz umfasst Informationen zu den Stromübertragungsleitungen, Bussen und Transformatoren für den Anschluss an das öffentliche Mittelspannungsnetz.

Zur Verwaltung dieses Netzes wird ein System zur Überwachung und Steuerung der Netzbetriebsparameter aufgebaut. Zunächst wird ein Netzmonitor modelliert, der aus einem einfachen Monitor besteht, der die Prüfung der Spannungspegelverletzung vornimmt. Die Spannungspegelbewertung folgt den Kriterien der DIN EN 50160 [3]. Ein „event“ wird festgestellt, wenn die Spannung an einem Bus außerhalb der zulässigen Grenzen von $[0,95-1,05]$ v_{m_pu} liegt. In dem Fall sendet der Monitor ein Signal, dass ein Spannungsproblem erkannt wurde.

Bei der Erkennung von Problemen werden die Informationen über die Stromflüsse des gesamten Quartiers an einen „Grid Corrector“ gesendet, der diese Informationen und Informationen über verfügbare Flexibilitäten des Speichersystems (basierend auf der verfügbaren Lade- und Entladekapazität) aufnimmt. Diese Informationen werden verwendet, um Anforderungen an Stromeinspeisungen zu ermitteln, um die Last an den erforderlichen Bussen zu verringern, die Spannungspegelverletzungen aufzuweisen, und um die erforderlichen Stromeinspeisungen an verschiedenen Bussen zu ermitteln. Dies basiert auf der „Max-Dependencies“-Methode, die im ZLE entwickelt wurde [27]. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in Form einer „dictionary“-Klasse dargestellt, in der die Anforderungen an die Stromeinspeisung für jeden Bus aufgeführt sind.

Diese Daten werden dann an die verschiedenen BEMS verteilt, wo sie zusammen mit den zusätzlichen Anforderungen an die Stromeinspeisung an das Steuerungssystem weitergegeben werden. Dieses wendet die Werte auf das Speichersystem an, um zu versuchen, die Spannungsniveaus zu korrigieren.

Kommunikationsebene

Das zunächst implementierte Kommunikationsmodell hat das Ziel, die Kommunikationsanforderungen des „Grid Corrector“ zu simulieren, die an jedes BEMS gesendet werden müssen. Hierzu muss ein zentrales Gerät verteilte Informationen an jedes Steuergerät für das BEMS senden.

Um die Kommunikation zwischen Agenten zu modellieren, muss zunächst ein Modell für die verschiedenen Geräte entwickelt werden. In OMNET++ wird ein Modell für das Kommunikations-Netzwerk erstellt. OMNET++ ist ein diskreter Ereignissimulator, der Kommunikationsnetzwerke mithilfe von Standardmodellen aus seinen Bibliotheken simulieren kann [14]. Das INET Framework enthält Modellbibliotheken für die verschiedenen Geräte, die zur Kommunikation verwendet werden. Es gibt eine Vielzahl von Modellen, die zur Darstellung jedes einzelnen Agenten im BEMS verwendet werden. Jeder Agent wird als eine Anordnung von Komponenten modelliert, die zum Empfangen der Informationen verwendet werden. Ein Router ist das primäre Gateway für die Verbindung des Gebäudes mit dem Internet, um die erforderlichen Informationen vom zentralen Managementsystem zu erhalten. Das „Router“-Modell in INET ermöglicht die Modellierung von drahtlosen oder Ethernet-Schnittstellen. Über einen Switch wird der Steuerungsagent mit dem Router verbunden. Mehrere Agenten können an denselben Switch angeschlossen werden. In diesem Modell wird jedoch ein Schalter pro Gebäude verwendet. Ein Modell wird mithilfe des „EthernetSwitch“-Modells erstellt. Schließlich wird der Steuerungsagent für jedes Gebäude als „Empfänger“-Client modelliert, der so eingerichtet ist, dass er Informationen für jedes Gebäude empfängt. Dieser Client ist dem Paket „TcpBasicClientApp“ nachempfunden. Hierbei handelt es sich um einen Client für ein generisches Anforderungs-Antwort-Protokoll. Abbildung 27 zeigt einen Schnappschuss dieser Router-Switch-Client-Konfiguration.

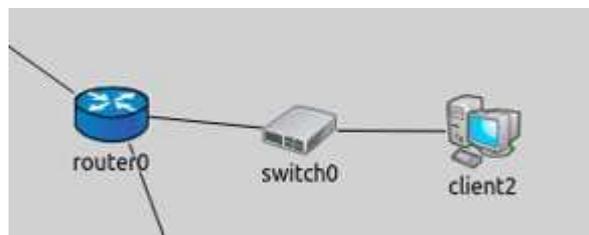


Abbildung 27: Router-Switch-Client Konfiguration, basierend auf der INET Modellbibliothek.

Die zentrale Optimierung ist ebenfalls mit einem Client verbunden, der das Gerät darstellt, das für die Netzverwaltung verwendet wird. Dieses Gerät wird an einen Switch angeschlossen, und dieser wiederum wird mit einem Router verbunden, der für die Verbindung mit dem Internet verwendet wird.

Mithilfe der „InternetCloud“ aus dem INET-Paket wird ein Modell für das Internetprotokoll erstellt. Bei diesem Modul handelt es sich um einen IPv4-Router, der Pakete verzögern oder verwerfen kann (unter Beibehaltung ihrer Reihenfolge) und zur Darstellung der Kommunikation über das Internet und zur Schätzung der Kommunikationsverzögerungen verwendet wird.

Die Topologie des Kommunikationsnetzes unterscheidet sich von der des Stromversorgungsnetzes. Da jeder Client für das BEMS direkt mit dem Internet verbunden werden kann, wird eine Sterntopologie konfiguriert (siehe Abbildung 28). Dabei sind der zentrale CEMS-Client und alle BEMS-Clients mit dem Internet verbunden, sodass keine direkte Verbindung zwischen den Clients hergestellt wird und die gesamte Kommunikation über das Internet-Cloud-Modell läuft.

Die Kopplung des Kommunikationsmodells in OMNET++ mit dem Stromnetzmodell (durchgeführt in Python) erfolgt über das Paket „cosima“ [13]. cosima ist ein Werkzeug zur Untersuchung der

Wechselwirkungen zwischen dem Energiesystem und dem Kommunikationsnetz durch die Integration des (Kommunikations-)Simulators OMNET++ in das Co-Simulations-Framework mosaik. Somit kann das für die elektrische Energieversorgung und -management entwickelte Co-Simulationsmodell mit dem in OMNET++ entwickelten Kommunikationsmodell gekoppelt werden. Die Architektur des cosima-Frameworks erfordert, dass jedes Paarelement über „Agenten“-Modelle mit dem Kommunikations-simulator verbunden ist. Der „Sender-Agent“ ist so konfiguriert, dass er die Eingaben vom „Grid-Corrector“ (in Form eines python „dictionary“) empfängt. Dieser Agent empfängt Informationen über die Optimierungsberechnungszeit und die Ergebnisse der Optimierung.

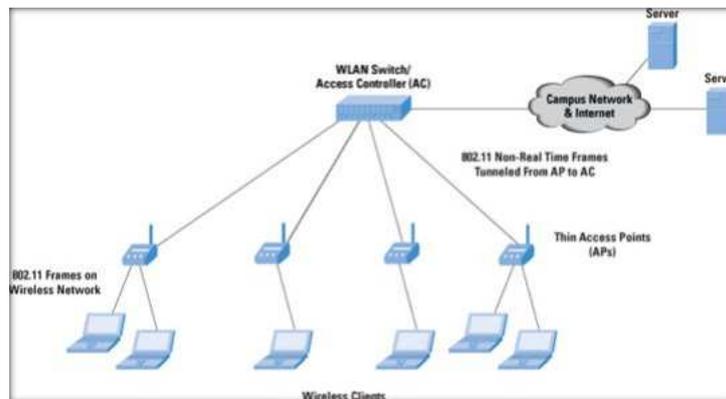


Abbildung 28: Beispiel einer Sternnetzwerktopologie. Quelle: OMNET++-Dokumentation [15].

Der „Sender-Agent“ wird dann mit dem „Kommunikationssimulator“ gekoppelt, der den Agenten mit dem entsprechenden Client im Kommunikationsmodell paart (d. h., der „sender_agent“ wird mit dem „client0“-Element im Kommunikationsmodell gekoppelt). Dadurch wird die Kommunikationssimulation gestartet. Die „Sender-Agenten“ verfügen außerdem über ein Verfahren, um die Informationen im Datenpaket zu empfangen und an die verschiedenen Agenten zu verteilen, die im Kommunikationsmodell durch den Namen des Kunden identifiziert werden. Das Kommunikationsmodell übernimmt die Informationen zu Absender, Empfänger, Ausgabezeitpunkt und zum Inhalt der Nachricht und führt eine Simulation der Kommunikation zwischen diesen Clients im OMNET++-Framework durch. Dies erfolgt für jeden der „receiver_agent“, die jeweils ein BEMS darstellen. Sobald ein Kunde ein Datenpaket empfängt, verbindet das Cosima-Framework diesen Kunden mit dem entsprechenden „receiver_agent“, der die Informationen über das empfangene Paket und die Ankunftszeit zwischenspeichert. Im Anschluss erfolgt die Kopplung des „receiver_agent“ mit dem BEMS, welches die empfangenen Informationen nutzt, um das entsprechende Laden/Entladen der vom BEMS gesteuerten Batterie durchzuführen.

Somit ist das Netzkorrekturmodell über die vom cosima-Framework bereitgestellte Agenten-Client-Struktur mit dem BEMS verbunden. Dies ermöglicht eine effektive Kopplung des Energiesystemmodells, des Überwachungs- und Steuerungsmodells sowie des Kommunikationsmodells.

Datenebene

Aufgrund der ereignisbasierten Natur der Simulationsarchitektur konnte keine zeitbasierte Datenbankarchitektur implementiert werden. Ergebnisse zu den Leistungsflüssen und zur Kommunikation der verschiedenen Elemente wurden in JSON-Datenstrukturen gespeichert. Dies wurde durch ein in mosaik implementiertes Sammlermodell erreicht. Der Zeitstempel jedes Ereignisses dient der eindeutigen Identifizierung des Zeitpunktes, zu dem unterschiedliche Datenpakete von den Agenten gesendet oder empfangen werden. Diese Angaben werden zur weiteren Auswertung der Ergebnisse genutzt.

2.4.5 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation werden in Bezug auf die für dieses Szenario formulierten Ziele dargestellt. Erste vorläufige Ergebnisse zeigen die Machbarkeit der Umsetzung mit den vorgeschlagenen Tools. Für die Modellierung des Energiesystems und der Steuergeräte wurden die Komponenten des E-Mobilität-Szenarios eingesetzt. Da das Energiesystem und die Kommunikationsmodelle in unterschiedlichen Umgebungen entwickelt werden, wurden sie vor der Kopplung unabhängig voneinander entwickelt.

Abbildung 29 zeigt das entwickelte Testmodell, das als erster „Proof of Concept“ für die spätere Simulation des gesamten Quartiers diente. Das Kommunikationsmodell wurde auf OMNET++ unter Verwendung der Sterntopologie und einer Verbindung über ein Internet-Cloud-Modell aufgebaut. Jedes BEMS wurde anhand der Struktur der Client-Server-Router-Konfiguration modelliert. Mehrere Router wurden zudem zu einem Gruppenrouter verbunden, um lokale Internetanbieter zu simulieren (Internet Service Provider, ISP). Diese wurden mit einem Modell einer Internet-Cloud Modell verbunden. Das zentrale CEMS wurde in ähnlicher Weise mithilfe der beschreibenden Client-Server-Router-Konfiguration modelliert. Im Rahmen der Konfiguration des Modells mussten Verbindungsparameter (wie Breitbandkapazität und Länge der Verbindungen) festgelegt werden (siehe Abbildung 30).

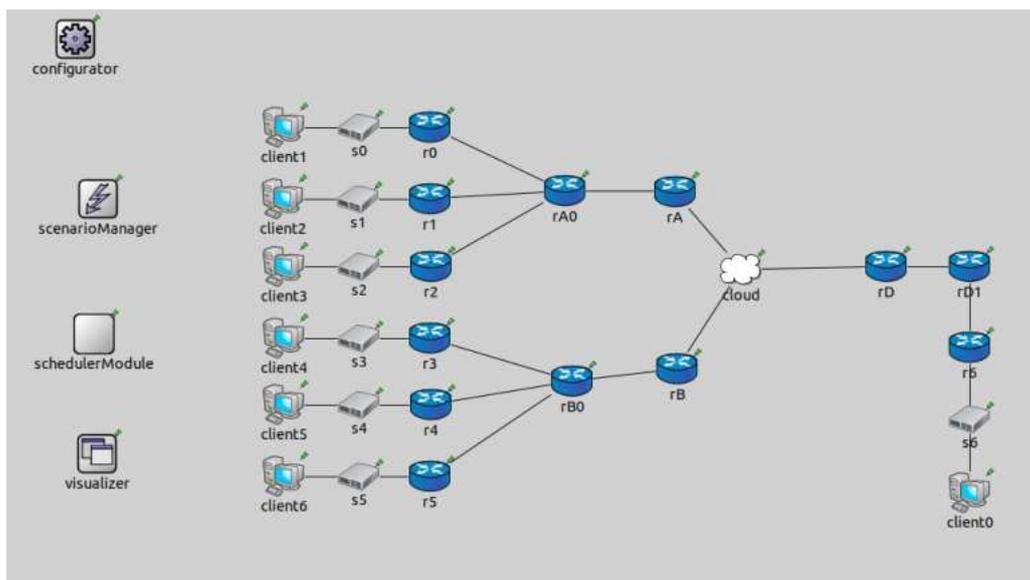


Abbildung 29: Sterntopologie für das Kommunikationsmodell zwischen den zentralen und dezentralen Energiemanagementsystemen.

Für das Internet-Cloud-Modell ist eine zusätzliche Konfiguration erforderlich, welche auch den Latenzparameter in diesem Modell steuert (siehe Abbildung 31). Des Weiteren können Drop-Raten für Pakete konfiguriert werden, die auf einem wahrscheinlichkeitsbasierten Modell einer abgeschnittenen Normalverteilung und einer minimalen Verzögerung basieren.

```

}
connections:
s0.ethg++ <-> Eth10M <-> client1.ethg++;
s0.ethg++ <-> Eth10M <-> r0.ethg++;
s1.ethg++ <-> Eth10M <-> client2.ethg++;
s1.ethg++ <-> Eth10M <-> r1.ethg++;
s2.ethg++ <-> Eth10M <-> client3.ethg++;
s2.ethg++ <-> Eth10M <-> r2.ethg++;
s3.ethg++ <-> Eth10M <-> client4.ethg++;
s3.ethg++ <-> Eth10M <-> r3.ethg++;
s4.ethg++ <-> Eth10M <-> client5.ethg++;
s4.ethg++ <-> Eth10M <-> r4.ethg++;
s5.ethg++ <-> Eth10M <-> client6.ethg++;
s5.ethg++ <-> Eth10M <-> r5.ethg++;
r0.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.1km; } <-> rA0.ethg++;
r1.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.1km; } <-> rA0.ethg++;
r2.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.1km; } <-> rA0.ethg++;
r3.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.1km; } <-> rB0.ethg++;
r4.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.1km; } <-> rB0.ethg++;
r5.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.1km; } <-> rB0.ethg++;
rA0.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.5km; } <-> rA.ethg++;
rB0.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.5km; } <-> rB.ethg++;

rD.ethg++ <-> Eth10M { length = 1.0km; } <-> rD1.ethg++;
r6.ethg++ <-> Eth10M <-> s6.ethg++;
rD1.ethg++ <-> Eth10M { length = 0.5km; } <-> r6.ethg++;
s6.ethg++ <-> Eth10M <-> client0.ethg++;
s6.ethg++ <-> Eth10M <-> r6.ethg++;

cloud.ethg++ <-> Eth10M <-> rD.ethg++;
rB.ethg++ <-> Eth10M <-> cloud.ethg++;
rA.ethg++ <-> Eth10M <-> cloud.ethg++;
}

```

Abbildung 30: Parameterdefinition für das erstellte Kommunikationsmodell.

```

1
2 <internetCloud symmetric="true">
3   <parameters name="good">
4     <traffic src="rD" dest="rA" delay="20ms+truncnormal(200ms,60ms)"
5       datarate="uniform(100kbps,1Mbps)" drop="uniform(0,1) &lt; 0.01" />
6     <traffic src="rD" dest="rB" delay="20ms+truncnormal(200ms,60ms)"
7       datarate="uniform(100kbps,1Mbps)" drop="uniform(0,1) &lt; 0.01" />
8     <traffic src="rD" dest="rC" delay="20ms+truncnormal(200ms,60ms)"
9       datarate="uniform(100kbps,1Mbps)" drop="uniform(0,1) &lt; 0.01" />
10
11
12 <!--
13   <traffic src="*" dest="*" delay="10ms+truncnormal(100ms,20ms)" datar
14   -->
15 </parameters>
16 </internetCloud>
17

```

Abbildung 31: Parameterdefinition für das Internet-Cloud-Modell.

Vorläufige Ergebnisse der Konfiguration des Modells dienen dazu, die Auswirkungen verschiedener Komponenten auf die Kommunikationslatenzen und auf die Menge der verworfenen Pakete zu bewerten. Der statistische Charakter des implementierten Modells für Verzögerungen führt auch zu einer logarithmischen Normalverteilung der Latenzen zwischen dem Senden und Empfangen der Daten zwischen den Komponenten (End-to-End delays). Abbildung 32 zeigt, dass der Mittelwert dieser Latenzen etwa 300 ms beträgt.

Diese Auswertungen ermöglichen die Entwicklung eines umfassenderen Modells für die Kommunikation im Quartier. Angesichts der erforderlichen Anzahl an Geräten zur Kommunikationssimulation wurde ein „Stern“-Kommunikationsnetzwerk rund um die Komponente „Internet-Cloud“ geschaffen, das an das BEMS und das CEMS im Quartier angeschlossen werden soll. Diese Struktur besteht aus 5 Clustern (gruppiert nach Standort, mit 3 ISPs für jeden Cluster). Es wird angenommen, dass das CEMS sich in einer gewissen Distanz befindet und über das Internet mit dem Quartier verbunden ist (Abbildung 33).

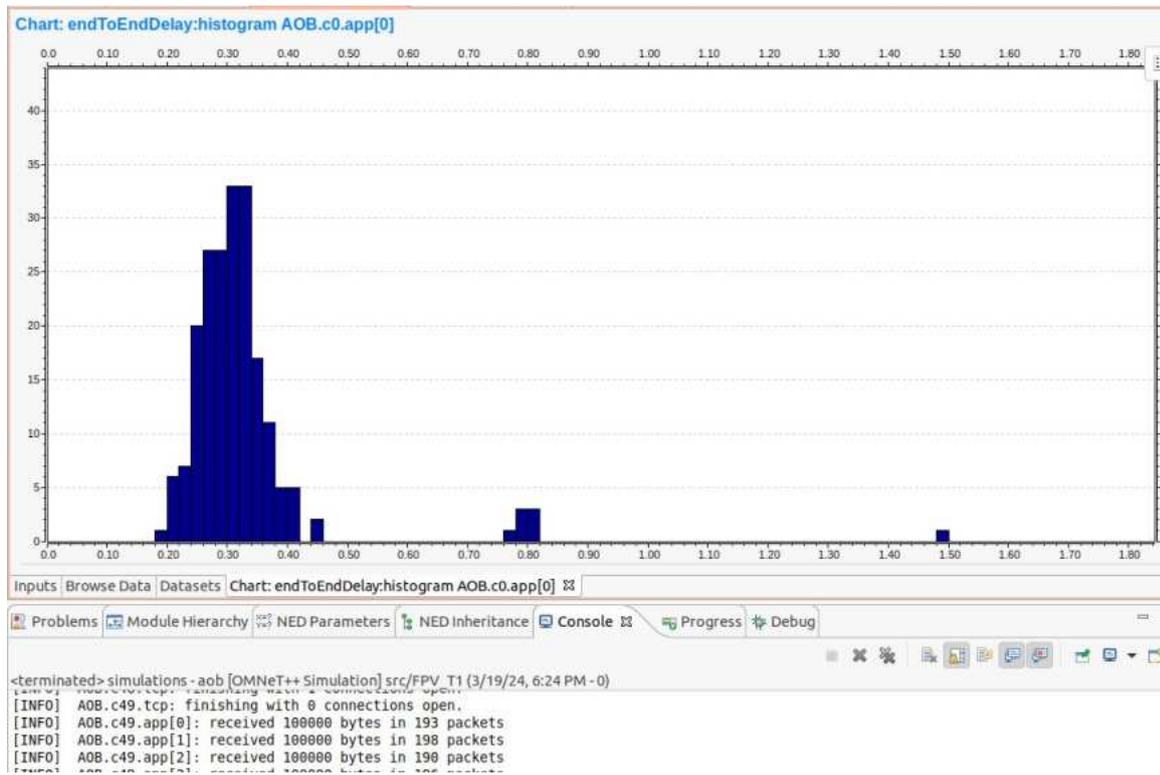


Abbildung 32: Ergebnisse zur Latenz beim Paketversand zwischen Clients.

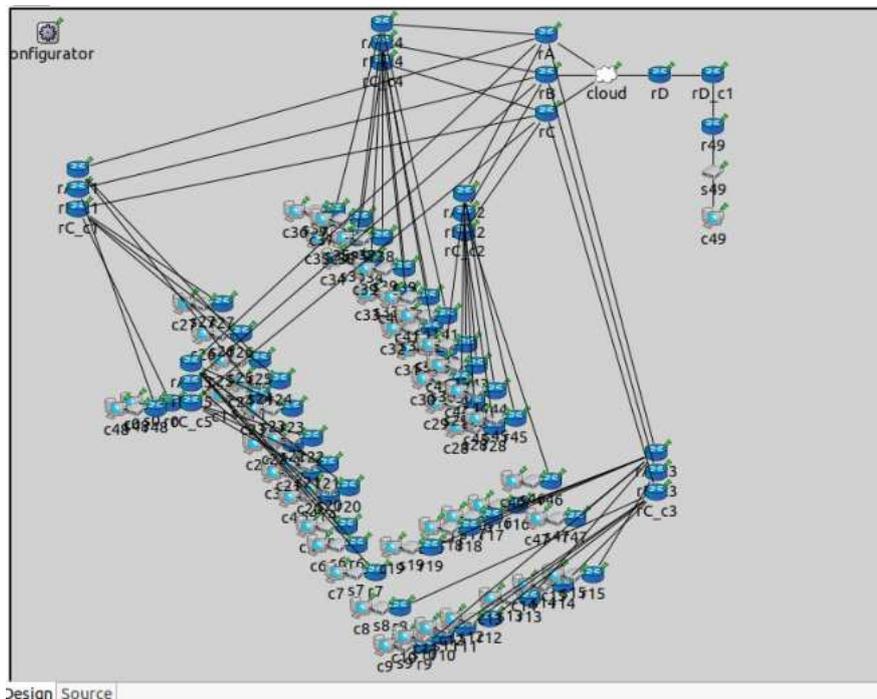


Abbildung 33: Kommunikationsmodell für das Quartier.

Die vorläufigen Ergebnisse zeigen die Wirksamkeit des Modellaufbaus. Abbildung 34 zeigt eine Darstellung der Spannungsniveaus in mehreren Bussen des Netzes. Da die Kontrolle der Spannungsniveaus das primäre Ziel darstellt, kann die Auswertung der Ergebnisse der Verzögerungen durch Beobachtung der Zeitspanne erfolgen, die verstreicht, bis die Spannungsniveaus die festgelegten Grenzen erreichen, nachdem die Probleme von der „Grid Corrector“-Komponente erkannt wurden. Dies zeigt, dass es eine Verzögerung zwischen den entsprechenden Signalen für die verschiedenen Busse gibt, was die ordnungsgemäße Funktionalität der eingebauten Komponenten belegt.

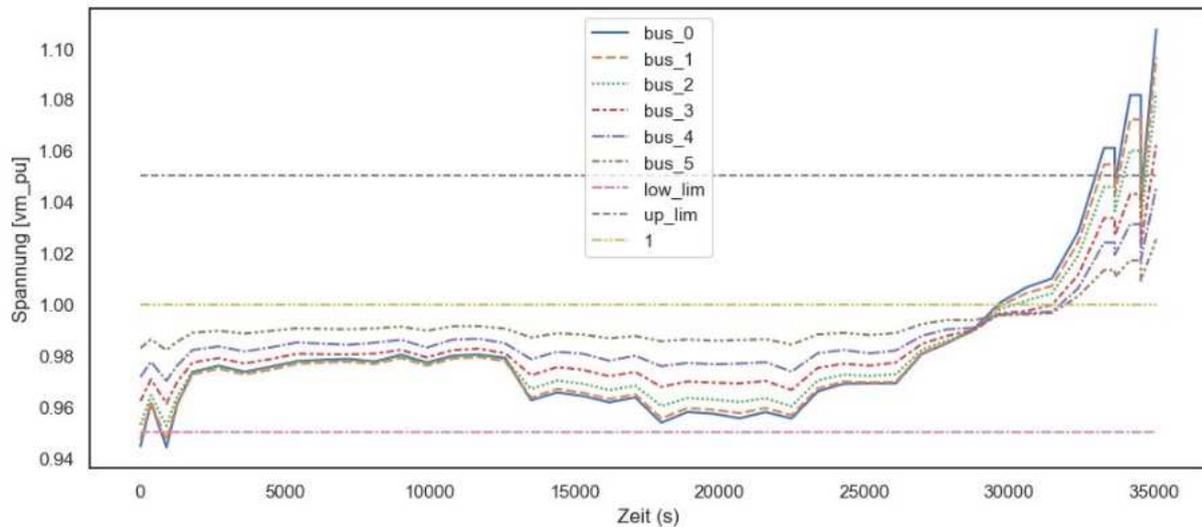


Abbildung 34: Spannungsniveaus in mehreren Bussen des Quartiers.

In Abbildung 34 liegen einige Spannungswerte außerhalb der Grenzen. Diese Werte werden nach dem Ausgleichsprozess auf die angegebenen Grenzen ausgeglichen. Dies geschieht jedoch nicht unmittelbar, da die Kommunikationsverzögerungen zu einer Verzögerung bei der Aktivierung des Flexibilitätssignals an die entsprechende Komponente führen. Dies bedeutet, dass das Netz für einen Zeitraum außerhalb der Kontrollgrenzen betrieben wird. Dieser Effekt verringert die Stabilität des Stromnetzes.

Abbildung 35 zeigt das Gesamtverhalten des Niederspannungsverteilungsnetzes. Angezeigt werden die minimale Spannung und die maximale Spannung, sowie die Referenzwerte für die festgelegten Grenzen. Hier lässt sich die Verzögerung besser beobachten und in einigen Fällen konnte aufgrund unzureichender Flexibilitätskapazitäten im Netz keine Korrektur festgestellt werden. Die Aktivierungszeit kann gemessen werden, um einige Indikatoren für das Verhalten des Netzes zu erhalten. Der häufigste Wert, die Mean Time Of Failure (MTOF), liegt bei etwa 474 ms. Diese Verzögerungen sind auf die Dauer der Berechnung der Leistungskorrektur (ca. 120 ms) und die Verzögerungen bei der Kommunikation (350 ms) zurückzuführen.

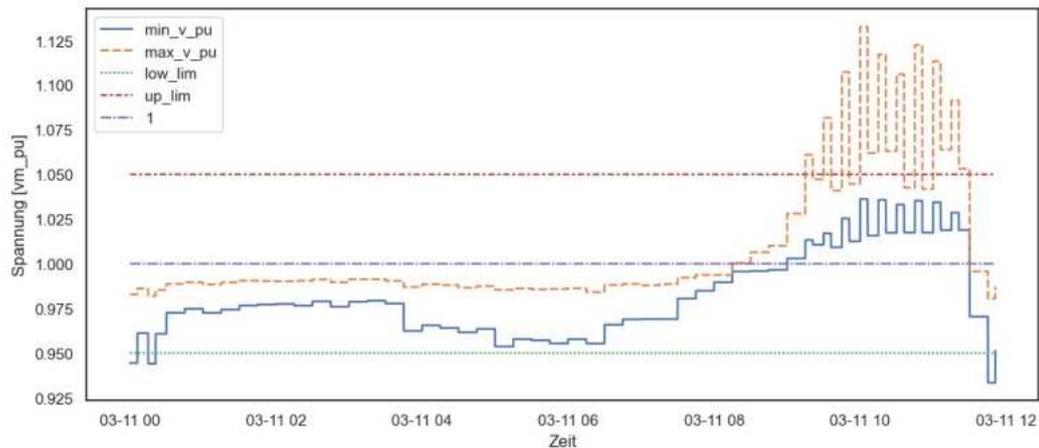


Abbildung 35: Gesamtbewertung der Netzstabilität.

2.4.6 Ausblick

Dieses Szenario wurde entwickelt, um die technologische Umsetzung eines Mehrdomänenmodells eines Smart Grids zu testen, bei dem die Kommunikation zentraler und dezentraler Managementsysteme durch die Kopplung des Modells der Energiesysteme, des Steuerungssystems und der Kommunikationssysteme erreicht wurde.

Die technische Umsetzung erforderte den Einsatz unterschiedlicher Frameworks, deren Anwendbarkeit in einem realen Anwendungsfall evaluiert wurde. Erste Ergebnisse zeigten, welche Auswirkungen Latenzen und Verzögerungen in den Geräten auf das Netz haben. Die Verzögerung bei der Reaktion führt zu Vorfällen, bei denen das Stromnetz aufgrund von Problemen bei der Kommunikation von Leistungskorrekturmaßnahmen außerhalb der festgelegten Grenzen arbeitet. Die Ergebnisse dienen dazu, die Funktionalität der Modelle und der entwickelten Kopplung darzustellen und die Quellen von Latenzen zu bewerten, die sich auf die korrekte Funktionalität des Stromnetzes auswirken. Der Verlust von Datenpaketen wurde bislang nicht berücksichtigt. Dies kann in zukünftigen Szenarien parametrisiert werden, um die Auswirkungen dieses Phänomens zu bewerten.

Eine weitere Evaluierung in einem komplexeren Quartier ist erforderlich. Einige Aspekte der Bewertung wurden vereinfacht, um die Modellierungsberechnungszeiten zu reduzieren. Dies betrifft beispielsweise eine vollständige Modellierung des PV-Systems. Elektrofahrzeuge und Ladestationen wurden als statische Komponenten modelliert, jedoch bieten die Modelle auch die Möglichkeit, Ladestrategien einzubeziehen, die auch das Netz verwalten können. Dies erfordert jedoch die Implementierung zusätzlicher Kommunikationsmodelle, damit die Ladestationen auf Prognosen zu Last- und Wetterparametern zugreifen können. Die Entwicklung eines komplexeren Kommunikationsmodells wäre daher erforderlich.

Darüber hinaus wurde die Kommunikation innerhalb des BEMS nicht detailliert modelliert. Auch ein „Home Area Network“ (HAN)-Modell für jedes Gebäude kann weiterentwickelt werden. Dieses HAN kann in OMNET++ implementiert werden, um die interne Kommunikation der verschiedenen Geräte unter Überwachung und Aufsicht des BEMS zu simulieren. Dazu kann die „Local Area Network“ LAN- und „Wireless Area Network“ WAN-Kommunikation gehören, die für diese Anwendungen typisch ist.

Das Modell kann auch in andere komplexere dezentrale Systeme integriert werden, beispielsweise die Komponenten, die in dem Durchstichszenario „Flexibilität“ entwickelt wurden. Hier kann die Kommunikation zwischen den dezentralen BEMS auch modelliert werden, sodass die Kommunikation über Informationen zur Optimierung der Stromflexibilitäten im gesamten Quartier modelliert werden kann. Dies ist ein noch komplexeres Szenario, bei dem alle BEMS-Informationen voneinander gesendet

und empfangen werden. Die Auswirkungen dieses dezentralen Kommunikationsschemas bedürfen weiterer Untersuchung, da sich aus der Latenz ergebende Probleme eskalieren können.

2.5 Durchstichszenario Flexibilität

2.5.1 Einleitung

Im Rahmen des Durchstichszenarios „Flexibilität“ wird die multimodale Flexibilitätsnutzung im Quartier zur Lösung von Problemen im Stromnetz untersucht. Die Komplexität elektrischer Energiesysteme in Verteilnetzen nimmt stetig zu. Beispielsweise durch die steigende Anzahl dezentraler erneuerbarer Energieerzeugung und Speicherkapazitäten. Veränderungen auf dem Energiemarkt durch die Zunahme von dezentralen Energieressourcen (DER), Elektromobilität und lokalen Speicherkapazitäten fördern den Ausbau hin zu aktiven Verteilnetzen, die steuerbare und flexible Erzeuger- und Verbraucherlasten umfassen.

Parallel dazu erfordert die Einbeziehung von Flexibilität in den Betrieb eines Smart Grids die Berücksichtigung einer globalen Optimierung auf Quartiersebene. Für eine optimale Funktion des Netzes muss die Flexibilität der verschiedenen Komponenten im Quartier systematisch berücksichtigt werden. Die Optimierung des Netzes erfordert dann die ordnungsgemäße Kommunikation der Flexibilitäten jeder Komponente des Bezirks, sodass die unterschiedlichen Flexibilitätsgrade jeder Komponente bei der Ermittlung eines optimalen Betriebsplans für die Verwaltung des Netzes berücksichtigt werden.

Die aktuelle Dezentralisierung des Smart Grids erfordert auch, dass jedes der Geräte mit anderen Geräten kommunizieren kann, damit sie Informationen austauschen können, um lokal optimale Betriebspunkte zu finden. Dies erhöht die Komplexität des Optimierungsproblems, da jede Komponente in der Lage sein muss, Informationen zu senden und zu empfangen, um einen optimalen Betriebsplan für einen definierten Zeitraum zu finden.

Zusätzlich ist zur Erreichung der Klimaziele der Umbau insbesondere der Wärmeversorgung durch eine Erhöhung der Energieeffizienz und eine Abkehr von konventionellen Energieträgern unabdingbar. Wärmepumpen sind hierbei ein geeignetes Mittel. Dies erfordert, dass die Flexibilität von Komponenten zur thermischen Energiebereitstellung und -speicherung auch auf Quartiersebene berücksichtigt wird.

Ziel dieses Szenarios ist die Bewertung der Auswirkungen einer Optimierung der Flexibilität im Betrieb des Smart Grids. Aufgrund der unterschiedlichen Aspekte der in diesem Szenario bewerteten Komponenten wurden zwei unterschiedliche Konfigurationen bewertet: Flexibilität bei thermischen Komponenten und Flexibilität bei elektrischen Speichergeräten.

2.5.2 Flexibilität in thermischen Komponenten

GitLab Tag: [D1.4 Zukunftslabor Energie ZN3488](#)

2.5.2.1 Forschungsziel

Ziel dieses Szenarios ist die Analyse der Nutzung der Flexibilität bei der Beheizung von Wohngebäuden mit einem steigenden Durchdringungsgrad von Wärmepumpen und deren Auswirkungen im Quartier „Am Ölper Berge“ in Braunschweig, Niedersachsen auf das lokale Niederspannungsnetz. In dem Szenario werden nutzerseitige Möglichkeiten der Nutzung von Flexibilität bei der Betriebsweise von Wärmepumpen in Verbindung mit einem Speicher untersucht. Das Niederspannungsnetz ist bei zeitgleicher Nutzung vieler Wärmepumpen stark belastet. Gleichzeitig haben Gebäude eine gewisse Trägheit in der Wärmehaltung aufgrund der Isolierung. Auch können Speicher eine Beheizung des Gebäudes für kurze Zeit sicherstellen. Diese Möglichkeiten der Flexibilität in der Betriebsweise der Wärmepumpe werden anhand von Wohngebäuden im Quartier „Am Ölper Berge“ untersucht.

2.5.2.2 Vorgehensweise

Der grundlegende Forschungsansatz der Analyse der Flexibilität bei der Betriebsweise von Wärmepumpen in Wohngebäuden in Quartieren wurde bei der Initiierung des DSZ Flexibilität bestimmt. Es wurde der Modellierungsansatz der Co-Simulation in mosaik 3.0 zur Untersuchung des Forschungsziels in Abstimmung mit dem Konsortium des Zukunftslabors Energie festgelegt und notwendige Simulationsszenarien bestimmt. Dazu wurden vom Durchstichszenario Gebäude genutzte Modelle von Wohngebäuden verwendet.

Kern des Durchstichszenario Flexibilität war die anschließend durchgeführte Modellierung der Energieversorgungsszenarien und für diese notwendige Komponenten (Energiesystem-, Steuerungsmodelle und Datenauswertung) in der Programmiersprache Python. Abschließend wurden verschiedene Energieversorgungsszenarien und der Einsatz der nutzerseitigen Verbesserungsmaßnahmen simuliert. Die entwickelte Co-Simulation einschließlich ihrer Energiesystemmodelle, Szenarien und Daten ist in einem Open Source Repository frei zugänglich und für zukünftige Forschungen modular erweiterbar. Das DSZ EMOB folgt damit der ZLE Open Science Declaration und den Standards der transparenten Energieforschung [28].

2.5.2.3 Modellierung

Für die Untersuchung der Forschungsziele in diesem Szenario wurde eine Co-Simulation mit dem mosaik-Framework entwickelt. Mit Hilfe von Simulationsmodellen lassen sich Systemkomponenten einzeln oder in Kombination mit anderen Modellen umfassend analysieren, um so das Systemverhalten zu untersuchen und optimierte Versorgungsszenarien und Managementkonzepte zu entwickeln.

Abbildung 36 zeigt die Struktur des Modells. Dieses Modell ist so konzipiert, dass es zunächst den Wärmebedarf eines Gebäudes berechnet, der über das thermische System gedeckt werden muss. Dieses System besteht aus einem Wärmetauscher (in Form eines Heizkörpers), einem Wärmespeicher (dessen Flexibilität vom Optimierer übernommen wird) und einer Wärmepumpe (der Hauptenergiequelle). Darüber hinaus werden meteorologische Daten für die Gebäudesimulation und von den thermischen Komponenten zur Berechnung von Wärmeverlusten und Wärmeversorgung benötigt. Anschließend können die Komponenten über einen Stromnetzsimulator miteinander verknüpft werden.

Die entwickelte Co-Simulation für die Energiesystemanalyse folgt dem objektorientierten und modularen Aufbau von mosaik. Jedes Modell läuft in seinem eigenen Prozess. Mosaik orchestriert den Austausch von Parametern zwischen den Modellen und synchronisiert die Ausführungen der Modellprozesse der zeitbasierten Co-Simulation. Die entwickelten Modelle können anhand von drei Kategorien unterteilt werden: (1) Modelle zum Abbild energetischer Komponenten, (2) Modelle zur Steuerung und Koordination der Komponenten für Energieerzeugung und -speicherung und (3) Modelle für das Einlesen und Sichern von Datensätzen. Dieser Aufbau folgt analog dem Vorgehen im Durchstichszenario E-Mobilität.

Zu dem Zwecke der Untersuchung der Auswirkungen der multimodalen Flexibilität in der Nachbarschaft, um Probleme im Stromnetz zu lösen, wurden Wohngebäude mit Wärmepumpen und Speicher simuliert. In der Simulation wurde Teile des Quartiers „Am Ölper Berge“ verwendet. Die genutzten Gebäudemodelle wurden in Zusammenarbeit mit dem DSZ Gebäude erstellt. Abbildung 37 zeigt die Komponenten, die für die Wärmeversorgungsmodell gebaut wurden.

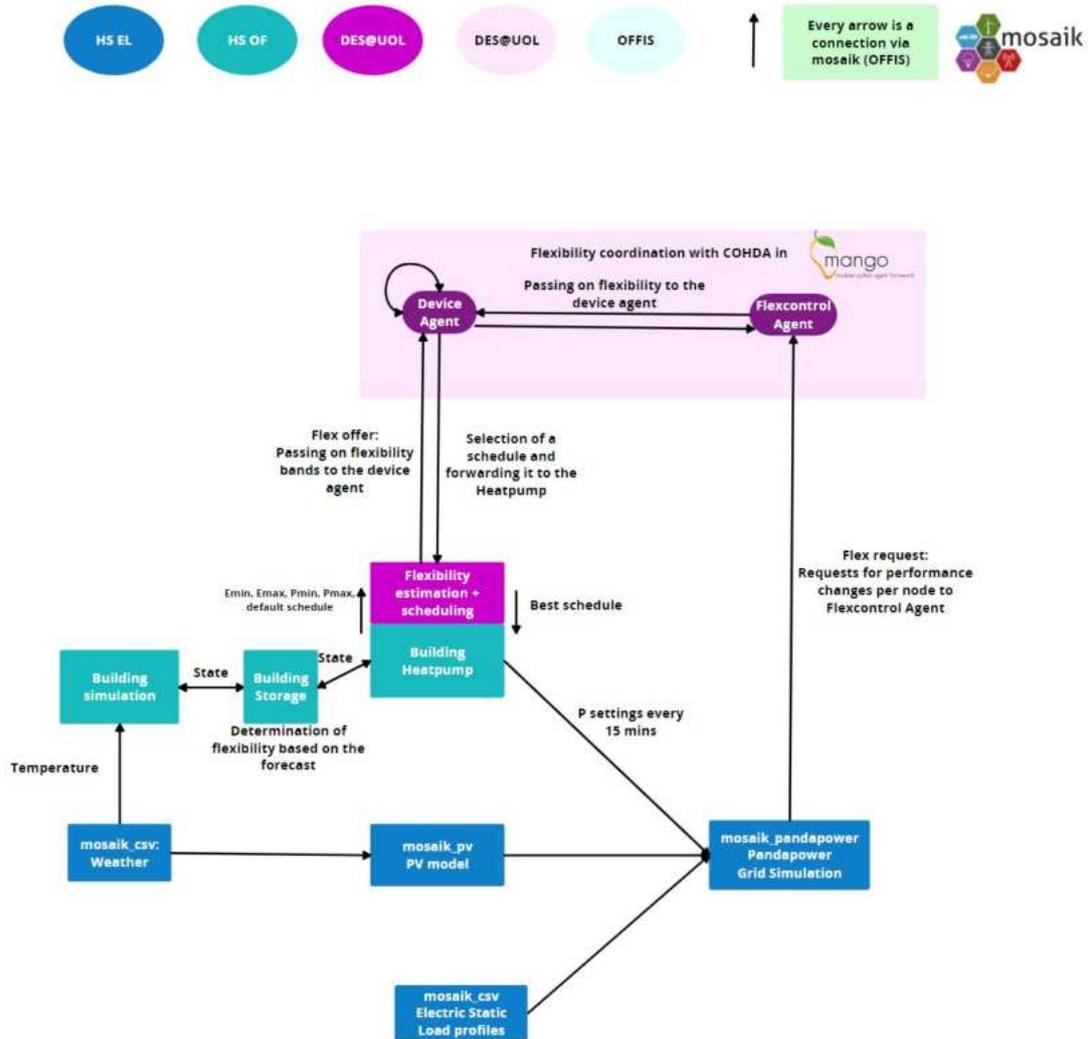


Abbildung 36: Erste Konzeptualisierung für den Aufbau des Co-Simulationsszenarios zur Modellierung von Flexibilitäten in der thermischen Energieversorgung.

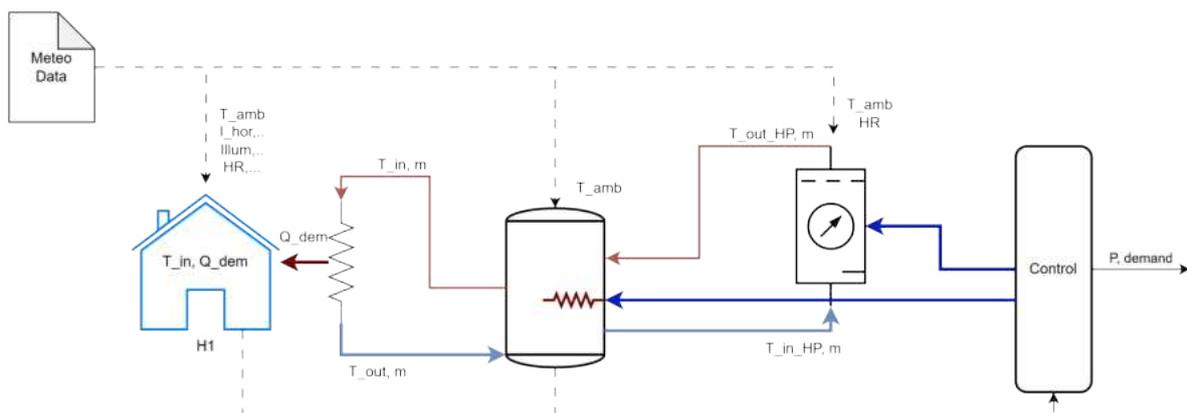


Abbildung 37: Aufbau der Komponenten zur Modellierung der thermischen Energieversorgung.

Zur Berechnung der Flexibilität wurde die eigens entwickelte „Mosaik-COHTA“ Python-Bibliothek verwendet, die einen Simulator für die Energiespeicheroptimierung für COHTA implementiert. Sie implementiert die Algorithmen zur Generierung von multikriteriell optimierten Fahrplänen für die Integration von Speichern mit einer Vielzahl von Zielen in einer COHTA-Verhandlung. Flexibilitätsagenten wurden verwendet, um optimale Betriebspläne zu berechnen und so Lastspitzen

zu vermeiden. Das Multiagentensystem basiert auf dem „mango“ Multiagentenframework des OFFIS. Abbildung 38 zeigt die Integration des Flexibilitätsoptimierers in das Szenario.

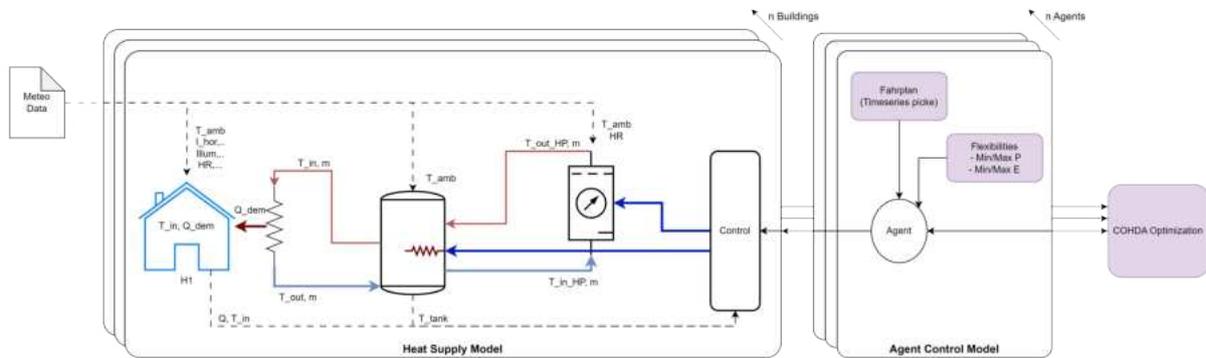


Abbildung 38: Implementierung des Wärmeversorgungsmodells und des Agentensteuerungsmodells zur Optimierung der Flexibilität.

2.5.2.4 Simulationsergebnisse

Das Szenario Flexibilität hat sowohl technische als auch wissenschaftliche Ziele umgesetzt. Auf der technischen Seite bestand das vorangige Ziel, die Implementierung eines Flexibilitätsmodells zur einheitlichen Darstellung der Flexibilität zwischen den verschiedenen Komponenten einer Energiesystem-Simulation zu erreichen. Dies wurde mit dem Co-Simulationsframework mosaik umgesetzt, dass verschiedene Komponenten der Simulation koordiniert.

Auf der wissenschaftlichen Seite bestanden die Fragestellungen, welche Freiheitsgrade zur Bereitstellung von Flexibilität bei Speicher-, Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystemen zur Verfügung stehen. Des Weiteren, welche Optionen bei der Flexibilitätsnutzung im Quartier zur Lösung von Problemen im Stromnetz genutzt werden können. Zusammen mit dem Durchstichszenario IKT, wurde außerdem das Vorkommen von Kommunikationsstörungen während der Flexibilitätsberechnung erforscht.

Die wichtigsten Ergebnisse zeigen die Auswirkungen der Einbeziehung von Flexibilität in das Netz. Dies zeigt die Änderungen am ursprünglichen Betriebsplan, um Spitzen im Netz zu vermeiden. Es werden sechs Häuser mit Wärmepumpen simuliert, die jeweils an einen Speicher angeschlossen sind, der in der Abbildung 39 dargestellt ist.

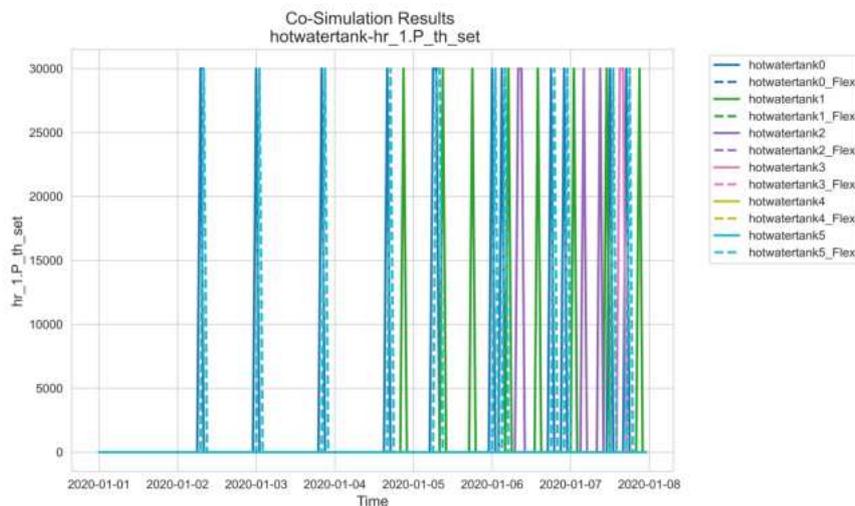


Abbildung 39: Ergebnisse zum Strombedarf der elektrischen Reserveheizung für die Tanks. Durch die Optimierung der Flexibilität wird versucht, die Parallelnutzung elektrischer Energie zu vermeiden.

Diese unterschiedlichen Leistungsaufnahmen im Speicher führen zu unterschiedlichen Temperaturen der Speicher auf verschiedenen Ebenen (siehe Abbildung 40). Durch die Einbeziehung der Flexibilitätsoptimierung wird ein Abkühlen der Tanks verhindert, was eine spätere Vermeidung der Parallelnutzung der Backup-Heizsysteme darstellt.

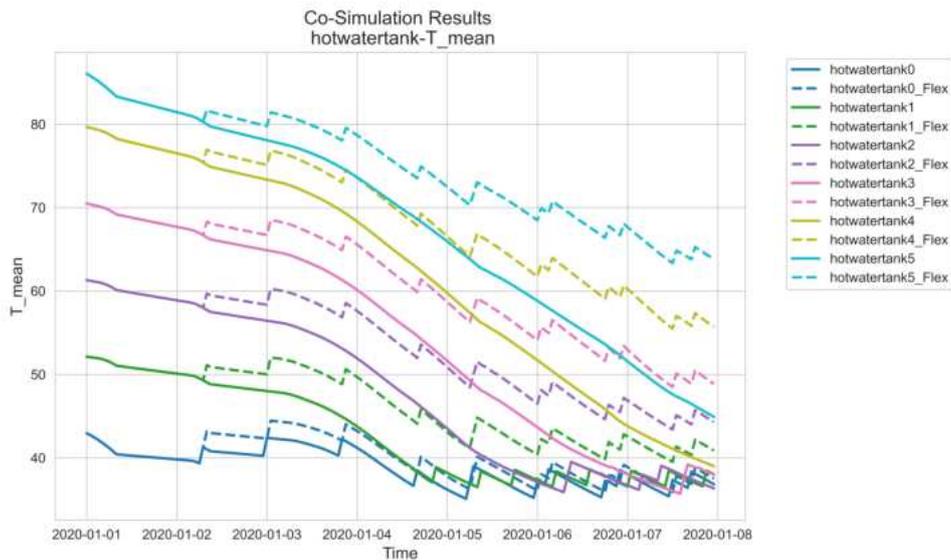


Abbildung 40: Mittlere Temperaturniveaus im Tank. Der Einsatz von Flexibilität führt zu einer langsameren Abkühlung im Tank.

Die Ergebnisse zeigen auch den Wärmebedarf der Gebäude. Da die Gebäude recht ähnlich sind, sind auch die Bedarfsprofile ähnlich (siehe Abbildung 41). Dieser Wärmebedarf muss durch das Energiesystem gedeckt werden und dient daher als Grundlage für die Quantifizierung der insgesamt benötigten Energiemenge.

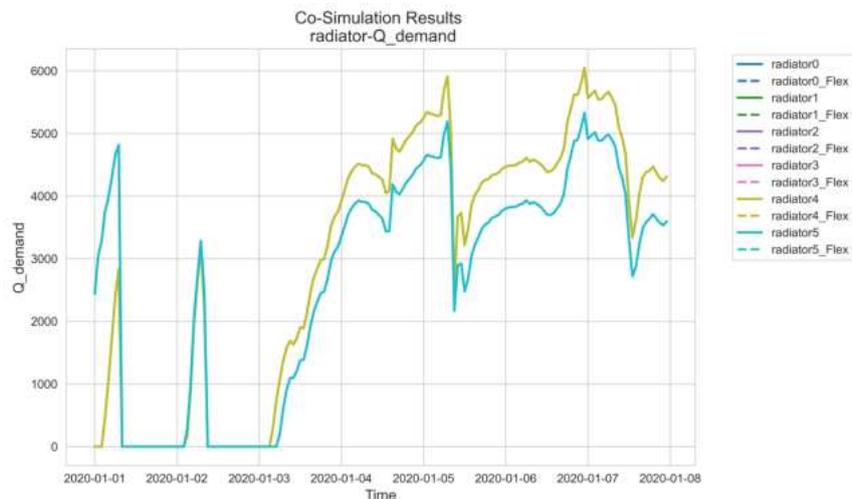


Abbildung 41: Wärmebedarf verschiedener Gebäude.

2.5.2.5 Ausblick

Das Durchstichszenario Flexibilität von thermischen Speichersystemen zielte darauf ab, die Auswirkungen der multimodalen Flexibilität in der Nachbarschaft zu analysieren, um Probleme im Stromnetz zu lösen. Hierzu konnten vielversprechende Ergebnisse erzielt werden.

Aufgrund des gewählten Open Source Ansatzes, dem zugrunde liegenden Co-Simulationsframework mosaik und aller weiteren Komponenten, verfügt die Modellierung über eine hohe Modularität und ist

daher einfach erweiterbar. Aus akademischer Sicht ist ein möglicher zukünftiger Forschungsansatz Untersuchungen zur Netzintegration von Stromspeicher zusätzlich zu den Wärmespeichern.

Die Umsetzung der Flexibilität auf Heizkomponenten erforderte die Anpassung mehrerer Modelle, da die Flexibilität der Wärmespeicherkomponenten anhand des Temperaturniveaus, der Kapazität der Speichertanks und der Außentemperaturen berechnet werden müssen. Diese Flexibilitätsberechnungen in Form der Flexibilität von thermischer Energie und Leistung mussten in die Modelle integriert werden. Dieser Ansatz kann weiter genutzt werden, wenn die mögliche Implementierung von Wärmenetzen im Quartier in Betracht gezogen wird. Die Modellierung eines kompletten Wärmenetzes kann auch eine weitere Optimierung des Temperaturniveaus und der Nutzung thermischer Energie im Wärmenetz bedeuten. Anschließend müssen auch Modelle für ein vollständiges Wärmenetz entwickelt werden, ähnlich wie bei der Modellierung elektrischer Netze.

Darüber hinaus kann dieses Szenario dahingehend erweitert werden, dass auch die Speicherung elektrischer Energie in die Flexibilitätsbetrachtungen einbezogen wird. Die Einbeziehung der Flexibilität in elektrischen Komponenten wird im folgenden Abschnitt beschrieben, eine Kombination beider Aspekte der Energieversorgung kann jedoch über die Sektorenkopplung erfolgen.

2.5.3 Flexibilität in elektrischen Komponenten

GitLab Tag: [D1.4 Zukunftslabor Energie ZN3488](#)

2.5.3.1 Forschungsziel

In diesem Szenario wird der Einsatz von Speichersystemen als Flexibilitätsmechanismus zur Bewältigung von Spannungsbereichsverletzungen innerhalb des Smart Grids bewertet. Ziel ist die Implementierung eines Kontrollmechanismus, der die Flexibilität dezentraler Speicherung bewerten kann. Dies erfordert die Kommunikation der Flexibilitätskapazitäten verschiedener verteilter Speichersysteme, die untereinander ihren Status und ihre Betriebspläne kommunizieren müssen. Diese Kommunikation muss zwischen verschiedenen Agenten stattfinden, die jeweils einem Speichersystem zugeordnet sind. Jeder dieser Agenten muss diese Informationen dann berücksichtigen, um optimale Betriebspläne zu finden, die die verschiedenen Aspekte der Flexibilität der Speichersysteme berücksichtigen. Auch die Stabilität des Netzes muss von einer zentralen Kontrollstelle berücksichtigt werden. So soll ein optimaler Betriebsplan gefunden und anschließend an jeden dezentralen Agenten kommuniziert werden, der wiederum den Lade- und Entladevorgang des zugeordneten Speichersystems steuert. Anschließend sollen die Auswirkungen dieses Steuerungsmechanismus auf die Leistung der Batterien und auf die globale Stabilität des Systems bewertet werden.

2.5.3.2 Vorgehensweise

Das System wird anhand eines Anwendungsfalls evaluiert, der ein bestehendes Quartier in Norddeutschland betrifft. Dazu werden Informationen zur Topologie des Niederspannungsverteilsnetzes des Wohngebiets gesammelt. Mit diesem Netzmodell wird ein intelligentes Netz erstellt, das aus mehreren Komponenten zur Energieerzeugung, -nutzung und -verbrauch besteht. Ziel ist es, potenzielle Herausforderungen im Stromversorgungssystem zu bewerten, die sich aus der Integration dieser Komponenten ergeben können. Die Modellierung des Strombedarfs der Haushalte basiert auf früheren Daten zum Energiebedarf von Wohngebäuden.

2.5.3.3 Modellierung

Die Co-Simulation dient als Werkzeug zur Integration der unterschiedlichen Modelle, die unabhängig voneinander funktionieren. Dies ermöglicht die Kopplung und Synchronisierung verschiedener Modelle in einer Co-Simulationsumgebung, die die Simulation orchestriert und Informationen zwischen Modellen überträgt, wie beispielsweise der Stromerzeugung, dem Ladezustand oder des Spannungsniveaus. Basierend auf der Netztopologie des Stadtteils und der Zuordnung eines Busses

pro Gebäude wird ein Modell für das Stromnetz erstellt. Die Modellerstellung erfolgt in *pandapower*, während die Kopplung über einen Mosaik-Simulator erfolgt. Mithilfe von Standardprofilen und Informationen zu den Gebäuden werden Modelle für das elektrische Energieprofil verschiedener Haushalte erstellt. Die Modelle werden lokal in CSV-Dateien gespeichert und synchron von einem *mosaik-csv-reader* gelesen. Erforderliche meteorologische Informationen wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) gesammelt und auch als CSV gespeichert, um vom Co-Simulationstool gelesen zu werden. Modelle für die Photovoltaik-Erzeugung nutzen Informationen zu geometrischen Eigenschaften des Gebäudes und Informationen zu den Modulen, die im Paket *pvlib* enthalten sind. Mithilfe der Bibliothek *carpy* werden Modelle von Elektrofahrzeugen auf der Grundlage von Profilen für den Strombedarf von Elektrofahrzeugen erstellt. Diese Modelle sind mit einem Ladesäulenmodell gekoppelt, das mehrere Ladestrategien beinhaltet. Es werden Modelle zur elektrischen Speicherung erstellt, um Lade- und Entladevorgänge zu simulieren und dabei zusätzliche Informationen wie Lade- und Entladeeffizienzen zu nutzen.

Die Überwachung und Steuerung werden durch mehrere Modelle realisiert. Auf der dezentralen Ebene werden Gebäudeenergiemanagement-Steuereinheiten (BEM) erstellt, um die Informationen zu Komponenten für jedes Gebäude zusammenzufassen und den Energieverbrauch jedes Gebäudes zu verwalten und auszugleichen. Es wurde ein Modell für einen zentralen Kontrollagenten erstellt, der als Überwachungsagent zur Erkennung von Spannungsbereichsverletzungen im Netz fungiert. Ein Algorithmus identifiziert diese Ausfälle iterativ, indem er Lastflussberechnungen durchführt und mithilfe einer gewichteten Empfindlichkeitsmatrix (Sensitivity Matrix) Busse mit den höchsten Spannungsabhängigkeiten ermittelt. Anschließend empfiehlt es Stromeinspeisungen an einem einzelnen Bus, bevor es neu bewertet und zum Bus mit der nächsten Priorität übergeht. Dadurch werden effiziente und gezielte Empfehlungen für das Spannungsmanagement im gesamten Netz gewährleistet. Abbildung 42 zeigt den Zusammenhang zwischen dem zentralen Steuerungssystem und der Flexibilitätsoptimierung (wird im Weiteren genauer erläutert).

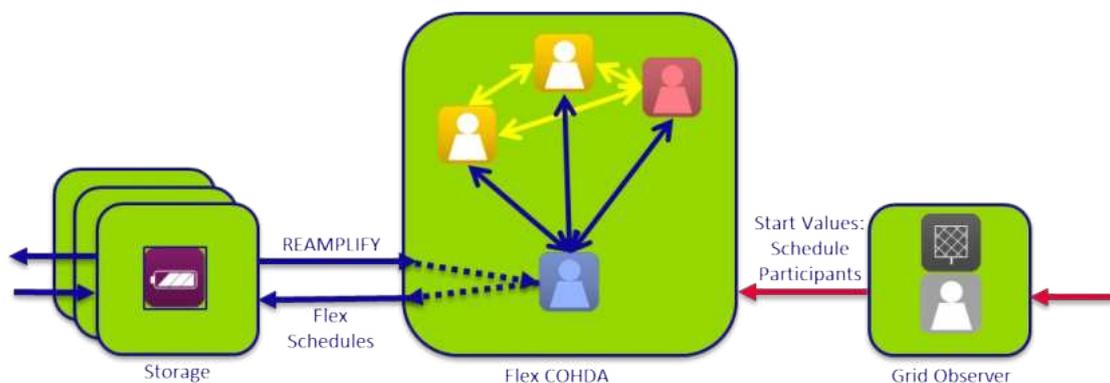


Abbildung 42: Struktur zur Optimierung der Fahrpläne, die aus dem Netzüberwachungs- und -korrekturmodell stammen.

Es wurde ein Flexibilitätsoptimierungsmodell erstellt, um Informationen über Betriebspläne des Netzes zu sammeln und den Netzbetrieb zu optimieren (siehe Abbildung 43). Mehrere Agenten wurden modelliert, die mit jedem Gebäude-BEM kommunizieren, um Flexibilitätssignale zu senden und zwischen der zentralen Steuerung und der verteilten Steuerung zu kommunizieren. Die zentrale Steuerung kommuniziert mit den verschiedenen BEM, um Signale für die erforderliche Leistungskompensation zu verteilen und Probleme mit der Netzspannung zu bewältigen.

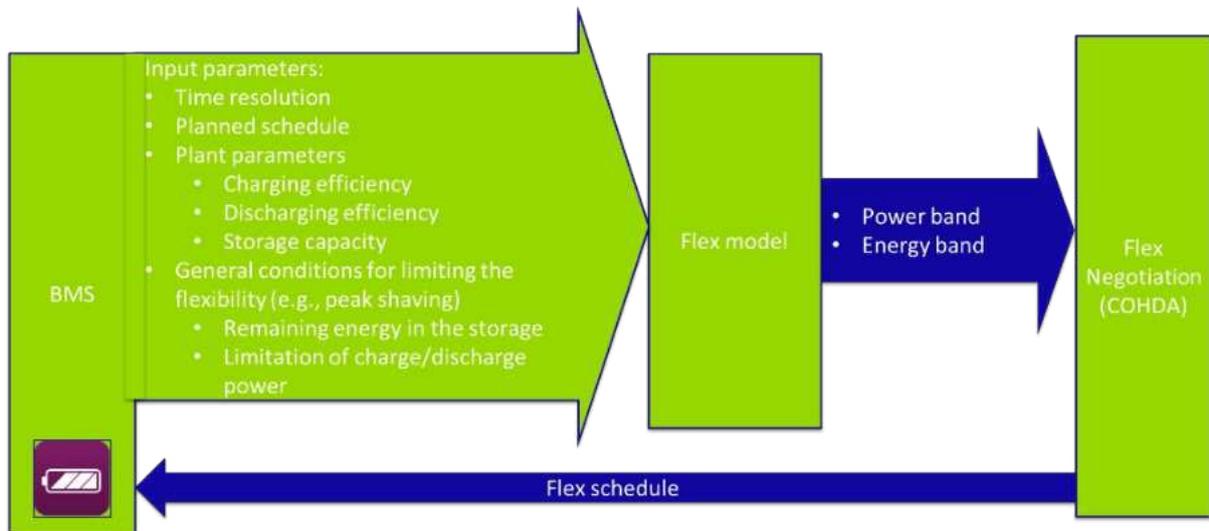


Abbildung 43: Struktur des Informationsflusses zur Optimierung der Flexibilität in Speicherkomponenten.

Es wurden verschiedene Szenarien erstellt, die unterschiedliche Durchdringungsgrade von Geräten für erneuerbare Energien berücksichtigen. Zur Durchführung der Simulationen benötigen die Flexibilitätsagenten zunächst einen Betriebsplan, der eine Prognose des Energieverbrauchs für einen vordefinierten Zeithorizont ermöglicht. Mithilfe dieses Optimierungsplans kommunizieren die Flexibilitätsagenten miteinander und optimieren diesen Betriebsplan unter Verwendung von Informationen zur maximalen Ladung und minimalen Entladung (Watt) sowie zur maximalen und minimalen Energieverfügbarkeit (kWh). Abbildung 44 zeigt Beispiele für diese Leistungs- und Energiebänder.

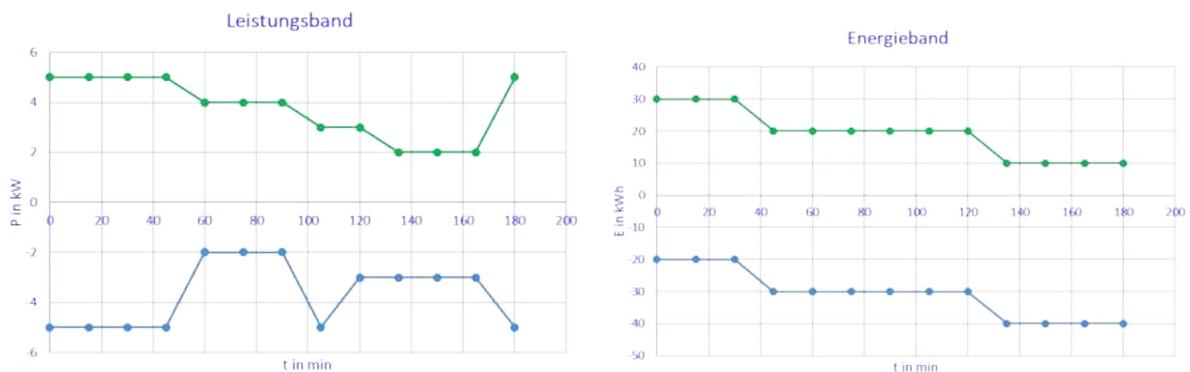


Abbildung 44: Beispiel für Leistungs- und Energieflexibilitätsbänder.

Diese Informationen werden mittels eines selbst entwickelten Mosaik-Adapters (mosaik-COHTA) an den COHTA-Optimierer übermittelt. Der Optimierer zielt darauf ab, den gleichzeitigen Stromverbrauch zu minimieren, indem er einen optimalen Betriebsplan erstellt und diese Informationen an verschiedene Agenten verteilt. Jeder Agent leitet die erhaltenen Informationen an seinen gekoppelten BEM-Controller weiter, der die neuen Einschränkungen auf das Modell anwendet. Die Kopplung erfolgt durch die Nutzung der „mango“-Bibliothek. Das System überwacht dann Spannungsverstöße innerhalb des vordefinierten Bereichs und sendet Leistungsanforderungen an die Batterie, um diese Probleme zu lösen. Auf diese Weise wird die Flexibilität des Netzes maximiert und gleichzeitig der stabile Betrieb gewährleistet. Abbildung 45 zeigt die Architektur für die Optimierung von Fahrpläne basierte auf die Flexibilität der Komponenten durch ein Multiagentensystem.

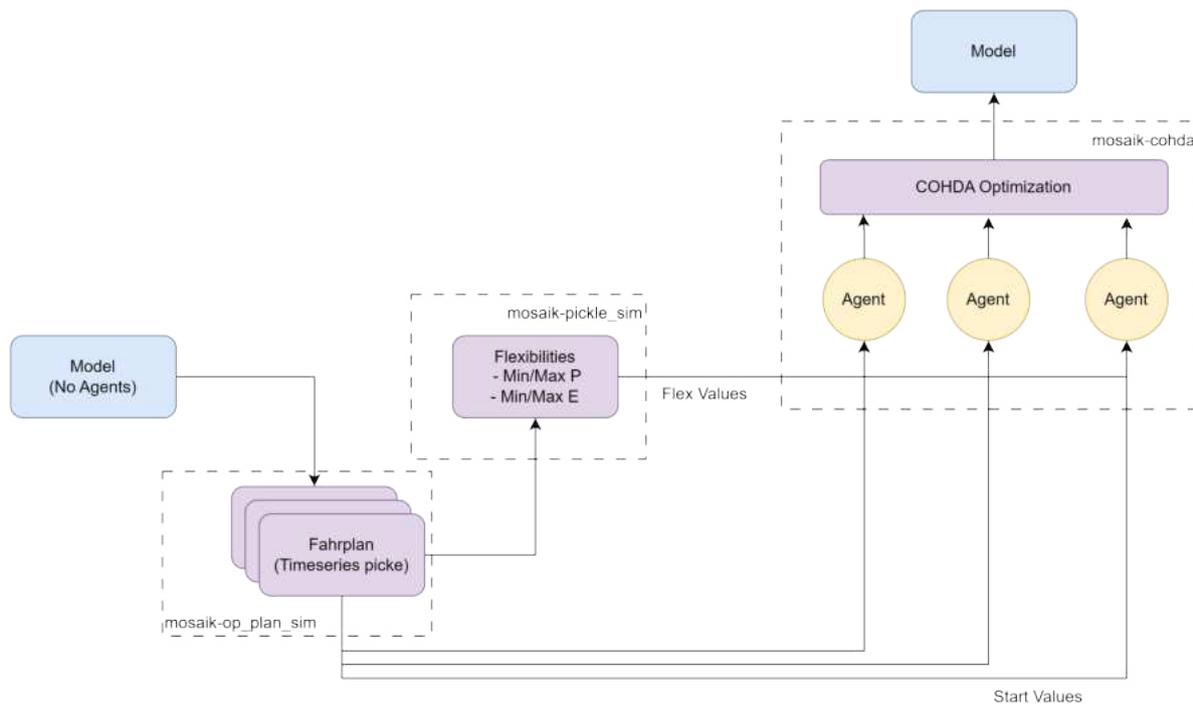


Abbildung 45: Struktur der agentenbasierten Optimierung durch COHDA.

2.5.3.4 Simulationsergebnisse

Die ersten Ergebnisse resultieren aus der erfolgreichen technischen Umsetzung der einzelnen beschriebenen Komponenten. Zur Kopplung der Simulationen der Flexibilitätsrechner und der Flexibilitätsagenten wurden neue Adapter entwickelt. Die zentralen und dezentralen Steuerungen mussten für die Kopplung mit den Flexibilitätsagenten angepasst werden. Die Komponenten repräsentieren die Energieerzeuger, den Verbrauch und die Speicherung.

Da der Fokus auf der Bewertung der Ergebnisse der Flexibilität lag, wurde ein Energieversorgungsszenario in mehreren Konfigurationen bewertet: zunächst ohne zentrale Steuerung und ohne Flexibilitätsagenten, dann ein Szenario mit zentraler Steuerung und dann ein Szenario mit zentraler Steuerung und Flexibilitätsoptimierung.

Ohne jegliche Kontrolle kommt es zu Spannungsproblemen, wobei 140 Ereignisse gezählt werden, bei denen die Spannungspegel außerhalb der $[0.95, 1.05]$ -Grenzen liegen (siehe Abbildung 46). Durch die Einbeziehung von Flexibilität und einer zentralen Steuerung werden diese Spannungsprobleme beseitigt. Das zeigt, dass die implementierten Steuerungssysteme in der Lage sind, das Netz zu steuern und zu verwalten, selbst bei der hohen Durchdringung erneuerbarer Energiequellen und dem erhöhten Spitzenbedarf von Elektrofahrzeugen.

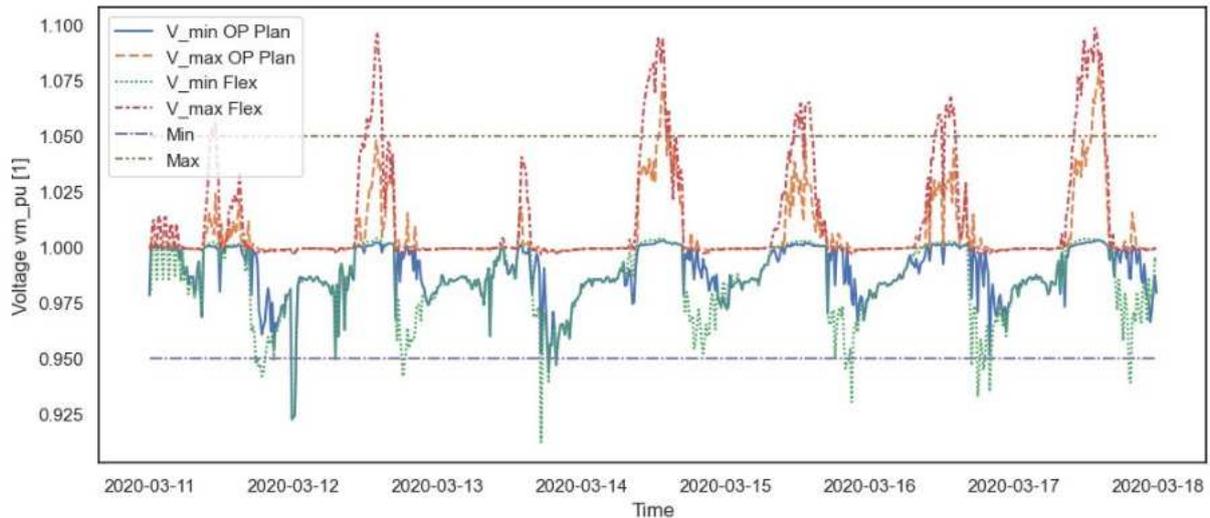


Abbildung 46: Spannungsniveaus in den verschiedenen konstruierten Szenarien.

Ein weiteres Ergebnis zeigt sich in der Variabilität des Ladezustands der Batterien über die Knoten hinweg. Darunter wird der Ausgleich der verfügbaren Energie in den verschiedenen Batterien verstanden, deren Flexibilität vom Ladezustand abhängt. Abbildung 47 zeigt die Beispielergebnisse einer Speichereinheit im Modell, bei der die unterschiedliche SOC-Werte für mehrere Szenarien zu erkennen sind.

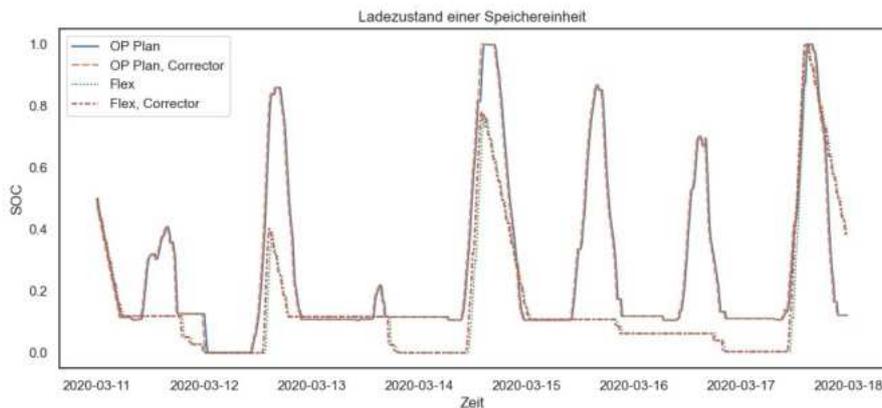


Abbildung 47: Beispiel für SOC in einer Speichereinheit im Modell. Durch die Flexibilitätsoptimierung wird versucht, die Ladestufen zu reduzieren und die Ladeflexibilität des Speichers zu erhöhen.

Ohne die Implementierung der Flexibilitätsoptimierung beträgt der mittlere Ladezustand der Batterien über die Simulation hinweg $0,38 \pm 0,24$. Durch die Nutzung der Flexibilität beträgt der mittlere Ladezustand $0,38 \pm 0,14$, wodurch die Variabilität zwischen den Komponenten verringert wird. Die Implementierung von Flexibilität und zentraler Steuerung reduziert den durchschnittlichen SOC der Batterie auf $0,25 \pm 0,15$. Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse dieser statistischen Analyse. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass auch kleinere Batterien realisierbar sind, da die Anforderungen an die Batteriedimensionierung reduziert werden.

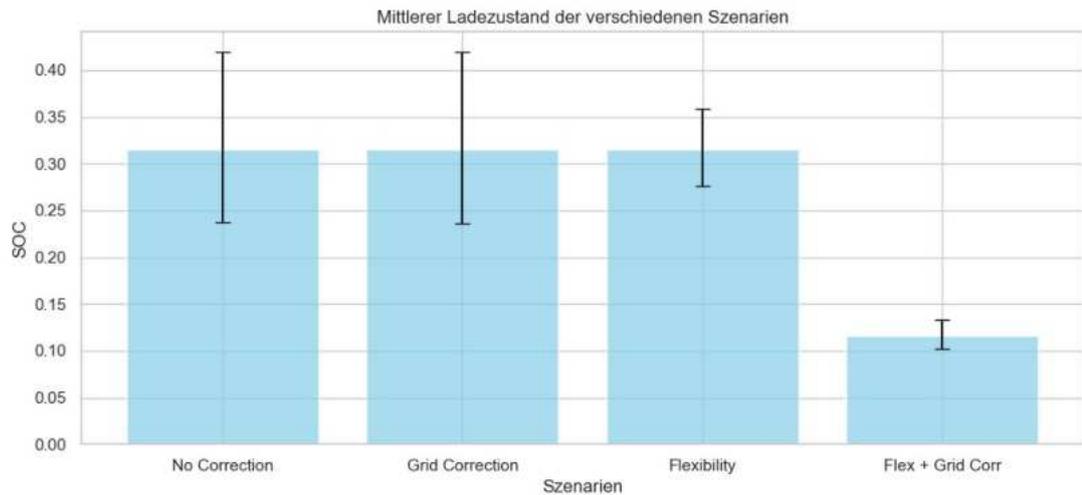


Abbildung 48: Statistische Analyse des SOC für die verschiedenen Batterien in den entwickelten Szenarien.

Auch der Parallelverbrauch der Batterien wird reduziert (Abbildung 49). Durch die Auswertung der kumulierten Lade- und Entladeleistung wird festgestellt, dass die Nutzung der Flexibilitätsoptimierung die parallele Nutzung der Batterien reduziert, deren Lade- und Entladevorgänge reduziert und im Allgemeinen einen geringeren Leistungsfluss von den Geräten aufrechterhält. Dies trägt dazu bei, die Flexibilität des Netzes zu maximieren und größere Kapazitäten für die Aufnahme zusätzlicher lokal erzeugter Energie (aus PV-Anlagen) zu ermöglichen und so den Eigenverbrauch durch Vermeidung von Leistungseinschränkungen zu maximieren.

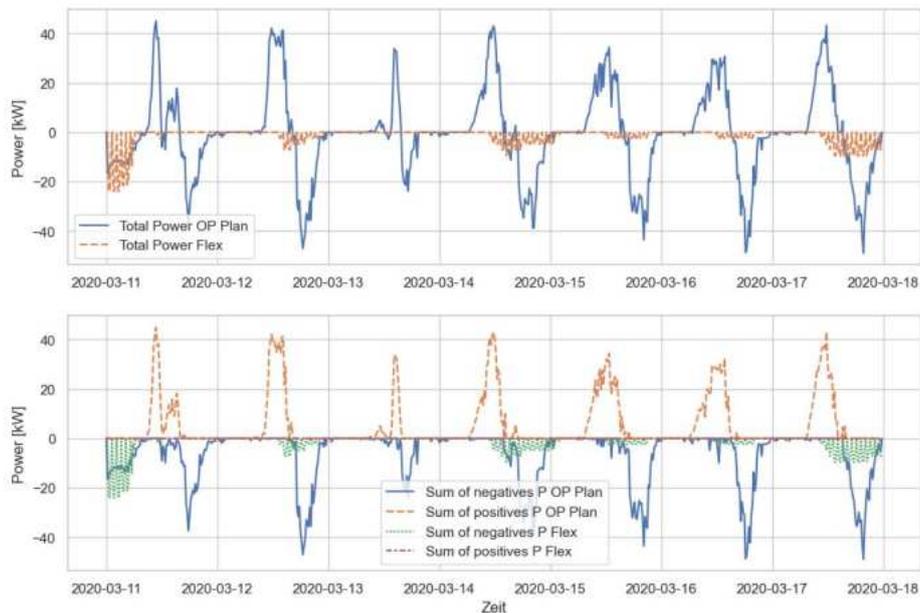


Abbildung 49: Aggregation der Gesamtleistung (oben) und der Gesamtlade- und Entladeleistung (unten) in den verschiedenen Szenarien. In den Flexibilitätsszenarien werden Batterien seltener und mit geringerer Intensität genutzt.

Ein weiteres Ergebnis der Auswertungen betrifft den umgesetzten Prognosehorizont. Aufgrund der Komplexität eines Optimierungsproblems wurde die Flexibilitätsoptimierung für einen vorgegebenen Zeitraum durchgeführt. Der Einfluss dieses Horizonts wurde ebenfalls bewertet. Längere Prognosehorizonte führten dazu, dass während der gesamten simulierten Woche Probleme mit geringerer Spannung auftraten. Die Mittelwerte des Batterieladungsstatus -SOC wurden jedoch zwischen 0.238 und 0.251 gehalten. Bei dem Versuch, Prognosehorizonte von mehr als 12 Stunden (48 Schritte) zu berücksichtigen, wurden Probleme mit der Simulation festgestellt, weil die Komplexität

des Optimierungsproblems dazu führte, dass die Simulation angehalten wurde und keine Lösungen vorhanden waren.

2.5.3.5 Ausblick

Das Durchstichszenario dient dazu, drei Hauptergebnisse zu liefern. Zunächst wurde eine technische Umsetzung einer Co-Simulation von Flexibilitätsoptimierung, zentraler und dezentraler Smart-Grid-Steuerung sowie eines Stromnetzes mit hoher Durchdringung erneuerbarer Energien und Elektrofahrzeuge erreicht. Zweitens deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die zentrale Steuerung das Stromnetz erfolgreich verwaltet, um Spannungsprobleme zu verhindern, die sich aus einer derart komplexen Netzkonfiguration ergeben. Dies wird durch eine Kombination aus zentraler Steuerung, dezentralem Gebäudeenergiemanagementsystem und Flexibilitätsoptimierung erreicht. Drittens trägt die Implementierung von Flexibilität im Smart Grid dazu bei, die Nachfrage nach verfügbaren Speicherkapazitäten zu reduzieren und damit die für den Betrieb des Netzes erforderliche Batteriespeichergröße zu verringern. Aufgrund der steigenden Komplexität des Problems ergeben sich Einschränkungen, da das Optimierungsproblem über längere Zeithorizonte nicht gelöst werden konnte. Darüber hinaus verschärfte sich das Problem bei der Belegung mehrerer dezentraler Energiespeicher. Dadurch ist die Modellierung größerer Stadtteile noch eingeschränkt.

Eine Erweiterung des aktuellen Modells könnte zusätzliche Komponenten für zukünftige Energieszenarien umfassen, wie zum Beispiel Wärmepumpen und elektrische Warmwasserbereiter zur Deckung des Wärmebedarfs im Quartier. Das Steuerungssystem wird um Funktionen zur Bewältigung von Leitungslastverstößen erweitert, womit die bestehende Funktionalität zur Behandlung von Spannungsbereichsverstößen ergänzt wird. Darüber hinaus sollen weitere Ladestrategien getestet werden, die durch das Lastmanagement der Ladestationen zur weiteren Reduzierung der Flexibilitätsanforderungen beitragen können. Von besonderem Interesse ist die Implementierung von Flexibilitätsmechanismen in anderen Speichersystemen wie thermischen Speichern, um parallele Wärmebedarfe zu vermeiden und den Betrieb der Energieversorgung eines Stadtteils zu optimieren, was ein Mehrdomänenmodell ermöglichen würde.

Des Weiteren ist die Modellierung der Kommunikation zwischen den Agenten von Interesse, insbesondere jene, die Batteriesysteme überwachen und steuern. Der im Szenario IKT entwickelte Ansatz ermöglicht die Modellierung einer multilateralen, bidirektionalen Kommunikation eines verteilten Systems mit einem zentralen Energiemanagementsystem. Die wachsende Komplexität des Kommunikationssystems kann zu Herausforderungen führen, die typisch für Kommunikationssysteme sind, wie etwa Latenzen und Paketverluste.

3 Veröffentlichungen

Tabellarische Auflistung der Veröffentlichungen, die in Zusammenhang mit den hier erzielten Ergebnissen stehen.

„Titel“ - Konferenz/ Journalname	Datum der Veröffentlichung	Autorenschaft
„NOVA Measures in Suburban Low Voltage Grids with an Inhomogeneous Distribution of Electric Vehicles,” - 4th E-Mobility Power System Integration Symposium, (EMOB 2020), ISBN 978-3-9820080-6-6	03.11.2020	Wagner H., Wussow, J., Engel, B.
„Electric mobility integration in energy communities: trending topics and future research directions” - 5th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2021)	27.09.2021	Eckhoff, S.; Wagner, H.; Werth, O.; Gerlach, J.; Breitner, M. H.; Engel, B.
„Analysis of the Grid Capacity for Electric Vehicles in Districts with a Major Need for Sustainable Energy Refurbishment: the Case of a District in Lower Saxony” - EnviroInfo 2021. Environmental Informatics - A bogeyman or saviour to achieve the UN Sustainable Development Goals?	27.9.- 29.9.2021	Wagner, Henrik; Eckhoff, Sarah; Fayed, Sarah; Penaherrera V., Fernando; Ofenloch, Annika; Werth, Oliver et al.
„An Open Source Grid Observer for the Analysis of Power Flexibilities in Low Voltage Distribution Grid Simulations.” - ICSGCE - 10th International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies	14.10.- 16.10.2022	Fayed, Sarah; Penaherrera Vaca, Fernando Andres; Wagner, Henrik; Rolink, Johannes
„Co-simulation-based analysis of the grid capacity for electric vehicles in districts: the case of ‘Am Ölper Berge’ in Lower Saxony - 6th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2022)	10.10.2022	Wagner, H.; Peñaherrera, F.; Fayed, S.; Werth, O.; Eckhoff, S.; Engel, B. et al.
„Open-Source Repository: Analysis of the Grid Capacity for Electric Vehicles in Am Ölper Berge District in Lower Saxony” (https://gitlab.com/zdin-zle/scenarios/gridcapacity-for-electric-mobility)		Wagner, H.; Penaherrera, F.; Fayed, S.; Eckhoff, S.; Werth, O.
„Collaborative Research Platform for Investigating the Impact of Digitalization on Robust Network Operation”, - ETG-CIRED-Workshop 2021 (D-A-CH): Innovationen im Verteilnetz	02.11.- 03.11.2021	Fayed, Sarah; Petznik, Jan; Poppinga, Thomas; Rubio, Alejandro; Schuldt, Frank; Rolink, Johannes
„Infrastructure of a Laboratory Coupled Co-simulation for the Investigation of Flexibility Provision in Distribution Grids“ - ETG Kongress 2023: Die Energiewende beschleunigen	25.05.- 26.05.2023	Fayed, Sarah; Rubio, Alejandro; Petznik, Jan; Rolink, Johannes; Schuldt, Frank;
Efficient Collaboration in Interdisciplinary Teams – an Electromobility Research Example, Poster at 6th Workshop of Applied Science, Hannover; doi: 10.5281/zenodo.11567933	02.05.- 03.05.2024	H. Wagner, S. Lier, S. Eckhoff, S. Fayed, F. Peñaherrera V., O. Werth, B. Engel, M. Breitner, S. Lehnhoff, J. Rolink
Efficient Collaboration in Interdisciplinary Teams – an Electromobility Research Example, Paper, doi:	11.06.2024	Peñaherrera V., O. Werth, B. Engel, M.

10.5281/zenodo.11570770		Breitner, S. Lehnhoff, J. Rolink
-------------------------	--	-------------------------------------

4 Literaturverzeichnis

- [1] Adrian Beyertt, Paul Verwiebe, Stephan Seim, Filip Milojkovic, and Joachim Müller-Kirchenbauer. 2020. *Felduntersuchung zu Behavioral Energy Efficiency Potentialen von privaten Haushalten*. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3855575>.
- [2] Bundesregierung. 2022. *Klimaschutzgesetz. Generationenvertrag für das Klima (2022)*. Retrieved June 21, 2024 from <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>.
- [3] Deutsches Institut für Normung. 2020. *DIN EN 50160:2020-11. Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN 50160:2010 + Cor.:2010 + A1:2015 + A2:2019 + A3:2019*, 50160:2020-11. Beuth Verlag GmbH, Berlin. Retrieved from.
- [4] S. Eckhoff, H. Wagner, O. Werth, J. Gerlach, M. H. Breitner, and B. Engel. 2021. Electric mobility integration in energy communities: trending topics and future research directions. In *5th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2021)*, Hybrid Conference, Germany, 196–204. DOI: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.2524>.
- [5] Rami Elshinawy. *mosaik-pandapower 0.2.2*. Retrieved June 25, 2024 from <https://pypi.org/project/mosaik-pandapower/>.
- [6] William F. Holmgren, Clifford W. Hansen, and Mark A. Mikofski. 2018. pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *JOSS* 3, 29, 884. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.00884>.
- [7] Sarah Fayed, Fernando P. V., Henrik Wagner, and Johannes Rolink. 2022. An Open Source Grid Observer for the Analysis of Power Flexibilities in Low Voltage Distribution Grid Simulations. In *10th International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies. (ICSGCE)*. IEEE, Kuala Lumpur, Malaysia, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICSGCE55997.2022.9953716>.
- [8] Carlos Gaete-Morales, Hendrik Kramer, Wolf-Peter Schill, and Alexander Zerrahn. 2021. An open tool for creating battery-electric vehicle time series from empirical data, emobpy. *Scientific data* 8, 1, 152. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00932-9>.
- [9] Hakan Ibrahim Tol. 2015. *District Heating in Areas with Low Energy Houses: Detailed Analysis of District Heating Systems based on Low Temperature Operation and Use of Renewable Energy*. DTU Civil Engineering Report No. R-283 (UK). Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.
- [10] International Organization for Standardization. 2007. *Energy performance of buildings — Calculation of energy use for space heating and cooling*, ISO/FDIS 13790:2007(E) https://www.sysecol2.ethz.ch/OptiControl/LiteratureOC/ISO_07_FDIS_13790_ApprovalDraft.pdf. Retrieved June 24, 2024 from.
- [11] mosaik. *mosaik-heatpump* · GitLab. Retrieved June 25, 2024 from https://gitlab.com/mosaik/components/energy/mosaik-heatpump/-/tree/master?ref_type=heads.
- [12] Annika Ofenloch, Jan S. Schwarz, Deborah Tolk, Tobias Brandt, Reef Eilers, Rebeca Ramirez, Thomas Raub, and Sebastian Lehnhoff. 2022. MOSAIK 3.0: Combining Time-Stepped and Discrete Event Simulation. In *2022 Open Source Modelling and Simulation of Energy Systems (OSMSES)*, Aachen, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/OSMSES54027.2022.9769116>.
- [13] OFFIS-DAI. *cosima integrated the communication simulator OMNeT++ into agent communication*. Retrieved June 21, 2024 from <https://github.com/OFFIS-DAI/cosima>.
- [14] *OMNeT++ Discrete Event Simulator*. Retrieved June 21, 2024 from <https://omnetpp.org/>.
- [15] OMNeT++ Simulator. *Architecture of wireless network simulation – OMNeT++ Simulator*. Retrieved June 21, 2024 from <https://omnet-manual.com/omnet-wireless-network-simulation/architecture-of-wireless-network-simulation/>.

- [16] Volker Quaschnig. 2013. *Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen. Systemauslegung: Experten der HTW Berlin erklären, wie PV-Speichersysteme heute und zukünftig kostenoptimal dimensioniert werden können.* (2013). Retrieved June 25, 2024 from <https://www.volker-quaschnig.de/artikel/2013-06-Dimensionierung-PV-Speicher/index.php>.
- [17] Steinbrink, Cornelius and Blank-Babazadeh, Marita and El-Ama, André and Holly, Stefanie and Lüers, Bengt and Nebel-Wenner, Marvin and Ramírez Acosta, Rebeca P. and Raub, Thomas and Schwarz, Jan Sören and Stark, Sanja and Nieße, Astrid and Lehnhoff, Sebastian. 2019. CPES Testing with mosaik: Co-Simulation Planning, Execution and Analysis. *Applied Sciences* 9, 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9050923>.
- [18] Umweltbundesamt. 2024. *Indikator: Energieverbrauch für Gebäude (2024)*. Retrieved June 21, 2024 from <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-energieverbrauch-fuer-gebaeude>.
- [19] Universität Kassel. *DHWcalc. Version 2.02b*. Retrieved June 24, 2024 from <https://www.uni-kassel.de/maschinenbau/institute/thermische-energietechnik/fachgebiete/solar-und-anlagentechnik/downloads>.
- [20] VDE FFN. 2018. *Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz. Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz*, VDE-AR-N 4105 Anwendungsregel: 2018-11 <https://www.vde.com/de/fnn/themen/tar/tar-niederspannung/erzeugungsanlagen-am-niederspannungsnetz-vde-ar-n-4105-2018>. Retrieved June 25, 2024 from.
- [21] H. Wagner, S. Eckhoff, S. Fayed, F. Peñaherrera V., A. Ofenloch, O. Werth, B. Engel, M. Breitner, S. Lehnhoff, and J. Rolink. 2021. Analysis of the Grid Capacity for Electric Vehicles in Districts with a Major Need for Sustainable Energy Refurbishment: The Case of a District in Lower Saxony. In *35th EnviroInfo Conference – A bogeyman or saviour to achieve the UN Sustainable Development Goals?*, Volker Wohlgemuth, Stefan Naumann, Hans-Knud Arndt and Grit Behrens, Eds. Shaker Verlag GmbH, Berlin, 65–66. DOI: <https://doi.org/10.2370/9783844083293>.
- [22] H. Wagner, F. Peñaherrera, S. Fayed, O. Werth, S. Eckhoff, B. Engel, M. H. Breitner, S. Lehnhoff, and J. Rolink. 2022. Co-simulation-based analysis of the grid capacity for electric vehicles in districts: the case of “Am Ölper Berge” in Lower Saxony. In *6th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2022)*, Den Haag, Netherlands, 33–41. DOI: <https://doi.org/10.1049/icp.2022.2713>.
- [23] H. Wagner, F. Penaherrera Vaca, and S. Fayed. 2022. *Grid Capacity for Electric Mobility in Existing Districts (2022)*. Retrieved June 21, 2024 from <https://gitlab.com/zdin-%20zle/scenarios/grid-capacity-for-electric-mobility>.
- [24] H. Wagner, J. Wussow, and B. Engel. 2020. NOVA Measures in Suburban Low Voltage Grids with an Inhomogeneous Distribution of Electric Vehicles. In *4th E-Mobility Power System Integration Symposium*. Energynautics GmbH, Darmstadt, Germany.
- [25] Henrik Wagner, Sarah Eckhoff, Sarah Lier, Sarah Fayed, Fernando Penaherrera, Michael Breitner, Bernd Engel, Sebastian Lehnhoff, and Johannes Rolink. Efficient Collaboration in Interdisciplinary Teams: an Electromobility Research Example. DOI: <https://doi.org/10.5281/ZENODO.11570770>.
- [26] ZDIN-ZLE. *Components. photovoltaic* · *GitLab*. Retrieved June 25, 2024 from <https://gitlab.com/zdin-zle/models/photovoltaic>.
- [27] ZDIN-ZLE. *Scenarios. Development of a Grid Monitor* · *GitLab*. Retrieved June 21, 2024 from <https://gitlab.com/zdin-zle/scenarios/development-of-a-grid-monitor>.
- [28] Zukunftslabor Energie. *ZLE Open Science Declaration*. Retrieved June 21, 2024 from <https://www.zdin.de/uploads/ZLE-Open-Science-Declaration-v7.pdf>.