

BACHELORTHESIS

Mario Emanuel Fernández

Effizientes Strommanagement in deutschen Haushalten

Analyse der Potenziale durch die Integration von Smart-Meter-Daten und maschinellem Lernen im Kontext dynamischer Tarifmodelle

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK

Department Informatik

Faculty of Computer Science and Engineering

Department Computer Science

Mario Emanuel Fernández

Effizientes Strommanagement in deutschen Haushalten. Analyse der Potenziale durch die Integration von Smart-Meter-Daten und maschinellem Lernen im Kontext dynamischer Tarifmodelle

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Informatik Technischer Systeme*
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Marina Tropmann-Frick
Zweitgutachter: Prof. Dr. Stefan Sarstedt

Eingereicht am: 18. Juni 2024

Mario Emanuel Fernández

Thema der Arbeit

Effizientes Strommanagement in deutschen Haushalten. Analyse der Potenziale durch die Integration von Smart-Meter-Daten und maschinellem Lernen im Kontext dynamischer Tarifmodelle

Stichworte

Digitalisierung, Dynamische Stromtarife, Datenanalysen, Energiemanagementsystem, Energieeffizienz, Energiegesetz, Energiewende, Energiewirtschaft, Home Energy Management System, Erneuerbare Energie, Lastmanagement, Lastprofil, Lastvariable Tarife, Machine Learning, Photovoltaik-Anlage, Prädiktive Analyse, Smart Grid, Smart Meter Gateway, Smart Meter, Spotmarkt, Strombörse, Stromdaten, Stromerzeugung, Stromspeicher.

Kurzzusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit werden die Auswirkungen dynamischer Stromtarife auf das Energiemanagement von Haushalten untersucht. Ziel ist es, zu analysieren, wie verschiedene Nutzertypen ihre Energiekosten durch den Einsatz dynamischer Tarife und fortschrittlicher Energiemanagementtechnologien, wie Home Energy Management Systems (HEMS) und intelligente Zähler, senken können. Dabei wird ein Simulator eingesetzt, der auf realen Daten basiert, um Stromverbrauch, -erzeugung und -preise zu simulieren und auszuwerten, welches Verbrauchsverhalten für Privathaushalte zukünftig rentabel sein könnte. Die Ergebnisse zeigen, dass Verbraucher mit Photovoltaikanlagen und Batteriesystemen dank ihrer Fähigkeit, Energie zu erzeugen und zu speichern, eine größere Unabhängigkeit vom Netz erreichen und dynamische Tarife effizienter nutzen können als traditionelle Verbraucher. Dies führt zu erheblichen Kosteneinsparungen und einer besseren Anpassung des Energieverbrauchs an die Tarifstrukturen. Die Arbeit hebt die Bedeutung zeitlicher Muster des Stromverbrauchs und der Preise hervor und unterstreicht die Rolle intelligenter Zähler bei der Echtzeitüberwachung des Energieverbrauchs. Trotz einiger Einschränkungen bietet die Untersuchung wertvolle Erkenntnisse für die Optimierung des Energiemanagements und zeigt, dass dynamische Tarife und intelligente Systeme wesentliche Elemente für eine nachhaltige Energiewende sind.

Mario Emanuel Fernández

Title of Thesis

Efficient electricity management in German households. Analyzing the potential of integrating smart meter data and machine learning in the context of dynamic tariff models.

Keywords

Digitalization, Dynamic Electricity Tariffs, Data Analysis, Energy Management System, Energy Efficiency, Energy Law, Energy Transition, Energy Industry, Home Energy Management System, Renewable Energy, Load Management, Load Profile, Time-of-Use Tariffs, Machine Learning, Photovoltaic System, Predictive Analysis, Smart Grid, Smart Meter Gateway, Smart Meter, Spot Market, Electricity Exchange, Electricity Data, Electricity Generation, Electricity Storage.

Abstract

This bachelor's thesis examines the impact of dynamic electricity tariffs on household energy management. The aim is to analyze how different types of users can reduce their energy costs using dynamic tariffs and advanced energy management technologies, such as Home Energy Management Systems (HEMS) and smart meters. A simulator based on real data is used to simulate electricity consumption, generation and prices and to evaluate which consumption patterns could be profitable for private households in the future.

The results show that consumers with photovoltaic systems and battery storage achieve greater grid independence and can utilize dynamic tariffs more efficiently than traditional consumers. This leads to significant cost savings and better alignment of energy consumption with tariff structures.

The study highlights the importance of temporal patterns in electricity consumption and prices, emphasizing the role of smart meters in real-time energy monitoring. Despite some limitations, the research provides valuable insights into optimizing energy management and demonstrates that dynamic tariffs and smart systems are essential elements for a sustainable energy transition.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	vii
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	2
1.2 Problemanalyse.....	2
1.3 Zielsetzung	3
1.4 Forschungsmethodik.....	4
1.4.1 Methodik.....	4
1.4.2 Forschungsinstrument.....	4
1.5 Gliederung der Arbeit.....	5
2 Theoretische Grundlagen.....	7
2.1 Variable und dynamische Stromtarife	7
2.2 Strommarkt.....	8
2.3 Smart Meter Gateway.....	9
2.4 Kategorien von Letztverbrauchern	10
2.5 Home Energy Management System	11
3 Stand der Forschung	12
3.1 Überblick über frühere Studien und relevante Fälle.....	12
3.2 Internationale Erfahrungen mit variablen Stromtarifen	13
3.3 Analyse der aktuellen Situation in Deutschland.....	14
4 Anforderungsanalyse.....	15
4.1 Lastprofil im Rahmen des Letztverbrauchers.....	15
4.2 Technischer Aufbau eines Haushaltsstromsystems.....	16
4.3 Strompreiskomponenten.....	17
4.4 Machine-Learning-Komponente	17

4.5	Anforderungen.....	18
4.5.1	Funktionale Anforderungen.....	18
4.5.2	Nicht-Funktionale Anforderungen.....	18
5	Umsetzung	20
5.1	Architektur der Simulationsanwendung.....	20
5.2	Funktionsweise der Anwendungskomponenten.....	21
5.2.1	Datenerhebung.....	21
5.2.2	Datenaufbereitung.....	23
5.2.3	Simulationen	24
5.2.4	Machine Learning	28
5.2.5	Visualisierungen	33
5.3	Simulationsanwendung.....	34
5.3.1	Entwicklung der Simulationsanwendung	34
5.3.2	Verwendung der Simulationsanwendung	35
5.4	Durchführung der Simulationen.....	37
6	Ergebnisse und Analyse.....	38
6.1	Zusammenhänge zwischen Komponenten und Variablen	38
6.2	Bedeutung der Zeitintervalle für Stromverbrauch und -preis.....	40
6.3	Auswirkungen auf die Letztverbraucher	41
7	Fazit.....	46
7.1	Reflexion über die Ergebnisse.....	46
7.2	Einschränkungen der Studie	47
	Literaturverzeichnis	50
	Anhang.....	56
A.1	Simulationsbericht des PVGIS-Simulators	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das Smart-Meter-Gateway und seine Umgebung	9
Abbildung 2: Darstellung eines Standardlastprofils	15
Abbildung 3: Darstellung der Simulationsanwendung-Architektur	20
Abbildung 4: Darstellung der Standardlastprofile der Haushalte in Hamburg.....	21
Abbildung 5: Ergebnis einer durchgeführten Simulation mit dem PVGIS-Simulator	22
Abbildung 6: Darstellung der Datenintegration durch die ETL-Prozesse	23
Abbildung 7: Darstellung der Informationssammlung aus dem Datenmodell	24
Abbildung 8: Darstellung eines Haushaltsstromsystems für das Flexumer-Szenario	26
Abbildung 9: Bericht über das Energieverbrauchsverhalten und Strommarktpreise.....	28
Abbildung 10: Darstellung der Datenpartition für das Modelltraining - Methode 1	29
Abbildung 11: Darstellung der Datenpartition für das Modelltraining - Methode 2	29
Abbildung 12: Beispiel eines Entscheidungsbaumes beim Modelltraining mit XGBoost.....	30
Abbildung 13: Quellcode für das Modelltraining mit XGBosst.....	31
Abbildung 14: Ergebnisse der Strompreisprognose eines trainierten Modells.....	32
Abbildung 15: Ergebnis der Variablen der trainierten Modelle	32
Abbildung 16: Strompreisprognose für das Jahr 2024	33
Abbildung 17: Darstellung der Informationssammlung für die Visualisierungen.....	33
Abbildung 18: Quellcode SGS-Launcher	35
Abbildung 19: Wellcome page „Smart Grid Strategist“	35
Abbildung 20: Benutzeroberfläche der Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“	36
Abbildung 21: Grafiken der Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“	36

Abbildung 22: Korrelationsmatrix der Modellvariablen	38
Abbildung 23: Pearson-Korrelationen zwischen den Variablen des Modells	39
Abbildung 24: Bedeutung des Zeitintervalls für die Modellvariablen	40
Abbildung 25: Dynamische Tarifkosten im Vergleich zu festen Tarifen - Consumer	41
Abbildung 26: Prognose des Lasten Netz und des Strommarktpreises für das Jahr 2024.....	42
Abbildung 27: Verteilung des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung	43
Abbildung 28: Dynamische Tarifkosten im Vergleich zu festen Tarifen - Prosumer	43
Abbildung 29: Verteilung des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung	44
Abbildung 30: Verteilung des monatlichen Stromverbrauchs nach Lastart	45
Abbildung 31: Dynamische Tarifkosten im Vergleich zu festen Tarifen - Flexumer	45
Abbildung 32: Dynamische Tarifkosten eines Flexumer gegenüber eines Consumer	47

1 Einleitung

Die EU-Kommission initiierte im Dezember 2019 den „European Green Deal“, der die EU auf den Weg zur Klimaneutralität bis 2050 führen, ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken und die Lebensqualität ihrer Bürger verbessern soll [19]. Im Fokus der deutschen Maßnahmen steht der Übergang zu nachhaltigeren Energiequellen und effizienteren Energiemanagementsystemen, insbesondere durch den Ausbau erneuerbarer Energien [4][5][6].

Eine Schlüsselrolle bei der Energiewende in Deutschland spielt die Digitalisierung. Durch die Einführung intelligenter Zähler, auch bekannt als „Smart Meter“, soll das Lastmanagement in den Verteilungsnetzen optimiert werden [2]. Diese technologischen Fortschritte ermöglichen eine effizientere Nutzung von Energie und sind ein wesentlicher Bestandteil der deutschen Strategie zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen [5][10].

Die Einführung intelligenter Zähler wird begleitet von der Einführung dynamischer Stromtarife in Deutschland, die ab 2025 eingeführt werden und einen wichtigen Schritt zur Transformation der Rolle der Letztverbraucher auf dem Energiemarkt darstellen [8][11][13]. Letztverbraucher werden die Möglichkeit haben, sich aktiv am Energiemarkt zu beteiligen und von Schwankungen der Strompreise zu profitieren [8][11][13].

Aus diesem Umfeld sind innovative Softwarelösungen wie Home Energy Management Systems (HEMS) hervorgegangen. HEMS verbinden intelligente Technologien wie intelligente Zähler, Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) und Speichersysteme und unterstützen die Maximierung des Eigenverbrauchs von Solarenergie [21].

Diese Bachelorarbeit analysiert die wirtschaftliche Effizienz des Haushaltsstrommanagements unter Verwendung von Daten aus intelligenten Zählern und Machine-Learning-Methoden.

1.1 Motivation

Die Motivation für diese Forschungsarbeit ergibt sich aus dem sogenannten Smart-Meter-Gesetz, das im September 2016 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) initiiert wurde und am 12. Mai 2023 in Kraft trat [3][7]. Ziel dieses Gesetzes ist die flächendeckende Einführung intelligenter Messsysteme in Deutschland bis 2032, um die Digitalisierung der Energiewende voranzutreiben [3][7]. Intelligente Messsysteme, auch bekannt als intelligente Zähler oder Smart Meter, erfassen den Energieverbrauch in Echtzeit und übermitteln die Daten automatisch an die Energieversorger [2]. Dies ermöglicht Letztverbrauchern, detaillierte Informationen über ihren Stromverbrauch zu erhalten und diesen effizienter zu steuern [2].

Das Gesetz legt einen klaren Fahrplan zur Umsetzung fest: Bis Ende 2025 müssen mindestens 20 % der Letztverbraucher mit einem jährlichen Stromverbrauch von 6.000 bis 100.000 kWh sowie Anlagenbetreiber mit einer installierten Leistung von 7 bis 100 kW mit Smart Metern ausgestattet sein. Diese Quote muss sich bis Ende 2028 auf 50 % erhöhen und bis Ende 2030 auf 95 % [3][7]. Außerdem müssen ab 2025 alle Stromversorger verpflichtend „dynamische Stromtarife“ anbieten [8]. Diese Rahmenbedingungen und die potenziellen Vorteile der Smart-Meter-Technologie motivieren die vorliegende Forschungsarbeit, um Lösungen zu entwickeln, die die Einführung dynamischer Stromtarife unterstützen und eine breite Akzeptanz bei den Verbrauchern fördern [8].

1.2 Problemanalyse

Die Einführung des Smart-Meter-Gesetzes in Deutschland hat die Bedeutung von last- und zeitabhängigen variablen Tarifen im Zuge der Energiewende und des steigenden Bedarfs an flexiblen Stromtarifen hervorgehoben [7][9][13]. Diese sind Teil eines breiteren Trends, der darauf abzielt, den Stromverbrauch besser an die Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen und die Netzbelastung anzupassen [8][13][14]. Im Mittelpunkt dieser Umstrukturierung stehen verschiedene Herausforderungen, darunter die Akzeptanz bei den Verbrauchern, technische Umsetzbarkeit sowie regulatorische und wirtschaftliche Aspekte [8][12][13][29].

Die Einführung dynamischer Tarife wirft Fragen auf, wie sich dies auf das Verhalten der Verbraucher auswirken wird und welche technologischen Innovationen erforderlich sind, um die Flexibilität im Stromnetz zu erhöhen. Dabei stellt sich die Frage, ob die Regulierungsmaßnahmen ausreichen, um einen harmonischen Umstieg zu ermöglichen [8][13][24].

1.3 Zielsetzung

Abgrenzung

Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen dynamischer Stromtarife auf das Haushaltsstrommanagement und analysiert Daten zu Stromverbrauch, -erzeugung und -preisen. Zudem wird die Leistung technologischer Lösungen wie HEMS und deren Integration in das Energiesystem eines Haushalts betrachtet. Der Fokus liegt darauf, wie Verbraucher ihren Stromverbrauch durch HEMS-Technologien und dynamische Tarife optimieren können. Die Investitionskosten vor Beginn der Analyse werden nicht berücksichtigt.

Definition der Zielsetzungen

1. **Analyse der Auswirkungen dynamischer Stromtarife:** Es wird untersucht, wie sich dynamische Stromtarife auf das Stromverhaltensverhalten der Haushalte auswirken und wie flexibel Letztverbraucher auf unterschiedliche Tarifstrukturen reagieren können.
2. **Bewertung der wirtschaftlichen Effizienz:** Ein zentrales Anliegen ist die ökonomische Bewertung des Haushaltsstrommanagements unter Berücksichtigung dynamischer Stromtarife. Dabei sollen potenzielle Einsparungen durch die Nutzung dieser Tarife ermittelt und analysiert werden.
3. **Identifizierung von Optimierungspotenzialen:** Diese Arbeit zielt darauf ab, mögliche Schranken für eine effektive Nutzung dynamischer Stromtarife zu identifizieren und darauf aufbauend Empfehlungen zur Optimierung des Energiemanagements abzuleiten.
4. **Beitrag zur Forschung:** Die Studie soll einen Beitrag zur Forschung leisten, indem sie neue Erkenntnisse über die praktischen Auswirkungen dynamischer Stromtarife auf Haushalte liefert. Dabei werden innovative Ansätze zur Integration von Smart-Meter-Daten und maschinellem Lernen erforscht.

1.4 Forschungsmethodik

1.4.1 Methodik

Die Forschungsmethodik dieser Arbeit basiert auf der Anwendung von Software-Simulationen zur Generierung und Analyse von Daten. Dabei wird ein Simulator eingesetzt, der auf realen Daten basiert, um das Verhalten von Haushalten unter dynamischen Stromtarifen zu modellieren. Die Methodik gliedert sich in folgende Schritte:

- **Datenerhebung und -aufbereitung:** Relevante Parameter für die Simulation werden aus realen Datenquellen extrahiert und aufbereitet. Dies umfasst Informationen über relevante Variablen wie den Stromverbrauch, das Stromerzeugungspotenzial, die Preisstrukturen und die Wetterbedingungen.
- **Entwicklung des Simulators:** Basierend auf den gesammelten Daten werden Modelle und Algorithmen entwickelt, um das Verhalten von Haushalten unter dynamischen Stromtarifen zu simulieren. Der Simulator ermöglicht es, verschiedene Szenarien zu erstellen und ihre Auswirkungen auf den Stromverbrauch und die Kosten zu analysieren.
- **Durchführung der Simulationen:** Die Simulationen werden unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt, um ein breites Spektrum möglicher Szenarien abzudecken. Dabei werden unterschiedliche Parameter und Einstellungen getestet, um die Effizienz und potenzielle Kosteneinsparungen durch die Kombination von Home-Energy-Management-Systemen und dynamischen Tarifen zu untersuchen.
- **Analyse der Simulationsergebnisse:** Die Ergebnisse der Simulationen werden gründlich analysiert, um Erkenntnisse über das Verhalten von Haushalten unter dynamischen Stromtarifen zu gewinnen und Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren.

1.4.2 Forschungsinstrument

Im Rahmen der Forschungsmethodik wurde eine Anwendung namens „Smart Grid Strategist (SGS)“ entwickelt. Das Hauptziel von SGS besteht darin, den Nutzern ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, mit dem sie ihr individuelles Stromverhaltensverhalten besser verstehen und Einspar- und Optimierungsmöglichkeiten identifizieren können.

SGS besteht aus zwei Hauptkomponenten: dem Simulator und den Analysegraphen.

Der Simulator ermöglicht es, verschiedene Profile von Letztverbrauchern zu visualisieren, indem er Parameter aus realen Datensätzen verwendet, um „Standardlastprofile“ zu generieren. Der Simulator verwendet maschinelle Lerntechniken, um Vorhersagen über das Verhalten der simulierten Variablen zu treffen und ihre mögliche Entwicklung bis 2024 aufzuzeigen. Anhand dieser Profile können die tatsächlichen Stromkosten berechnet werden, sowie die potenziellen Kosten unter einem dynamischen Tarif.

Die Analysegraphen stellen die Ergebnisse der Simulation in übersichtlicher Form dar. Diese Graphen bieten einen intuitiven Einblick in die Auswirkungen dynamischer Stromtarife auf das Stromverbrauchsverhalten und die damit verbundenen Kosten.

1.5 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 1 wird die Einleitung präsentiert, einschließlich der Motivation, Problemanalyse, Zielsetzung der Studie, Forschungsmethodik und des Forschungsinstruments. Eine Vorschau auf die Kapitelstruktur wird ebenfalls gegeben.

Kapitel 2 erläutert die theoretischen Grundlagen und behandelt Themen wie variable und dynamische Stromtarife, den Strommarkt, die Funktionsweise von Smart Meter Gateways, Kategorien von Letztverbrauchern und Home Energy Management Systems.

Kapitel 3 bietet einen Überblick über den Stand der Forschung. Es umfasst eine Zusammenfassung früherer Studien, eine Analyse internationaler Erfahrungen mit variablen Stromtarifen und eine Bewertung der aktuellen Situation in Deutschland.

In Kapitel 4 wird die Anforderungsanalyse beschrieben, einschließlich des Lastprofils im Rahmen des Letztverbrauchers, des technischen Aufbaus eines Haushaltsstromsystems, der Strompreiskomponenten und der Machine-Learning-Komponente. Funktionale und nicht-funktionale Anforderungen werden ebenfalls erläutert.

Kapitel 5 befasst sich mit der Umsetzung der Simulationsanwendung. Die Architektur der Simulationsanwendung, die Funktionsweise der Anwendungskomponenten (Datenerhebung,

Datenaufbereitung, Simulationen, Machine Learning und Visualisierungen) sowie die Entwicklung und Anwendung der Simulationsanwendung werden detailliert beschrieben.

Kapitel 6 präsentiert die Ergebnisse und Analysen. Es beinhaltet die Interpretation der erhaltenen Daten, die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Komponenten und Variablen, die Bedeutung der Zeitintervalle für Stromverbrauch und Strompreis sowie die Auswirkungen auf die Letztverbraucher.

Kapitel 7 zieht die Schlussfolgerungen der Arbeit. Es fasst die Ziele und Ergebnisse zusammen und diskutiert die praktischen sowie theoretischen Implikationen der Studie. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der breiteren Implementierung intelligenter Energiemanagementsysteme und dynamischer Tarife sowie die Rolle des maschinellen Lernens zur Verbesserung der Effizienz und Effektivität dieser Systeme.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Variable und dynamische Stromtarife

Variable Stromtarife sind Preismodelle im Energiesektor, die den Stromverbrauch effizienter steuern und die Nutzung von Energieressourcen optimieren [13]. Im Gegensatz zu traditionellen Tarifen, bei denen der Strompreis festgelegt ist, passen sich variable Stromtarife je nach Nachfrage, Angebot und Netzbelastung an. Das bedeutet, dass die Strompreise in Echtzeit oder in festgelegten Intervallen variieren können [13]. Das Hauptmerkmal variabler Stromtarife ist die erhöhte Flexibilität im Stromverbrauch, wodurch Verbraucher ihren Stromverbrauch in Zeiten niedriger Nachfrage oder hoher Produktion erneuerbarer Energien verschieben können [8][13]. Dies trägt zur Stabilisierung des Stromnetzes bei und unterstützt die Integration erneuerbarer Energiequellen wie Solar- und Windkraft [13].

Arten von variablen Stromtarifen in Deutschland

- **Lastvariable Tarife:** Geeignet für steuerbare Geräte wie Nachtspeicherheizungen, Wärmepumpen und Ladestationen für Elektroautos. Ein separater Stromzähler ist erforderlich.
- **Zeitvariable Tarife mit NT- und HT-Zeiten:** Bieten einen niedrigeren Strompreis (NT-Tarif) zu bestimmten Stunden, meist nachts, und einen höheren Preis (HT-Tarif) tagsüber. Erfordern einen Zweitarifzähler.
- **Zeitvariable Tarife ohne festgelegte Zeiten:** Bieten einen günstigeren Preis, der nicht an feste Stunden gebunden ist, sondern sich am Strommarkt orientiert. Können mit einem digitalen oder analogen Stromzähler genutzt werden.
- **Dynamische Tarife:** Orientieren sich direkt am aktuellen Börsenpreis und können mehrmals täglich ändern. Benötigen ein intelligentes Messsystem [7][13][18][35].

2.2 Strommarkt

Grundkonzepte des Strommarkts

Der Strommarkt ist ein komplexes System, in dem Stromerzeuger und -verbraucher agieren und Preissignale austauschen. Ein zentraler Akteur auf dem europäischen Strommarkt ist die European Energy Exchange (EEX), die den größten Handelsplatz für Energie in Deutschland bereitstellt. Die EPEX, eine Tochtergesellschaft der EEX, betreut den EPEX-Spotmarkt, der sich auf den kurzfristigen Handel mit Energieprodukten wie Strom konzentriert [12][16].

Day-Ahead-Markt

Ein wichtiger Bestandteil des Strommarkts ist der Day-Ahead-Markt, auf dem Strommengen für den nächsten Tag gehandelt werden, bevor der tatsächliche Bedarf entsteht. Diese frühzeitige Planung ermöglicht es den Marktteilnehmern, ihre Energiebedürfnisse im Voraus zu decken und Risiken durch kurzfristige Schwankungen zu minimieren. Der Day-Ahead-Markt basiert auf Angebot und Nachfrage, wobei ein Gleichgewicht durch die Festlegung von Preisen erreicht wird [12][16].

Unterschiede zu anderen Märkten

Der Day-Ahead-Markt unterscheidet sich von anderen Märkten wie dem Intraday-Markt und dem Spotmarkt durch seinen zeitlichen Horizont. Während er den Handel für den nächsten Tag abdeckt, konzentrieren sich die anderen Märkte auf den kurzfristigen Handel. Diese Unterscheidung ermöglicht es den Marktteilnehmern, ihre Handelsaktivitäten entsprechend ihren Bedürfnissen und Risikoprofilen anzupassen [12][16].

Gewährleistung der Netzstabilität

Der Strommarkt sorgt dafür, dass ausreichend Kapazitäten vorhanden sind, um Angebot und Nachfrage jederzeit auszugleichen. Preissignale fördern Investitionen in neue Kapazitäten und den Einsatz vorhandener Ressourcen. Ausgleichsenergie wird genutzt, um Abweichungen zwischen Prognosen und tatsächlichem Verbrauch auszugleichen [12][16].

2.3 Smart Meter Gateway

Grundkonzepte des Smart Meter Gateways

Ein Smart Meter Gateway (SMGW) bildet das Herzstück der intelligenten Energieerfassung. Es fungiert als Schnittstelle zwischen den intelligenten Zählern und den Energieversorgungsunternehmen, was eine sichere und effiziente Verwaltung sowie die Übermittlung von Energiedaten ermöglicht [2][9] (s. Abbildung 1).

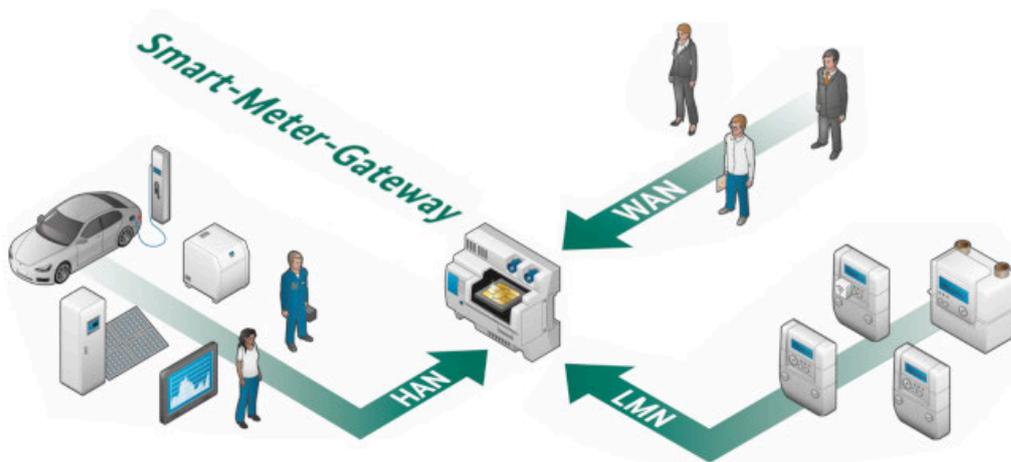


Abbildung 1: Das Smart-Meter-Gateway und seine Umgebung

Quelle: [Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik](#) [03.06.2024]

Funktionen und Vorteile eines Smart Meter Gateways

Das SMGW ermöglicht es Verbrauchern, ihren Stromverbrauch in Echtzeit zu überwachen, was potenziell zu Energieeinsparungen führt. Zusätzlich erleichtert es die nahtlose Integration erneuerbarer Energien und dezentraler Erzeugungssysteme. Gleichzeitig trägt es zur frühzeitigen Erkennung von Fehlern oder Anomalien im Verteilnetz bei, was die Zuverlässigkeit der Energieversorgung erhöht. Die Vorteile eines Smart Meter Gateways sind vielfältig: Es verbessert die Energieeffizienz durch optimiertes Energiemanagement, stärkt die Position der Verbraucher durch detaillierte Verbrauchsinformationen und erhöht die Datensicherheit durch verschlüsselte Übertragung [2][9].

2.4 Kategorien von Letztverbrauchern

Veränderung der Rolle der Letztverbraucher

Historisch gesehen wurde das Energiesystem in Erzeuger und Verbraucher unterteilt. Mit der Energiewende und der Integration erneuerbarer Energien sind jedoch neue Akteure entstanden. Begriffe wie „Producer“ (engl. für Erzeuger), „Consumer“ (engl. für Verbraucher), „Prosumer“ (setzt sich aus Producer und Consumer zusammen) und „Flexumer“ (setzt sich aus Flexible und Consumer zusammen, bedeutet flexible Verbraucher) reflektieren die veränderte Rolle der Letztverbraucher im Energiesystem und gruppieren sie in neue Kategorien [21][22].

Akteure und ihre Funktionen:

- **Producer:** Diese Akteure tragen zur dezentralen und erneuerbaren Energieerzeugung bei. Dazu gehören auch Privathaushalte mit PV-Anlagen oder kleinen Windkraftanlagen.
- **Consumer:** Traditionelle Stromabnehmer, die ihre Energie ausschließlich aus dem öffentlichen Netz beziehen [21].
- **Prosumer:** Verbraucher, die gleichzeitig Energie produzieren und konsumieren, z. B. Haushalte mit PV-Anlagen, die überschüssigen Strom ins Netz einspeisen [21][22].
- **Flexumer:** Flexible Energieverbraucher, die ihren Verbrauch an die Marktbedingungen anpassen können [21][22][40].

Veränderung der Lastprofile

Das „Lastprofil“ beschreibt das zeitliche Muster des Energieverbrauchs. Mit der Einführung von Prosumer und Flexumer sind die Lastprofile dynamischer und vielfältiger geworden, was eine bessere Anpassung an die schwankende Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen ermöglicht. Trotz ihrer traditionell passiven Rolle beeinflussen Consumer die Gesamtnachfrage nach Energie. Auf der anderen Seite erhöhen Prosumer den Anteil erneuerbarer Energien im Energiemix und stabilisieren das Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage. Schließlich bieten Flexumer dem System Flexibilität, indem sie ihren Verbrauch an Zeiten hoher erneuerbarer Energieerzeugung oder niedriger Nachfrage anpassen [21][22].

2.5 Home Energy Management System

Ein Home Energy Management System ist eine fortschrittliche Softwarelösung zur intelligenten Verknüpfung und Steuerung verschiedener Komponenten eines lokalen Energiesystems, wie Photovoltaikanlagen, Speicher und große Stromverbraucher, wie Wallboxen und Wärmepumpen [25]. Ziel des HEMS ist es, den Eigenverbrauch von selbst erzeugtem Solarstrom zu maximieren und die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu verbessern [21][25].

Das HEMS erfasst den Energieverbrauch in Echtzeit und optimiert ihn durch die Steuerung von Geräten im Haushalt, um von günstigeren Tarifen zu profitieren und den Eigenverbrauch von Solarstrom zu maximieren. Es bietet Benutzerschnittstellen zur Überwachung und Anpassung des Energieverbrauchs [21][25].

Die Einführung von HEMS wird zunehmend von Regierungen, Energieversorgungsunternehmen und Verbrauchern unterstützt, da es eine Vielzahl von Vorteilen bietet, darunter eine Reduzierung der Energiekosten, eine verbesserte Integration erneuerbarer Energien und eine erhöhte Energieeffizienz [21][25].

In Deutschland wird die Implementierung von HEMS durch verschiedene Maßnahmen und Initiativen gefördert, darunter staatliche Anreize, Förderprogramme für erneuerbare Energien und regulatorische Anforderungen zur Förderung von Energieeffizienz und Smart-Grid-Technologien [5][21][25].

3 Stand der Forschung

3.1 Überblick über frühere Studien und relevante Fälle

Der Fokus auf dynamische Stromtarife hat in den letzten Jahren zugenommen, insbesondere im Zusammenhang mit der Energiewende [13]. Untersuchungen haben gezeigt, dass solche Tarife erhebliche Vorteile bieten können, aber es noch offene Fragen gibt [13][29].

Ein Bericht der Deutschen Energie-Agentur (dena) [15] beleuchtet die regulatorischen Rahmenbedingungen in Deutschland. Zeitvariable Preismodelle bieten Anreize für Verbraucher, ihr Strombezugsverhalten zu optimieren, was sowohl marktorientierte als auch netzorientierte Zielwirkungen haben kann. Obwohl dynamische Tarife aufgrund hoher Installationskosten für intelligente Zähler noch nicht weit verbreitet sind, wird eine steigende Akzeptanz erwartet [14].

Eine Machbarkeitsstudie des Fraunhofer-Instituts für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) [24] zeigt, dass die Integration von intelligenten Zählern und Energiemanagementsystemen grundlegend für dynamische Tarife ist [24]. Diese ermöglichen es Verbrauchern, ihren Energieverbrauch effizient an Marktpreissignale anzupassen, was wirtschaftliche und ökologische Vorteile bringt [24].

Agora Energiewende untersuchte die Auswirkungen dynamischer Stromtarife auf die Netzstabilität und fand heraus, dass sie dazu beitragen können, Lastspitzen zu reduzieren und die Integration erneuerbarer Energien zu verbessern [1].

Trotz dieser positiven Ergebnisse besteht weiterhin Forschungsbedarf hinsichtlich der langfristigen wirtschaftlichen Auswirkungen, der technologischen Unterstützung für Verbraucheranpassungen, der Regulierung und der Verbraucherakzeptanz [13][29].

3.2 Internationale Erfahrungen mit variablen Stromtarifen

Die erfolgreiche Implementierung dynamischer Stromtarife ist anhand der Erfahrungen aus Finnland, Estland, Schweden und Spanien möglich [18][41]. Diese Länder haben dank weit verbreiteter Smart-Meter-Installationen und innovativer Tarifmodelle wertvolle Erkenntnisse gewonnen, die Deutschland als Vorbild dienen könnten [18][41].

Finnland ist Vorreiter bei der Digitalisierung des Energiesektors in Europa, mit einem Netz von 250.000 km Niederspannungsleitungen und mehr als 3,7 Millionen Messpunkten [41]. Seit 2014 erhalten finnische Haushalte Rechnungen, die auf ihrem tatsächlichen Stromverbrauch basieren, der über Online-Portale zugänglich ist, und die Konten können remote verwaltet werden, ohne dass physische Besuche erforderlich sind [20]. Das Land bereitet die zweite Phase des Einsatzes intelligenter Zähler vor, mit Vorschriften, die die Erfassung von Verbrauchsdaten alle 15 Minuten und deren Speicherung in einem nationalen „Datahub“ erfordern [20].

Auch Estland hat seit 2013 bedeutende Fortschritte gemacht, indem es hauptsächlich stündlich angepasste, zeitvariable Tarife einsetzt, die zu einer besseren Integration erneuerbarer Energien und einer effizienteren Nutzung der Energieressourcen führen [41].

Schweden unterstützt dynamische Stromtarife durch eine umfassende Smart-Meter-Initiative, die 2009 abgeschlossen wurde. Dies hat zu einer besseren Lastverteilung und einer höheren Akzeptanz erneuerbarer Energien beigetragen [18].

In Spanien wurden seit 2014 flächendeckend Smart Meter eingeführt und zur Förderung dynamischer Stromtarife genutzt [18]. Diese Tarife basieren auf stündlichen Marktpreisen und haben positive Auswirkungen auf die Verbrauchsmuster der Kunden sowie auf die Stabilität des Stromnetzes [18].

Trotz Herausforderungen bei der Anpassung von Verbrauchergewohnheiten und der Akzeptanz neuer Tarifstrukturen zeigen Studien, dass dynamische Tarife zu einer effizienteren Nutzung der Energieressourcen und einer Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks führen [18][39][41].

3.3 Analyse der aktuellen Situation in Deutschland

Die bisherige Forschung hat bereits wichtige Erkenntnisse über die technischen und wirtschaftlichen Aspekte dynamischer Stromtarife geliefert [7][13]. Sie unterstreichen die Notwendigkeit, den Stromverbrauch zu flexibilisieren, um die Integration erneuerbarer Energien zu fördern und das Stromnetz zu stabilisieren [1][11][13]. Durch die Flexibilisierung des Verbrauchs kann überschüssiger Strom aus erneuerbaren Energien effizienter genutzt und die Nachfrage besser an das Angebot angepasst werden [1][11][13].

Die Erfahrungen der in Abschnitt 3.2 genannten Länder verdeutlichen das Potenzial dynamischer Stromtarife zur Förderung einer nachhaltigeren und effizienteren Energieversorgung [18][41]. Deutschland kann von diesen Beispielen lernen, insbesondere was die flächendeckende Einführung von Smart Metern und die Entwicklung flexibler Tarifmodelle betrifft [7][18][41]. Die Herausforderungen in Deutschland liegen vor allem in der hohen Anfangsinvestition für Smart Meter und der Notwendigkeit, die Verbraucher über die Vorteile dynamischer Tarife aufzuklären [8][13][23]. Die internationalen Erfahrungen zeigen jedoch, dass diese Herausforderungen überwunden werden können und dass dynamische Stromtarife einen bedeutenden Beitrag zur Energiewende leisten können [18][41].

4 Anforderungsanalyse

Wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, zielt diese Arbeit darauf ab, die wirtschaftliche Effizienz des Strommanagements von Haushalten mithilfe von Smart-Meter-Daten und maschinellem Lernen zu analysieren. Hierfür werden die nachfolgenden Punkte analysiert, die Herausforderungen in Bezug auf die Zielsetzung darstellen.

4.1 Lastprofil im Rahmen des Letztverbrauchers

Zur Bewertung der wirtschaftlichen Effizienz des Strommanagements in Haushalten ist die Analyse des Lastprofils der Letztverbraucher entscheidend [22]. Ein Lastprofil zeigt den zeitlichen Verlauf des Stromverbrauchs (s. Abbildung 2) und hilft, Nutzungsmuster und Reaktionen auf verschiedene Stromtarife realistisch darzustellen.

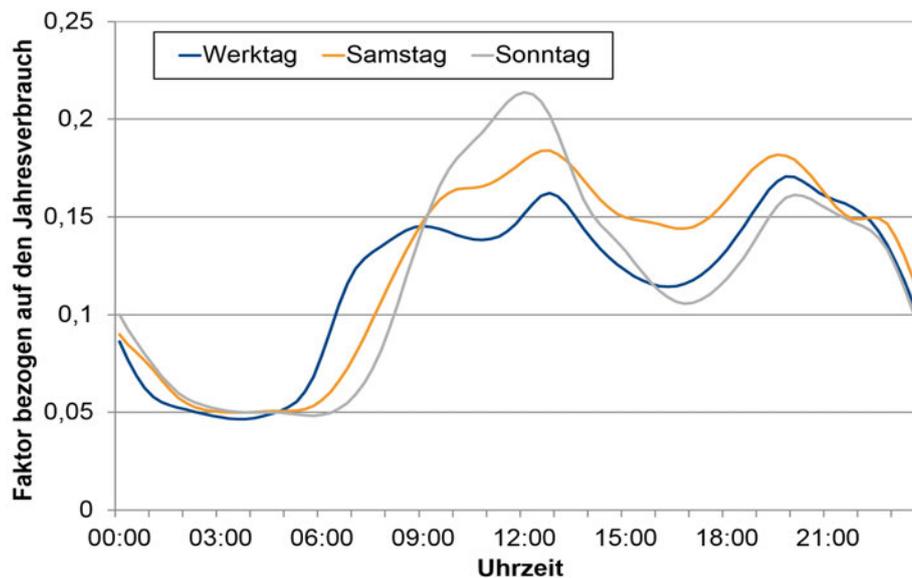


Abbildung 2: Darstellung eines Standardlastprofils

Quelle: [EnArgus: Zentrales Informationssystem Energieforschungsförderung](#) [03.06.2024]

Lastprofile nach Letztverbraucher-kategorie:

- **Consumer:** Diese Gruppe bezieht ihren gesamten Strombedarf aus dem Netz und hat ein konstantes Lastprofil, das je nach Tageszeit und Wochentag variiert. In der Simulations-App sollten intelligente Zähler nachgebildet werden, um den Stromverbrauch zu erfassen.
- **Prosumer:** Prosumer erzeugen einen Teil ihres Stroms selbst, meist durch PV-Anlagen, und speisen überschüssigen Strom ins Netz ein. Die Simulation sollte die Variabilität der PV-Erzeugung berücksichtigen.
- **Flexumer:** Diese Gruppe kann Strom speichern und bei Bedarf nutzen. Ihr Lastprofil umfasst Verbrauch, Erzeugung und Speicherung. In der Simulations-App sollten Batteriespeichersysteme und ihre Interaktion mit dem Haushaltsstromsystem genau modelliert werden.

4.2 Technischer Aufbau eines Haushaltsstromsystems

Um das Strommanagement in Haushalten zu verstehen und zu optimieren, ist es entscheidend, den technischen Aufbau des bestehenden Systems zu verstehen [31]. Im Rahmen dieser Studie umfasst dies die folgenden Komponenten:

- **Intelligente Zähler (Smart Meter):** Diese Geräte messen den Stromverbrauch in Echtzeit und senden die Daten automatisch an den Energieversorger [24]. Für die Simulationsanwendung ist es wichtig, dass die Daten der intelligenten Zähler erfasst und analysiert werden können, um das Stromverhaltensverhalten der Haushalte genau zu überwachen und nachzubilden.
- **PV-Anlagen:** Diese Systeme erzeugen Strom aus Sonnenenergie und können den Eigenverbrauch von erneuerbarer Energie in Haushalten erhöhen [9][21][24]. In der Simulations-anwendung sollten PV-Anlagen so modelliert werden, dass sie die Stromerzeugung in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf und den Jahreszeiten realistisch darstellen.
- **Batteriespeichersysteme:** Diese Systeme speichern überschüssigen Strom, der beispielsweise von PV-Anlagen erzeugt wird, um ihn bei Bedarf wieder abzugeben [21][24]. In der Simulationsanwendung müssen Batteriespeichersysteme integriert werden, um die Flexibilität und Unabhängigkeit des Haushalts vom Stromnetz realistisch darzustellen.

4.3 Strompreiskomponenten

Die Anwendung sollte sowohl dynamische als auch feste Tarifmodelle nachbilden und deren Vor- und Nachteile analysieren, um die wirtschaftlichen Auswirkungen auf den Haushaltsstromverbrauch zu beurteilen [13]. Dies umfasst die Verarbeitung von Echtzeit-Marktdaten für dynamische Tarife und die Bereitstellung stabiler Optionen für feste Tarife.

- **Feste Stromtarife:** Bleiben über einen bestimmten Zeitraum konstant und bieten Stabilität [13]. Die Simulationsanwendung soll deren Eignung und wirtschaftliche Effizienz für verschiedene Verbrauchertypen bewerten.
- **Dynamische Stromtarife:** Variieren je nach Angebot und Nachfrage, besonders im Day-Ahead-Markt [13]. Die Simulationsanwendung soll diese abbilden, um ihre Auswirkungen auf Consumer, Prosumer und Flexumer zu untersuchen.

4.4 Machine-Learning-Komponente

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Analyse des Stromverbrauchsverhaltens von Haushalten, um Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren und die Stromverbrauchskosten durch geeignete Stromtarife zu senken. Hierbei spielt die Integration einer Machine-Learning-Komponente eine zentrale Rolle, die als Home Energy Management System (HEMS) fungiert [21][25][38].

Diese Komponente überwacht, steuert und optimiert den Stromfluss im Haushalt. Sie analysiert Smart-Meter-Daten, simuliert die Stromerzeugung und -speicherung durch Photovoltaik- und Batteriespeichersysteme und sorgt für eine intelligente Laststeuerung. Lern- und Prognosefunktionen sind dabei wichtige Merkmale, die eine präzise Vorhersage und Optimierung des Stromverbrauchs ermöglichen.

4.5 Anforderungen

4.5.1 Funktionale Anforderungen

Auf Grundlage, der in den Abschnitten 4.1 bis 4.4 erörterten Punkte werden in diesem Abschnitt die Anforderungen an die Simulationsanwendung detailliert beschrieben.

- **Datenerfassung und -verarbeitung:** Die Anwendung sollte in der Lage sein, Daten aus verschiedenen Quellen wie intelligenten Zählern, PV-Anlagen, Batteriespeichersystemen und meteorologischen Daten zu simulieren und kontinuierlich zu integrieren.
- **Simulation verschiedener Szenarien:** Es sollten verschiedene Szenarien hinsichtlich dynamischer Stromtarife, PV-Anlagengrößen, und Batteriekapazitäten simuliert werden können. Dies hilft, die Auswirkungen unterschiedlicher Parameter auf das Strommanagement zu bewerten.
- **Integration von Maschinellem Lernen:** Die Software sollte maschinelles Lernen nutzen, um Verbrauchs- und Erzeugungsmuster zu modellieren, Vorhersagen zu treffen und Optimierungspotenziale zu identifizieren.
- **Visualisierungen:** Die Ergebnisse der Simulationen sollten klar und verständlich visualisiert werden, damit Benutzer die Auswirkungen verschiedener Szenarien leicht interpretieren können.

4.5.2 Nicht-Funktionale Anforderungen

Die nicht-funktionalen Anforderungen beschreiben die Kriterien, die nicht direkt mit den spezifischen Funktionen der Simulationsanwendung zusammenhängen, sondern mit ihrer Leistung und Qualität, die für eine effektive Analyse erforderlich sind. Diese Anforderungen basieren auf den Gesamtzielen der Bachelorarbeit, nämlich die Auswirkungen dynamischer Stromtarife auf das Haushaltsstrommanagement zu untersuchen und verschiedene Optimierungspotenziale zu identifizieren.

- **Datenqualität und -quantität:** Die Anwendung soll eine ausreichende Menge an qualitativ hochwertigen Daten generieren, um repräsentative Analysen durchführen zu können. Dies umfasst die genaue Erfassung und Berechnung relevanter Parameter wie Stromverbrauch, -produktion und -speicherung.
- **Zuverlässigkeit und Genauigkeit:** Die Anwendung soll zuverlässig arbeiten und genaue Daten liefern, um die Vertrauenswürdigkeit der Analyse sicherzustellen. Die Datenverarbeitung und -simulation sollten robust und fehlerfrei sein, um konsistente und verlässliche Ergebnisse zu gewährleisten.
- **Datenstrukturierung:** Die generierten Daten sollten strukturiert und leicht zugänglich sein, um eine einfache und effektive Analyse zu ermöglichen. Dies umfasst eine klare und systematische Organisation der Daten, sodass sie ohne zusätzlichen Aufwand weiterverarbeitet werden können.
- **Leistungsfähigkeit:** Die Anwendung sollte eine hohe Leistung aufweisen, um Simulationen in angemessener Zeit durchzuführen. Dies erfordert die Kapazität, eine große Menge an Daten zu verarbeiten.
- **Benutzerfreundlichkeit:** Die Benutzeroberfläche sollte intuitiv und leicht zu bedienen sein, um sicherzustellen, dass Benutzer die Anwendung effizient nutzen können. Klare und verständliche Visualisierungen der Simulationsergebnisse sind entscheidend, damit die Benutzer die Auswirkungen verschiedener Szenarien leicht interpretieren können.

5 Umsetzung

5.1 Architektur der Simulationsanwendung

Anhand der Anforderungen (s. Abschnitt 4.5) sowie den Eigenschaften und Funktionalitäten der zu analysierenden Komponenten (s. Abschnitt 4.1 bis 4.4) entsteht eine Architektur der Simulationsanwendung (s. Abbildung 3), die alle relevanten Aspekte berücksichtigt.

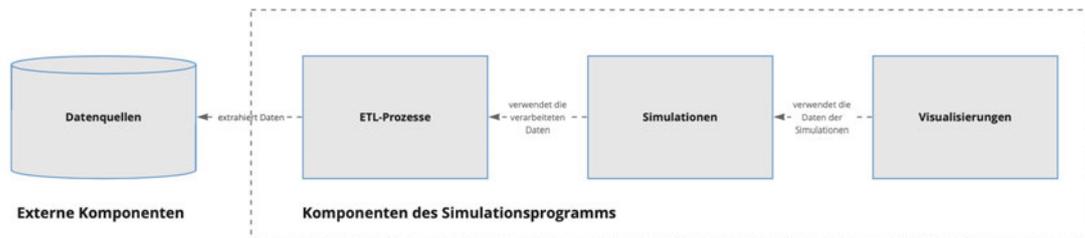


Abbildung 3: Darstellung der Simulationsanwendungs-Architektur

Quelle: Eigene Darstellung unter Berücksichtigung der Anforderungen (s. Abschnitt 4.5)

Der Datenfluss verläuft von links nach rechts. Zunächst werden reale Daten aus verschiedenen Quellen gesammelt. Diese Daten werden anschließend durch ETL-Prozesse (Extraktion, Transformation, Laden) aufbereitet und in ein Datenmodell integriert, das als Grundlage für die Simulationen dient. Die aufbereiteten Daten werden als Parameter in den Simulationen verwendet. Schließlich werden die Ergebnisse der Simulationen in Diagrammen dargestellt, um eine einfachere Analyse zu ermöglichen.

5.2 Funktionsweise der Anwendungskomponenten

5.2.1 Datenerhebung

Für die Analyse und Simulation des Stromverbrauchs sind präzise und relevante Daten unerlässlich. Daher wurden spezifische Datenquellen ausgewählt, die alle erforderlichen Parameter abdecken.

Datenquellen

Stromnetz Hamburg GmbH: Diese Quelle enthält Daten zu „systematischen Standardlastprofilen“ [36] (s. Abbildung 4). Diese stellen charakteristische Verbrauchsmuster von Haushalten dar. Die Quelle verwendet ein synthetisches Standardlastprofilverfahren, das den zeitlichen Verlauf des bezogenen Stroms für Kundenanlagen mit einem Jahresverbrauch von bis zu 100.000 kWh abbildet [36].

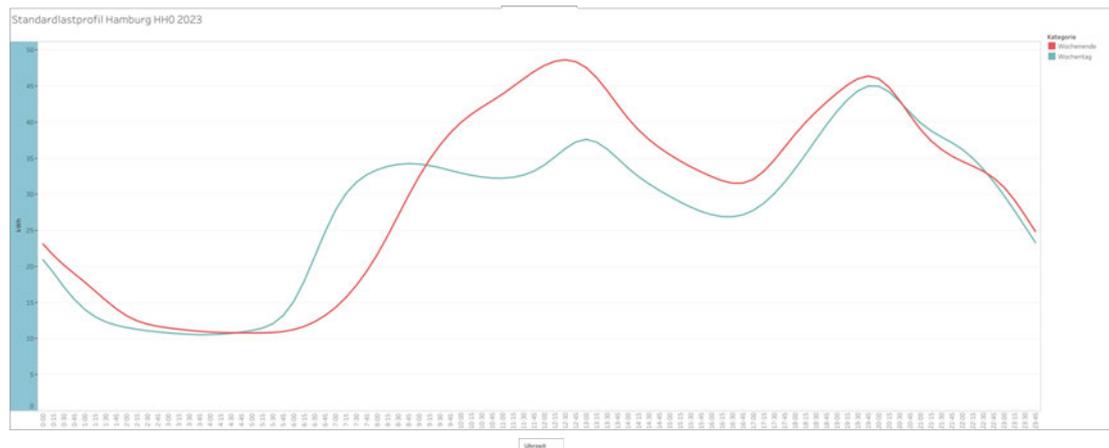


Abbildung 4: Darstellung der Standardlastprofile der Haushalte in Hamburg

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den Daten der Stromnetz Hamburg GmbH

Deutscher Wetterdienst (DWD): Der DWD enthält umfassende Wetterdaten wie Temperatur, Sonnenstunden pro Tag und Sonneneinstrahlung. Diese Daten sind entscheidend für die Berechnung der Produktion von PV-Anlagen. Insbesondere wird auf die Daten einer meteorologischen Messstelle in Hamburg (Messstation-Id: 1975) zurückgegriffen, die den stündlichen Verlauf der Globalstrahlung in Hamburg von 2005 bis heute enthält [17].

Photovoltaic Geographic Information System (PVGIS): PVGIS ist ein von der Europäischen Kommission entwickelter Simulator. Das Webtool stellt Daten zur Solarenergieerzeugung basierend auf geografischen und meteorologischen Daten bereit [28]. In diesem Zusammenhang speichert diese Datenquelle die Ergebnisse spezifischer Simulationen, die zuvor im PVGIS-Simulator durchgeführt wurden (s. Abbildung 5). Für diese Simulationen wurden die geografischen Daten der zuvor erwähnten meteorologischen Messstation (1975) in Hamburg verwendet.

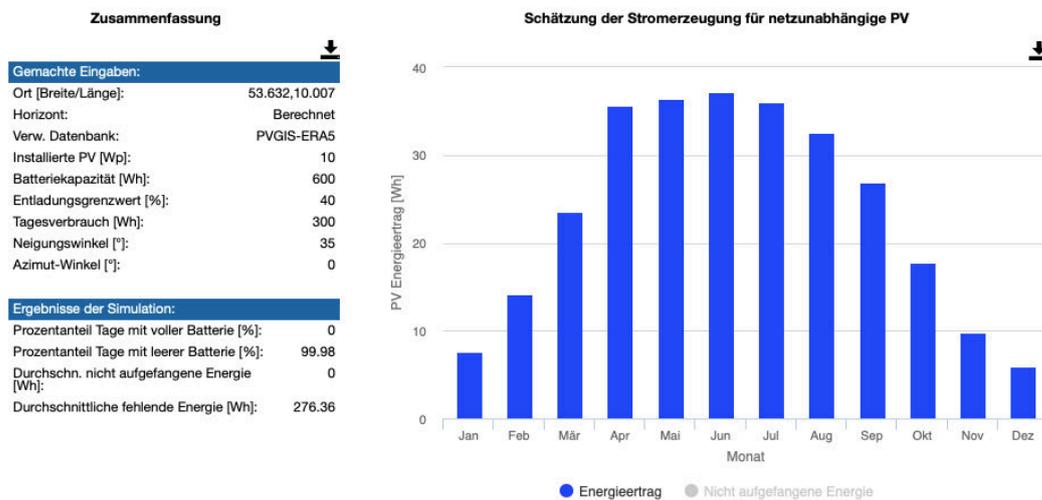


Abbildung 5: Ergebnis einer durchgeführten Simulation mit dem PVGIS-Simulator
 Quelle: [Photovoltaic Geographic Information System](#) [22.03.2024]

Strommarktdaten (SMARD): Diese Quelle bezieht aktuelle und historische Marktdaten zum Strompreis aus den Daten, die gemäß der Stromtransparenzverordnung (EU-Verordnung Nr. 543/2013) verfügbar gemacht werden [33]. Die Daten werden von den deutschen Übertragungsnetzbetreibern an ENTSO-E geliefert und von SMARD automatisch abgerufen, geprüft und aufbereitet [33]. Diese Informationen sind für die Analyse dynamischer Stromtarife und ihre Auswirkungen auf Stromkosten und Verbrauchsverhalten relevant.

5.2.2 Datenaufbereitung

Für die Datenintegration wird eine Komponente eingesetzt, die ETL-Prozesse (s. Abbildung 6) durchführt. Diese Komponente ist verantwortlich für das „Extrahieren, Transformieren und Laden“ der Rohdaten aus den in Abschnitt 5.2.1 genannten Quellen stammen und in Herunterladefordateien vorliegen.

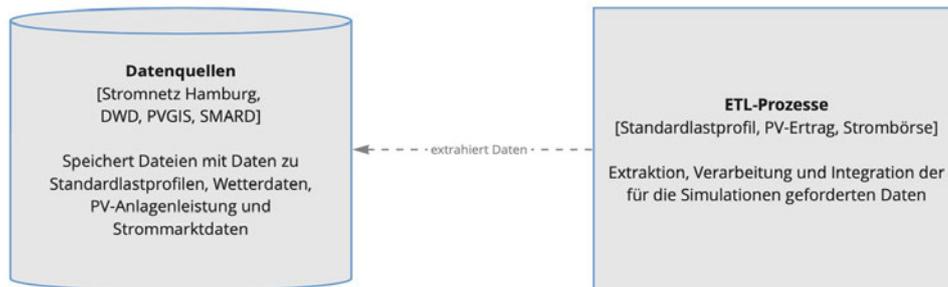


Abbildung 6: Darstellung der Datenintegration durch die ETL-Prozesse

Quelle: Eigene Darstellung unter Berücksichtigung der Anforderungen (s. Abschnitt 4.5)

ETL-Prozesse

ETL-Prozesse sind für das Bereinigen, Filtern und Konvertieren der Daten in das gewünschte Format zuständig. Ziel ist es, die für die Simulationen benötigten Parameter so zu verarbeiten, dass sie dem gleichen Muster folgen und die gleiche Skalierbarkeit aufweisen. Dies bedeutet beispielsweise, dass die Zeitstempel der Parameter auf der gleichen Skala liegen oder, dass die Skalen der zu simulierenden Variablen aneinander angepasst sind. Schließlich werden diese Daten in ein Datenmodell integriert und in einer Datei gespeichert. In diesem Zusammenhang werden drei verschiedene ETL-Prozesse durchgeführt, die jeweils spezifische Datenquellen verarbeiten.

ETL-Prozess Standardlastprofil: Dieser Prozess verarbeitet die Daten aus der Quelle Stromnetz Hamburg GmbH. Zunächst werden die Daten aus dem synthetischen Standardlastprofil für das Jahr 2023 extrahiert und deren Werte in Prozentwerten berechnet. Dadurch kann das Lastprofil in den Simulationen skaliert werden, sodass unabhängig von der Skalierung der gleiche Verlauf dargestellt werden kann. Das Ergebnis dieses Prozesses bildet die Basisparameter für die Simulation des Standardlastprofils in verschiedenen Szenarien.

ETL-Prozess PV-Ertrag: Dieser Prozess verarbeitet Daten aus den Quellen DWD und PVGIS, um Basiswerte für die Simulation der Leistung von PV-Anlagen zu erzeugen. Zunächst werden Globalstrahlungsdaten für das Jahr 2023 extrahiert und in 15-Minuten-Intervallen aufgetragen. Anschließend werden die simulierten PV-Ertragswerte aus den Ergebnissen der mit dem PVGIS-Simulator durchgeführten Simulationen extrahiert und auf den Ertrag einer 1 kWp PV-Anlage skaliert. Diese skalierten Werte werden dann in 15-Minuten-Intervallen aufgetragen. Dadurch werden die Ertragswerte der PV-Anlage und der Zeitfaktor, dargestellt durch die Globalstrahlungsdaten, integriert. Dies ermöglicht die Skalierbarkeit des Leistungskurvenverlaufs der PV-Anlage und die Simulation unterschiedlicher Leistungen je nach Szenario.

ETL-Prozess Strombörse: Dieser Prozess befasst sich mit der Verarbeitung von Daten aus der Quelle SMARD, die Daten über Großhandelsstrompreise bereitstellt. In diesem Fall handelt es sich bei den extrahierten Daten um jene, die die Strompreise auf dem Day-Ahead-Markt darstellen. Diese Strompreise werden in 15-Minuten-Intervallen aktualisiert und sind entscheidend für die Analyse dynamischer Stromtarife und ermöglichen die Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Stromkosten und das Verbrauchsverhalten der Haushalte.

5.2.3 Simulationen

Die ETL-Prozesse liefern die notwendigen, bereinigten und transformierten Daten (s. Abbildung 7), die als Grundlage für die Simulationen dienen. Diese Simulationen ermöglichen es, verschiedene Szenarien zu modellieren und die Auswirkungen unterschiedlicher Verbrauchs- und Erzeugungsstrategien zu bewerten.

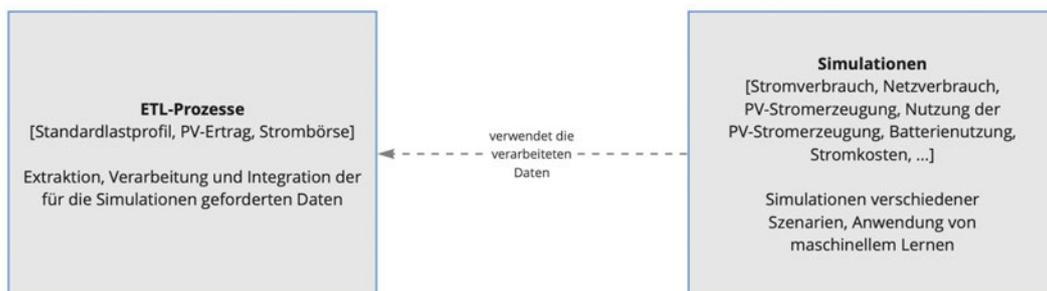


Abbildung 7: Darstellung der Informationssammlung aus dem Datenmodell

Quelle: Eigene Darstellung unter Berücksichtigung der Anforderungen (s. Abschnitt 4.5)

Simulationsszenarien

Es werden drei Szenarien simuliert: Consumer, Prosumer und Flexumer.

Consumer: Das Consumer-Szenario simuliert den Stromverbrauch eines Haushalts, der ausschließlich Strom aus dem Netz bezieht. Dabei werden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- **Stromverbrauch:** Dies wird auf Basis der Daten aus den ETL-Prozessen simuliert.
- **Stromkostenberechnung:** Die Stromkosten werden sowohl für feste als auch für dynamische Tarife berechnet.
- **Keine eigene Erzeugung oder Speicherung:** Es wird keine eigene Stromerzeugung durch PV-Anlagen oder Batteriespeicherung berücksichtigt.

Prosumer: Das Prosumer-Szenario erweitert das Consumer-Szenario um die Komponente der Stromerzeugung durch PV-Anlagen. Hierbei werden die folgenden Aspekte simuliert:

- **Stromverbrauch und -erzeugung:** Der Haushalt verbraucht Strom und erzeugt gleichzeitig Strom durch PV-Anlagen.
- **Priorisierung der Eigennutzung:** Der selbst erzeugte Strom wird vorrangig genutzt, bevor auf das Netz zugegriffen wird.
- **Stromkostenberechnung:** Die Kosten werden unter Berücksichtigung der erzeugten und aus dem Netz bezogenen Strom berechnet.

Flexumer: Das Flexumer-Szenario ist das umfassendste Modell und inkludiert sowohl die Stromerzeugung durch PV-Anlagen als auch die Nutzung von Batteriespeichern.

- **Stromverbrauch, -erzeugung und -speicherung:** Der Haushalt verbraucht und erzeugt Strom. Außerdem speichert überschüssigen Strom in Batterien.
- **Priorisierung der Nutzung:** Der selbst erzeugte und gespeicherte Strom wird vorrangig genutzt, bevor auf das Netz zugegriffen wird.
- **Anpassung des Netzverbrauchs:** Der Verbrauch aus dem Netz wird an die Verfügbarkeit von erzeugtem und gespeichertem Strom angepasst.
- **Stromkostenberechnung:** Die Kosten werden unter Berücksichtigung der eigenen Erzeugung, der Batteriespeicherung und des Netzverbrauchs berechnet.

Simulationsmodell

In diesem Abschnitt wird das Modell des Haushaltsstromsystems für die Simulationen vorgestellt. Es umfasst die folgenden Komponenten: intelligente Zähler, PV-Anlage und Batteriesysteme. Die Verwendung dieser Komponenten in den Simulationen definiert die verschiedenen Lastarten (s. Abbildung 8).

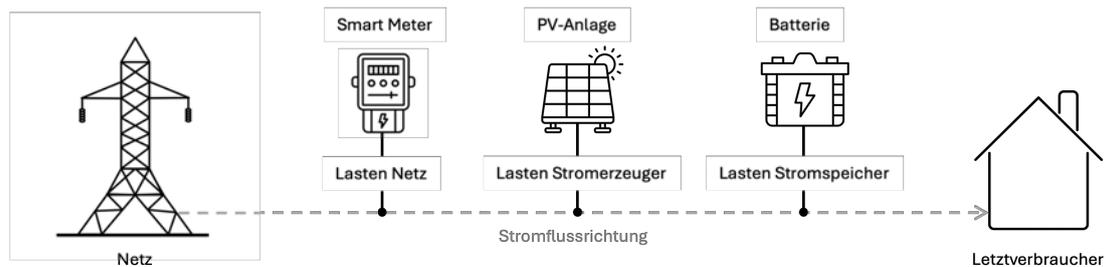


Abbildung 8: Darstellung eines Haushaltsstromsystems für das Flexumer-Szenario

Quelle: Eigene Darstellung unter Berücksichtigung der Anforderungen (s. Abschnitt 4.5)

Lasten Netz: Die Netzlasten repräsentieren den Stromverbrauch aus dem öffentlichen Netz. Diese Lasten variieren je nach Benutzertyp und der Verfügbarkeit von Eigenproduktion und Batteriespeicherung:

- **Consumer:** Der gesamte Stromverbrauch wird direkt aus dem Netz bezogen. Die Netzlasten entsprechen daher dem gesamten Stromverbrauch des Haushalts.

$$\text{Lasten Netz} = \text{Gesamtstromverbrauch}$$

- **Prosumer:** Prosumer nutzen zunächst den selbst erzeugten Strom und beziehen nur den überschüssigen Bedarf aus dem Netz. Die Netzlast wird daher berechnet, indem die Eigenproduktion von der Stromnachfrage abgezogen wird.

$$\text{Lasten Netz} = \text{Gesamtstromverbrauch} - \text{Eigenproduktion}$$

- **Flexumer:** Flexumer nutzen neben der Eigenproduktion auch Batteriespeicher, bevor sie auf Netzstrom zurückgreifen. Hierbei werden sowohl die Eigenproduktion als auch die entnommene Energiemenge aus dem Speicher von der Stromnachfrage abgezogen, um die Netzlast zu berechnen.

$$\text{Lasten Netz} = \text{Gesamtstromverbrauch} - \text{Eigenproduktion} - \text{Gespeicherter Strom}$$

Lasten Stromerzeuger: Die Erzeugungslasten stellen den Anteil des Stromverbrauchs dar, der durch die PV-Anlage gedeckt wird. Diese werden wie folgt berechnet, für jeden Zeitstempel wird der Stromverbrauch mit der Stromproduktion der PV-Anlage verglichen:

- Wenn die Produktion den Verbrauch deckt, entspricht die Erzeugungslast dem Verbrauch.
- Andernfalls entspricht sie der gesamten produzierten Strommenge.

$F_I = \text{Gesamtstromverbrauch}$

$F_{II} = \text{Eigenproduktion}$

$$\text{Lasten Stromerzeuger} = \begin{cases} F_I, & \text{wenn } F_I \geq F_{II} \\ F_{II}, & \text{wenn } F_I < F_{II} \end{cases}$$

Lasten Stromspeicher: Die Speicherlasten beziehen sich auf die Strommenge, die in den Batteriesystemen gespeichert und bei Bedarf wieder entnommen wird. Die Berechnung erfolgt auf Basis der folgenden Schritte:

1. **Speicherung überschüssigen Stroms:** Wenn die PV-Produktion den Verbrauch übersteigt, wird der überschüssige Strom in die Batterie eingespeist. Dabei darf die gespeicherte Strommenge die Kapazität der Batterie nicht überschreiten.

$F_{III} = \text{Eigenproduktion} - \text{Gesamtstromverbrauch}$

$F_{IV} = \text{Speicherkapazität}$

$$\text{Ladung Stromspeicher} = \begin{cases} F_{III}, & \text{wenn } F_{III} \leq F_{IV} \\ F_{IV}, & \text{wenn } F_{III} > F_{IV} \end{cases}$$

2. **Nutzung von gespeichertem Strom:** Wenn der Verbrauch die PV-Produktion übersteigt, wird der benötigte Strom zunächst aus dem Batteriespeicher entnommen.

$F_V = \text{Gesamtstromverbrauch} - \text{Eigenproduktion}$

$F_{VI} = \text{Gespeicherter Strom}$

$$\text{Lasten Stromspeicher} = \begin{cases} F_V, & \text{wenn } F_V \leq F_{VI} \\ F_{VI}, & \text{wenn } F_V > F_{VI} \end{cases}$$

In allen Fällen gilt Folgendes: Die Last kann nicht negativ sein, sie kann nur mindestens 0 sein. Ergibt die Lastberechnung einen negativen Wert, wird die Last auf 0 gesetzt.

$$\text{Lastberechnung} = \max(0, \text{Lastberechnung})$$

5.2.4 Machine Learning

In diesem Projekt wird Machine Learning verwendet, um Muster im Stromverbrauch und in den Strompreisen zu erkennen sowie zukünftige Entwicklungen vorherzusagen. Um diese Prognosen des Stromverbrauchs und der Strommarktpreise zu erstellen, werden Modelle auf historischen Daten trainiert und die Trainingsergebnisse anschließend ausgewertet.

Implementierung von prädiktiven Modellen

Explorative Datenanalyse (EDA)

Der Prozess beginnt mit einer explorativen Datenanalyse (EDA), um die Merkmale der historischen Daten besser zu verstehen. Es werden Visualisierungen der Zeitreihen für Verbrauch und Preise (s. Abbildung 9), deskriptive Statistiken und eine Korrelationsanalyse (Pearson) zwischen den Variablen durchgeführt. Dieser Schritt ist entscheidend, um Muster und Anomalien in den Daten zu identifizieren, bevor die Merkmalsauswahl erfolgt.

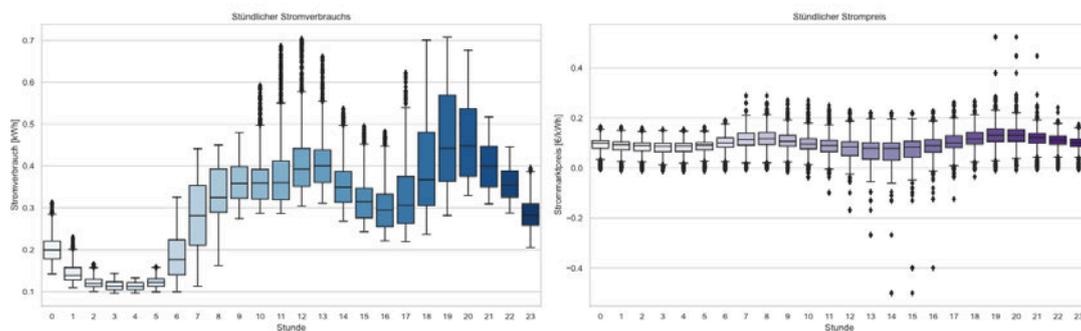


Abbildung 9: Bericht über das Energieverbrauchsverhalten und Strommarktpreise

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Datenladung und Merkmalsauswahl

Nach der EDA erfolgt das Laden der historischen Daten. Diese Daten stammen aus Simulationen, die sowohl zeitliche Informationen als auch Stromverbrauchs- und Strompreiswerte enthalten. Um das Modell zu trainieren, werden die relevanten Merkmale und Zielvariablen ausgewählt. Zu den Merkmalen gehören die Tageszeit, der Tag des Jahres, die Kalenderwoche usw., während die Zielvariablen den Stromverbrauch und den Marktpreis für Strom umfassen.

Datenaufteilung

Für das Training und die Bewertung der Modelle werden drei verschiedene Methoden zur Datenaufteilung angewendet:

- Aufteilung nach Datum (s. Abbildung 10):** Diese Methode ermöglicht die Beibehaltung der zeitlichen Reihenfolge und simuliert reale Bedingungen, was das Risiko von Datenverlusten minimiert. Diese Methode ist besonders geeignet für Zeitreihen. Beispielsweise werden die Daten des Jahres 2023 in 70% für das Training, 20% für die Validierung und 10% für die Testung aufgeteilt.

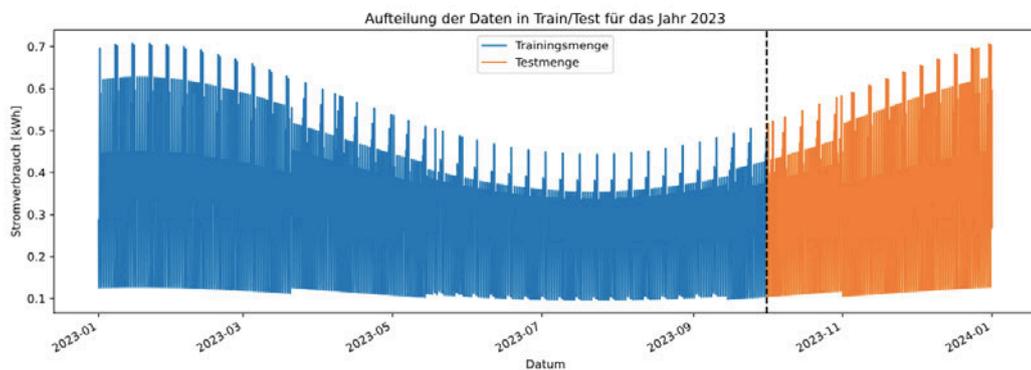


Abbildung 10: Darstellung der Datenpartition für das Modelltraining - Methode 1

Quelle: Eigene Darstellung anhand von Simulationsdaten

- Zufällige Aufteilung (s. Abbildung 11):** Diese Methode ist flexibel und kann auf alle Datentypen angewendet werden. Sie ermöglicht eine präzise Kontrolle über die Größe des Testdatensatzes und gewährleistet Repräsentativität. Allerdings besteht bei Zeitreihendaten ein erhöhtes Risiko von Datenverlusten, und variable Partitionen erschweren die Replizierbarkeit, da sie die zeitliche Reihenfolge nicht berücksichtigen [30].

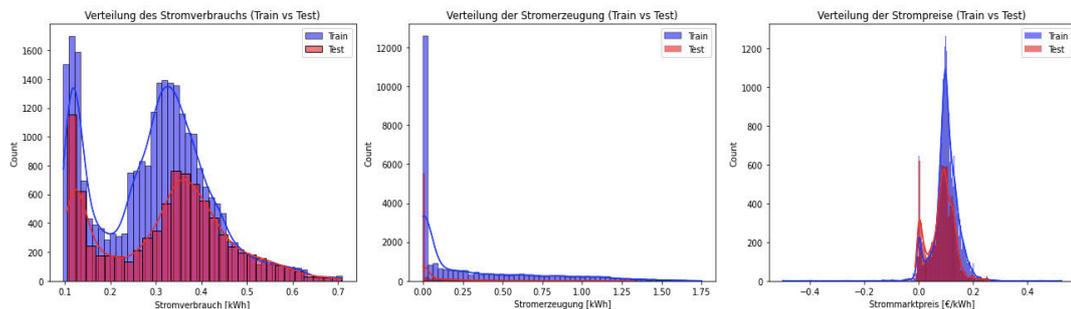


Abbildung 11: Darstellung der Datenpartition für das Modelltraining - Methode 2

Quelle: Eigene Darstellung anhand von Simulationsdaten

- **Kombination beider Methoden:** Die Kombination beider Methoden umfasst zunächst eine zeitliche Aufteilung der Daten, gefolgt von einer zufälligen Aufteilung innerhalb der so gebildeten zeitlichen Segmente. Diese Methode ermöglicht es, die zeitliche Reihenfolge der Daten zu wahren und gleichzeitig eine zufällige Verteilung innerhalb der Trainings- und Validierungssätze sicherzustellen.

Modelltraining und -bewertung

Für das Modelltraining wird das XGBoost-Verfahren als Regressionsmodell verwendet (s. Abbildung 12). XGBoost ist ein Ensemble-Lernalgorithmus, der auf dem Prinzip des Boostings basiert und mehrere schwache Lerner kombiniert, um ein starkes Modell zu erstellen [30].

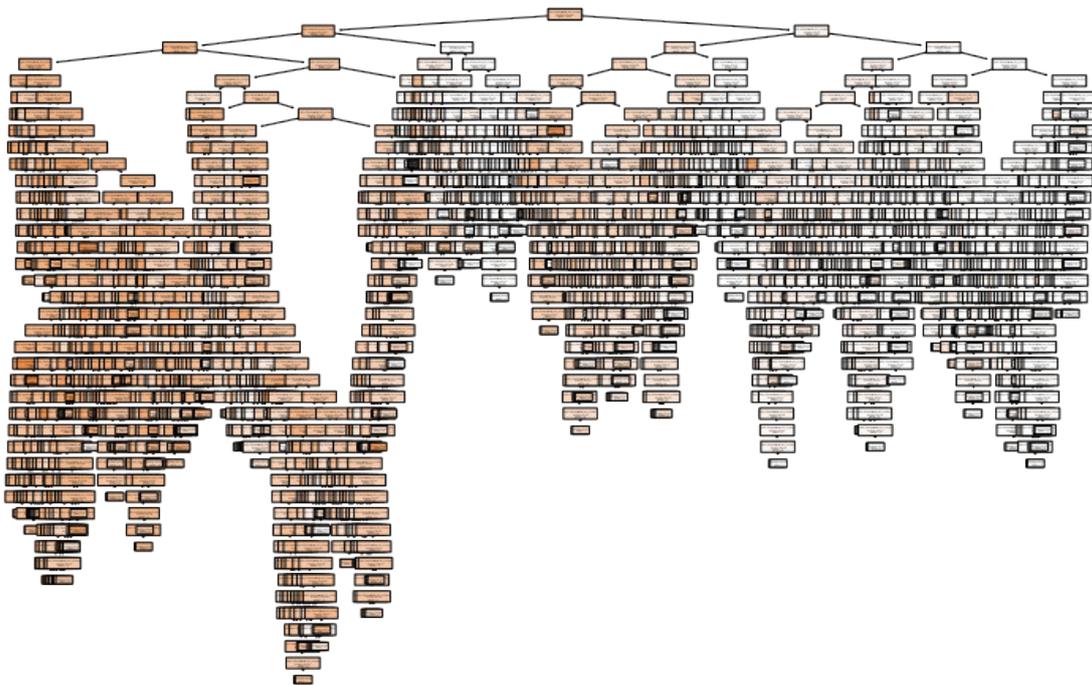


Abbildung 12: Beispiel eines Entscheidungsbaumes beim Modelltraining mit XGBoost

Quelle: Eigene Darstellung anhand von Simulationsdaten

Die Methode „train_model_XGBoost“ (s. Abbildung 13) ist darauf ausgelegt, ein Regressionsmodell mit der Bibliothek XGBoost in Python zu trainieren.

```
# Funktion zur Modellierung mit XGBoost
def train_model_XGBoost(X_train, X_test, y_train, y_test):
    model = xgb.XGBRegressor(base_score=0.5, booster='gbtree',
                             n_estimators=1000,
                             early_stopping_rounds=50,
                             objective='reg:squarederror',
                             max_depth=3,
                             learning_rate=0.01)

    model.fit(X_train, y_train,
              eval_set=[(X_train, y_train), (X_test, y_test)],
              verbose=100)

    return model
```

Abbildung 13: Quellcode für das Modelltraining mit XGBosst

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Funktionsweise der Methode:

- Die Funktion nimmt vier Argumente entgegen: „X_train“ (Trainingsmerkmale), „X_test“ (Testmerkmale), „y_train“ (Trainingslabels) und „y_test“ (Testlabels).
- Sie erstellt ein Regressionsmodell mit „xgb.XGBRegressor“ und konfiguriert mehrere wichtige Parameter: „base_score=0.5“ (Ausgangspunkt für alle Vorhersagen), „booster='gbtree'“ (verwendet Entscheidungsbäume als Booster), „n_estimators=1000“ (maximale Anzahl von Boosting-Iterationen), „early_stopping_rounds=50“ (stoppt das Training, wenn die Metrik nach 50 Iterationen nicht verbessert wird), „objective='reg:squarederror'“ (Verlustfunktion für Regression, quadratischer Fehler), „max_depth=3“ (maximale Tiefe der Bäume) und „learning_rate=0.01“ (Lernrate für die Aktualisierungen jeder Iteration).
- Das Modell wird mit „model.fit“ trainiert, wobei „X_train“ und „y_train“ als Trainingsdatensatz verwendet werden. Evaluationsdatensätze (Training und Test) werden durch „eval_set=[(X_train, y_train), (X_test, y_test)]“ bereitgestellt, um die Leistung des Modells zu überwachen. Der Trainingsstatus wird alle 100 Iterationen mit „verbose=100“ ausgegeben.
- Die Funktion gibt schließlich das trainierte Modell zurück.

Nachdem die Modelle mit Trainingsdaten trainiert und mit Testdaten getestet wurden, werden die Ergebnisse bewertet (s. Abbildung 14), um ihre Robustheit und Verallgemeinerbarkeit sicherzustellen.

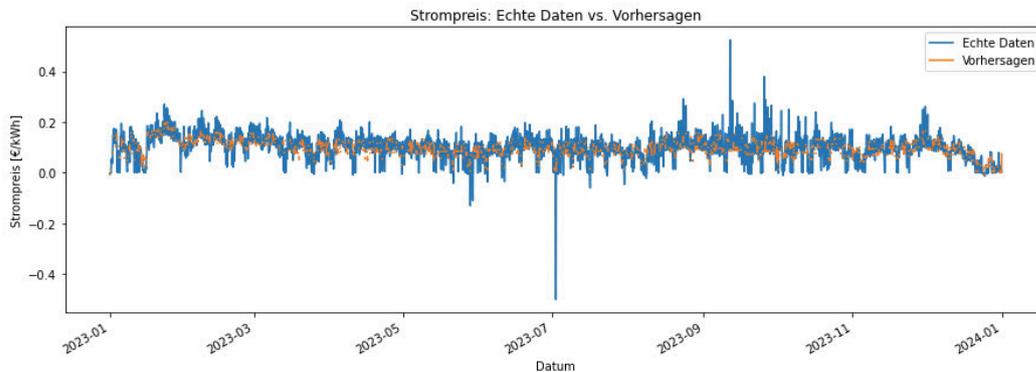


Abbildung 14: Ergebnisse der Strompreisprognose eines trainierten Modells

Quelle: Eigene Darstellung anhand von Simulationsdaten

Die Hyperparameter des Modells werden mithilfe von Techniken wie der Kreuzvalidierung optimiert, um die Leistung zu verbessern. Eine häufig verwendete Leistungsmetrik zur Bewertung der Modelle ist der „Mean Squared Error (MSE)“, der die durchschnittliche quadratische Abweichung zwischen den tatsächlichen und vorhergesagten Werten misst [26]. Ein niedrigerer MSE deutet auf eine bessere Anpassung des Modells an die Daten hin. Im vorliegenden Fall wird das Modell mit dem niedrigsten durchschnittlichen MSE als das beste Modell ausgewählt (s. Abbildung 15).

Modellversion	MSE SV	MSE SP	R ² SV	R ² SP	MAE SV	MAE SP
v1	0.000289226	0.00239986	0.734549	-0.0839197	0.0127041	0.0379038
v2	4.6095e-05	0.000752205	0.951751	0.659409	0.00460508	0.0196874
v3	0.000289883	0.0023593	0.733946	-0.0656006	0.0126314	0.0376142

Beste Modellversion: v2
 Beste durchschnittliche MSE: 0.000399150188361597

Abbildung 15: Ergebnis der Variablen der trainierten Modelle

Quelle: Eigene Darstellung anhand von Simulationsdaten

Durchführung der Prognosen

Zum Abschluss werden die Modelle verwendet, um Prognosen für das gesamte Jahr 2024 in 15-Minuten-Intervallen zu erstellen (s. Abbildung 16), die an die Intervalle der Strommessung und der Strompreisaktualisierung auf dem Strommarkt angepasst sind. Die Ergebnisse dieser Prognosen können in den Diagrammen der Visualisierungen visualisiert und analysiert werden.

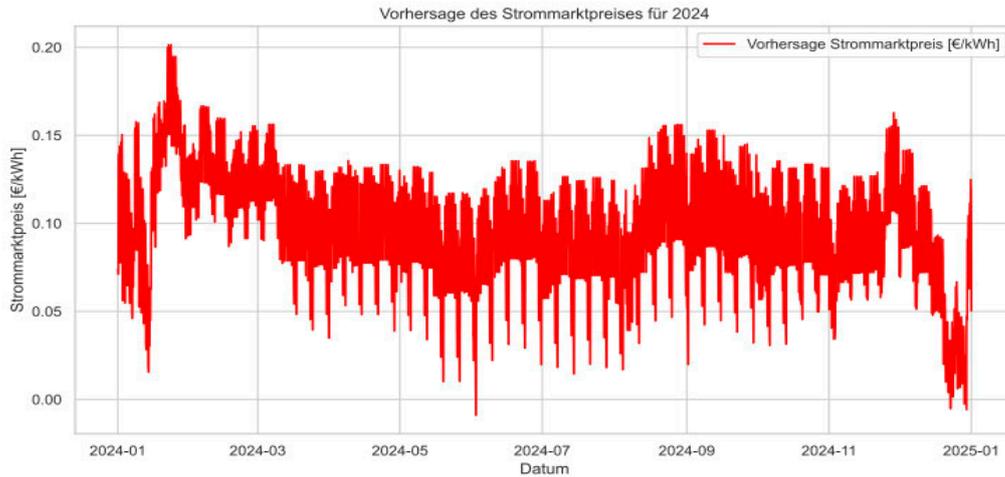


Abbildung 16: Strompreisprognose für das Jahr 2024

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

5.2.5 Visualisierungen

Die Visualisierungen werden durch das Sammeln von Daten aus dem Simulationsteil generiert (s. Abbildung 17).

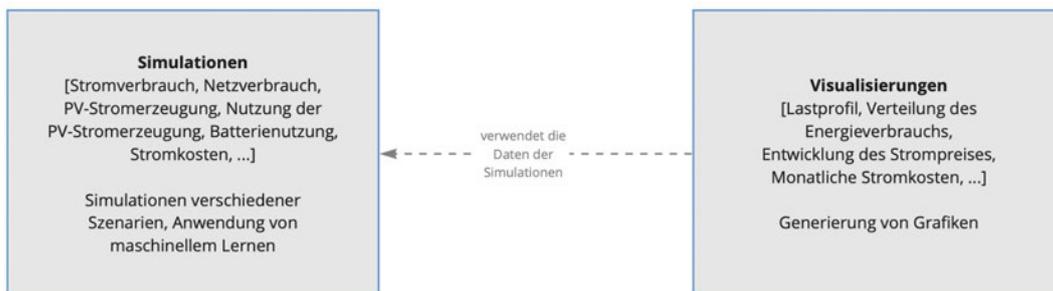


Abbildung 17: Darstellung der Informationssammlung für die Visualisierungen

Quelle: Eigene Darstellung unter Berücksichtigung der Anforderungen (s. Abschnitt 4.5)

Diese bieten eine anschauliche Darstellung der simulierten Ergebnisse und decken verschiedene Aspekte ab, darunter die zeitliche Verteilung der Strom, die monatliche kumulierte Stromverteilung, das Lastprofil über die Zeit, die Verteilung des Stromverbrauchs nach Lasttyp sowie die Entwicklung der Strompreise auf dem Day-Ahead-Markt. Sie ermöglichen es, komplexe Muster und Trends schnell zu erkennen und zu analysieren, was fundierte Entscheidungen im Energiemanagement erleichtert.

5.3 Simulationsanwendung

5.3.1 Entwicklung der Simulationsanwendung

Die Entwicklung der Simulationsanwendung erfolgte in einem strukturierten und systematischen Prozess, der verschiedene Technologien und Bibliotheken einbezog. Die Anwendung wurde in Jupyter Notebook entwickelt, einer interaktiven Entwicklungsumgebung für Python, die besonders nützlich für die iterative Entwicklung und das Debugging von Code sowie für die Dokumentation und Präsentation der Arbeitsergebnisse ist. Python wurde als Hauptprogrammiersprache gewählt aufgrund seiner einfachen Syntax, Vielseitigkeit und umfangreichen Bibliotheken. Für die Entwicklung wurden insbesondere die Bibliotheken Dash zur Erstellung interaktiver Web-Benutzeroberflächen, Plotly zur Erstellung interaktiver Grafiken und Dash Bootstrap Components für ansprechende und responsive Layouts verwendet.

Neben diesen Hauptbibliotheken kamen weitere Abhängigkeiten zum Einsatz: Pandas zur Datenmanipulation und -analyse, Openpyxl zur Arbeit mit Excel-Dateien und Numpy für numerische Berechnungen. Für den Machine-Learning-Komponenten wurden Pandas, Numpy, XGBoost, Scikit-Learn-Module wie `train_test_split` und `mean_squared_error` verwendet.

Der Entwicklungsprozess umfasste die Definition der Architektur der Simulationsanwendung, die Implementierung und das Testen grundlegender Simulationsfunktionen sowie die Entwicklung und Integration der Visualisierungskomponenten. Schließlich wurden alle Komponenten integriert, wobei besonderes Augenmerk auf die Datenverarbeitung, numerische Berechnungen und die Interaktion mit Excel-Dateien gelegt wurde, um eine benutzerfreundliche und funktionale Anwendung zu gewährleisten.

5.3.2 Verwendung der Simulationsanwendung

Die Simulationsanwendung hat eine einfache Struktur, bei der die Funktionalitäten der Komponenten über einen Launcher ausgeführt werden können. Die Nutzung erfolgt in wenigen Schritten:

1. **Klonen des Repository:** Das Repository „<https://github.com/acs340/smart-grid-strategist.git>“ wird geklont und die Abhängigkeiten aus dem Dokument README gelesen, um sicherzustellen, dass alle notwendigen Pakete installiert sind.
2. **Starten der Anwendung in Jupyter Notebook:** Die Anwendung wird über den App-Launcher gestartet (s. Abbildung 18). Dies initiiert die ETL-Prozesse und startet die Simulationsanwendung.

```
# Zum Starten der Anwendung führen Sie diese Zelle aus.

import os

def run_etl_process(callback):
    if not os.path.exists("SGS/Output-Data/ETL-Prozess_Ergebnisse.xlsx"):
        %run "SGS/ETL_Prozess.ipynb"
    run_etl_processes()
    callback()

def run_simulations_app():
    %run "SGS/Analyse.ipynb"
    run_simulation()

def sgs_launcher():
    run_etl_process(run_simulations_app)

if __name__ == "__main__":
    sgs_launcher()
```

Abbildung 18: Quellcode SGS-Launcher

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Anschließend wird das Programm auf <http://localhost:8050> gestartet (s. Abbildung 19).



Abbildung 19: Wellcome page „Smart Grid Strategist“

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

3. **Simulation durchführen:** Um die Simulation durchzuführen, wird zunächst der Typ des Letztverbrauchers ausgewählt, beispielsweise Consumer, Prosumer oder Flexumer (s. Abbildung 20). Danach werden die notwendigen Parameter eingegeben. Zu den erforderlichen Parametern gehören der jährliche Stromverbrauch, der aktuelle Tarif, die Kapazität der Solarenergieerzeugung und weitere relevante Parameter, die vom Endverbrauchertyp abhängen (s. Abbildung 20).



Abbildung 20: Benutzeroberfläche der Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Abschließend wird den Button „Simulieren“ angeklickt, um die Simulation zu starten und die Ergebnisse anzuzeigen (s. Abbildung 21).



Abbildung 21: Grafiken der Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

5.4 Durchführung der Simulationen

Für die Simulationsstudien wurde ein spezifisches Szenario definiert, um die Auswirkungen variabler Tarife und intelligenter Energiemanagementsysteme auf verschiedene Nutzertypen zu bewerten. Dabei wurden die drei Kategorien von Nutzern untersucht: Consumer, Prosumer und Flexumer. Diese Einteilung ermöglicht eine detaillierte Analyse der unterschiedlichen Bedürfnisse und Verhaltensweisen der Nutzer in Bezug auf ihren Stromverbrauch und die Nutzung von Technologien zur Stromerzeugung und -speicherung.

- **Haushaltstyp:** Die Simulationen basieren auf einem Referenzhaushalt mit zwei Bewohnern. Diese Wahl orientiert sich am Bericht „Einpersonenhaushalte in Hamburg 2022“ des Statistikamt Nord, welcher einen repräsentativen Durchschnitt für Haushalte dieser Größe in Hamburg darstellt [34].
- **Durchschnittlicher Stromverbrauch:** Der durchschnittliche Stromverbrauch pro Haushalt wurde auf 3500 kWh pro Jahr festgelegt. Diese Zahl basiert auf den Daten des „Stromspiegel 2023“ von „co2online“ und entspricht einem Haushalt der Kategorie D (bis zu 3800 kWh) auf der Skala von A bis G [37].
- **Kostenparameter:** Für die Kostenparameter wurden die Arbeitspreis- und Grundpreisdaten anhand der Ergebnisse von Online-Preisvergleichsportalen für die PLZ 22335 (Hamburg / Fuhlsbüttel, Standort der DWD-Messstation) festgelegt. Der Arbeitspreis wurde mit 35,43 ct/kWh und der Grundpreis mit 14,96 €/Monat bestimmt. Bei den variablen Tarifen wurde derselbe Grundpreis verwendet, aber der Arbeitspreis entsprach direkt dem aktuellen Marktwert des Stroms.
- **Technologische Referenzmodelle:** Für die Berechnungen des Batterieverbrauchs wurde als Referenz das Modulmodell „BYD Premium HVS 2,56 kWh“ gemäß dem Bericht der „Stromspeicher-Inspektion 2024“ der Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin verwendet [27]. Für die PV-Anlage wurden die Basisdaten des PVGIS-Simulators für 1 kWp herangezogen.
- **Simulationszeitraum:** Die Simulationen beziehen sich auf das Jahr 2023 für die deskriptive Analyse. Für die Prognosen wurden Vorhersagen für den Stromverbrauch und die Marktpreise im Jahr 2024 ausschließlich auf den Netzverbrauch und die Marktpreiswerte angewendet.

6 Ergebnisse und Analyse

6.1 Zusammenhänge zwischen Komponenten und Variablen

Die Analyse der Korrelationen (nach Pearson) zwischen den verschiedenen Komponenten und Variablen zeigt einige Zusammenhänge (s. Abbildung 22).

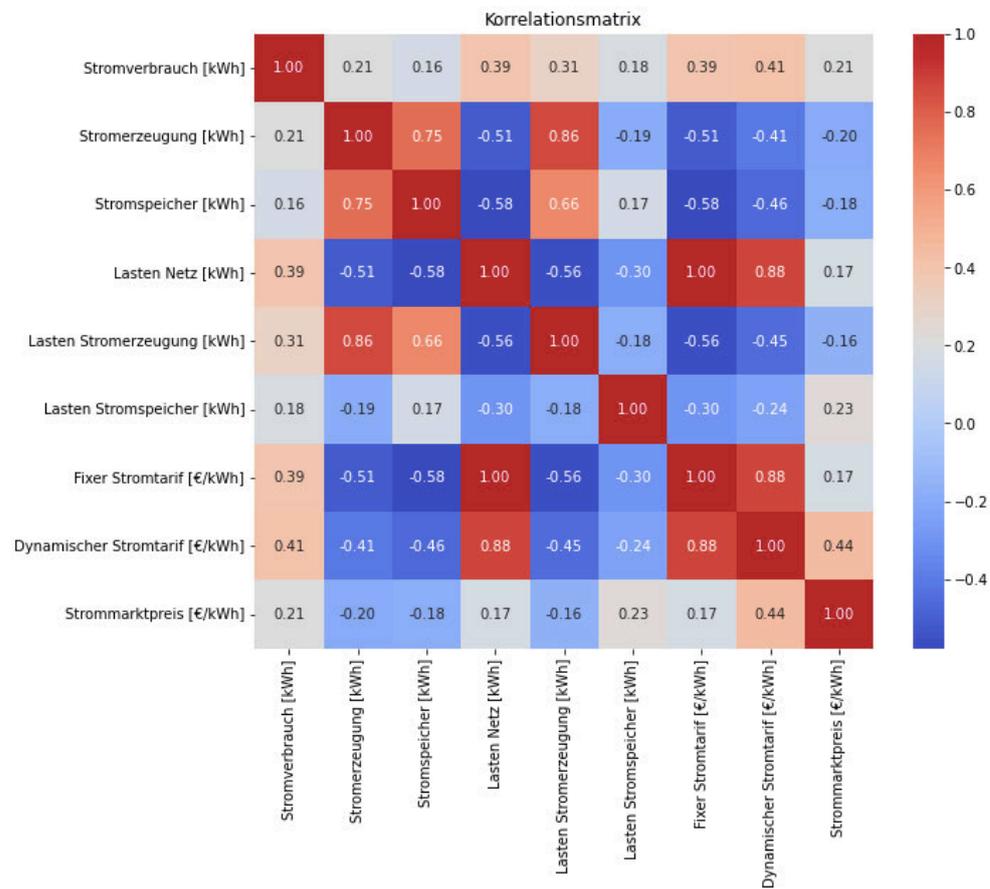


Abbildung 22: Korrelationsmatrix der Modellvariablen

Quelle: Eigene Darstellung anhand von Simulationsdaten

So besteht beispielsweise ein enger Zusammenhang zwischen dem Potenzial für Kosteneinsparungen und Eigenerzeugung und dem Einsatz von Batteriespeichern. Haushalte mit PV-Anlagen und Batteriespeichern haben demnach mehr Potenzial, ihren Stromverbrauch aus dem Netz zu reduzieren und dadurch Kosten zu sparen. Die Kapazitäten der PV- und Batteriespeichersysteme spielen hierbei eine entscheidende Rolle.

Korrelationsanalysen haben gezeigt, dass die Korrelationswerte direkt proportional zur Menge des selbst erzeugten und gespeicherten Stroms sind. Je höher die Kapazität, desto höher der Korrelationswert zwischen den Variablen „Lasten Netz“ und „Stromerzeugung“. Dieser Wert steigt von 0,5 auf 0,8 (s. Abbildung 23). Dadurch können größere Einsparungen erzielt werden, da mehr überschüssiger Strom gespeichert und genutzt werden kann, anstatt auf das Netz angewiesen zu sein.

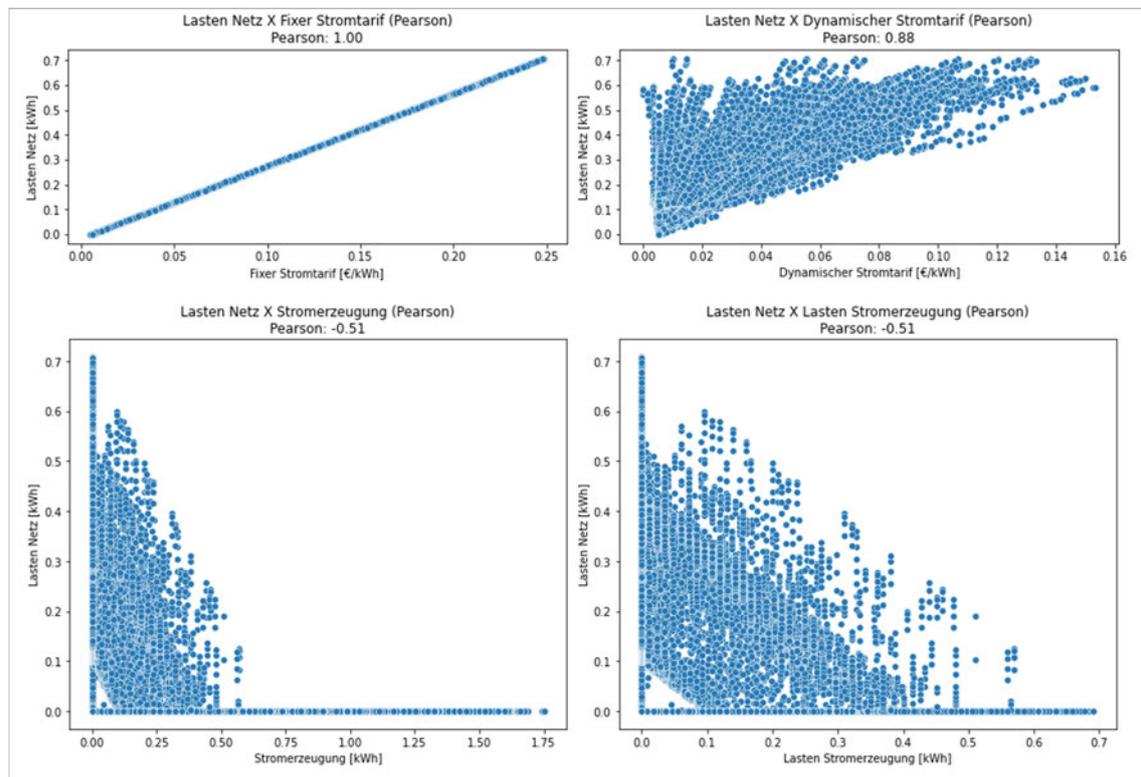


Abbildung 23: Pearson-Korrelationen zwischen den Variablen des Modells

Quelle: Eigene Darstellung anhand von Simulationsdaten

6.2 Bedeutung der Zeitintervalle für Stromverbrauch und -preis

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Analyse war die Untersuchung der zeitlichen Muster im Stromverbrauch und den Strompreisen. Es zeigt sich, dass der Stromverbrauch stark von Tages- und Jahreszeiten abhängt (s. Abbildung 24). Beispielsweise steigt der Verbrauch in den Abendstunden und in den Wintermonaten deutlich an. Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Optimierung des Energiemanagements und die Nutzung dynamischer Tarife. Allerdings variiert die Relevanz der Zeitintervalle für die Strompreise. Während der Verbrauch klare saisonale und tägliche Muster aufweist, sind die Strompreise auf dem Markt von vielen externen Faktoren, z. B. Rohstoffe oder Import und Export, beeinflusst, die in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden [11][13].

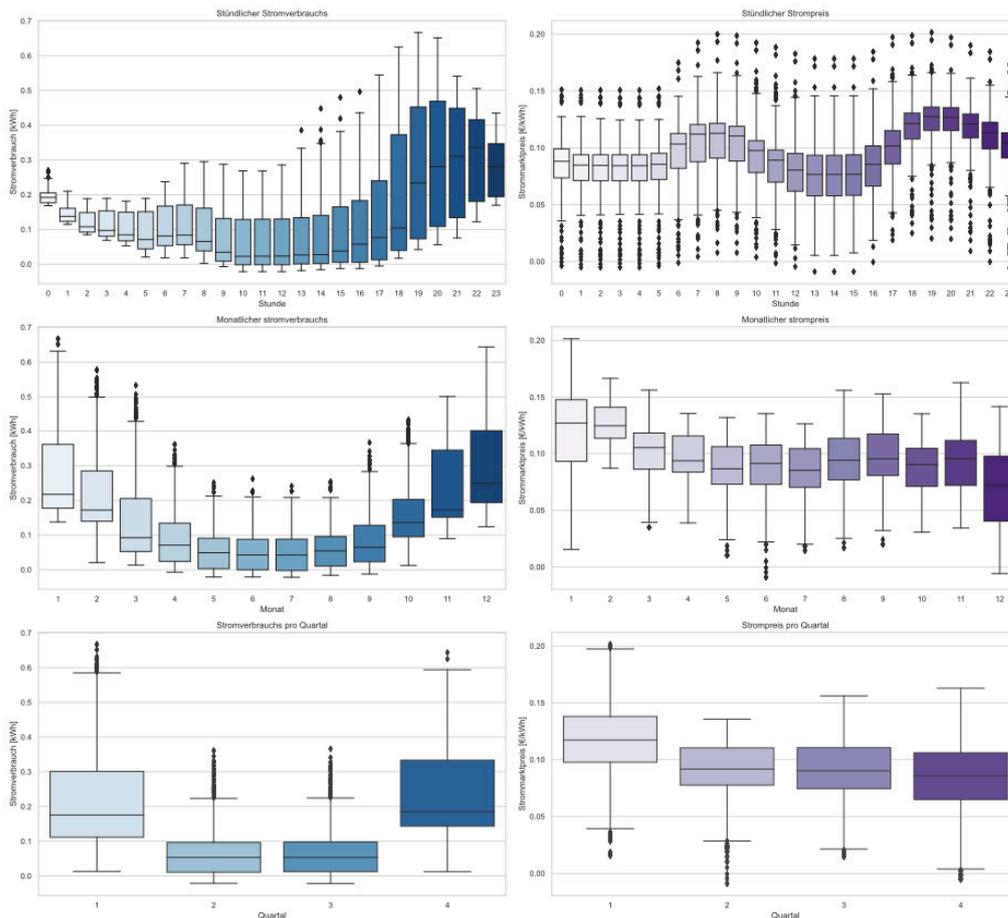


Abbildung 24: Bedeutung des Zeitintervalls für die Modellvariablen

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

6.3 Auswirkungen auf die Letztverbraucher

Die Auswirkungen dynamischer Tarife und intelligenter Strommanagementsysteme unterscheiden sich je nach Nutzertyp. Die Analyse zeigt, dass die verschiedenen Verbraucher, jeweils spezifische Vorteile und Herausforderungen haben.

Consumer: Consumer sind in hohem Maße von den Marktpreisen und deren Schwankungen abhängig, aber sie können dennoch von dynamischen Tarifen profitieren und ihre Stromkosten senken. Beispielweise könnten im Jahr 2023 die Kosten eines monatlichen festen Tarifs von 118 € mit einem dynamischen Tarif auf 44 € reduziert werden (s. Abbildung 25).

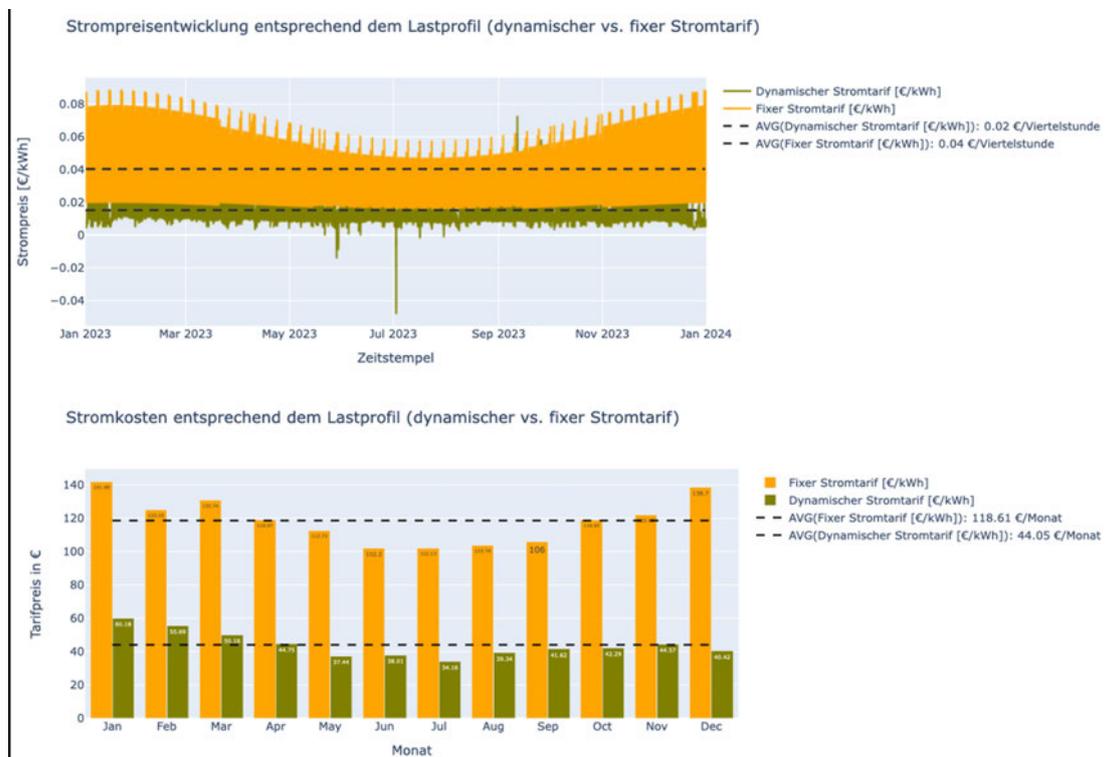


Abbildung 25: Dynamische Tarifkosten im Vergleich zu festen Tarifen - Consumer

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Dies würde im Jahr 2023 einen Kostenvorteil von 60 % gegenüber festen Tarifen aufweisen (s. Abbildung 25), was bereits eine erhebliche Kosteneinsparung darstellt. Wenn die Consumer einen Überblick über ihren Stromverbrauch und die Marktpreise haben und ihren Stromverbrauch auf Zeiten mit niedrigen Preisen ausrichten, könnte diese Einsparung noch weiter zunehmen.

Die simulierten Prognosen für 2024 (s. Abbildung 26) bilden einen stabilen Trend sowohl für den durchschnittlichen jährlichen Stromverbrauch von 0,10 kWh pro Viertelstunde als auch für den durchschnittlichen Strompreis von 0,10 €/kWh ab. Das bedeutet, dass das Einsparungspotenzial der Consumer dank dynamischer Tarife im Jahr 2024 gleich bleiben würde.



Abbildung 26: Prognose des Lasten Netz und des Strommarktpreises für das Jahr 2024

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Prosumer: Letztverbraucher mit Photovoltaik-Systemen können einen Teil ihres eigenen Bedarfs decken, indem sie ihre eigene Elektrizität erzeugen, was sowohl bei dynamischen als auch bei festen Tarifen zu Kosteneinsparungen führt.

In den Ergebnissen unserer Simulation betrug die durchschnittliche Stromproduktion etwa 80 % der maximalen Kapazität der PV-Anlage, was bedeutet, dass pro 1 kWp etwa 800 kWh pro Jahr erzeugt werden konnten. Diese Zahlen, bezogen auf die Eingangsdaten der Simulationen (Stromverbrauch von 3500 kWh pro Jahr und PV-Anlage-Kapazität von 1 kWp), deckten etwa 20 % des jährlichen Stromverbrauchs ab (s. Abbildung 27).

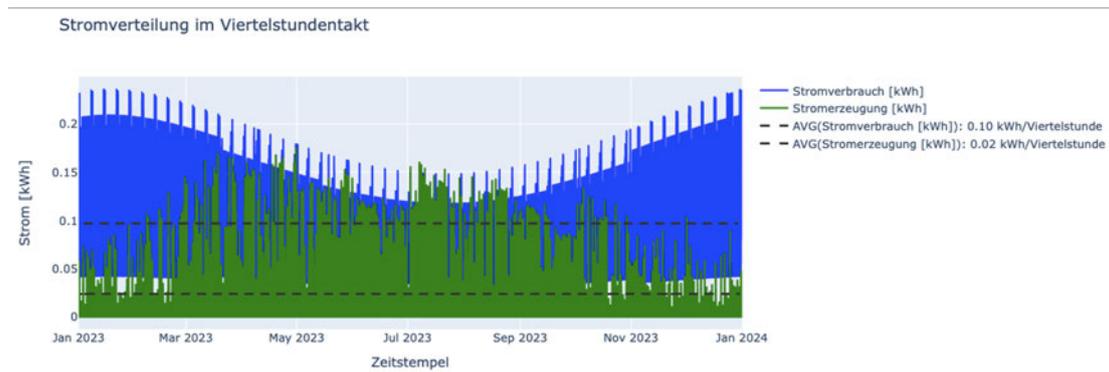


Abbildung 27: Verteilung des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Mit diesen Zahlen erreichten Prosumers eine Kosteneinsparung von 20 % bei festen Tarifen im Vergleich zu Consumer. Bei dynamischen Tarifen konnten sie zusätzlich 13 % der Gesamtkosten im Vergleich zu Consumer reduzieren. Das Einsparpotenzial zugunsten dynamischer Tarife im Vergleich zu festen Tarifen lag, ähnlich wie bei Consumer, bei 60 % (s. Abbildung 28).

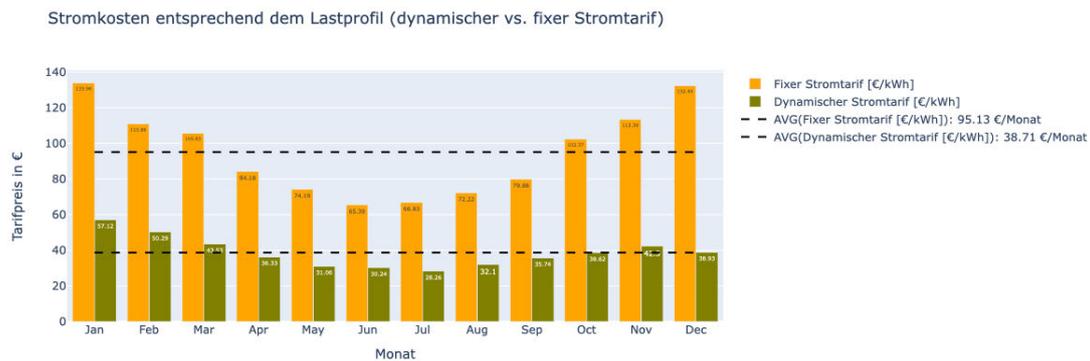


Abbildung 28: Dynamische Tarifkosten im Vergleich zu festen Tarifen - Prosumer

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Zusätzlich wurden weitere Simulationen durchgeführt, bei denen die Kapazität der PV-Anlage von 1 kWp auf 5 kWp erhöht wurde. Dadurch konnte die Stromproduktion bis zu 40 % des jährlichen Stromverbrauchs decken (s. Abbildung 29). Dies führte zu einer zusätzlichen Kosteneinsparung von etwa 15 % sowohl bei festen als auch bei dynamischen Tarifen im Vergleich zur ersten Simulation.

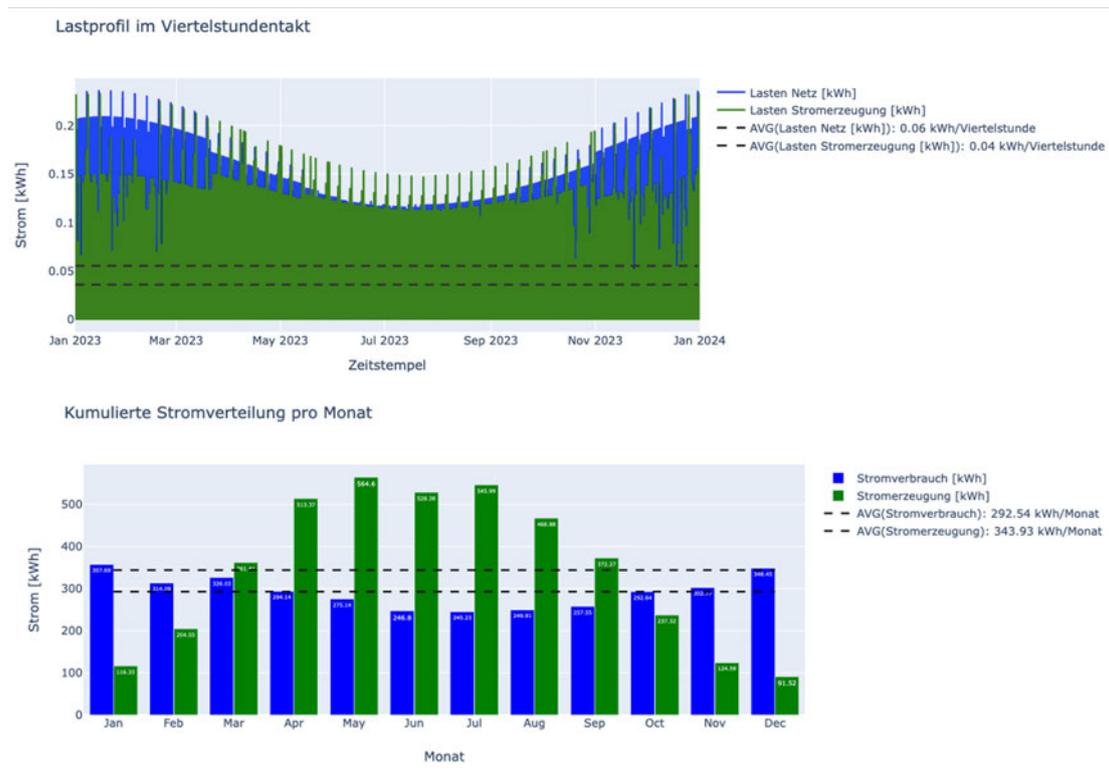


Abbildung 29: Verteilung des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

In den Prognosen für 2024 bleibt der durchschnittliche Stromverbrauch der Prosumer in beiden Simulationen gleich. Auch der durchschnittliche Marktpreis bleibt bei 0,10 €/kWh, wie für Consumer.

Flexumer: Flexumer können wie Consumer und Prosumer sowohl bei festen als auch bei dynamischen Tarifen Kosten sparen.

In den Simulationsergebnissen mit den Eingangsdaten (PV-Anlage von 1 kWp und Batteriekapazität von 2,5 kWh) zeigten sich ähnliche Werte wie im Prosumer-Szenario mit einer PV-Anlage von 1 kWp. Dies liegt daran, dass die Batterie nur dann geladen werden kann, wenn die PV-Anlage eine Überproduktion (s. Abbildung 29, März-September) aufweist. Bei den Werten für den Gesamtstromverbrauch von 3500 kWh, einer PV-Anlage von 1 kWp und einer Batteriekapazität von 2,5 kWh war dies nur in sehr wenigen Zeiträumen (s. Abbildung 30) möglich. Daher führte die Nutzung der Batterien zu keinem signifikanten Unterschied im Vergleich zu den Ergebnissen des Prosumer-Szenarios.

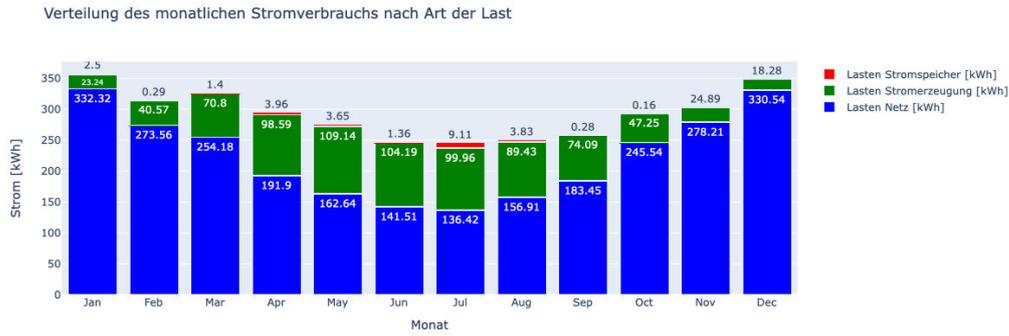


Abbildung 30: Verteilung des monatlichen Stromverbrauchs nach Lastart

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

Zusätzlich wurden weitere Simulationen durchgeführt, bei denen die Kapazität des PV-Systems auf 5 kWp erhöht und die Batteriekapazität bei 2,5 kWh beibehalten wurde. In diesem Fall konnte die Batterie öfter genutzt werden, um überschüssigen Strom zu speichern und später zu verwenden, was die Kosteneinsparungen erhöhte (s. Abbildung 31). Als Ergebnis erreichten Flexumer eine zusätzliche Kosteneinsparung von etwa 28 % bei festen Tarifen und etwa 22 % bei dynamischen Tarifen im Vergleich zur Simulation des Prosumer-Szenarios mit einer PV-Anlage von 5 kWp.

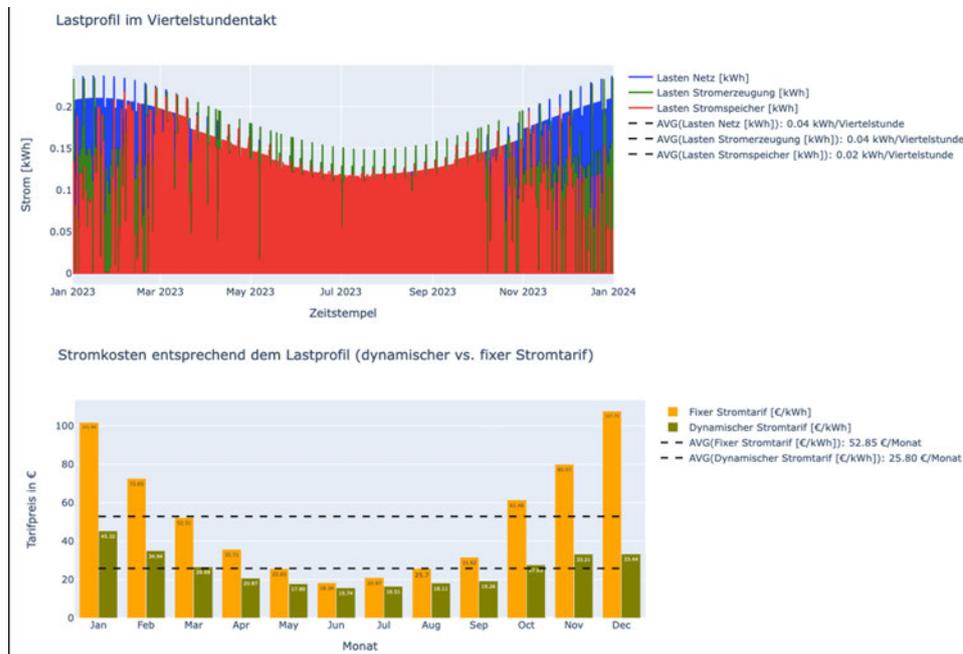


Abbildung 31: Dynamische Tarifkosten im Vergleich zu festen Tarifen - Flexumer

Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

7 Fazit

7.1 Reflexion über die Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Studie bieten wichtige Einblicke in die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Nutzertypen im Stromverbrauch, den dynamischen Tarifen und den Einsatzmöglichkeiten von intelligenten Strommanagementsystemen.

Die starke Korrelation zwischen dem Kosteneinsparungspotenzial und der Eigenproduktion sowie der Nutzung von Batteriespeichern unterstreicht die Bedeutung der Investitionen in erneuerbare Energien und Speichertechnologien für die Letztverbraucher. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Notwendigkeit eines ganzheitlichen Ansatzes zur Optimierung des Energiemanagements, der die Integration verschiedener Komponenten wie PV-Anlagen, Batteriespeicher, intelligente Haushaltsgeräte und Strommanagementsysteme umfasst.

Die Analyse der zeitlichen Muster des Stromverbrauchs und der Strompreise verdeutlicht die Bedeutung des Zeitintervalls bei der Entwicklung dynamischer Tarife. In diesem Kontext ist das Zeitintervall, in dem die Preise in den Tarifen festgelegt werden, von großer Relevanz. Tarife, die sich direkt am stündlich aktualisierten Strommarktwert orientieren, bieten einen höheren Dynamismus und ermöglichen es den Verbrauchern, ihr Verbrauchsverhalten präziser anzupassen. Alternativ können Tarife, die auf durchschnittlichen wöchentlichen, monatlichen oder anderen Preiswerten basieren, weniger volatil sein, bieten jedoch nicht die gleiche Präzision bei den Kosteneinsparungen. Je dynamischer die Tarife sind, desto besser können sie auf die tatsächliche Nachfrage reagieren und den Verbrauchern helfen, ihre Energiekosten zu optimieren, während sie gleichzeitig die Belastung des Stromnetzes verringern. Allerdings zeigt die Analyse auch, dass die Vorhersagbarkeit und Stabilität der Einsparungen durch dynamische Tarife aufgrund externer Faktoren, die die Strompreise beeinflussen, eine Herausforderung darstellen.

Darüber hinaus zeigen die Analysen, dass die Auswirkungen von dynamischen Tarifen und intelligenten Strommanagementsystemen je nach Art des Nutzers unterschiedlich sind. Während Consumer bei den dynamischen Tarifen stark vom Marktpreis abhängig sind, können

Prosumer und Flexumer dank ihrer eigenen Erzeugungs- und Speicherkapazitäten ihre Abhängigkeit vom Netz verringern und gleichzeitig stärker von dynamischen Tarifen profitieren (s. Abbildung 32).

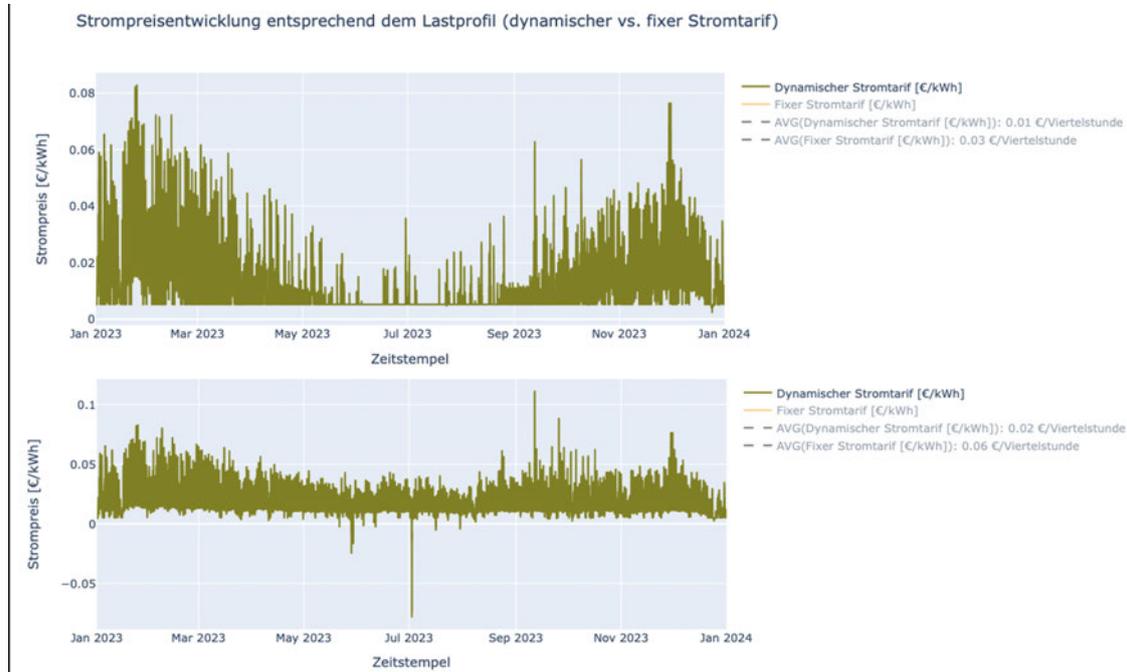


Abbildung 32: Dynamische Tarifkosten eines Flexumer gegenüber eines Consumer
 Quelle: Simulationsanwendung „Smart Grid Strategist“

In diesem Zusammenhang spielt der Smart Meter eine entscheidende Rolle, da er die Grundlage für eine datengesteuerte Optimierung des Energiemanagements bildet. Durch die kontinuierliche Erfassung von Echtzeitdaten ermöglicht der Smart Meter eine präzise Überwachung des Stromverbrauchs und liefert wertvolle Informationen zur Anpassung des Verbrauchsverhaltens an sich ändernde Tarifstrukturen. Auf diese Weise befähigt er die Letztverbraucher, von dynamischen Tarifen maximal zu profitieren und ihre Stromkosten zu minimieren.

7.2 Einschränkungen der Studie

Trotz der Erkenntnisse dieser Studie gibt es einige Einschränkungen, die berücksichtigt werden müssen. Die Daten basieren auf einer bestimmten Stichprobe von Haushalten und spiegeln nicht alle Variationen und Dynamiken des Stromverbrauchs und der Strompreise wider.

Darüber hinaus wurden Investitionen für Komponenten, Vertragslaufzeit, Kündigungsrecht und Bearbeitungszeit, sowie externe Faktoren wie geopolitische Ereignisse oder wirtschaftliche Instabilitäten, die einen Einfluss auf die Strompreise haben können [11][13], nicht berücksichtigt.

Für zukünftige Forschung bieten sich daher verschiedene Ansatzpunkte an. Eine breitere Datenerhebung über einen längeren Zeitraum hinweg könnte eine detailliertere Analyse der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Variablen ermöglichen. Eine detaillierte Analyse der Investitionskosten für die verschiedenen Komponenten der intelligenten Energiemanagementsysteme wie PV-Anlagen, Batteriespeicher und intelligente Haushaltsgeräte wäre notwendig. Dies könnte auch die Untersuchung von Amortisationszeiten und finanziellen Einsparungen über einen längeren Zeitraum umfassen. Weiterhin sollten zukünftige Studien die durchschnittlichen Stromverbrauchsmuster basierend auf verschiedenen demografischen Faktoren untersuchen, wie der Anzahl der Personen pro Haushalt, Einzelhaushalten versus Familienhaushalten und der durchschnittlichen Wohnfläche sowie Wohnort. Solche Daten könnten helfen, maßgeschneiderte Tarifmodelle zu entwickeln.

Darüber hinaus ist eine Analyse der Art und Größe der Wohnungen, die für die Installation von Energiemanagementkomponenten geeignet sind, wichtig. Dies könnte auch die Untersuchung von Herausforderungen und Lösungen für die Installation in Mehrfamilienhäusern oder Mietwohnungen umfassen. Eine umfassende Untersuchung der verschiedenen Subventionen und Förderprogramme für erneuerbare Energien und Energiespeichersysteme sollte ebenfalls durchgeführt werden. Dies könnte auch die Analyse der Effizienz und Erreichbarkeit solcher Programme für verschiedene Bevölkerungsgruppen einschließen.

Ein weiterer wichtiger Bereich für zukünftige Forschung ist das Bewusstsein und die Information der Letztverbraucher. Es sollte untersucht werden, wie gut die Letztverbraucher über die Möglichkeit informiert sind, ihre Tarifpläne zu wechseln. Untersuchungen könnten auch effektive Strategien zur Aufklärung und Motivation der Letztverbraucher untersuchen, um ihnen zu helfen, fundierte Entscheidungen zu treffen und von dynamischen Tarifen zu profitieren.

Die Entwicklung und Verfeinerung von Modellen zur Vorhersage des Stromverbrauchs und der Strompreise ist ebenfalls ein vielversprechender Bereich. Solche Modelle könnten helfen,

die Unsicherheiten und Volatilitäten besser zu managen und den Verbrauchern stabilere und verlässlichere Einsparmöglichkeiten zu bieten. Es wäre auch wichtig, die langfristigen Auswirkungen variabler Tarife auf die Energiewende zu bewerten. Hierbei sollte untersucht werden, wie variable Tarife die langfristigen Ziele der Energiewende unterstützen können, einschließlich der Integration erneuerbarer Energien, der Stabilisierung des Stromnetzes und der Förderung eines nachhaltigeren Verbraucherverhaltens.

Schließlich könnten innovative Technologien und Geschäftsmodelle, die das Energiemanagement weiter optimieren und die Nutzung erneuerbarer Energien fördern, ein weiterer Forschungsbereich sein. Dies könnte die Entwicklung von Peer-to-Peer-Energiehandelssystemen, Blockchain-Technologien zur Stromabrechnung und anderen innovativen Ansätzen umfassen. Zukünftige Forschung, die sich mit diesen Aspekten befasst, könnte nicht nur das Verständnis für dynamische Tarife und intelligentes Energiemanagement vertiefen, sondern auch praktische Lösungen bieten, um die Nutzung erneuerbarer Energien und die Energieeffizienz in Haushalten zu fördern.

Literaturverzeichnis

- [1] Agora Energiewende (2017). Abgaben Umlagen. Verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Abgaben_Umlagen/Agora_Abgaben_Umlagen_WEB.pdf [Zugriff: 15. Mai 2024].
- [2] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) (2023). Smart-Meter-Gateway Cybersicherheit für die Digitalisierung der Energiewirtschaft. Verfügbar unter: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Broschueren/Smart-Meter-Gateway.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [3] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2016). Messstellenbetriebsgesetz (MsbG). Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/messbg/MsbG.pdf> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023). Ein Strommarkt für die Energiewende. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/weissbuch.pdf?__blob=publicationFile&v= [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2019). Barometer Digitalisierung der Energiewende: Berichtsjahr 2019. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/barometer-digitalisierung-der-energiewende-berichtsjahr-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023). Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [Zugriff: 11. Juni 2024].

- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023). Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/gesetz-zur-digitalisierung-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [8] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023). Inputpapier der AG2 zu dynamischen Tarifen aus Stromsystemperspektive. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/inputpapier_flex-ag2_dynamische-tarife-stromsystemperspektive-25-10-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2023). Smart Metering. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/smart-metering.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2015). Weißbuch. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/weissbuch.pdf?__blob=publicationFile&v= [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [11] Bundesnetzagentur (2021). Marktanalyse zu variablen Stromtarifen. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/EN/BNetzA/PressSection/PressReleases/2022/20221130_MB.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [12] Bundesnetzagentur (2023). Marktbeobachtung Monitoringbericht 2023. Verfügbar unter: <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2023.pdf> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [13] Bundesnetzagentur (2023). Ecofys: Lastvariable und Zeitvariable Tarife. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzzugangUndMesswesen/MessUndZaehlwesen/EcofysLastvariableZeitvariableTarife.pdf?__blob=publicationFile&v=1 [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [14] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2023). BDEW-Strompreisanalyse Dezember 2023. Verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/original_images/2023/12/12/231212_bdew-strompreisanalyse_dezember_2023_12122023.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].

- [15] Dena (2024). 'Was sind dynamische Stromtarife?', Deutsche Energie-Agentur. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2024/Was_sind_dynamische_Stromtarife.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [16] Deutscher Industrie- und Handelskammertag (DIHK) (2024). Strombeschaffung und Handel. Verfügbar unter: <https://www.dihk.de/resource/blob/16826/6b374abd68f83c368ed7d9cc68dadcd0/dihk-faktenpapier-strombeschaffung-und-handel-data.pdf> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [17] Deutscher Wetterdienst (DWD) (2024). 'Beschreibung der Solarstrahlungsdaten', Open Data. Verfügbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/solar/BESCHREIBUNG_obsgermany_climate_hourly_solar_de.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [18] ENEFIRST (n.d.). 'Using ToU (Time-of-Use) tariffs to engage consumers and benefit the power system'. Verfügbar unter: https://enefirst.eu/wp-content/uploads/1_Using-ToU-Time-of-Use-tariffs-to-engage-consumers-and-benefit-the-power-system.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [19] Europäische Kommission (2019). Mitteilung der Kommission: Der europäische Grüne Deal. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [20] Europäische Kommission (2020). Implementing Plan Finland. Verfügbar unter: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/implementing_plan_finland_final_10072020_0.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [21] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE) (2019). Smart Meter, Prosumer, Flexumer – Wie die Digitalisierung die Rolle von Verbrauchern verändert. Verfügbar unter: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2019/10/FE_13549_Bericht2.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [22] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE) (2018). Bericht FE 13549. Verfügbar unter: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2018/12/FE_13549_Bericht_final_online.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].

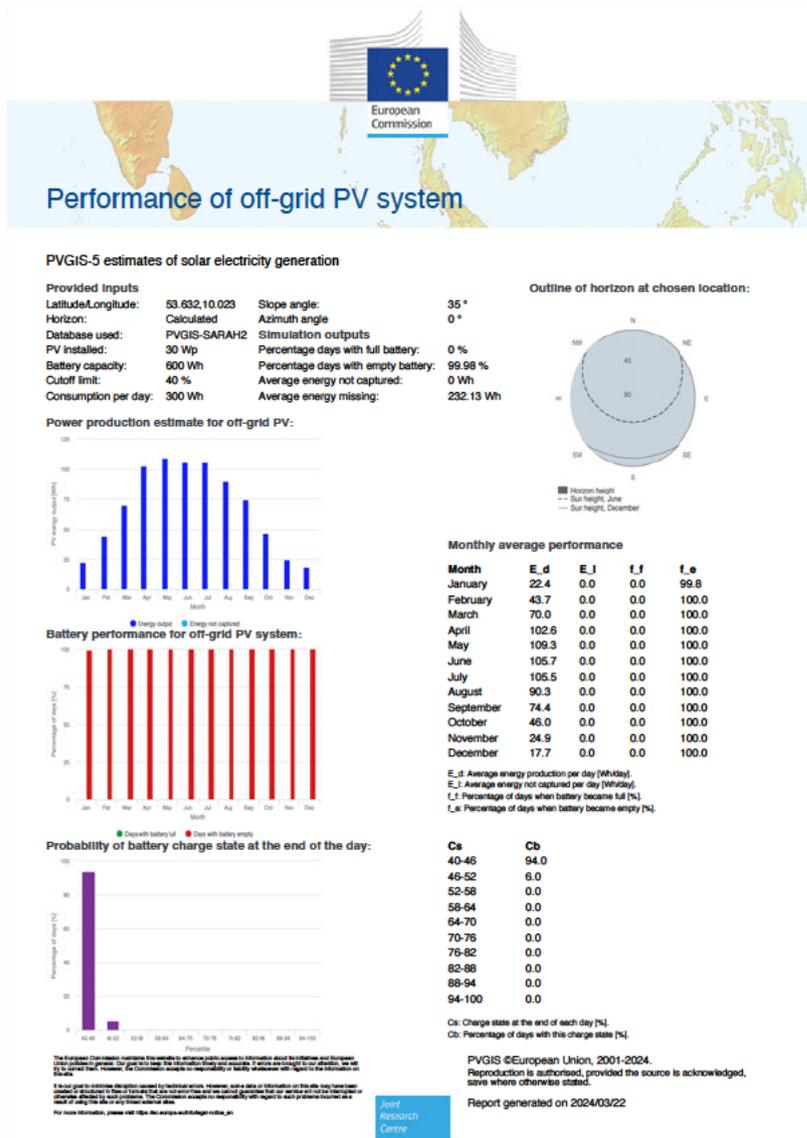
- [23] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE) (2023). iMSys Aktualisierung, May. Verfügbar unter: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2023/02/iMSys_Aktualisierung_01-2023.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [24] Fraunhofer-Institut (2021). Intelligente Messsysteme als Schlüsseltechnologie für die Energiewende. Verfügbar unter: <https://public-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/be2409c6-eb92-4e32-b4be-81983bed8ec1/content> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [25] HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e. V. (2023). Energiemanagementsysteme. Verfügbar unter: <https://www.hea.de/assets/hea/pdf/allgemein/hea-fachinformation-energiemanagementsysteme.pdf> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [26] Hodson, T., Over, T. & Foks, S. (2021). Mean Squared Error, Deconstructed. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 13. [DOI:10.1029/2021MS002681](https://doi.org/10.1029/2021MS002681).
- [27] HTW Berlin (2024). 'Stromspeicher-Inspektion 2024', Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Verfügbar unter: <https://solar.htw-berlin.de/wp-content/uploads/HTW-Stromspeicher-Inspektion-2024.pdf> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [28] Joint Research Centre (2024). 'Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)', European Commission. Verfügbar unter: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [29] Kowalski, J. und Matusiak, B.E. (2019). 'End users' motivations as a key for the adoption of the home energy management system', International Journal of Management and Economics, 55(1), pp. 13-24. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2478/ijme-2019-0002> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [30] Martínez-Muñoz, G. (2019). 'A Comparative Analysis of XGBoost'. Verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/publication/337048557> [Zugriff: 11. Juni 2024].

- [31] Müller, A.C. and Guido, S. (2016). Introduction to Machine Learning with Python. 1st ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc. Verfügbar unter: [https://www.nrigroupindia.com/e-book/Introduction%20to%20Machine%20Learning%20with%20Python%20\(%20PDFDrive.com%20\)-min.pdf](https://www.nrigroupindia.com/e-book/Introduction%20to%20Machine%20Learning%20with%20Python%20(%20PDFDrive.com%20)-min.pdf) [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [32] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (n.d.). 252. PTB-Seminar. Verfügbar unter: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_9/9.2_gesetzliches_messwesen_und_konformitaetsbewertung/9.21/252_ptb-seminar/Vortrag10.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [33] SMARD (2024). 'Download Marktdaten', SMARD.de. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/home/downloadcenter/download-marktdaten/?downloadAttributes=%7B%22selectedCategory%22:3,%22selectedSubCategory%22:8,%22selectedRegion%22:false,%22selectedFileType%22:%22XLSX%22,%22from%22:1672527600000,%22to%22:1704063599999%7D> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [34] Statistikamt Nord (2023). 'Einpersonenhaushalte in Hamburg 2022', Statistikamt Nord. Verfügbar unter: https://www.statistik-nord.de/fileadmin/Dokumente/Presseinformationen/SI23_092.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [35] Stiftung Umweltenergierecht (2023). Kurzgutachten: Dynamischer Stromtarif. Verfügbar unter: https://stiftung-umweltenergierecht.de/wp-content/uploads/2023/12/Stiftung_Umweltenergierecht_Kurgutachten_Dynamischer_Stromtarif_final.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [36] Stromnetz Hamburg (2024). 'Zählverfahren', Stromnetz Hamburg. Verfügbar unter: <https://www.stromnetz-hamburg.de/fuer-partner/stromlieferanten/zaehlverfahren> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [37] Stromspiegel (2023). 'Stromspiegel 2023: Stromverbrauch und Stromkosten im Haushalt', Stromspiegel. Verfügbar unter: https://www.stromspiegel.de/fileadmin/ssi/stromspiegel/Downloads/StromspiegelFlyer_2023_Web.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].

- [38] Truong Hoang Bao Huy, H.T.D., Vo, D.N. und Kim, D. (2023). Real-time energy scheduling for home energy management systems with an energy storage system and electric vehicle based on a supervised-learning-based strategy. *Energy Conversion and Management*, vol. 292, 117340. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117340> [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [39] Umweltbundesamt (2021). Umweltwirkungen von Smart Metern. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_34-2021_umweltwirkungen_smart_meter.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [40] Westphal, B. (2019). *Energietechnik*, 197(8), pp. 60-1. Verfügbar unter: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2019/08/18017_et_197-8_60_1_Westphal_ArtikelPDF.pdf [Zugriff: 11. Juni 2024].
- [41] X-Road® Data Exchange Layer (n.d.). 'Access to electricity and gas smart meter data in Estonia'. Verfügbar unter: <https://x-road.global> [Zugriff: 11. Juni 2024].

Anhang

A.1 Simulationsbericht des PVGIS-Simulators



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original