

Interactive Simulation of Grid Flexibility Using Configurable Energy Devices

IP5-ARBEIT

6 Februar 2026



Studenten:

Merlin van der Kolk
Eric Brukner

Betreuer:

Prof. Dr. Norbert Seyff
Dr. Nitish Patkar

Kunde:

Dr. Christian Dollfus

Projekt Nummer:

25HS_IIT27

Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Technik

Abstract

Mit dem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien wie Solar- und Windkraft steht die Stabilität von Stromnetzen vor neuen Herausforderungen, da deren wetterabhängige und volatile Erzeugung auf einen ohnehin schwankenden Stromverbrauch trifft. Netzbetreiber und Energiemanagementsysteme erstellen daher Prognosen über Last und Einspeisung, die als Grundlage für Planung und Betrieb dienen. Flexible Systeme sind erforderlich, um Netzimbalancen zu vermeiden und eine effiziente Energienutzung zu ermöglichen, indem sie Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlichen Energieflüssen in Echtzeit erkennen und automatisch ausgleichen.

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Konzept erstellt und prototypisch umgesetzt, das simulierte Energieproduktion mit vorhergesagtem Verbrauch vergleicht und bei Abweichungen automatisierte Korrekturmassnahmen auslöst beispielsweise durch die prioritätsbasierte Steuerung flexibler Verbraucher. Ziel ist es, ein transparentes und nachvollziehbares Modell für dynamisches Energiemanagement zu schaffen, das zeigt, wie flexibel steuerbare Verbraucher und Speicher, etwa Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge oder Batteriesysteme, zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen können. Ein zentrales Element des Systems ist eine Visualisierungskomponente, welche Energieflüsse, Prognosen und Anpassungen verständlich darstellt.

Die Umsetzung basiert auf öffentlich verfügbaren Energiedaten aus offiziellen Quellen wie Swissgrid, auf deren Grundlage eine einfache Prognose erstellt wurde. Zusätzlich wurden eine prioritätsbasierte Entscheidungslogik (Merit Order) sowie eine interaktive Visualisierung der Simulation implementiert. Da zu Projektbeginn keine bestehenden Daten oder Softwaremodule zur Verfügung standen, wurde die gesamte Lösung von Grund auf entwickelt. Der Fokus lag dabei auf Skalierbarkeit und Übertragbarkeit auf unterschiedliche Anwendungsszenarien von einzelnen Gebäuden bis hin zu grösseren Netzabschnitten.

Das Ergebnis ist ein Prototyp, der die Balance zwischen Energieangebot und -nachfrage innerhalb einer Simulation abbildet und grafisch darstellt. Die Anwendung ermöglicht es, verschiedene Szenarien zur flexiblen Steuerung von Verbrauchern und Erzeugern zu untersuchen und deren Auswirkungen auf die Netzstabilität zu analysieren. Für einen produktiven Einsatz wäre jedoch eine Anbindung an reale Messdaten, Prognosesysteme und operative Schnittstellen notwendig.

Keywords: Energiemanagement, Netzstabilität, Merit Order, Simulation, Visualisierung

Inhaltsverzeichnis

Abstract	1
1 Einleitung.....	4
2 Grundlagen	5
2.1 Grundlagen der Energiebilanz und Prognosen.....	5
2.2 Merit-Order-Logik	7
2.3 Simulationen und Visualisierung von Energieflüssen.....	7
2.4 Abgrenzung zu bestehenden Simulations- und Flexibilitätsplattformen	8
2.4.1 Bestehende und ähnliche Simulations- und Flexibilitätsplattformen	8
2.4.2 Abgrenzung zu unserem Projekt.....	9
3 Methoden und Prozesse	11
3.1 Projektmanagement und Vorgehensmodell	11
3.2 Risiken.....	11
3.3 Aufbau der Validierung / Nutzertests	13
4 Planung und Design.....	14
4.1 Vorgehen & Iteratives Design	14
4.2 Auswahl des Designs	15
4.3 Festlegung Design.....	17
5 Technische Umsetzung.....	18
5.1 Architekturüberblick	18
5.2 Gerätedefinitionen und Abstraktion	19
5.3 Merit-Order-Logik.....	19
5.4 Zeitdiskrete Simulation und Ablauf pro Schritt	21
5.5 Forecast-Generierung und Simulation von Abweichungen	21
5.6 API-Schicht und Frontend-Anbindung.....	22
5.7 Backend Testbarkeit, Performance und Qualitätssicherung	23
5.8 Frontend.....	24
5.9 Frontend Testbarkeit, Performance und Qualitätssicherung.....	25
5.10 Offene Punkte	25
6 Validierung / Nutzertests.....	27
7 Herausforderungen	31
8 Diskussion	33
8.1 A: Welche Visualisierungstechniken sind am besten geeignet, um Energieerzeugungs- und Verbrauchs Daten klar und verständlich für verschiedene Zielgruppen darzustellen?.....	33

8.2 B: Wie sind reale merit orders im Energiemanagement strukturiert und wie können sie modelliert und an eine skalierbare Simulationsumgebung angepasst werden?	33
8.3 C: Welche Methoden können verwendet werden, um synthetische Verbrauchsdaten zu erzeugen, die reale Muster realistisch nachahmen und dennoch kontrollierte Abweichungen für Tests zulassen?	34
8.4 D: Identifikation geeigneter Szenarien und Prototyping der Benutzeroberfläche: Welche Ansätze nutzen Sie, um die definierte Zielgruppe zu erreichen?	35
8.5 E: Technisches Konzept: Mit welchem technischen Konzept erreichen Sie die gewünschte Lösung?	35
8.6 F: User Interface Design: Welche Interaktionskonzepte, Interface-Designs und visuellen Sprachen eignen sich für Ihren Ansatz?	36
8.7 G: Implementierung: Mit welcher technischen Implementierung erfüllen Sie die Anforderungen an Funktionalität, Benutzerfreundlichkeit, Zuverlässigkeit, Effizienz und Wartungsfähigkeit?	36
8.8 H: Test: Korrektheit, Benutzerfreundlichkeit und Zuverlässigkeit sind zentral für die erfolgreiche Einführung der Software. Wie können Sie sie sicherstellen und testen?	37
9 Fazit.....	38
10 Ausblick	39
A Fragenbogen	40
B Ausgefüllte Fragebogen	42
Fragenbogen Firma Swissgrid_1:.....	42
Fragenbogen Firma Swissgrid_2:.....	44
Fragenbogen Firma Primeo Energie:.....	46
C Quellcode und Repository	48
Meilensteine	48
Quellenverzeichnis.....	49
Abbildungsverzeichnis	50

1 Einleitung

Die steigende Integration erneuerbarer Energien wie Photovoltaik und Windkraft verändert die Anforderungen an Stromnetze grundlegend. Da diese Energiequellen von Natur aus volatil und nur begrenzt vorhersagbar sind, kommt es zunehmend zu Ungleichgewichten zwischen Erzeugung und Verbrauch. Ein kontinuierliches Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage ist jedoch essenziell, da elektrische Energie nur eingeschränkt gespeichert werden kann und Abweichungen die Netzstabilität gefährden. Netzbetreiber setzen daher verschiedene Massnahmen ein, darunter Prognoseverfahren, Regelernergie und Flexibilitätsmechanismen, um kurzfristige Schwankungen auszugleichen und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten [1, 2].

In der Schweiz übernimmt die Swissgrid AG als nationale Übertragungsnetzgesellschaft die Verantwortung für den sicheren Betrieb des Stromnetzes. Zu diesem Zweck greifen Swissgrid sowie weitere Akteure wie Energieversorger und Bilanzgruppenverantwortliche auf Prognosen zurück, die auf historischen Verbrauchsdaten und Wetterinformationen basieren, um erwartete Erzeugungs- und Lastverläufe abzuschätzen und Abweichungen durch Regelleistung zu kompensieren. Dennoch bestehen weiterhin Herausforderungen hinsichtlich Datenverfügbarkeit und Prognosegenauigkeit, da insbesondere Messdaten aus tieferen Netzebenen nur begrenzt verfügbar sind und Prognosefehler direkte Auswirkungen auf die Netzstabilität haben können [1].

Parallel dazu wächst das Interesse an Energiemanagement-Strategien, die nicht ausschliesslich auf Prognosen basieren, sondern aktiv in das Zusammenspiel von Erzeugung und Verbrauch eingreifen, indem sie den zeitlichen Einsatz und die Leistungsaufnahme flexibel steuerbarer Verbraucher und Produzenten innerhalb vorgegebener Rahmenbedingungen anpassen. Dabei rücken Verbraucher und Speicher wie Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge oder Batteriesysteme zunehmend in den Fokus. Solche Flexibilitäten können dazu beitragen, Lastspitzen zu reduzieren, Engpässe zu vermeiden und die Integration erneuerbarer Energien zu erleichtern [3].

Vor diesem Hintergrund wurde in Zusammenarbeit mit CEEX (Clean Energy Exchange) ein Projekt initiiert, dessen Ziel die Entwicklung eines Prototyps zur Simulation und Visualisierung von Energieflüssen ist. Der Prototyp dient dazu, aufzuzeigen, inwiefern sich Abweichungen zwischen prognostizierter und tatsächlicher Energieproduktion sowie -nachfrage durch eine prioritätsbasierte Steuerungslogik (Merit Order) ausgleichen lassen, bei der flexibel steuerbare Verbraucher und Produzenten abhängig von ihrer Flexibilität und Relevanz für das energetische Gleichgewicht gestaffelt eingesetzt werden. Der Fokus liegt dabei nicht auf einer operativen Echtzeitsteuerung, sondern auf der nachvollziehbaren Darstellung von Entscheidungsprozessen und deren Auswirkungen auf das energetische Gleichgewicht.

Zentrale Bestandteile des Systems sind eine einfache Prognoselogik für Verbrauchs- und Erzeugungswerte, die Modellierung einer Merit-Order-basierten Entscheidungslogik sowie eine interaktive Visualisierung verschiedener Energieszenarien. Der Prototyp soll CEEX als Grundlage dienen, um interne Konzepte weiterzuentwickeln und potenziellen Kunden die Funktionsweise und den Nutzen flexibler Energiemanagement-Strategien anschaulich zu vermitteln. Da zu Projektbeginn keine geeigneten Datensätze oder bestehenden Softwaremodule verfügbar waren, wurde die Lösung von Grund auf entwickelt. Als Datenbasis werden öffentlich zugängliche Quellen, unter anderem von Swissgrid, verwendet, um realitätsnahe Simulationen zu ermöglichen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein nachvollziehbares Simulations- und Visualisierungssystem zu entwerfen, das exemplarisch zeigt, wie flexibel steuerbare Ressourcen zur Balance von Angebot und Nachfrage beitragen können, und gleichzeitig Methoden und Kriterien zu evaluieren, mit denen solche Systeme auf unterschiedliche Anwendungskontexte skaliert werden können.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen und technischen Grundlagen behandelt, die für das Verständnis des entwickelten Prototyps notwendig sind. Dazu gehören zentrale Konzepte der Energiewirtschaft wie das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch, Prognosen von Last- und Erzeugungsdaten sowie prioritätsbasierte Steuerungsmechanismen. Ein besonderer Fokus liegt auf der Merit-Order-Logik, da sie die Grundlage für die im Projekt umgesetzte Entscheidungslogik bildet.

Darüber hinaus werden bestehende Ansätze zur Simulation und Visualisierung von Energieflüssen betrachtet, um den entwickelten Prototypen in den aktuellen Stand der Technik einzuordnen und klar von operativen Energiemanagementsystemen abzugrenzen.

2.1 Grundlagen der Energiebilanz und Prognosen

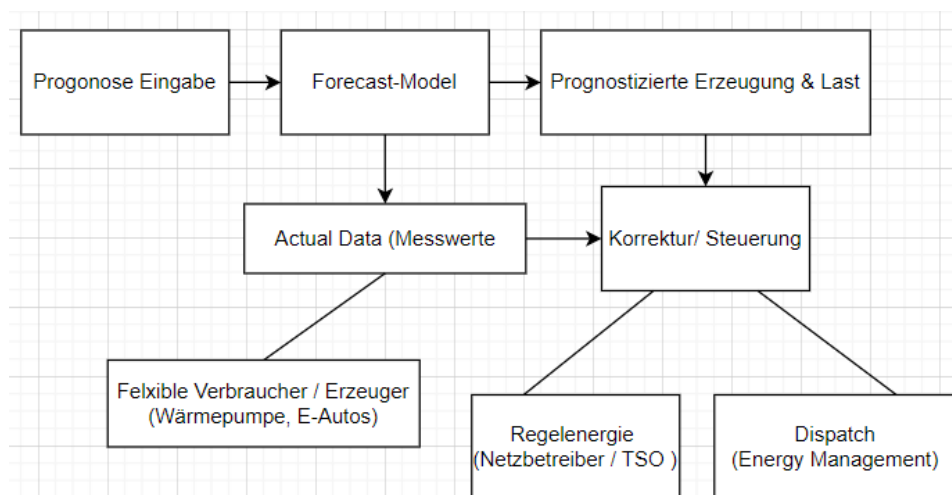


Abbildung 1 Grobes Grundlagen der Energiebilanz Prognosen Diagramm

Ein stabiles Stromnetz erfordert zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen erzeugter und verbrauchter elektrischer Energie. Da elektrische Energie nur begrenzt speicherbar ist, müssen Abweichungen zwischen Angebot und Nachfrage kurzfristig ausgeglichen werden. Prognosen spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie als Grundlage für Planung, Steuerung und den Einsatz von Ausgleichsmechanismen dienen [1][4].

Veröffentlichung und Anbieter von Prognosen

Last- und Erzeugungsprognosen werden in verschiedenen zeitlichen Auflösungen erstellt, typischerweise stündlich, täglich oder wöchentlich, je nach Anwendungsfall. Sie werden von unterschiedlichen Akteuren bereitgestellt:

- Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB): In der Schweiz z. B. Swissgrid veröffentlicht Prognosen zur Netzlast und erneuerbaren Einspeisungen, ähnlich wie TenneT in Deutschland oder RTE in Frankreich.
- Regionale Verteilnetzbetreiber (VNB): Stellen detailliertere Lastprognosen für lokale Netze bereit.
- Private Anbieter und Forschungseinrichtungen: Unternehmen wie MeteoSwiss oder Fraunhofer ISE kombinieren Wetter- und Verbrauchsdaten zu Prognosemodellen.

In der Praxis unterscheiden sich Prognosen zwischen Ländern teilweise durch verfügbare Daten, Netzstruktur und Anteil erneuerbarer Energien. So sind in der Schweiz kurzfristige Prognosen für Wasserkraft stark wetterabhängig, während in Deutschland Wind- und Solarenergie dominanter sind, was andere Modellansätze erforderlich macht [4].

Methodik und Algorithmen

Last- und Erzeugungsprognosen basieren in der Regel auf historischen Verbrauchsdaten, Tages- und Wochenprofilen sowie externen Einflussfaktoren wie Wetterbedingungen (z. B. Temperatur) [5]. Während früher oft einfache statistische Methoden, wie Regressionsanalysen, genutzt wurden, kommen heute zunehmend komplexe Algorithmen zum Einsatz, um die Volatilität insbesondere erneuerbarer Energien abzubilden:

- Zeitreihenmodelle: Klassische Ansätze wie ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average) nutzen die Autokorrelation in historischen Daten und eignen sich besonders für kurzfristige Vorhersagen [5].
- Künstliche Intelligenz: Moderne Ansätze, etwa neuronale Netze oder Random Forests, erfassen nicht-lineare Zusammenhänge zwischen Wetterdaten und Erzeugungsleistung und liefern präzisere Prognosen [5][4].

Erzeugungsprognosen, insbesondere im Bereich erneuerbarer Energien, sind zusätzlich stark von meteorologischen Daten abhängig [4]. Trotz moderner Prognoseverfahren lassen sich Abweichungen nicht vollständig vermeiden, da kurzfristige Wetteränderungen oder unerwartete Verbrauchsspitzen zu Prognosefehlern führen können [4].

Für Energiemanagement- und Simulationssysteme ist daher weniger die absolute Genauigkeit einzelner Prognosewerte entscheidend, sondern vielmehr die Fähigkeit, Abweichungen zu erkennen und darauf zu reagieren. In Prototypen und Demonstrationssystemen werden häufig vereinfachte Prognosemodelle eingesetzt, um grundlegende Zusammenhänge zwischen Prognose, Ist-Werten und Steuerungsmechanismen transparent darzustellen. Auch im Rahmen dieses Projekts wird bewusst eine einfache Prognoselogik verwendet, um den Fokus auf die Wirkung der nachgelagerten Entscheidungs- und Steuerungslogik zu legen [5].

2.2 Merit-Order-Logik

Die Merit-Order-Logik beschreibt die prioritätsbasierte Reihenfolge, in der Kraftwerke zur Deckung der Stromnachfrage eingesetzt werden. Grundlage ist die Sortierung der verfügbaren Erzeugungskapazitäten nach ihren variablen Kosten: Zunächst werden Anlagen mit den geringsten Grenzkosten eingesetzt, wie erneuerbare Energien (z. B. Solar- und Windkraft), gefolgt von teureren konventionellen Kraftwerken wie Gas- oder Kohlekraftwerken [7].

Die Merit Order ist kein von einzelnen Netzbetreibern festgelegtes Steuerungsinstrument, sondern ein grundlegendes Marktprinzip liberalisierter Strommärkte. Sie ergibt sich aus dem Marktdesign, bei dem Stromerzeuger ihre Angebote kostenbasiert in den Markt einbringen. Übertragungsnetzbetreiber wie Swissgrid sind dabei nicht für die Auswahl der Kraftwerke verantwortlich, sondern gewährleisten den sicheren und stabilen Netzbetrieb.

Ziel dieses Marktmechanismus ist eine möglichst kosteneffiziente Deckung der Stromnachfrage. Durch die kostenbasierte Einsatzreihenfolge können Lastschwankungen flexibel ausgeglichen werden, indem zusätzliche, teurere Erzeugungseinheiten nur bei steigender Nachfrage oder fehlender günstiger Erzeugung zugeschaltet werden. Dies trägt zur wirtschaftlichen Optimierung des Gesamtsystems bei [8].

Im Kontext von Energiemanagement- und Simulationssystemen kann die Merit-Order-Logik auf eine prioritätsbasierte Steuerung von Erzeugern und in erweiterten Modellen auch von flexiblen Verbrauchern übertragen werden. Im entwickelten Prototypen wird dieses Prinzip genutzt, um Abweichungen zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Energieverbrauch automatisch auszugleichen: Einheiten mit geringeren Kosten oder niedriger Priorität werden zuerst angepasst, während kritische Verbraucher oder kostenintensive Erzeugungseinheiten möglichst stabil bleiben [7][8].

Die Merit Order bildet somit die Grundlage für die Entscheidungslogik im Prototypen und ermöglicht eine transparente Simulation der Systemreaktionen auf Verbrauchsschwankungen und variierende Einspeisung aus erneuerbaren Quellen [7][8].

2.3 Simulationen und Visualisierung von Energieflüssen

Die Simulation und Visualisierung von Energieflüssen ist sowohl ein eigenständiges, gut erforschtes Anwendungsfeld innerhalb der Energieforschung als auch eng mit allgemeinen Prinzipien der Informationsvisualisierung und Visual Analytics verknüpft. Viele der eingesetzten Methoden basieren auf etablierten Visualisierungsgrundlagen, werden jedoch gezielt an die spezifischen Anforderungen des Energiesektors wie zeitliche Dynamik, Netzabhängigkeiten und kostenbasierte Einsatzlogiken angepasst und weiterentwickelt [9][10].

Auf dieser Grundlage stellen Simulation und Visualisierung von Energieflüssen zentrale Bestandteile moderner Energiemanagementsysteme dar. Sie erlauben es, Messdaten von Erzeugung und Verbrauch sowie Prognosewerte in verständliche Darstellungen zu überführen, wodurch komplexe Zusammenhänge im Stromnetz transparent werden [9][10]. Dabei kommen sowohl grafische Netzmodelle als auch interaktive Dashboards zum Einsatz, die zeitliche und räumliche Energieflüsse sichtbar machen.

Für das hier entwickelte Projekt wurden die Visualisierungen gezielt ausgewählt, um Prognoseabweichungen, Merit-Order-Logik und Geräteeinsätze anschaulich darzustellen:

1. **3D-Merit-Order-Diagramme:** Zwei 3D-Diagramme zeigen die Merit-Order der verfügbaren Energiequellen (Achsen: X = Kosten, Y = Leistung, Z = Reaktionszeit). Ein Diagramm für positive Anpassungen (Last erhöhen / Erzeugung reduzieren) und eines für negative Anpassungen (Last reduzieren / Erzeugung erhöhen). Die Wahl von 3D-Visualisierung orientiert sich an Empfehlungen aus der Forschung; Übersichtsarbeiten diskutieren Einsatzszenarien für 3D/hochdimensionale Darstellungen, weisen jedoch zugleich auf Wahrnehmungs- und Occlusion-Probleme hin, sodass Interaktion und ergänzende Low-Dimensional-Views empfohlen werden [10][12][11].

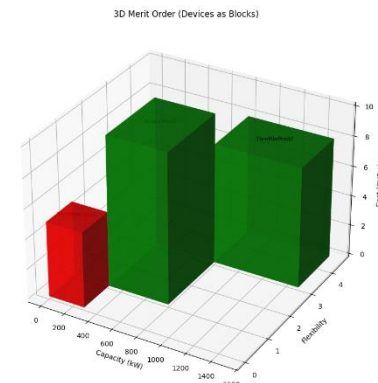


Abbildung 2 3D-Merit-Order Diagramm Beispiel

2. **2D-Merit-Order-Diagramm:** Aus den 3D-Daten wird eine 2D-Ansicht erstellt, die Kosten und Leistung auf einer Ebene zeigt. Diese Darstellung vereinfacht die Analyse der Prioritäten der einzelnen Erzeuger und flexiblen Lasten. Sánchez-Hidalgo & Cano (2018) betonen die Relevanz von Low-Dimensional-Visualisierungen für den Überblick in komplexen Netzdaten [9].
3. **Gerätespezifische Detailansicht (Device Layer):** Auf Basis der Balken der 2D-Merit-Order-Diagramme können detaillierte Informationen zu jedem Gerät angezeigt werden (aktuelle Leistung, maximale Kapazität, Reaktionszeit). Dies entspricht modernen Visual-Analytics-Plattformen wie VADER, die Geräte- und DER (Distributed Energy Resources) -Daten integrieren und für situational awareness sowie Szenarioanalyse genutzt werden können [14].
4. **Kreisdiagramme (Pie-Charts):** Verbrauch: Anteil jedes Verbrauchers am Gesamtverbrauch; Produktion: Anteil jeder Erzeugungsquelle an der Gesamtproduktion. Solche Pie-Charts unterstützen eine schnelle Einschätzung relativer Anteile, sind aber für feine Vergleiche weniger geeignet [12][9].
Durch diese Kombination aus 3D-, 2D- und Kreisdiagrammen entsteht ein interaktives, mehrstufiges Dashboard, das Transparenz über Energieflüsse, Prognoseabweichungen und Flexibilitätsoptionen bietet. Übersichtsarbeiten und Surveys zeigen die Effektivität interaktiver Visualisierungen für Monitoring und Netzstrukturanalysen und stützen damit die Gestaltung des Prototypen-Dashboards [12][9].

2.4 Abgrenzung zu bestehenden Simulations- und Flexibilitätsplattformen

In diesem Abschnitt werden bestehende Simulations- und Flexibilitätsplattformen analysiert und die Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu diesen Lösungen aufgezeigt.

2.4.1 Bestehende und ähnliche Simulations- und Flexibilitätsplattformen

Im Bereich der Simulation und Analyse energiebezogener Systeme existieren zahlreiche Plattformen und Frameworks, die darauf abzielen, Energieflüsse, Flexibilitätsmechanismen oder Steuerungsstrategien modellhaft abzubilden. Diese Systeme werden überwiegend in der

akademischen Forschung, in Pilotprojekten oder als Demonstratoren für Energieplattformen und energiewirtschaftliche Anwendungsfälle eingesetzt, um neue Konzepte zur Integration erneuerbarer Energien und flexibler Verbraucher zu untersuchen.

Ein prominentes Beispiel aus der Forschung ist die Plattform ReSIM, ein modulares Simulations- und Kollaborationsframework für multi-energetische Systeme auf Quartier- und Distriktebene. ReSIM ermöglicht die Integration verschiedener Komponentenmodelle (z. B. Gebäude, Speicher, Erzeuger) sowie unterschiedlicher Steuerungsalgorithmen und wird zur Analyse von Last- und Erzeugungsdynamiken sowie zur Bewertung von Regel- und Flexibilitätsstrategien eingesetzt [15]. Aufbauend auf dem ReMaP-Projekt bietet ReSIM insbesondere eine offene Forschungsumgebung zur Untersuchung von Prognoseabweichungen und Steuerungskonzepten in komplexen Energiesystemen [16].

Weitere Forschungswerkzeuge sind Plattformen wie GridSpice, ein cloud-basiertes Open-Source-Simulationspaket zur Modellierung von Smart-Grid-Infrastrukturen einschliesslich Erzeugung, Lasten, Speichern und Netzelementen. GridSpice wird primär für Forschungs- und Entwicklungszwecke genutzt und erlaubt Simulationen komplexer Smart-Grid-Szenarien einschliesslich verschiedenen Komponenten, deren Zusammenspiel analysiert werden kann [17]. Ergänzend existieren Werkzeuge wie der GridSim-Simulator, ein flexibles Python-basiertes Toolkit zur Abbildung komplexer Energiesysteme mit mehreren Energieträgern, das insbesondere für akademische Analysen und methodische Untersuchungen verwendet wird [18].

Neben klassischen Simulationsframeworks entwickeln sich zunehmend Plattformen mit Fokus auf Flexibilitätsmanagement und Aggregation. Ein Beispiel hierfür ist FlexMeasures, eine offene Energie-Management- und Flexibilitätsplattform, die Planung, Prognose und Steuerung flexibler Assets unterstützt. Solche Systeme richten sich sowohl an Forschungseinrichtungen als auch an Anwender im Bereich des Energiemanagements und verfolgen bereits teilweise operative Zielsetzungen, etwa durch die Optimierung von Einsatzplänen für flexible Verbraucher [19].

Diese bestehenden Plattformen zeigen, dass Simulation und Flexibilitätsbewertung zentrale Bestandteile moderner Systeme sind. Gleichzeitig weisen sie eine hohe methodische Komplexität auf wie etwa durch die Notwendigkeit der Co-Simulation verschiedener Sektoren [15] oder die detaillierte physikalische Modellierung von Netzkomponenten [17]. Sie sind häufig für spezifische Forschungsfragen optimiert, was eine hohe Einarbeitungszeit und IT-Infrastruktur erfordert.

2.4.2 Abgrenzung zu unserem Projekt

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prototyp grenzt sich in mehreren wesentlichen Punkten von den beschriebenen bestehenden Simulations- und Flexibilitätsplattformen ab.

Erstens unterscheidet sich die Zielsetzung deutlich: Während Plattformen wie ReSIM, GridSpice oder FlexMeasures auf detaillierte physikalische Modellierung, Optimierung oder sogar operative Nutzung abzielen [15][17][19], ist der hier vorgestellte Prototyp bewusst als didaktisch orientierte Simulations- und Visualisierungsumgebung konzipiert. Ziel ist nicht die exakte Abbildung realer Netzzustände oder die Optimierung eines Energiesystems, sondern die nachvollziehbare Darstellung von Entscheidungsprozessen bei Abweichungen zwischen Prognose und Ist-Werten.

Zweitens liegt eine klare Abgrenzung in der Steuerungslogik. Bestehende Plattformen setzen häufig auf Optimierungsverfahren, agentenbasierte Modelle oder regelbasierte Steuerungen. Der entwickelte Prototyp verwendet hingegen eine vereinfachte Merit-Order-basierte

Entscheidungslogik, um flexibel steuerbare Verbraucher und Erzeuger prioritätsbasiert anzupassen. Dadurch wird transparent aufgezeigt, wie unterschiedliche Flexibilitäten zur Stabilisierung des Energiesystems beitragen können, ohne komplexe Optimierungsmodelle vorauszusetzen.

Drittens unterscheidet sich der Prototyp hinsichtlich der Visualisierung und Transparenz. Während viele Forschungsplattformen primär numerische Ergebnisse oder technische Dashboards liefern, steht hier die interaktive Visualisierung von Energieflüssen, Prognoseabweichungen und Flexibilitätsreaktionen im Vordergrund. Die Kombination aus 3D-Merit-Order-Darstellungen, 2D-Diagrammen und gerätespezifischen Detailansichten zielt darauf ab, komplexe Zusammenhänge auch für nicht-technische Stakeholder verständlich zu machen [9][10][12].

Schliesslich ist der Prototyp bewusst nicht als operatives Energiemanagementsystem ausgelegt. Es erfolgt keine Anbindung an reale Steuerungsschnittstellen, Märkte oder Echtzeitsysteme. Stattdessen dient die Anwendung als Demonstrations- und Analysewerkzeug, das unterschiedliche Szenarien simuliert und deren Auswirkungen auf die Energiebilanz sichtbar macht. Damit ergänzt der Prototyp bestehende Plattformen, indem er eine niedrighschwellige, transparente und übertragbare Perspektive auf Flexibilitätsmechanismen im Energiesystem bietet.

3 Methoden und Prozesse

Dieses Kapitel beschreibt die methodische Vorgehensweise im Projekt, die Organisation der Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber CEEX, auftretende Herausforderungen sowie den aktuellen Stand der Validierung. Der Fokus liegt auf iterativer Entwicklung, kontinuierlichem Stakeholder-Feedback und technischer Validierung innerhalb der Simulationsumgebung.

3.1 Projektmanagement und Vorgehensmodell

Zu Projektbeginn wurde ein iteratives Vorgehensmodell gewählt, das sich an agilen Prinzipien orientierte. Ziel war es, frühzeitig funktionierende Teilergebnisse zu liefern und diese regelmässig mit dem Kunden zu besprechen.

Aufgrund der Komplexität des Projekts und zahlreicher offener fachlicher Fragen konnte intensive Arbeit am Code erst relativ spät erfolgen, etwa eine Woche vor den Winterferien. Zuvor lag der Fokus auf Abstimmungen, der Konzeption der Architektur, der Klärung der Merit-Order-Logik sowie der Datenbasis, da viele Themen „eine Wissenschaft für sich“ darstellten und für die spätere Simulation relevant, aber nicht direkt vom Kunden gefordert waren. Hier musste eine Balance gefunden werden zwischen notwendigem Fachwissen für die Simulation und den Anforderungen des Auftraggebers.

Die Kommunikation mit CEEX erfolgte überwiegend über regelmässige Online-Meetings, in denen der aktuelle Entwicklungsstand präsentiert, offene Fragen geklärt und Feedback zu fachlicher Ausrichtung, Visualisierung und Weiterentwicklung der Simulation eingeholt wurde. Asynchrone Kommunikation per E-Mail und Chat wurde hauptsächlich zur Terminvereinbarung genutzt; fachliche Diskussionen liefen fast ausschliesslich über die Calls.

Die Aufgabenplanung und der Entwicklungsfortschritt wurden intern fortlaufend dokumentiert. Mit zunehmendem Projektfortschritt und nachdem die grundlegende Architektur, Prognoselogik und Merit-Order-Entscheidungslogik definiert waren, verlagerte sich der Fokus auf die eigenständige Umsetzung und Integration der einzelnen Module.

3.2 Risiken

Im Rahmen der Projektplanung wurden potenzielle Risiken identifiziert und bewertet. Die folgende Übersicht beschreibt die Auswirkungen dieser Risiken sowie die entsprechenden Strategien zur Risikominimierung (Mitigation), um den Projekterfolg sicherzustellen.

Risiko	Beschreibung & Auswirkungen	Vermeidungsstrategie
Team-Verfügbarkeit	Ausfälle durch Krankheit oder Überlastung können zu Zeitverzug führen.	Gemeinsame Dokumentation & Repositories; Cross-Training für Wissensredundanz; flexible Zeitplanung.
Mangelndes User-Feedback	Ohne Validierung durch Nutzer entsprechen Design und Usability eventuell nicht den Anforderungen.	Frühzeitige Einbindung einer Testgruppe (Peers/Dozenten); strukturiertes Feedback nach Prototyp-Phasen.
Technische Hürden / Bugs	Unvorhergesehene Softwarefehler oder Umgebungs-Probleme verzögern die Entwicklung.	Modulare Programmierung; konsequente Nutzung von Git; Einplanung von Pufferzeiten für Integrationstests.
Skalierbarkeit	Performance-Einbussen bei grossen Datensätzen oder langen Simulationszeiträumen.	Einsatz effizienter Datenstrukturen; Abfrage-Optimierung; Durchführung von Lasttests.
Fehler in der Merit-Order-Logik	Falsche Priorisierungen führen zu unrealistischen Simulationsergebnissen.	Intensive Unit- und Integrationstests; Simulation von Grenzfällen; Abgleich mit theoretischen Erwartungswerten.
Mangelhafte Visualisierung	Komplexe oder unklare Darstellung führt zu Fehlinterpretationen durch den Anwender.	User-Centered Design; iterative Prototypenerstellung; Fokus auf Konsistenz und Einfachheit der Diagramme.
Nicht-repräsentative Modelldaten	Synthetische Daten bilden reale Energiemuster nicht präzise genug ab (Validitätsverlust).	Modellierung auf Basis realer Konsumtrends; Abgleich der synthetischen Daten mit öffentlichen Referenzdatensätzen.
Abweichende Erwartungshaltung	Ergebnisse entsprechen nicht vollumfänglich den Anforderungen des Auftraggebers (CEEX).	Regelmässige Status-Meetings; Präsentation von Zwischenergebnissen; frühzeitige Scope-Anpassung bei Abweichungen.

3.3 Aufbau der Validierung / Nutzertests

Die Validierung des Prototyps wurde in zwei aufeinander aufbauende Stufen gegliedert, um sowohl die Benutzerfreundlichkeit als auch die fachliche Plausibilität der Simulation systematisch zu prüfen. Ziel war es, Schwachstellen in der Benutzerführung, mögliche Verständnisprobleme sowie technische Limitationen frühzeitig zu identifizieren und dokumentieren zu können.

3.3.1 Explorative Nutzerbeobachtung

In der ersten Stufe soll der Prototyp explorativ getestet werden, um ein grundlegendes Verständnis der Benutzeroberfläche, der Eingabemasken und der Simulationsergebnisse zu gewinnen. Hierzu sollen ausgewählte Fachanwender eingeladen werden, die Applikation ohne konkrete Vorgaben zu erkunden. Die Auswahl soll gezielt nach Fachkompetenz erfolgen: Alle Teilnehmenden verfügten über Expertise im Bereich des Verteilnetzbetriebs, da das Produkt insbesondere für diese Zielgruppe demonstriert werden soll.

Die explorative Vorgehensweise ermöglichte es, natürliche Interaktionen sowie Nutzungsmuster zu beobachten und typische Verständnisprobleme frühzeitig zu erkennen. Die Beobachtung konzentrierte sich auf drei Konstrukte:

1. **Verständnis der Simulationsergebnisse:** Prüfung, ob die Nutzer die dargestellten Werte korrekt interpretieren.
2. **Technische Limitationen:** Aspekte wie Stabilität oder Fehler bei der Verarbeitung von Eingaben.
3. **Verständnis der Eingabemasken:** Bedienlogik und Klarheit der Parameterdefinitionen.

Zur Datenerhebung sollen Screen Recordings, detaillierte Beobachtungsnotizen sowie ein Validierungsfragebogen eingesetzt. Diese Kombination erlaubt sowohl qualitative Einblicke in das Nutzerverhalten als auch erste quantitative Rückmeldungen zur Bedienbarkeit und fachlichen Plausibilität der Simulation. Dadurch können typische Problemstellen und Verbesserungspotenziale systematisch identifiziert werden und es wird die Basis für die nachfolgende strukturierte Validierung geschaffen.

3.3.2 Strukturierte Validierung

Auf Basis der explorativen Ergebnisse wurde eine zweite, strukturierte Validierungsstufe aufgebaut, in der gezielt einzelne Aspekte der Simulation systematisch geprüft wurden:

- **Methode:** Standardisierter Fragebogen zur Bewertung von Benutzerfreundlichkeit, fachlicher Plausibilität, Flexibilitätsabbildung und wissenschaftlicher Aussagekraft.
- **Zielsetzung:** Vergleichbarkeit der Rückmeldungen, systematische Identifikation von Stärken und Schwächen sowie Priorisierung von Verbesserungsmaßnahmen.

Die Kombination aus explorativer Beobachtung und strukturierter Befragung ermöglicht eine umfassende Einschätzung der Simulation sowohl aus Sicht der Usability als auch der fachlichen Relevanz. Diese mehrstufige Vorgehensweise gewährleistet, dass die Validierung allgemeine Verständlichkeit ebenso abdeckt wie spezifische fachliche Anforderungen, und liefert belastbare Ergebnisse für künftige Anpassungen und Verbesserungen.

4 Planung und Design

Dieses Kapitel beschreibt die Konzeption, die gestalterische Ausarbeitung sowie die grundlegenden Strukturierungsentscheidungen des entwickelten Prototyps. Der Fokus liegt dabei auf dem gewählten Vorgehen, der Auswahl geeigneter Visualisierungen sowie der gemeinsamen Festlegung des Designs in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber CEEX.

4.1 Vorgehen & Iteratives Design

Die Entwicklung des Prototyps folgte einem iterativen Vorgehen, das sich an agilen Prinzipien orientierte. Anstatt zu Beginn ein vollständig spezifiziertes Zielsystem zu definieren, wurden zentrale Funktionalitäten schrittweise erarbeitet, implementiert und in regelmässigen Abständen mit dem Auftraggeber CEEX abgestimmt. Dieses Vorgehen ermöglichte es, fachliche Unklarheiten frühzeitig zu identifizieren und Designentscheidungen kontinuierlich zu überprüfen.

In einer frühen Projektphase wurden konzeptionelle Skizzen erstellt, die mögliche Darstellungen von Prognoseabweichungen, der Merit-Order-Logik und von Energieflüssen visualisierten. Diese Skizzen dienten primär als Diskussions- und Kommunikationsgrundlage und halfen dabei, fachliche Anforderungen sowie Erwartungen des Kunden zu konkretisieren. Insbesondere bei der Frage, wie komplexe energiewirtschaftliche Zusammenhänge verständlich visualisiert werden können, erwiesen sich diese frühen Entwürfe als wertvolles Hilfsmittel.

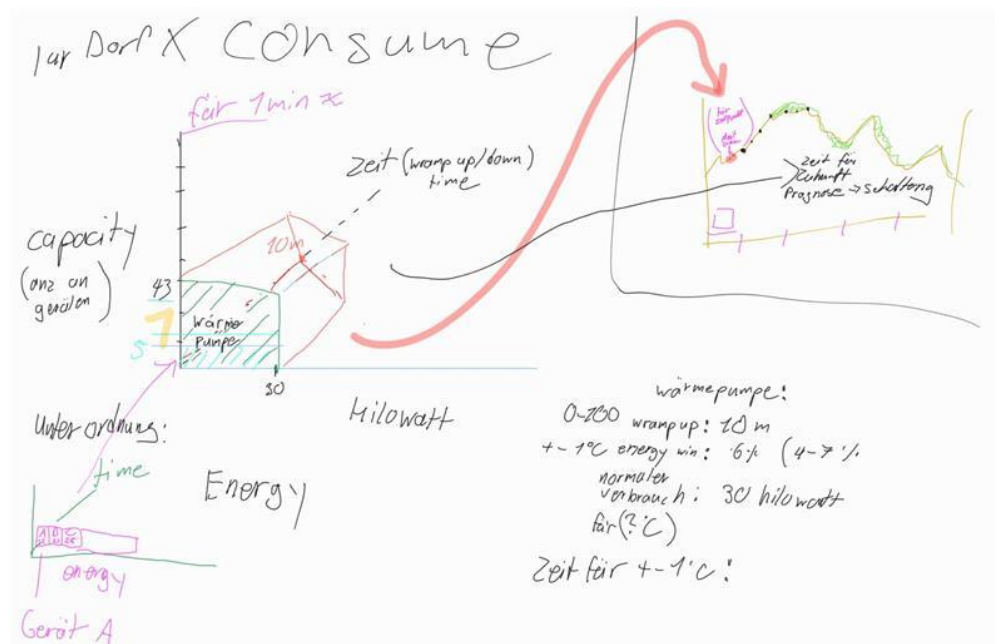


Abbildung 3 Erste konzeptionelle Skizze zur Visualisierung von Merit-Order und Prognoseabweichungen. Diente als Diskussionsgrundlage in frühen Projektphasen.

[illegible]

4.2 Auswahl des Designs

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Beispielvisualisierungen und Diagrammtypen entworfen, um dem Kunden eine Übersicht über mögliche Darstellungsformen zu geben. Diese Visualisierungen sollten verdeutlichen, welche Arten von Grafiken grundsätzlich denkbar sind und welche Informationen damit transportiert werden können. Insgesamt wurden dem Auftraggeber 14 unterschiedliche Diagrammtypen vorgestellt, die aus Sicht des Projektteams potenziell relevant und nützlich für die Simulation sein könnten (siehe Abbildungen 5 und 6).

Auf dieser Grundlage konnte der Kunde beurteilen, welche Visualisierungen er als besonders hilfreich, verständlich und relevant für den geplanten Einsatz der Simulation einschätzt.

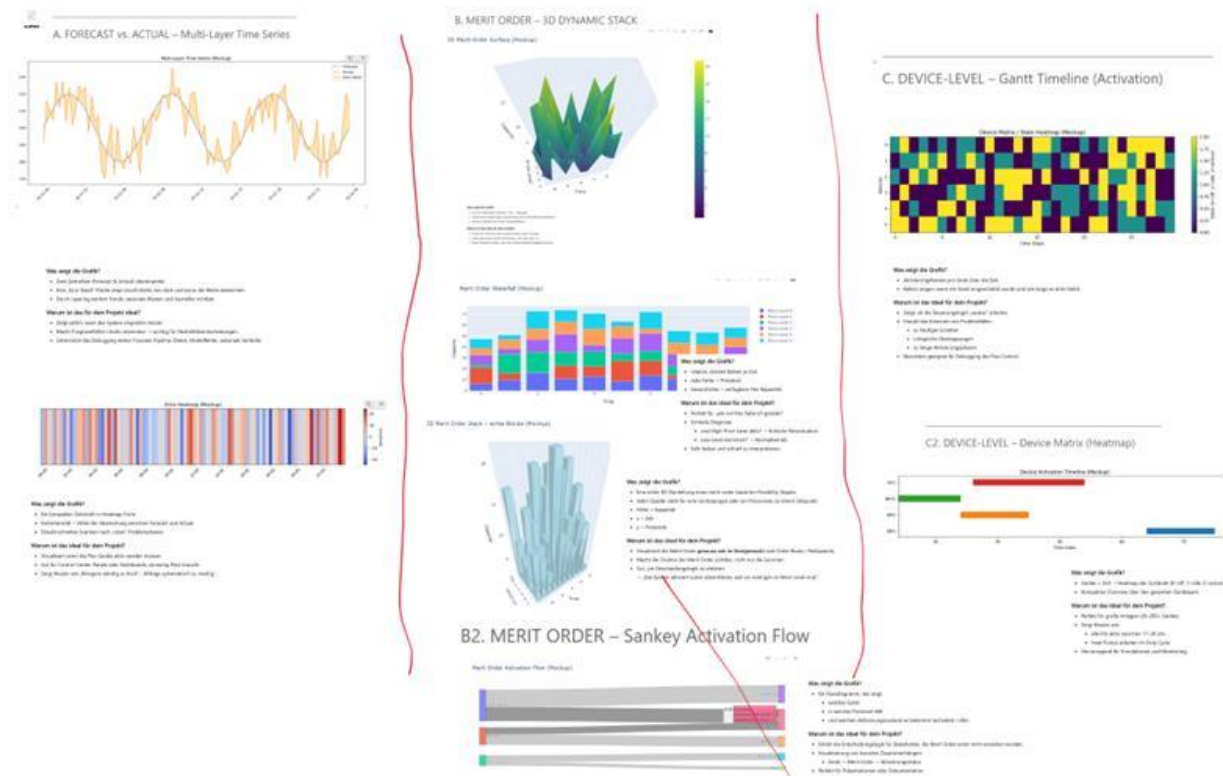


Abbildung 5 Erste Auswahl an Visualisierungsvorschlägen für den Auftraggeber.

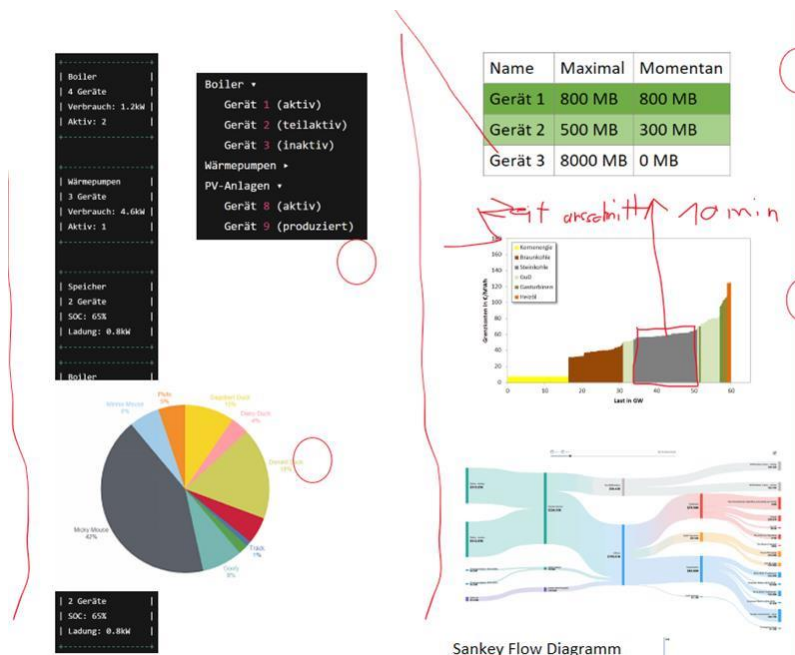


Abbildung 6 Weitere Visualisierungsvorschläge zur Diskussion möglicher Darstellungsformen.

4.3 Festlegung Design

Die endgültige Auswahl der im Prototypen enthaltenen Visualisierungen erfolgte gemeinsam mit dem Auftraggeber. In Abbildung 6 sind die vom Kunden ausgewählten Diagramme durch rote Markierungen hervorgehoben. Diese Markierungen kennzeichnen jene Visualisierungen, die im finalen Prototyp umgesetzt werden sollten.

Auf Basis dieser Auswahl wurde intern eine konsolidierte Designskizze erstellt (Abbildung 7). Diese diente dem Projektteam als Referenz für den weiteren Entwicklungsprozess und unterstützte dabei, den vorgesehenen User Flow, die Abfolge der Interaktionen sowie die Platzierung der einzelnen Visualisierungskomponenten besser zu strukturieren. Gleichzeitig fungierte diese Skizze als visuelle Anforderungserinnerung („Requirements-Reminder“), um die mit dem Kunden vereinbarten Designentscheidungen konsequent in der Umsetzung zu berücksichtigen.



Abbildung 7 Vereinbarte Designskizze mit dem Auftraggeber zur internen Orientierung und Umsetzung.

5 Technische Umsetzung

Dieses Kapitel beschreibt die technische Architektur, sowie konkrete Implementierungen. Die Beschreibungen reichen von der Modellierung der Geräte über die Merit-Order-Logik bis hin zur API-Schicht und der Frontend-Anbindung. Abbildungen veranschaulichen Architekturübersichten und die wichtigsten Komponenten.

5.1 Architekturüberblick

Die Simulation folgt klarer Trennung von Verantwortlichkeiten:

Business-/Simulations-Layer (Python Backend): Kernkomponenten sind Device-Modelle, DeviceManager, EnergyService (synthetischer Forecast-Generator) und eine Simulation Engine, die den diskreten Simulationsschritt ausführt.

API-Layer (FastAPI): Exponiert Endpunkte für Simulation, Konfiguration, Visualisierungsdaten und projektionale Ansichten. Pydantic-Modelle gewährleisten Eingabevalidierung und automatisch generierte OpenAPI-Dokumentation.

Frontend: Interaktives Dashboard und Standartansicht (React/TypeScript) zur Visualisierung (Line Charts, Pie Charts, 2D/3D Merit Order, Device-Detailansichten) und zur Konfiguration von Szenarien.

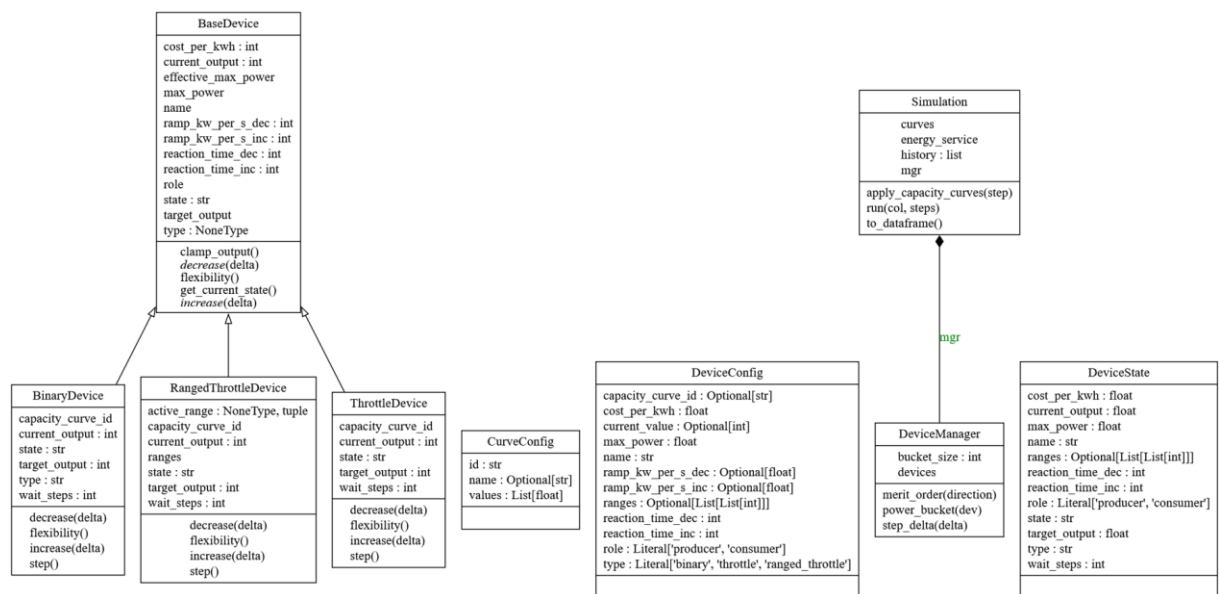


Abbildung 8 Python Backend UML-Diagramm erste Hälfte.

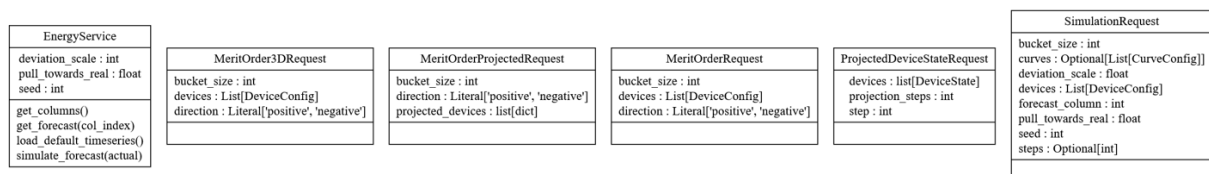


Abbildung 9 Python Backend UML-Diagramm zweite Hälfte.

5.2 Gerätedefinitionen und Abstraktion

Zentrales Entwurfsprinzip ist eine saubere Abstraktion von Energieassets. Alle Geräte erben von einer Basisklasse `BaseDevice`, die ein einheitliches Interface und gemeinsame Metadaten bereitstellt:

- `role` (Producer / Consumer)
- `max_power` und `effective_max_power(t)` (Kapazitätskurve)
- `cost_per_kwh`
- `reaction_time_inc`, `reaction_time_dec`
- `ramp_rate` (kW pro Zeitschritt)
- Laufende Zustandsfelder: `current_power`, `target_power`, `state`, `wait_steps`

Die einheitliche API (`increase`, `decrease`, `step`) trennt die Planungsphase (Entscheidung, welches Gerät wie stark geändert werden soll) von der Ausführungsphase (zeitdiskrete Umsetzung der Zielwerte unter Berücksichtigung von Reaktionszeiten und Rampen). Diese Trennung erhöht Transparenz und Testbarkeit.

Implementierte Device-Klassen

`BinaryDevice`; diskrete Ein/Aus-Anlagen (z. B. einfache Wärmepumpen). Modelliert Wartephasen und diskrete Übergänge mit limitierter Rampenrate.

`ThrottleDevice`; kontinuierlich regelbare Anlagen (z. B. Batteriesysteme). Arbeiten mit `target_output` und nähern sich diesem Wert über mehrere `step`-Aufrufe.

`RangedThrottleDevice`; gestufte Leistungsbereiche (Sicherheits- oder Betriebsstufen), nur diskrete Werte innerhalb definierter Bereiche möglich.

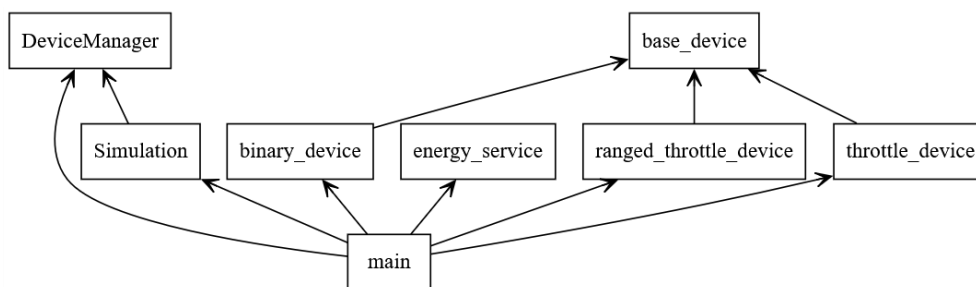


Abbildung 10 Python Backend UML Klassen Nutzungsansicht.

5.3 Merit-Order-Logik

Der `DeviceManager` übernimmt die zentrale Koordination:

Bucketierung: Geräte werden in Buckets nach `max_power` gruppiert (konfigurierbarer `bucket_size`). Das ermöglicht Skalierbarkeit und eine übersichtliche Visualisierung (kleine vs. grosse Assets).

Sortierung innerhalb der Buckets: Reihenfolge wird anhand einer Flexibilitätsmetrik gebildet, z. B. $\text{flex_score} = (\text{reaction_time_inc} + \text{reaction_time_dec})/2$ kombiniert mit Gerätetyp und cost_per_kwh als Tiebreaker.

Richtungsabhängige Merit-Orders: Für Unterdeckung (Load muss geliefert werden) und Überschuss (Load muss absorbiert werden) existieren getrennte Ordnungen. Bei Unterdeckung werden schnell reagierende Erzeuger aktiviert; bei Überschuss zuerst abschaltbare Erzeuger oder Verbraucher reduziert.

Planungsalgorithmus: Auf Basis der aktiven ΔP (Prognose-Ist-Abweichung) iteriert der DeviceManager über die Merit-Order, ruft increase/decrease auf und akkumuliert geplante Kompensationen bis ΔP erfüllt oder keine weitere Flexibilität verfügbar ist. Die Planung ist nicht-optimierend (keine globale Optimierung), sondern heuristisch und deterministisch, um Nachvollziehbarkeit zu sichern.

Konfigurierbare Parameter

Bucket_size

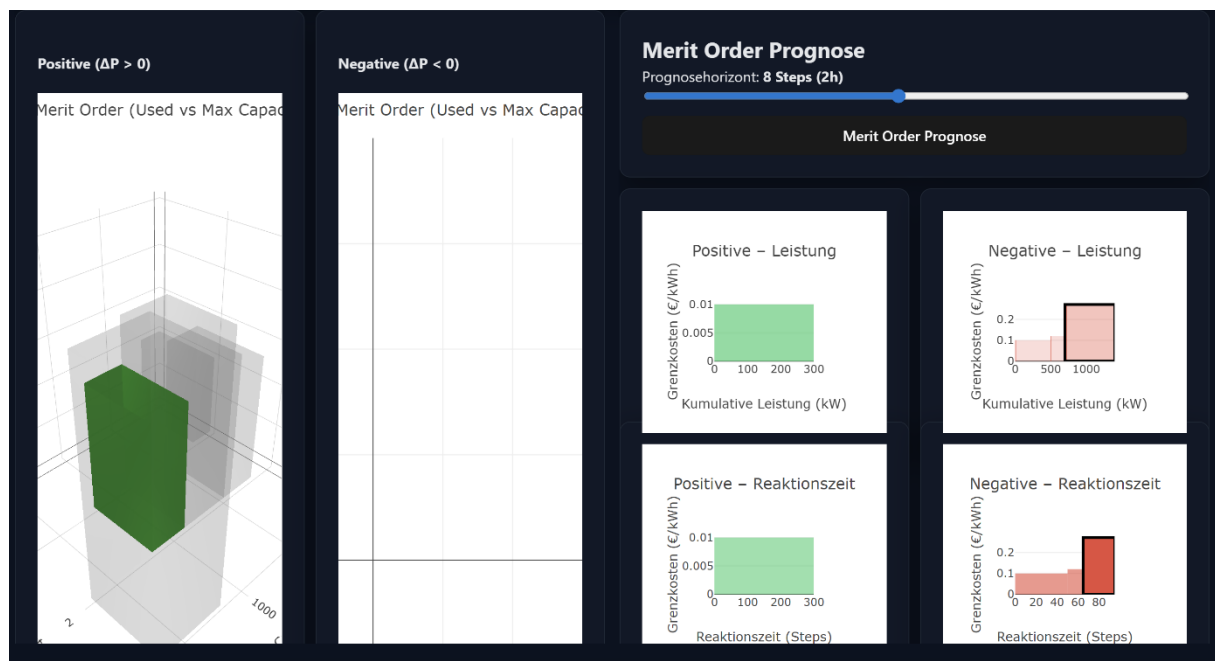


Abbildung 11 Frontend Visualisierung von 3D Merit Order und 2D Merit Order.

Gruppen-Details					
Rolle: consumer					
Power-Bucket: 1					
Anzahl Geräte: 2					
Name	Max. Leistung (kW)	Aktuell (kW)	Kosten (€/kWh)	Reaktion !	Reaktion ! Status
Wärmepumpe	400.0	8.0	0.10	30	30 Aktiv
Batteriespeicher	300.0	8.0	0.50	10	10 Aktiv

Abbildung 12 Frontend Visualisierung von Devices Informationen, erscheint bei draufklicken auf Balken von 2D Merit Order.

5.4 Zeitdiskrete Simulation und Ablauf pro Schritt

Die Simulation arbeitet mit einem diskreten Zeitschritt (15 Minuten, da die Datenquelle nur in bestimmten Zeitabständen Werte liefert). Jeder Simulationsschritt folgt diesem Ablauf:

1. step aller Geräte -> Aktualisierung laufender Rampen, Wartezeiten und current_power.
2. Berechnung der aktuellen Prognose-Ist-Abweichung ΔP (unter Verwendung des Forecasts des EnergyService).
3. Anwendung der Merit-Order-Planung: DeviceManager plant increase/decrease für Geräte.
4. Persistenz des Ergebnisses in der History (ΔP , device_targets, device_states, Outputs).

Die Kapazitätskurven (capacity_curve_id) modifizieren effective_max_power(t) und erlauben z.B. wetterbedingte Einschränkungen (PV-Produktion) oder geplante Wartungen.

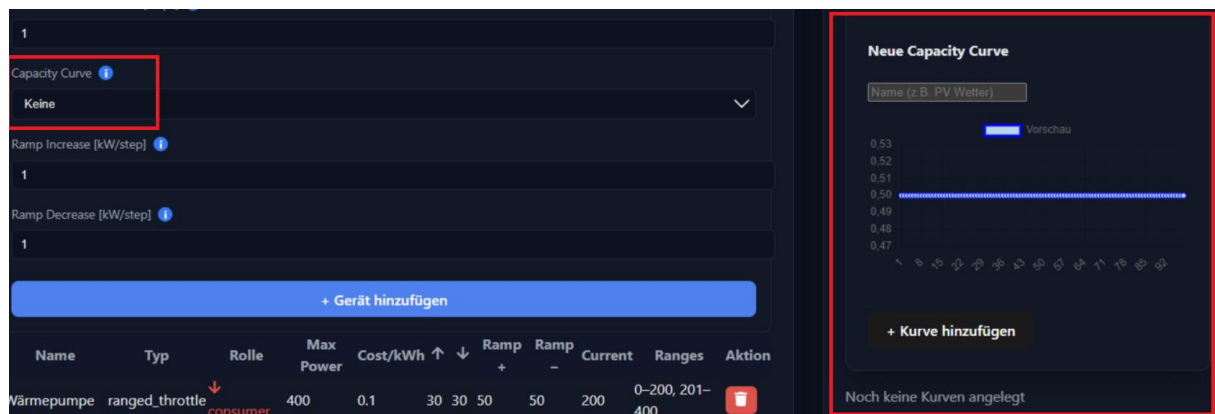


Abbildung 13 Frontend Kapazitätskurve.

5.5 Forecast-Generierung und Simulation von Abweichungen

Der EnergyService stellt synthetische Forecasts bereit, welche sich aus historischen Ist-Daten und parametrisierbaren Abweichungsmustern zusammensetzen. Dies erfolgt, da der Kunde bereits über einen eigenen Forecasting-Mechanismus verfügt.

Wichtige Mechanismen:

Deviation scale: skaliert die Standardabweichung der Zufallskomponente.

Pull-towards-real: sanfte Rückführung des Forecasts zum realen Ist-Wert über mehrere Schritte, um abrupte, unrealistische Forecastsprünge zu vermeiden.

Reproduzierbarkeit: Seed-gesteuerte Zufallszahlen erlauben deterministische Testszenarien.

Diese synthetischen Forecasts sind bewusst einfach gehalten, sie dienen der Robustheitstests der Merit-Order-Logik und der Demonstration von Systemverhalten bei Prognosefehlern.

5.6 API-Schicht und Frontend-Anbindung

Das Backend stellt eine REST-basierte Schnittstelle auf Basis von FastAPI bereit, welche die vollständige Steuerung und Auswertung der Simulation ermöglicht. Die API dient als klar definierte Kommunikationsschicht zwischen Simulationskern und Frontend und stellt sowohl ausführende als auch rein projektive Endpunkte zur Verfügung.

Zentrale Funktionalitäten der API umfassen die Konfiguration von Geräten, die Durchführung vollständiger Simulationsläufe sowie die Bereitstellung aggregierter Zeitreihen- und Visualisierungsdaten für das Frontend. Die Eingabe- und Ausgabedaten sind strikt typisiert und werden über Pydantic-Modelle validiert, wodurch eine robuste Schnittstelle sowie automatisch generierte OpenAPI-Dokumentation gewährleistet sind.

Zentrale API-Endpunkte

- **POST /simulate**
Führt einen vollständigen Simulationslauf über eine definierte Anzahl diskreter Zeitschritte aus. Der Endpunkt liefert eine strukturierte Zeitreihe, die unter anderem folgende Informationen enthält:
 - Ist- und Prognosewerte sowie deren Abweichung (ΔP),
 - verbleibende Abweichung nach Regelung,
 - aggregierte Geräteleistungen,
 - Gerätezielwerte, Zustände und Wartezeiten,
 - Systemkennzahlen wie physikalische Gesamtleistung.
Diese Daten bilden die Grundlage für sämtliche zeitbasierten Visualisierungen im Frontend (z. B. Line- und Pie-Charts).
- **POST /merit-order-3d**
Erzeugt eine dreidimensionale Darstellung der Merit-Order auf Basis der aktuell konfigurierten Geräte. Die Geräte werden nach Leistungs-Buckets gruppiert und entlang der Dimensionen Leistung, Kosten und Flexibilität angeordnet. Dieser Endpunkt dient ausschliesslich der Visualisierung und löst keine Regelentscheidungen aus.
- **POST /projected-device-state**
Berechnet projektionale Gerätezustände über mehrere zukünftige Zeitschritte. Dabei werden ausschliesslich bestehende Rampen, Wartezeiten und Zielwerte fortgeschrieben, neue Regelentscheidungen werden bewusst nicht getroffen. Der Endpunkt ermöglicht dem Frontend eine Vorschau auf das zukünftige Systemverhalten.
- **POST /merit-order-projected**
Erzeugt eine projektionale Merit-Order basierend auf zuvor berechneten Gerätezuständen. Diese Darstellung erlaubt es, die zukünftige Reihenfolge und Aktivität von Geräten zu analysieren, ohne den Simulationszustand zu verändern.
- **POST /devices / GET /devices**
Dienen der Verwaltung und Übergabe von Gerätedefinitionen an das Backend und werden primär zur Szenarienkonfiguration genutzt.



Die Qualität und Verlässlichkeit des Backends wird durch eine umfassende, automatisierte Teststrategie sichergestellt. Alle zentralen Klassen des Simulationskerns (Devices, DeviceManager, Forecast-/EnergyService, Simulation Engine) sind durch Unit- und Integrationstests abgedeckt.

Die Testsuite ist mit *pytest* umgesetzt und folgt dem Prinzip kleiner, deterministischer Tests mit klaren Arrange-Act-Assert-Phasen. Ein besonderer Fokus liegt auf den Device-Klassen, da diese die Grundlage der Merit-Order-Logik bilden und komplexe Zustandsübergänge besitzen.

Integrationstests

Neben den Unit-Tests existieren Integrationstests, welche komplette Simulationsläufe über mehrere Zeitschritte ausführen. Diese Tests kombinieren Forecast-Generierung, Merit-Order-Planung und Geräte-Rampenverhalten und prüfen globale Invarianten.

```
===== tests coverage =====
coverage: platform win32, python 3.13.0-final-0
Name                               Stmts  Miss  Cover   Missing
-----
DeviceManager.py                   69      9   87%   127-133, 142, 164
Simulation.py                      40     40    0%   1-105
base_device.py                     28      2   93%   47, 57
binary_device.py                   75      8   89%   45-48, 78-81
energy_service.py                  35      0  100%
main.py                            217    217    0%   1-528
ranged_throttle_device.py          60      2   97%   101, 130
test\test_base_device.py           52      2   96%    7, 10
test\test_binary_device.py         178      0  100%
test\test_device_manager.py         38      1   97%    64
test\test_energy_service.py         56      0  100%
test\test_integration_simple.py     35      0  100%
test\test_ranged_throttle_device.py 114      2   98%    6-7
test\test_throttle_device.py        114      0  100%
test\test_throttle_device_debug.py  24      0  100%
throttle_device.py                  51      1   98%    89
-----
TOTAL                             1186    284   76%
===== 65 passed, 3 warnings in 0.81s =====
```

Abbildung 16 Backend Auszug von Testsuite.

5.8 Frontend

Das Frontend dient der interaktiven Konfiguration, Steuerung und Visualisierung der Simulation. Es ist als Single-Page-Anwendung mit React und TypeScript umgesetzt und kommuniziert über eine REST-Schnittstelle mit dem Backend. Ziel ist eine übersichtliche und nachvollziehbare Darstellung des aktuellen Simulationszustands sowie eine einfache Bedienbarkeit für die Nutzerinnen und Nutzer.

Die Benutzeroberfläche ist modular aufgebaut und gliedert sich in klar abgegrenzte Funktionsbereiche. Dazu zählen unter anderem die Verwaltung von Geräten, die Konfiguration von Simulationseinstellungen sowie die Visualisierung der Merit-Order und zeitlicher Verläufe in Diagrammform. Änderungen an Geräten oder Parametern werden unmittelbar im UI reflektiert und können direkt an das Backend übermittelt werden.

Für die Visualisierung komplexer Zusammenhänge werden interaktive Diagramme eingesetzt, welche die aktuelle Lastverteilung und den Beitrag einzelner Geräte veranschaulichen. Insbesondere die 2D-Merit-Order-Darstellung ermöglicht eine intuitive Analyse der Reihenfolge und Leistung der beteiligten Geräte. Durch Interaktion mit den grafischen Elementen können zusätzliche Detailinformationen abgerufen werden.

Die Zustandsverwaltung erfolgt komponentenbasiert und reaktiv, sodass Änderungen konsistent und performant im gesamten Frontend propagiert werden. Durch die klare Trennung von Präsentationslogik und fachlicher Logik bleibt das Frontend übersichtlich, erweiterbar und gut wartbar.

5.9 Frontend Testbarkeit, Performance und Qualitätssicherung

Das Frontend ist komponentenbasiert mit React und TypeScript umgesetzt. Jede zentrale UI-Funktionalität ist als eigenständige Komponente realisiert (z. B. Geräteverwaltung, Merit-Order-Visualisierung, Simulationseinstellungen, Diagramme). Diese Struktur fördert Wiederverwendbarkeit, Wartbarkeit und gezielte Testbarkeit. Die Qualitätssicherung erfolgt primär über automatisierte Komponententests mit Vitest und @testing-library/react. Für nahezu alle interaktiven Komponenten existieren dedizierte Tests, welche Rendering, Benutzerinteraktionen und Validierungslogik abdecken.

Getestet werden unter anderem:

- korrektes Rendern von Formularfeldern und Visualisierungskomponenten
- Benutzerinteraktionen (z. B. Klicks, Eingaben, Slider-Änderungen)
- Validierung von Benutzereingaben (z. B. Pflichtfelder, Wertebereiche)
- korrektes Auslösen von Callback-Funktionen und State-Updates

Durch die komponentenweise Testabdeckung kann das Frontend unabhängig vom Backend weitgehend weiterentwickelt werden. Änderungen an der Visualisierung oder an Formularlogik lassen sich frühzeitig validieren, wodurch Regressionen vermieden werden. Die Tests fungieren damit sowohl als Qualitätssicherungsinstrument als auch als dokumentierte Spezifikation des erwarteten UI-Verhaltens.

% Coverage report from v8					
File	% Stmts	% Branch	% Funcs	% Lines	Uncovered Line #s
All files	77.03	58.44	72.04	81.41	
components	76.61	58.26	71.73	81.09	
Card.tsx	100	100	100	100	
ChartInfo.tsx	60	50	33.33	60	27-28
DeviceForm.tsx	74.35	74.35	66.66	76	..., 73-74, 78-79, 83-84, 88-89, 116-117, 199, 238-262, 283-291
DeviceList.tsx	100	62.5	100	100	73-84
DevicePieChart.tsx	100	100	100	100	
MeritOrder2D.tsx	96	44.44	88.88	96	47
MiniGraphWithSlider.tsx	100	100	100	100	
Section.tsx	100	100	100	100	
SimulationDashboard.tsx	59.52	36.73	50	66.66	68-79
SimulationGraphZoom.tsx	100	50	100	100	64-73
SimulationViewer.tsx	71.2	64.55	60.6	78.09	166-191, 247, 253, 268-273, 318-325, 542
theme	100	100	100	100	
theme.ts	100	100	100	100	

Abbildung 17 Frontend Testsuite ausschnitt.

5.10 Offene Punkte

Da die finale Validierungsphase mit dem Kunden nicht wie geplant stattfinden konnte, blieben die nachfolgend aufgeführten Punkte offen.

Ausstehende fachliche Klärung: Bestimmte Logiken wurden vorerst zurückgestellt, da hierfür ein direktes Feedback bzw. eine Bestätigung des Auftraggebers erforderlich gewesen wäre, um Fehlinterpretationen der Anforderungen zu vermeiden.

- **3D-Visualisierung („Berg-Ansicht“):** Die Umsetzung einer speziellen Berg-Ansicht innerhalb der 3D-Merit-Order wurde pausiert. Da der konkrete funktionale Mehrwert und

der Anwendungskontext dieser Darstellungsform ohne direktes Kundenfeedback nicht eindeutig verifiziert werden konnten, wurde zugunsten intuitiverer Visualisierungen auf eine Implementierung verzichtet.

- **Auflistung der Geräte:** Eine separate Liste der Geräte mit zusätzlichen Detailinformationen wurde zwar in Betracht gezogen, jedoch nicht implementiert. Die relevanten Informationen zu den Geräten sind bereits in den Simulationseinstellungen sowie in den bestehenden Visualisierungen (Merit Orders und Kuchendiagramme) enthalten. Eine weitere Darstellung hätte daher keinen klaren Mehrwert geboten und wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verworfen.
- **Neuer Gerätetyp:** Im Rahmen der Validierung mit weiteren Fachexperten entstand die Idee, einen zusätzlichen Gerätetyp für Batteriespeicher zu integrieren, die sowohl als Verbraucher als auch als Erzeuger fungieren können. Aufgrund der erhöhten fachlichen und technischen Komplexität wurde auf eine Umsetzung verzichtet, da zunächst sichergestellt werden sollte, dass diese Erweiterung dem konkreten Bedarf und den Erwartungen des Auftraggebers entspricht.

6 Validierung / Nutzertests

Die Validierung des Prototyps erfolgte in mehreren Schritten und mit unterschiedlichen Tiefenstufen. Da klassische Nutzertests mit einer grösseren Anzahl externer Testpersonen nicht durchgeführt werden konnten, wurde ein qualitativ-orientierter Ansatz gewählt. Dieser umfasste einerseits explorative Beobachtungen der Nutzerinteraktion und andererseits eine strukturierte Validierung mittels Fragebogen mit ausgewählten Fachexperten.

Explorative Nutzerbeobachtung (Swissgrid & Primeo Energie)

In einem ersten Schritt wurden Vertreter von Swissgrid sowie Primeo Energie gebeten, die Applikation frei zu erkunden und „mit der Simulation zu spielen“. Ziel dieser Phase war es nicht, konkrete Funktionen zu bewerten, sondern zu beobachten, ob die Benutzeroberfläche, Eingabemasken und Visualisierungen grundsätzlich verständlich sind und an welchen Stellen Unsicherheiten oder Rückfragen entstehen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden systematisch dokumentiert und bilden eine wichtige Grundlage für die weitere Interpretation der Validierungsergebnisse.

Bei den Swissgrid-Nutzern zeigte sich insbesondere, dass Eingabeformulare ohne explizite physikalische Einheiten (z. B. kW, MW, MWh) als unklar wahrgenommen wurden. Mehrfach wurde betont, dass für das Verständnis der Simulation die Lokation der flexiblen Ressourcen entscheidend sei, ebenso wie die Zuordnung, welcher Betreiber welche Flexibilität bereitstellt. Auch Preisangaben für Flexibilitäten wurden als zentraler Bestandteil der Marktmechanik hervorgehoben. Bemerkenswert war dabei, dass die Bedeutung der räumlichen Zuordnung als auch die Gewichtung der Kosten im Projektkontext ursprünglich nicht explizit berücksichtigt und vom Auftraggeber im Vorfeld ebenfalls nicht thematisiert worden war.

Die 3D-Darstellung der Merit-Order wurde von den Nutzern als ungewohnt empfunden, da sie in ihrer täglichen Arbeit primär ohne Grafiken und selten mit klassischen 2D-Darstellungen arbeiten. Für Batteriespeicher bestand der Wunsch nach detaillierteren Informationen im Formular, insbesondere bezüglich Rolle (Producer / Consumer), Typ und Kapazität. Weitere Rückmeldungen betrafen die Datenaufbereitung: Excel-Imports sollten möglichst vorgefiltert werden, um nur relevante Tabellen anzuzeigen. Funktionen wie „Pull Towards Real“ wurden als erklärungsbedürftig wahrgenommen, da ein klarer, fachlich etablierter Begriff fehlte. Zudem wurde angemerkt, dass die Simulation vor allem für kurzfristige Betrachtungen geeignet sei, während langfristige Effekte wie etwa die Bewertung von Wasserkraft, technisch nicht realistisch abgebildet werden können.

Bei Primeo Energie ergaben sich ähnliche Beobachtungen, obwohl sich der Fokus unterschied. Der Nutzer wünschte sich eine klarere Beschreibung der Rolle und Flexibilität einzelner Ressourcen sowie eine verständlichere Eingabe von Minimal- und Maximalleistungen, idealerweise unter Einbezug der aktuell anliegenden Leistung („Current Power“). Die Darstellung von Live-Power-Werten wurde als besonders nützlich eingeschätzt. Komplexe Grafiken spielten hingegen eine untergeordnete Rolle und wurden im Arbeitsalltag nur selten genutzt. Auch hier bestand ein Interesse an der Darstellung potenziell verfügbarer Energie, während langfristige Simulationen als wenig realistisch bewertet wurden.

Diese explorative Beobachtungsphase diente primär dazu, Usability-Probleme, Verständnishürden und Nutzererwartungen frühzeitig zu identifizieren, ohne diese bereits quantitativ zu bewerten.

Beobachtungsbereich	Zentrale Kenntnisse
Eingabeformulare	Fehlende physikalische Einheiten (z. B. kW, MW, MWh) wurden als unklar wahrgenommen.
Räumliche Zuordnung	Lokation flexibler Ressourcen und Betreiberzuordnung wurden als entscheidend für das Simulationsverständnis identifiziert.
Kosteninformation	Preisangaben für Flexibilitäten wurden als zentraler Bestandteil der Marktmechanik hervorgehoben.
Visualisierungen	3D-Darstellung der Merit-Order wurde als ungewohnt und erklärungsbedürftig wahrgenommen.
Batteriespeicher	Wunsch nach detaillierteren Angaben zu Rolle, Typ und Kapazität.
Datenaufbereitung	Excel-Imports sollten vorgefiltert werden, um nur relevante Tabellen anzuzeigen.
Fachbegriffe	Funktionen wie „Pull Towards Real“ wurden als nicht selbsterklärend bewertet.
Zeithorizont	Simulation wurde primär für kurzfristige Betrachtungen als geeignet eingeschätzt.

Strukturierte Validierung mittels Fragebogen (Swissgrid)

Aufbauend auf den Beobachtungen wurde mit zwei Swissgrid-Experten eine strukturierte Validierung anhand eines standardisierten Fragebogens durchgeführt. Diese Validierung zielte darauf ab, einzelne Aspekte der Simulation systematisch zu bewerten, darunter Benutzerfreundlichkeit, fachlicher Realismus, Flexibilitätsabbildung sowie wissenschaftliche Eignung.

Die Ergebnisse zeigen, dass Bedienung, Visualisierungen und grundlegende Steuerungsmöglichkeiten überwiegend positiv beurteilt wurden. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Simulation aktuell nur begrenzt zur Unterstützung konkreter Entscheidungsprozesse im operativen Swissgrid-Kontext geeignet ist. Mehrere technische Aspekte, wie die Realitätsnähe von Reaktionszeiten oder Ramp-up- und Ramp-down-Verhalten, konnten von den Experten nicht abschliessend beurteilt werden, was sehr interessant ist.

Positiv hervorgehoben wurden hingegen die Abdeckung relevanter Flexibilitätsklassen sowie die Gruppierung der Gerätetypen. Ergänzend wurde angeregt, künftig weitere Technologien wie Elektrolyseure zu berücksichtigen. Die zeitliche Auflösung der Simulation wurde als sinnvoller pragmatischer Einstieg bewertet, wobei feinere Zeitintervalle insbesondere für Photovoltaik-Anwendungen als potenziell interessant genannt wurden.

Bewertungsaspekt	Ergebnis
Benutzerfreundlichkeit	Überwiegend positiv
Verständlichkeit der Visualisierungen	Positiv
Steuerungsmöglichkeiten	Als ausreichend eingeschätzt
Operative Entscheidungsunterstützung	Nur eingeschränkt geeignet
Reaktionszeiten / Ramp-up / Ramp-down	Nicht abschliessend beurteilbar
Abdeckung relevanter Flexibilitätsklassen	Positiv hervorgehoben
Gruppierung der Gerätetypen	Als sinnvoll bewertet
Zeitliche Auflösung	Sinnvoller pragmatischer Einstieg
Erweiterungspotenzial	Weitere Technologien (z. B. Elektrolyseure) empfohlen

Einordnung der Primeo-Validierung

Ergänzend zur explorativen Beobachtungsphase liegt von Primeo Energie ein ausgefüllter Validierungsfragebogen eines Senior Flex Management Specialists vor. Dieser ermöglicht eine strukturierte Einschätzung der Simulation aus Sicht eines Verteilnetz- und Flexibilitätsbetreibers.

Die allgemeine Nutzbarkeit der Applikation wurde überwiegend positiv bewertet. Die Bedienung der Simulation wurde als intuitiv eingeschätzt (4/5), die dargestellten Visualisierungen als sehr verständlich (5/5) und die verfügbaren Steuerungsmöglichkeiten im Frontend als ausreichend (4/5). Auch die Unterstützung von Entscheidungsprozessen wurde eher positiv beurteilt (4/5), wobei implizit deutlich wurde, dass die Simulation primär als Analyse- und Demonstrationswerkzeug und weniger als operatives Leitsystem verstanden wird.

Im Bereich der technischen Validierung wurden insbesondere die Merit-Order-Darstellung sowie die Gruppierung der Device-Typen als praxisnah bewertet (jeweils 5/5). Reaktionszeiten sowie Ramp-up- und Ramp-down-Verhalten konnten vom Experten nicht abschliessend beurteilt werden. Es wurde jedoch angemerkt, dass bei Photovoltaik, Batteriespeichern und Elektrofahrzeugen sehr schnelle Reaktionszeiten üblich sind und diese meist durch Kommunikationslatenzen begrenzt werden. Für Wärmepumpen wurde eine fachliche Unsicherheit eingeräumt. Hinsichtlich der abgebildeten Gerätetypen wurde festgehalten, dass die Auswahl die wichtigsten aktuellen Flexibilitätsoptionen gut abdeckt und sich für die Modellierung der meisten Effekte eignet.

Die Abbildung von Flexibilitäten und Szenarien wurde sehr positiv bewertet. Sowohl die Abdeckung relevanter Flexibilitäten (5/5) als auch die Möglichkeit, dynamische Szenarien wie Wetteränderungen oder Lastschwankungen realistisch zu testen (5/5), wurden hervorgehoben. Die dynamischen Visualisierungen wurden als unterstützend für Analyse- und Entscheidungsprozesse wahrgenommen (5/5).

Auch die zeitliche Auflösung der Simulation (z. B. 15-Minuten-Intervalle) wurde als sinnvoll bewertet (5/5). Die Darstellung der Outputs zu Stromerzeugung, Stromverbrauch und Reaktionsverhalten wurde als verständlich eingeschätzt (5/5). Die Kennzahlen zur Merit-Order und Flexibilität wurden als weitgehend ausreichend beurteilt (4/5).

Die Interaktionsmöglichkeiten der Simulation, insbesondere über Slider und Kurven, wurden als sehr geeignet für Analysen bewertet (5/5). Zusätzliche Eingriffsmöglichkeiten in die Merit-Order wurden neutral beurteilt (3/5). Als mögliche Erweiterung wurden alternative Preismodelle wie Fixkostenansätze, Profit-Sharing oder Floor- und Cap-Pricing vorgeschlagen, sofern diese für den jeweiligen Anwendungsfall relevant sind.

Die wissenschaftliche Eignung der Simulation konnte vom Primeo-Experten nicht eindeutig bewertet werden. Gleichzeitig wurde angemerkt, dass die Arbeit potenziell innovative Ergebnisse liefern könnte und eine Prüfung hinsichtlich einer Einreichung bei Energiekonferenzen oder wissenschaftlichen Fachzeitschriften (z. B. UPEC, ISGT) lohnenswert sein könnte.

In den offenen Anmerkungen wurde zudem angeregt, die aggregierte Flexibilität stärker im Kontext von Regelenenergiemärkten zu betrachten. Neben einer rein netzdienlichen Perspektive sollte künftig auch eine systemdienliche Nutzung berücksichtigt werden, beispielsweise durch die Modellierung von Flexibilitätsprodukten, die sich an bestehenden Regelenenergieprodukten orientieren.

Kategorie	Bewertung
Intuitivität der Bedienung	4 / 5
Verständlichkeit der Visualisierungen	5 / 5
Steuerungsmöglichkeiten	4 / 5
Unterstützung von Entscheidungsprozessen	4 / 5
Merit-Order-Darstellung	5 / 5
Gruppierung der Device-Typen	5 / 5
Abdeckung relevanter Flexibilitäten	5 / 5
Dynamische Szenarien	5 / 5
Zeitliche Auflösung	5 / 5
Verständlichkeit der Outputs	5 / 5
Kennzahlen zur Flexibilität	4 / 5
Interaktionsmöglichkeiten	5 / 5
Zusätzliche Merit-Order-Eingriffe	3 / 5
Wissenschaftliche Eignung	Nicht eindeutig beurteilbar

Wichtige Erkenntnisse aus der Validierung

Festzuhalten ist, dass die Validierung des Prototyps auf zwei Ebenen erfolgte: einer explorativen Nutzerbeobachtung zur Überprüfung der grundsätzlichen Verständlichkeit sowie einer vertieften, strukturierten Bewertung durch Fachexperten von Swissgrid und Primeo Energie. Die Ergebnisse zeigen, dass der Prototyp als Demonstrator und Analysewerkzeug grundsätzlich gut geeignet ist, gleichzeitig jedoch Einschränkungen in Bezug auf Realismus, operative Entscheidungsunterstützung und die Abbildung langfristiger Szenarien bestehen. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern eine solide Grundlage für gezielte Weiterentwicklungen und ermöglichen eine zukünftige Validierung unter Einbezug realer Betriebsdaten.

7 Herausforderungen

Im Verlauf des Projekts traten Herausforderungen auf, die eine Anpassung der ursprünglichen Planung erforderten. Die folgende Übersicht stellt dar, wie sich die Realität von der Planungsphase unterschied und mit welchen Massnahmen das Projektteam auf diese Diskrepanzen reagierte.

Kategorie	Planung vs. Realität	Umgang mit der Situation (Mitigation)
1. Zeitplan der Implementierung	Geplant: Kontinuierlicher Start der Implementierung parallel zur Konzeptphase. Realität: Die intensive Arbeit am Code konnte erst eine Woche vor den Winterferien beginnen. Die Zeit davor musste vollständig investiert werden, um die komplexen Fachthemen auf ein für die Simulation verständliches Niveau zu reduzieren, ohne unnötige Tiefe, die vom Kunden nicht gefordert war.	Lösung: Durchführung intensiver Entwicklungs-Sprints nach Klärung der fachlichen Basis. Durch die vorherige Reduktion der Komplexität konnte die Kernfunktionalität anschliessend schneller und zielgerichteter umgesetzt werden.
2. Anforderungsanalyse	Geplant: Erhalt detaillierter Vorgaben zur Merit-Order-Logik und den Prognosemodellen durch den Auftraggeber. Realität: Aufgrund der teilweise groben Vorgaben entstand ein unerwartet hoher Abstimmungsbedarf. Es waren zahlreiche Iterationen und Diskussionen notwendig, um aus den komplexen Fachthemen herauszuarbeiten, welche Detailtiefe für die Simulation tatsächlich relevant ist und was weggelassen werden kann.	Lösung: Durchführung intensiver fachlicher Abstimmungsrunden zur Eingrenzung des Scopes. Definition und Dokumentation von Annahmen erfolgten nicht ad hoc, sondern als Resultat dieses klärenden Prozesses, um ein machbares Modell zu definieren.

3. Validierung & Testing	Geplant: Validierung des Prototyps durch Verteilnetz-Experten und iterative Tests mit dem Kunden (CEEX). Realität: Tests mit IBB entfielen wegen fehlender Kapazität. Kunden-Feedback blieb gegen Ende aus. Stattdessen wurden Tests mit Swissgrid und Primeo Energie durchgeführt.	Lösung: Flexibler Wechsel auf externe Experten (Swissgrid, Primeo). Diese explorativen Tests lieferten wertvolle Erkenntnisse zu Usability und Nutzererwartungen, die das fehlende Kundenfeedback teilweise kompensierten.
4. Kunden-kommunikation	Geplant: Regelmässige Abstimmungen (feste Tage) und iterative Abnahmen bis zum Projektende. Realität: Trotz bestätigter Einladungen wurden vereinbarte Termine seitens des Kunden teilweise ohne Absage nicht wahrgenommen. Während der Endphase brach der Kontakt zum Kunden (CEEX) ab. Auf mehrere Kontaktversuche und Terminvorschläge erfolgte keine Rückmeldung mehr, sodass eine finale fachliche Validierung des Projektstands mit dem Auftraggeber nicht mehr möglich war.	Lösung: Um kritische Informationslücken trotz ausbleibender Rückmeldungen zu schliessen, wurde proaktiv die telefonische Kontaktaufnahme gesucht Finalisierung des Projekts basierend auf dem letzten abgestimmten Stand. Proaktive Dokumentation der offenen Punkte und Nutzung der externen Validierung als Qualitätsnachweis.

Die Gegenüberstellung zeigt, dass insbesondere die Verfügbarkeit von Stakeholdern (Kunde, Testpartner) und die fachliche Komplexität die grössten Abweichungen vom Plan verursachten.

Durch eine agile Arbeitsweise und die Entscheidung, externe Fachexperten (Swissgrid, Primeo) als Ersatz für fehlende Partner einzubinden, konnte das Projektteam diese Risiken jedoch erfolgreich mitigieren. Die Verzögerung im Implementierungsstart erwies sich rückblickend als Vorteil, da sie eine stabilere fachliche Basis für den Code schuf.

8 Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Fragen aus der Vereinbarung genauer angeschaut und beantwortet.

8.1 A: Welche Visualisierungstechniken sind am besten geeignet, um Energieerzeugungs- und Verbrauchs Daten klar und verständlich für verschiedene Zielgruppen darzustellen?

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass keine einzelne Visualisierungstechnik für alle Zielgruppen gleichermassen geeignet ist. Stattdessen ist eine kombinierte, mehrstufige Visualisierungsstrategie erforderlich, die unterschiedliche Informationsbedürfnisse adressiert.

Für fachlich versierte Nutzer wie Swissgrid -und Primeo Energie -Experten ist insbesondere Realismus entscheidend. In den Validierungen wurde deutlich, dass Visualisierungen dann als sinnvoll wahrgenommen werden, wenn sie zentrale fachliche Konzepte wie Lokation, Zuordnung zu Betreibern, Einheiten (MW, MWh) und Kosten implizit oder explizit berücksichtigen. Rein abstrakte Darstellungen ohne räumlichen oder betrieblichen Kontext wurden als schwer einzuordnen empfunden. Die im Projekt eingesetzten 2D-Merit-Order-Diagramme sowie Kreisdiagramme ermöglichen einen schnellen Überblick über relative Anteile von Verbrauch und Produktion und unterstützen das Verständnis grundlegender Zusammenhänge.

Die 3D-Merit-Order-Visualisierung stellte sich als zweischneidig heraus: Sie erlaubt die gleichzeitige Darstellung mehrerer Dimensionen (Kosten, Leistung, Reaktionszeit), wurde jedoch von operativen Experten als ungewohnt und im Arbeitsalltag wenig relevant wahrgenommen. Ihr Mehrwert liegt daher vor allem in der didaktischen Vermittlung und Szenarioanalyse, weniger in der operativen Entscheidungsunterstützung.

Insgesamt bestätigt das Projekt, dass eine zielgruppenspezifische Kombination aus Low-Dimensional-Übersichten und optionalen Detailansichten die höchste Verständlichkeit und Akzeptanz bietet.

8.2 B: Wie sind reale merit orders im Energiemanagement strukturiert und wie können sie modelliert und an eine skalierbare Simulationsumgebung angepasst werden?

In realen Energiesystemen ist die Merit Order traditionell primär nach variablen Grenzkosten strukturiert und bestimmt die Einsatzreihenfolge von Erzeugungseinheiten. In der operativen Praxis spielen jedoch weitere Einflussfaktoren eine zentrale Rolle, darunter Reaktionszeiten, technische Restriktionen, Verfügbarkeiten, Netzrestriktionen sowie regulatorische Rahmenbedingungen. Insbesondere im Kontext von kurzfristigem Ausgleich und Regelenergie gewinnen Reaktionszeiten zunehmend an Bedeutung.

Im vorliegenden Projekt wurde diese komplexe Realität bewusst vereinfacht, um Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Auf ausdrückliche Vorgabe des Auftraggebers wurde die Reaktionszeit als primäres Priorisierungskriterium (Priorität 1) innerhalb der Merit-Order-Logik definiert. Kosten und verfügbare Leistung wurden nachgelagert berücksichtigt. Diese

Entscheidung reflektiert den projektbezogenen Fokus auf kurzfristige Ausgleichsmechanismen und die Demonstration, welche Flexibilitäten besonders schnell zur Stabilisierung des Systems beitragen können.

Die Merit Order wurde entsprechend als prioritätsbasierte Entscheidungslogik modelliert, bei der flexible Erzeuger und Verbraucher anhand weniger, klar definierter Attribute wie Reaktionszeit (Prio 1), Kosten und Leistung sortiert werden. Dadurch unterscheidet sich die im Projekt umgesetzte Merit Order bewusst von klassischen marktbasierten Ansätzen, bildet jedoch reale betriebliche Entscheidungslogiken in vereinfachter Form ab, wie sie insbesondere im Regel- und Engpassmanagement relevant sind.

Die Skalierbarkeit des Ansatzes ergibt sich daraus, dass neue Gerätetypen oder Flexibilitäten lediglich als zusätzliche Einträge mit denselben Attributen in die Merit-Order-Struktur integriert werden müssen. Die grundlegende Entscheidungslogik bleibt unabhängig von der Anzahl der Assets gleich und kann sowohl auf Gebäudeebene als auch auf grössere Netzabschnitte angewendet werden. Damit eignet sich das Modell insbesondere für simulationsbasierte Analysen, Szenarien vergleiche und Demonstrationszwecke, ohne den Anspruch einer vollständigen marktwirtschaftlichen oder operativen Abbildung zu erheben.

8.3 C: Welche Methoden können verwendet werden, um synthetische Verbrauchsdaten zu erzeugen, die reale Muster realistisch nachahmen und dennoch kontrollierte Abweichungen für Tests zulassen?

Zur Simulation von Prognoseabweichungen und Flexibilitätseffekten ist eine realitätsnahe, zugleich jedoch kontrollierbare Datenbasis erforderlich. Im Rahmen dieses Projekts wurde daher ein Ansatz gewählt, der sich an realen Zeitreihen orientiert, diese jedoch gezielt synthetisch erweitert.

Als Baseline dienen öffentlich verfügbare Last- und Erzeugungsdaten, unter anderem von Swissgrid. Diese Zeitreihen sind in 15-Minuten-Intervallen verfügbar und bieten damit einen sinnvollen Kompromiss zwischen zeitlicher Auflösung und Datenverfügbarkeit. Die Wahl dieses Intervalls ermöglicht es, typische Tagesverläufe sowie kurzfristige Schwankungen abzubilden, ohne die Simulation unnötig zu verkomplizieren.

Auf diese Baseline werden kontrollierte Abweichungen angewendet, um Prognosefehler realistisch zu simulieren. Hierzu werden parametrische Störgrößen eingesetzt, die es erlauben, sowohl die maximale Abweichung als auch die Dynamik der Rückführung des Forecasts an den Ist-Wert zu steuern. Dadurch können unterschiedliche Szenarien abgebildet werden, etwa stark schwankende Lasten auf Gemeindeebene oder vergleichsweise stabile Verläufe auf Gebäudeebene. Dabei wurde die methodische Entscheidung getroffen, die zugrundeliegende Prognoselogik bewusst einfach zu halten. Dies entspricht dem expliziten Wunsch des Kunden, da dieser bereits über einen eigenen Prognose-Algorithmus verfügt.

Dieser Ansatz stellt sicher, dass die generierten synthetischen Daten einerseits realistische Muster aufweisen, andererseits aber reproduzierbar und gezielt steuerbar bleiben. Damit eignen sie sich insbesondere zur Analyse der Reaktion der Merit-Order-Logik auf Prognosefehler und zur Untersuchung des Systemverhaltens unter variierenden Rahmenbedingungen.

8.4 D: Identifikation geeigneter Szenarien und Prototyping der Benutzeroberfläche: Welche Ansätze nutzen Sie, um die definierte Zielgruppe zu erreichen?

Die Identifikation geeigneter Nutzungsszenarien erfolgte nicht anhand abstrakter oder hypothetischer Use-Cases, sondern orientierte sich an typischen Fragestellungen aus dem Energiemanagement. Dazu zählen insbesondere Abweichungen zwischen Prognose- und Ist-Werten, der Einsatz flexibler Verbraucher zur Lastreduktion sowie der Vergleich unterschiedlicher Flexibilitätsklassen.

Ein zentrales Ziel bestand darin, diese Szenarien so aufzubereiten, dass sie für fachlich versierte Nutzer nachvollziehbar sind und Rückschlüsse auf reale Energiesysteme erlauben. Entsprechend wurde besonderer Wert auf die Lesbarkeit und Interpretierbarkeit der Visualisierungen gelegt.

Zur Ausarbeitung der Benutzeroberfläche wurden verschiedene Visualisierungsansätze zunächst konzeptionell erarbeitet und anschliessend gemeinsam mit dem Auftraggeber diskutiert. Hierzu kamen sowohl Skizzen als auch vereinfachte Prototypen zum Einsatz. Für einfache Darstellungen wie Kreisdiagramme oder tabellarische Übersichten wurden Beispiele aus etablierten Anwendungen herangezogen. Für komplexere Darstellungen, etwa 3D-Merit-Order-Visualisierungen oder Zeitreihenverläufe, wurden gezielt kleine Code-Prototypen erstellt, um sowohl die technische Machbarkeit als auch den Informationsgehalt zu evaluieren.

Die gewählten Visualisierungen wurden zudem im Rahmen von Demonstrationen mit Fachexperten von Swissgrid und Primeo Energie diskutiert. Diese Einbindung realer Nutzer ermöglichte es, Rückmeldungen zur Verständlichkeit, Relevanz und Aussagekraft der Szenarien zu erhalten und die Gestaltung entsprechend anzupassen.

8.5 E: Technisches Konzept: Mit welchem technischen Konzept erreichen Sie die gewünschte Lösung?

Das technische Konzept des Prototyps basiert auf einer klaren Trennung von Datenverarbeitung, Entscheidungslogik und Visualisierung. Prognose- und Ist-Daten werden zunächst vereinheitlicht verarbeitet und zur Ermittlung von Abweichungen herangezogen. Auf dieser Grundlage entscheidet eine zentrale Merit-Order-Komponente, welche Flexibilitäten aktiviert oder angepasst werden.

Die Entscheidungslogik ist vollständig vom Visualisierungs-Layer entkoppelt. Das Frontend greift ausschliesslich auf aggregierte und abstrahierte Simulationsergebnisse zu, ohne direkten Einfluss auf die Regelmechanismen zu nehmen. Dadurch bleibt das System modular aufgebaut und kann unabhängig weiterentwickelt oder erweitert werden.

Dieses Architekturprinzip unterstützt sowohl die Skalierbarkeit als auch die Übertragbarkeit des Ansatzes. Neue Gerätetypen, zusätzliche Flexibilitätsklassen oder alternative Prognosemechanismen können integriert werden, ohne die bestehende Struktur grundlegend zu verändern. Gleichzeitig wird die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsprozesse gewahrt, was insbesondere für Demonstrations- und Analysezwecke von zentraler Bedeutung ist.

8.6 F: User Interface Design: Welche Interaktionskonzepte, Interface-Designs und visuellen Sprachen eignen sich für Ihren Ansatz?

Für den Prototypen erwies sich ein dashboard-orientiertes User-Interface als besonders geeignet. Zentrale Kennzahlen und Übersichten werden prominent dargestellt, während Detailinformationen über gezielte Interaktionen, etwa durch Auswahl einzelner Geräte oder Diagramme, zugänglich sind.

Die Visualisierungen sind thematisch gruppiert, um einen klaren Lesefluss zu ermöglichen und die kognitive Belastung zu reduzieren. Farbgebung und Layout wurden bewusst zurückhaltend gestaltet, sodass die Aufmerksamkeit auf den wesentlichen Informationen liegt. In den Diagrammen selbst wurden kontrastreiche Farben eingesetzt, um unterschiedliche Datenreihen klar voneinander abzugrenzen.

Für die Merit-Order-Darstellungen wurden gezielt grüne und rote Farbtöne verwendet, um Produzenten und Konsumenten intuitiv unterscheidbar zu machen. Dadurch lassen sich zentrale Zusammenhänge auch ohne ausführliche Erklärung erfassen.

Textuelle Elemente wurden auf ein Minimum reduziert und beschränken sich im Wesentlichen auf Überschriften, Achsenbeschriftungen und Eingabefelder. Ergänzend wurden kontextabhängige Hilfetexte integriert, die bei Bedarf zusätzliche Informationen liefern. Dieses Design unterstützt den Einsatz des Prototyps als Präsentations- und Demonstrationswerkzeug, ohne die Nutzerführung zu verkomplizieren.

8.7 G: Implementierung: Mit welcher technischen Implementierung erfüllen Sie die Anforderungen an Funktionalität, Benutzerfreundlichkeit, Zuverlässigkeit, Effizienz und Wartungsfähigkeit?

Die Implementierung des Prototyps ist darauf ausgelegt, die Anforderungen an Funktionalität, Benutzbarkeit, Zuverlässigkeit, Effizienz und Wartbarkeit in ausgewogener Masse zu erfüllen.

Die Funktionalität wird durch eine klare Modellierung der Geräte, der Prognoselogik und der Merit-Order-Entscheidungen sichergestellt. Die Benutzbarkeit profitiert von der klaren Trennung zwischen Backend-Logik und Frontend-Darstellung, wodurch konsistente und nachvollziehbare Interaktionen ermöglicht werden.

Zuverlässigkeit wird durch deterministische Simulationsabläufe sowie durch die Berücksichtigung von Rand- und Sonderfällen in der Implementierung gewährleistet. Die Effizienz der Simulation ergibt sich aus der zeitdiskreten Ausführung und der bewussten Beschränkung auf die für die Analyse relevanten Parameter.

Die Wartbarkeit des Systems wird durch eine modulare Architektur, klar definierte Schnittstellen sowie eine strukturierte Codebasis unterstützt. Diese Eigenschaften erleichtern sowohl die Weiterentwicklung des Prototyps als auch dessen Anpassung an neue Anwendungsszenarien.

8.8 H: Test: Korrektheit, Benutzerfreundlichkeit und Zuverlässigkeit sind zentral für die erfolgreiche Einführung der Software. Wie können Sie sie sicherstellen und testen?

Korrektheit, Benutzbarkeit und Zuverlässigkeit wurden durch eine Kombination aus automatisierten Tests und qualitativer Validierung sichergestellt.

Im Backend kamen sowohl Unit-Tests als auch Integrationstests zum Einsatz, um einzelne Komponenten isoliert sowie deren Zusammenspiel innerhalb der Simulationslogik zu überprüfen. Dabei wurden gezielt Grenz- und Sonderfälle getestet, um fehlerhafte Zustandsübergänge oder inkonsistente Simulationsergebnisse frühzeitig zu erkennen.

Im Frontend lag der Fokus auf der Absicherung der Interaktion zwischen mehreren Komponenten und Zustandsübergängen der Benutzeroberfläche. Komponentenübergreifende Integrationstests stellten sicher, dass Benutzeraktionen zu den erwarteten Zustandsänderungen führen und die entsprechenden Visualisierungskomponenten in den korrekten Anwendungszuständen gerendert werden. Ergänzend wurden Unit-Tests für einzelne UI-Komponenten eingesetzt, um deren Verhalten isoliert zu überprüfen und die Wartbarkeit zu erhöhen.

Die Benutzbarkeit wurde ergänzend im Rahmen der in Kapitel 3 und 6 beschriebenen explorativen Nutzerbeobachtungen und strukturierten Validierungen untersucht. Die Kombination aus automatisierten Tests, deterministischen Testläufen und nutzerzentriertem Feedback stellt sicher, dass der Prototyp sowohl technisch korrekt als auch zuverlässig und verständlich für die Zielgruppe nutzbar ist.

9 Fazit

Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde ein einfacher Simulator zur Veranschaulichung des Einsatzes von Merit-Orders zur Optimierung des Stromkonsums entwickelt. Der Simulator richtet sich gezielt an Fachpersonen und dient primär Darstellungs- und Präsentationszwecken, nicht der eigenständigen Nutzung. Er kann je nach gewünschtem Simulationsbereich angepasst werden, beispielsweise auf ein einzelnes Haus oder auf verschiedene Gerätegruppen, und zeichnet sich durch eine einfache Bedienung sowie gute Modifizierbarkeit aus.

Zu Beginn des Projekts definierte die Projektgruppe gemeinsam mit dem Kunden CEEX den Umfang des Simulators und besprach grundlegende Prinzipien, insbesondere die Basis der Merit-Order-Logik. Anschliessend wurden Recherchen zu verschiedenen steuerbaren beziehungsweise modulierbaren Geräten durchgeführt, um deren Funktionsweisen, Parameter und relevante Eigenschaften kennenzulernen. Der Kunde legte anfangs grossen Wert auf diese Analyse. Rückblickend zeigte sich, dass dieser Fokus nicht in direktem Zusammenhang mit der späteren Simulationsrelevanz stand, dennoch half er, die Anforderungen und Bedürfnisse der Geräte besser zu verstehen. Parallel dazu erfolgten Recherchen zur Merit-Order-Thematik sowie die Erstellung erster Designentwürfe. Durch weitere Austausche mit CEEX konnten die Ziele sowie die notwendigen Funktionen des Simulators präzisiert und ein klareres Gesamtbild entwickelt werden. Insbesondere beim Verständnis der Merit Order traten anfangs Schwierigkeiten auf, die jedoch durch mehrere Besprechungen schrittweise geklärt werden konnten.

Nachdem ein ausreichendes fachliches Verständnis aufgebaut war, begann die Projektgruppe mit der Suche nach geeigneten Visualisierungsmöglichkeiten zur Darstellung der Simulationsdaten. Unterschiedliche Ansätze wurden für verschiedene Ebenen der Simulation recherchiert, die als besonders wichtig eingestuft wurden. Diese Ebenen umfassten die Visualisierung des Simulationsverlaufs mit der Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert, die Darstellung der Merit Order sowie von Gerätegruppen zur besseren Übersicht und zusätzlich eine detaillierte Auflistung einzelner Geräte zur Einsicht genauer Parameter. Die erarbeiteten Varianten wurden dem Kunden präsentiert und anschliessend gemeinsam bewertet und ausgewählt, um ein möglichst optimales Ergebnis zu erzielen.

Im Verlauf der Konzeptionsphase wurde seitens des Kunden angemerkt, dass zukünftig als Frontend-Technologie anstelle von React auch der Einsatz von Apache Superset wünschenswert sei, da dieses Tool im Unternehmen neu als interner Standard etabliert wird. Die Projektgruppe prüfte diese Möglichkeit oberflächlich und setzte sich kurz mit Apache Superset auseinander, entschied sich jedoch bewusst dagegen. Der Hauptgrund dafür war, dass der Fokus des Projekts auf der eigenständigen Implementierung und dem Programmieranteil lag. Die Nutzung von Superset hätte den Entwicklungsaufwand im Bereich Frontend stark reduziert und damit den Lern- und Coding-Anteil des Projekts deutlich verringert.

Nach der Festlegung der konkreten Ziele begann während der Winterferien die eigentliche Entwicklung des Produkts, da ein erheblicher Zeitaufwand notwendig war, um das erforderliche Verständnisniveau zu erreichen. Während der Entwicklungsphase wurden drei Unternehmen für eine externe Validierung kontaktiert. Eine Firma lehnte ab, mit den beiden übrigen konnte jedoch eine sinnvolle Validierung durchgeführt und darauf basierend Anpassungen vorgenommen werden. Gegen Ende des Projekts brach der Kontakt mit dem Kunden CEEX trotz mehrerer Versuche vollständig ab, wodurch es nicht mehr möglich war, weitere Verbesserungen gemäss Kundenwünschen umzusetzen oder den finalen Stand gemeinsam zu validieren.

10 Ausblick

Der entwickelte Simulator erfüllt die im Projekt definierten Ziele und eignet sich zur anschaulichen Darstellung der Merit-Order-Logik im Kontext des Stromkonsums. Gleichzeitig ergeben sich aus dem Projektverlauf mehrere Ansatzpunkte für zukünftige Weiterentwicklungen. Eine naheliegende Erweiterung betrifft die inhaltliche Tiefe der Simulation. So könnten zusätzliche Gerätekategorien, komplexere Abhängigkeiten zwischen Geräten oder dynamischere Lastprofile integriert werden, um realitätsnähere Szenarien abzubilden.

Im Rahmen der externen Validierung wurde zudem deutlich, dass insbesondere für Swissgrid-nahe Kunden eine räumliche Zuordnung von Geräten zu Standorten oder Netzebenen von hoher Relevanz ist. Die Ergänzung von Locations (z. B. Gebäude, Areale oder Netzsegmente) würde es ermöglichen, Lastverschiebungen nicht nur geräte-, sondern auch standortbezogen zu analysieren und damit die Aussagekraft der Simulation deutlich zu erhöhen, ergänzend dazu könnten Kostenaspekte stärker berücksichtigt werden, etwa durch eine detailliertere Abbildung von Strompreisen, Netzgebühren oder Anreizmechanismen, um wirtschaftliche Effekte von Merit-Order-Strategien transparenter darzustellen.

Ein weiterer möglicher Entwicklungsschritt betrifft die technische Architektur und die Visualisierung. Der vom Kunden angeregte Einsatz von Apache Superset könnte in einem Folgeprojekt erneut evaluiert werden, insbesondere wenn der Fokus stärker auf der unternehmensinternen Nutzung und weniger auf der Eigenimplementierung liegt.

Schliesslich wäre eine vertiefte Validierung mit Fachpersonen aus der Energiebranche wünschenswert. Durch kontinuierliches Feedback könnten sowohl die fachliche Korrektheit als auch die Benutzerfreundlichkeit weiter verbessert werden. Trotz des fehlenden finalen Austauschs mit dem Kunden bietet der Simulator eine solide Grundlage, auf der zukünftige Arbeiten aufbauen und weiterführende Optimierungen realisiert werden können.

A Fragenbogen

CEEX Simulation – Validierungsfragebogen

Projekt: Merit-Order & Flexibilitäts-Simulation

Datum: [Einfügen]

Teilnehmer: [Name / Rolle]

Anleitung

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen so ehrlich wie möglich. Nutzen Sie die Skala 1–5, wobei:

1 = stimme überhaupt nicht zu

2 = stimme eher nicht zu

3 = neutral

4 = stimme eher zu

5 = stimme voll zu

Offene Fragen sind für zusätzliche Kommentare gedacht.

1. Allgemeine Nutzbarkeit / User Experience

Die Bedienung der Simulation ist intuitiv. (1–5) ____

Die dargestellten Visualisierungen sind verständlich. (1–5) ____

Die verfügbaren Steuerungsmöglichkeiten im Frontend sind ausreichend. (1–5) ____

Die Simulation unterstützt meine Entscheidungsprozesse effektiv. (1–5) ____

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

2. Technische Validierung / Realismus

(weniger wichtig) Die Reaktionszeiten der simulierten Geräte entsprechen realen Werten. (1–5)

Ramp-up / Ramp-down Zeiten sind realistisch modelliert. (1–5) ____

Die Merit-Order (positiv/negativ, Preisachse, Z-Achse) entspricht der Praxis. (1–5) ____

Die Gruppierung der Device-Typen ist angemessen. (1–5) ____

Alle relevanten Gerätetypen und Flexibilitätsklassen sind abgebildet. (1–5) ____

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

3. Flexibilität & Szenarien

Die Simulation deckt die relevanten Flexibilitäten ab (z. B. Wärmepumpen, PV, Speicher). (1-5) ____

Dynamische Szenarien wie Wetteränderungen oder Stromschwankungen lassen sich realistisch testen. (1-5) ____

Die dynamischen Visualisierungen helfen bei der Entscheidungsfindung. (1-5) ____

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

4. Daten & Analyse

Die Zeitabschnitte der Simulation (z. B. 15-Minuten-Schnitte) sind sinnvoll. (1-5) ____

Die Outputs (Reaktionszeit, Stromverbrauch, Stromerzeugung) sind verständlich dargestellt. (1-5) ____

Die Kennzahlen zur Merit-Order und Flexibilität sind ausreichend. (1-5) ____

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

5. Simulation & Interaktion

Die Steuerungsmöglichkeiten (Slider, Kurven) sind sinnvoll für Ihre Analyse. (1-5) ____

Weitere Eingriffsmöglichkeiten in die Merit-Order wären hilfreich. (1-5) ____

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

6. Wissenschaftlicher

Die Simulation ist für wissenschaftliche Analysen oder Publikationen geeignet. (1-5) ____

Offene Frage:

7. Zusammenfassend / Offene Anmerkungen

- Welche Verbesserungen würden Sie sich insgesamt wünschen?

- Haben Sie weitere Hinweise zur Visualisierung, Bedienung oder Simulation?

B Ausgefüllte Fragebogen

Fragebogen Firma Swissgrid_1:

1. Allgemeine Nutzbarkeit / User Experience

- Die Bedienung der Simulation ist intuitiv. (1-5) 4
- Die dargestellten Visualisierungen sind verständlich. (1-5) 4
- Die verfügbaren Steuerungsmöglichkeiten im Frontend sind ausreichend. (1-5) 5
- Die Simulation unterstützt meine Entscheidungsprozesse effektiv. (1-5) 2

Offene Frage:

- Zu Bullet 4: Die Simulation ist zwar interessant, aber relativ weit weg von unserem Business. Interessant ist aber das Flexibilitätspotenzial und die Merit Order.

2. Technische Validierung / Realismus

- Die Reaktionszeiten der simulierten Geräte entsprechen realen Werten. (1-5)
- Ramp-up / Ramp-down Zeiten sind realistisch modelliert. (1-5)
- Die Merit-Order (positiv/negativ, Preisachse, Z-Achse) entspricht der Praxis. (1-5)
- Die Gruppierung der Device-Typen ist angemessen. (1-5) 5
- Alle relevanten Gerätetypen und Flexibilitätsklassen sind abgebildet. (1-5) 5

Offene Frage:

- Fragen 1-3 kann ich nicht beurteilen

3. Flexibilität & Szenarien

- Die Simulation deckt die relevanten Flexibilitäten ab (z. B. Wärmepumpen, PV, Speicher). (1-5) 5
- Dynamische Szenarien wie Wetteränderungen oder Stromschwankungen lassen sich realistisch testen. (1-5) 5
- Die dynamischen Visualisierungen helfen bei der Entscheidungsfindung. (1-5) 2

Offene Frage:

- Bezüglich Entscheidungsfindung: Gleiche Bewertung und Begründung wie bei Frage 1

4. Daten & Analyse

- Die Zeitabschnitte der Simulation (z. B. 15-Minuten-Schnitte) sind sinnvoll. (1-5) 4
- Die Outputs (Reaktionszeit, Stromverbrauch, Stromerzeugung) sind verständlich dargestellt. (1-5) 4
- Die Kennzahlen zur Merit-Order und Flexibilität sind ausreichend. (1-5) 4

Offene Frage:

- 15-Minuten-Schritte sind sicher ein pragmatischer Anfang aufgrund der Datenverfügbarkeit. Prinzipiell wären aber auch 5-Minuten-Schritte oder 1-Minuten-Schritte interessant, da vor

allein die Photovoltaik am Vor- und Nachmittag steile Rampen fährt, die durch Flexibilität ausgeglichen werden müssen.

- Bezüglich Kennzahlen und Darstellung: Gäbe es eine Möglichkeit, die verfügbare Flexibilität als Fläche ober- und unterhalb der realisierten Leistung darzustellen, um eine Übersicht zu haben zu welchen Zeitschritten noch viel Reserve übrig ist und wann nicht?

5. Simulation & Interaktion

- Die Steuerungsmöglichkeiten (Slider, Kurven) sind sinnvoll für Ihre Analyse. (1-5) __4__
- Weitere Eingriffsmöglichkeiten in die Merit-Order wären hilfreich. (1-5) __1__

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

6. Wissenschaftlicher

- Die Simulation ist für wissenschaftliche Analysen oder Publikationen geeignet. (1-5) __3__

Offene Frage:

Schwierig zu beurteilen; ich nehme an dass die Methodik nicht neuartig ist, deswegen müsste eine wissenschaftliche Publikation wohl auf realistischen Daten und interessanten Schlussfolgerungen basieren.

7. Zusammenfassend / Offene Anmerkungen

- Welche Verbesserungen würden Sie sich insgesamt wünschen?
- Haben Sie weitere Hinweise zur Visualisierung, Bedienung oder Simulation?

Fragenbogen Firma Swissgrid_2:

1. Allgemeine Nutzbarkeit / User Experience

- Die Bedienung der Simulation ist intuitiv. --> 4
- Die dargestellten Visualisierungen sind verständlich. --> 4
- Die verfügbaren Steuerungsmöglichkeiten im Frontend sind ausreichend. --> 4
- Die Simulation unterstützt meine Entscheidungsprozesse effektiv. --> 2

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

2. Technische Validierung / Realismus

- Die Reaktionszeiten der simulierten Geräte entsprechen realen Werten. --> nicht beurteilbar
- Ramp-up / Ramp-down Zeiten sind realistisch modelliert. --> nicht beurteilbar
- Die Merit-Order (positiv/negativ, Preisachse, Z-Achse) entspricht der Praxis. --> nicht Swissgrid-Praxis, sonst nicht beurteilbar
- Die Gruppierung der Device-Typen ist angemessen. --> 4
- Alle relevanten Gerätetypen und Flexibilitätsklassen sind abgebildet. --> 4

Offene Frage:

- weitere Gerätetypen evtl. Elektrolyseure?

3. Flexibilität & Szenarien

- Die Simulation deckt die relevanten Flexibilitäten ab (z. B. Wärmepumpen, PV, Speicher) --> 4 (Batterien nicht vergessen abzubilden)
- Dynamische Szenarien wie Wetteränderungen oder Stromschwankungen lassen sich realistisch testen. --> nicht beurteilbar
- Die dynamischen Visualisierungen helfen bei der Entscheidungsfindung. --> 4

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

4. Daten & Analyse

- Die Zeitabschnitte der Simulation (z. B. 15-Minuten-Schnitte) sind sinnvoll. --> 5
- Die Outputs (Reaktionszeit, Stromverbrauch, Stromerzeugung) sind verständlich dargestellt. --> 4
- Die Kennzahlen zur Merit-Order und Flexibilität sind ausreichend. --> nicht beurteilbar

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

5. Simulation & Interaktion

- Die Steuerungsmöglichkeiten (Slider, Kurven) sind sinnvoll für Ihre Analyse. --> 1, sicher von Mehrwert, jedoch nicht für unsere Anwendung
- Weitere Eingriffsmöglichkeiten in die Merit-Order wären hilfreich. --> nicht beurteilbar

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

6. Wissenschaftlicher

- Die Simulation ist für wissenschaftliche Analysen oder Publikationen geeignet.
--> 2, hier wären noch vertiefte Beschäftigung mit dem Thema nötig

Offene Frage:

7. Zusammenfassend / Offene Anmerkungen

- Welche Verbesserungen würden Sie sich insgesamt wünschen?
--> direkt im Gespräch angesprochen
- Haben Sie weitere Hinweise zur Visualisierung, Bedienung oder Simulation?

Fragenbogen Firma Primeo Energie:

1. Allgemeine Nutzbarkeit / User Experience

- Die Bedienung der Simulation ist intuitiv. (1-5) 4
- Die dargestellten Visualisierungen sind verständlich. (1-5) 5
- Die verfügbaren Steuerungsmöglichkeiten im Frontend sind ausreichend. (1-5) 4
- Die Simulation unterstützt meine Entscheidungsprozesse effektiv. (1-5) 4

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

2. Technische Validierung / Realismus

- Die Reaktionszeiten der simulierten Geräte entsprechen realen Werten. (1-5) ____
- Ramp-up / Ramp-down Zeiten sind realistisch modelliert. (1-5) ____
- Die Merit-Order (positiv/negativ, Preisachse, Z-Achse) entspricht der Praxis. (1-5) 5
- Die Gruppierung der Device-Typen ist angemessen. (1-5) 5
- Alle relevanten Gerätetypen und Flexibilitätsklassen sind abgebildet. (1-5) ____

Offene Frage:

- Zur Fragen bezüglich Reaktion- und Rampen-Zeiten denke ich, dass diese den tatsächlichen Werten entsprechen, aber ich bin kein Experte für Wärmepumpenanlagen. Bei PV, BESS und EVs ist die Reaktionszeit in der Regel sehr schnell und beschränkt sich meist auf den Kommunikationskanal.

- In Bezug auf die Frage zu den Gerätetypen würde ich sagen, dass die eingeschlossene Auswahl die wichtigsten aktuellen Opportunitäten abdeckt und sich gut dazu eignet, die meisten Auswirkungen zu modellieren und zu simulieren.

3. Flexibilität & Szenarien

- Die Simulation deckt die relevanten Flexibilitäten ab (z. B. Wärmepumpen, PV, Speicher). (1-5) 5
- Dynamische Szenarien wie Wetteränderungen oder Stromschwankungen lassen sich realistisch testen. (1-5) 5
- Die dynamischen Visualisierungen helfen bei der Entscheidungsfindung. (1-5) 5

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

4. Daten & Analyse

- Die Zeitabschnitte der Simulation (z. B. 15-Minuten-Schnitte) sind sinnvoll. (1-5) 5
- Die Outputs (Reaktionszeit, Stromverbrauch, Stromerzeugung) sind verständlich dargestellt. (1-5) 5
- Die Kennzahlen zur Merit-Order und Flexibilität sind ausreichend. (1-5) 4

Offene Frage:

- [Antwort hier eintragen]

5. Simulation & Interaktion

- Die Steuerungsmöglichkeiten (Slider, Kurven) sind sinnvoll für Ihre Analyse. (1–5) 5
- Weitere Eingriffsmöglichkeiten in die Merit-Order wären hilfreich. (1–5) 3

Offene Frage:

- Zum MOL-Eingriffsmöglichkeiten könnte ich weitere Preismodelle als Fixkosten (wie profit sharing, floor- or cap-pricing) vorschlagen, falls diese für Ihren Anwendungsfall relevant sein sollten.

6. Wissenschaftlicher

- Die Simulation ist für wissenschaftliche Analysen oder Publikationen geeignet. (1–5)

Offene Frage:

In den letzten Jahren bin ich etwas von der akademischen Welt entfernt. Daher habe ich mich nicht mit den relevanten Themen in wissenschaftlichen Zeitschriften und auf Konferenzen befasst. Es ist gut möglich, dass diese Arbeit zu innovativen Ergebnissen führt.

In diesem Fall könnte es sich lohnen, zu prüfen, ob sie für Energiekonferenzen oder wissenschaftliche Zeitschriften geeignet wäre. Sie könnten beispielsweise UPEC, ISGT oder andere relevante Veranstaltungen prüfen.

7. Zusammenfassend / Offene Anmerkungen

- Welche Verbesserungen würden Sie sich insgesamt wünschen?
- Haben Sie weitere Hinweise zur Visualisierung, Bedienung oder Simulation?

Falls noch nicht geschehen, würde ich vorschlagen, nach Möglichkeit zu untersuchen, wie die aggregierte Flexibilität rund um die Zeiträume und Termine der Regelenenergiemärkte gehandhabt werden kann. Also nicht nur Netzdienlich, sondern Systemdienlich auch. Daher könnte es hilfreich sein, die verfügbare Flexibilität in Form von Flex-Produkten zu formulieren, die wie die Regelenenergie-Produkte aussehen könnten.

C Quellcode und Repository

Der vollständige Quellcode des Projekts ist im Folgenden (private) Git-Repository verfügbar:

https://github.com/cleanenergyexchange/bachelorthesis_eric_bruckner_merlin_van_der_kolk.git

Meilensteine

Milestone	Description	Target Completion
M1	Project setup and initial research completed	KW 40
M2	Concept finalized; data generation and deviation functions specified	KW 42
M3	Functioning Merit Order	KW 48
M4	Functioning Simulation	KW 50
M5	Final validation and visual presentation completed	KW 01 (2026)
M6	IP5 Submission	KW 06 (2026)

Quellenverzeichnis

[1]	Swissgrid AG. (2025). <i>Stabiler Netzbetrieb mit hoher Photovoltaik-Produktion</i> . https://www.swissgrid.ch/de/home/newsroom/blog/2025/stabiler-netzbetrieb-mit-hoher-photovoltaik-produktion.html
[2]	Energie-Experten. (n.d.). <i>Wie Regelenergie das Stromnetz stabilisiert</i> . https://www.energie-experten.ch/de/wissen/detail/wie-regelenergie-das-netz-stabilisiert.html
[3]	Energie 360°. (n.d.). <i>Flexibilität in der Energieversorgung</i> . https://www.energie360.ch/de/magazin/energiemanagement-systeme/flexibilitaet-energieversorgung/
[4]	DNV. (o. J.). <i>Transforming grid operations with accurate short-term energy predictions</i> . https://www.dnv.com/article/transforming-grid-operations-with-accurate-short-term-energy-predictions/
[5]	IBM. (o. J.). <i>Load Forecasting and Energy Management</i> . https://www.ibm.com/think/topics/load-forecasting
[6]	Wikipedia. (o. J.). <i>Lastprognose</i> . Abgerufen am 5. Januar 2026, von https://de.wikipedia.org/wiki/Lastprognose
[7]	EnBW. <i>Merit Order: Prinzip und Bedeutung im Strommarkt</i> . https://www.enbw.com/unternehmen/themen/kohleausstieg/merit-order.html
[8]	UMFIS. (o. D.). <i>Merit-Order-Prinzip und Strompreisbildung</i> . Abgerufen am 22. Januar 2026 von https://www.umfis.de/merit-order-prinzip
[9]	Sánchez-Hidalgo, M. A., & Cano, M.-D. (2018). <i>A survey on visual data representation for smart grids control and monitoring</i> . Sustainable Energy, Grids and Networks, 16, 351–369. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467718301802
[10]	Chen, X., & Chen, X. (2021). <i>Data visualization in smart grid and low-carbon energy systems: A review</i> . Int. Trans. Electr. Energy Syst. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2050-7038.12889
[11]	Nga, D. V., See, O. H., Quang, D. N., Xuen, C. Y., & Lai, L. C. (2012). <i>Visualization techniques in smart grid</i> . Smart Grid and Renewable Energy, 3(3), 175–185. http://dx.doi.org/10.4236/sgre.2012.33025
[12]	Fischer, M. T., & Keim, D. A. (2021). <i>Towards a Survey of Visualization Methods for Power Grids</i> . arXiv:2106.04661. https://arxiv.org/abs/2106.04661
[13]	Wikipedia. (2025). <i>Smart Grid</i> . Abgerufen am 5. Januar 2026, von https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_grid
[14]	Sevlian, R. A., et al. (2017). <i>VADER: Visualization and Analytics for Distributed Energy Resources</i> . arXiv:1708.09473. https://arxiv.org/abs/1708.09473 . (siehe auch DOE/SLAC VADER PDF)
[15]	Forschungszentrum ETH Zürich. (o. J.). <i>ReSIM – Research Center for Energy Networks</i> . https://www.fen.ethz.ch/activities/tools/resim.html
[16]	Forschungszentrum ETH Zürich. (o. J.). <i>ReMaP Renewable Management and Real-time Control Platform</i> . https://www.fen.ethz.ch/activities/system-planning/remap.html
[17]	Wikipedia. (o. J.). <i>GridSpice</i> . https://en.wikipedia.org/wiki/GridSpice
[18]	GridSim documentation. (o. J.). The Gridsim simulator. https://gridsim.hevs.ch/
[19]	FlexMeasures. (o. J.). <i>FlexMeasures – The open-source toolkit for smart energy flexibility services</i> . https://flexmeasures.io/flexmeasures-the-open-source-toolkit-for-smart-energy-flexibility-services/

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Grobes Grundlagen der Energiebilanz Prognosen Diagramm	5
Abbildung 2 3D-Merit-Order Diagramm Beispiel.....	8
Abbildung 3 Erste konzeptionelle Skizze zur Visualisierung von Merit-Order und Prognoseabweichungen. Diente als Diskussionsgrundlage in frühen Projektphasen.	14
Abbildung 4 Erweiterte Skizze zur Darstellung von Funktionsweisen und Interaktionsmöglichkeiten.	15
Abbildung 5 Erste Auswahl an Visualisierungsvorschlägen für den Auftraggeber.....	16
Abbildung 6 Weitere Visualisierungsvorschläge zur Diskussion möglicher Darstellungsformen.	16
Abbildung 7 Vereinbarte Designskizze mit dem Auftraggeber zur internen Orientierung und Umsetzung.	17
Abbildung 8 Python Backend UML-Diagramm erste Hälfte.	18
Abbildung 9 Python Backend UML-Diagramm zweite Hälfte.	18
Abbildung 10 Python Backend UML Klassen Nutzungsansicht.	19
Abbildung 11 Frontend Visualisierung von 3D Merit Order und 2D Merit Order.	20
Abbildung 12 Frontend Visualisierung von Devices Infomationen, erscheint bei draufklicken auf Balken von 2D Merit Order.	20
Abbildung 13 Frontend Kapazitätskurve.....	21
Abbildung 14 Frontend Simulation Konfigurationen.....	23
Abbildung 15 Frontend Simulation Dashboard mit Visualisierungen von Line Charts und Pie Charts.....	23
Abbildung 16 Backend Auszug von Testsuite.	24
Abbildung 17 Frontend Testsuite ausschnitt.	25