

# ENTWICKLUNG EINER RAPID CONTROL PROTOTYPING PLATTFORM FÜR DIE ANALYSE VON ENERGIEMANAGEMENTSTRATEGIEN AUF LABOREBENE

**Jonathan Ries, Julien Essers, Mattias Hadlak, Christian Reinhold, Bernd Engel**

Technische Universität Braunschweig, elenia Institut für Hochspannungstechnik und  
Energiesysteme, Schleinitzstraße 23, 38106 Braunschweig, +49 (0) 531 391 9714,  
jonathan.ries@tu-braunschweig.de, <https://www.tu-braunschweig.de/elenia>

**Kurzfassung:** Diese Veröffentlichung beschreibt die Umsetzung eines modular adaptierbaren Simulink-Modells, welches eine synchrone Steuerung von Laborgeräten auf Basis von Zeitreihen ermöglicht. Die Ansteuerung der Laborgeräte erfolgt ethernetbasiert und mittels gerätespezifischer Protokolle im 1-sekündlichen Echtzeitbereich. Das Modell ermöglicht es, simulativ entwickelte Betriebsstrategien für Energiemanagementsysteme auf Laborebene zu analysieren und funktional zu validieren (Rapid Control Prototyping Ansatz). Der zur funktionalen Validierung verwendete Testcase zeigt eine Betriebsstrategie zur Flexibilisierung von Anlagen in Gebäuden auf Basis von Fahrplänen auf.

**Keywords:** Rapid Control Prototyping, Betriebsstrategien, Energiemanagementsysteme, Flexibilität, flexess

## 1 Einleitung

Zum Erreichen der im EU Green Deal beschlossenen vollständigen Klimaneutralität bis ins Jahr 2050 und der damit notwendigen Transformation des Energiesystems wurde im Juli diesen Jahres ein „EU-Aktionsplan für die Digitalisierung des Energiesektors“ initiiert [1]. Dieser schließt auch den Verbrauchssektor ein, zu dem u.a. der Energiebedarf von Gebäuden zählt. Als konkrete Maßnahme wird im Aktionsplan die Förderung von Demand Response Maßnahmen aufgeführt, die aus energietechnischer Sicht die Lastabschaltung, -erhöhung und -verschiebung beinhaltet. Ein signifikantes Potential für Demand Response Maßnahmen im Gebäude- bzw. Wohngebäudesektor bergen u.a. Batteriespeicher und Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge [2], die unter ökonomischen Gesichtspunkten häufig in Verbindung mit dezentralen Erzeugungsanlagen installiert werden. Gebäude-Energiemanagementsysteme (EMS) ermöglichen eine betriebsstrategieabhängig, d.h. zielgrößenorientierte Steuerung der Leistungsflüsse und bieten neben der gebäudeinternen Optimierung neue Möglichkeiten zur Teilnahme an innovativen Geschäftsmodellen oder zur Unterstützung eines stabilen Stromnetzbetriebs. Als Beispiel für eine derartige Betriebsstrategie kann z.B. das Anbieten von Flexibilität aus Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen genannt werden. Für die Erbringung passen Anlagen auf interne oder externe Signale hin ihren Wirkleistungsbedarf an.

Die in dieser Veröffentlichung präsentierte Lösung bestehend aus Simulink-Modell und einem Echtzeitrechensystem, nachfolgend als Rapid Control Prototyping Plattform bezeichnet, ermöglicht die synchrone Steuerung von Laborgeräten um das elektrische Verhalten von Gebäuden nachzubilden. Teil der Plattform ist ein (Gebäude-)EMS-Subsystem, welches die Implementierung und Analyse von simulativ entwickelten Betriebsstrategien auf Laborebene erlaubt.

## 2 Technische Beschreibung der Rapid Control Prototyping Plattform

Um Betriebsstrategien für EMS unter realitätsnahen Ausgangsbedingungen, d.h. unter Beteiligung von Laborgeräten und am Markt verfügbaren Anlagenkomponenten zu testen und miteinander vergleichen zu können eignet sich das Konzept des Rapid Control Prototyping (RCP) [3]. RCP-basierte Systeme zeichnen sich allgemein durch die Eigenschaft aus, dass Steuer- und Regelstrategien auf Simulationsebene entwickelt und nachfolgend auf ihre Eignung zur Steuerung realer Prozesse (Laborebene) getestet und verglichen werden können. Durch die Nutzung von MATLAB und Simulink als einheitliche Toolchain für Simulation und Testing können neue Betriebsstrategien für Energiemanagementsysteme auf Simulationsebene entwickelt und anschließend auf Laborebene getestet und validiert werden.

Das zur Durchführung von Software-in-the-loop (SiL-)Tests entwickelte Simulink-Modell wird in seinem Aufbau und seiner Funktionalität nachfolgend beschrieben.

### 2.1 Aufbau

Als Hardwareplattform dient ein Simulink Real-Time basiertes Echtzeitrechnungssystem des Herstellers Speedgoat. Zur Ausführung wird das entwickelte Modell vom Simulink Coder kompiliert und deterministisch ausgeführt. Dies stellt die Wiederholbarkeit und damit auch die Vergleichbarkeit von Testergebnissen sicher. Für die Umsetzung wurde ein modularer Ansatz gewählt, welcher auf Abbildung 1 dargestellt ist.

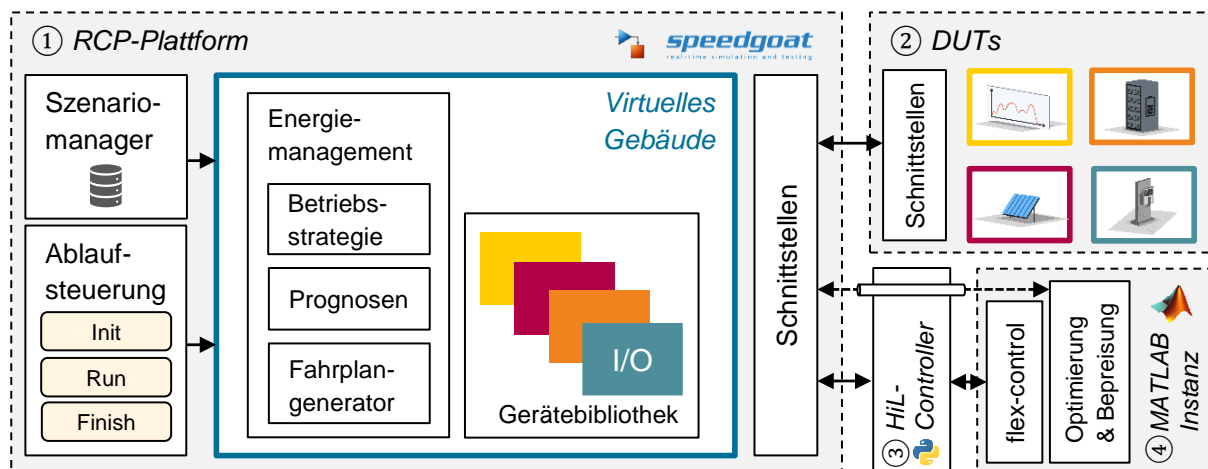


Abbildung 1: Architektur und Schnittstellen der entwickelten RCP-Plattform

Die RCP-Plattform (1) ist in drei Subsysteme aufgeteilt. Für Tests benötigte Eingangsdaten werden zentral in Form von Zeitreihen verwaltet. Hierzu wird der von Simulink bereitgestellte Szenariomanager genutzt, welcher das Hinzufügen und Zuordnen von Zeitreihen erlaubt. Hierzu zählen Lastprofile, Einstrahlungsdaten, Anwesenheitsprofile für Elektrofahrzeuge und historische (Wetter-)Daten, die z.B. beim Erstellen von Leistungsprognosen Verwendung finden. Das EMS und die in einer Gerätebibliothek zusammengefassten Geräte-Subsysteme (siehe Kapitel 2.2) stellen zusammen die Bestandteile zur Nachbildung des virtuellen Gebäudes dar. Jedes Geräte-Subsystem übernimmt die Ansteuerung eines realen Gerätes (2) DUT, device under test) und enthält daher die Verbindungsdaten zum Gerät und die zur Verfügung stehenden Geräteparameter.

Während der Versuchsdurchführung analysiert und steuert das EMS auf Basis der Leistungsdaten und einer Entscheidungslogik die Leistungsflüsse von Laborgeräten, die auch in realen Gebäuden vom EMS gesteuert werden. Hierzu zählt primär das Laden und Entladen des Batteriespeichers. Zu den umgesetzten Betriebsstrategien zählt die Eigenverbrauchsmaximierung als auch die später im Anwendungsbeispiel in Kapitel 3.1 vorgestellte fahrplanbasierte Strategie zur Flexibilitätsbereitstellung.

Die Plattform kann über einen in Python geschriebenen Hardware-in-the-loop (HiL)-Controller ③ direkt oder indirekt mit externen MATLAB Instanzen ④ gekoppelt werden. Die Einbindung von MATLAB Instanzen ermöglicht die Integration von zusätzlichen Funktionen, die aufgrund von Restriktionen des Echtzeitrechensystems bzw. Simulink nicht direkt auf der RCP-Plattform umgesetzt werden können (z.B. Lösen von Optimierungsproblemen) oder die Berücksichtigung von virtuellen Anlagenmodellen. Sind die Funktionen lediglich für das EMS-Subsystem von Relevanz, stellt der HiL-Controller eine direkte Verbindung zwischen der RCP-Plattform und der MATLAB Instanz her, sodass der Datenaustausch bilateral zwischen Plattform und MATLAB erfolgt. Virtuelle Anlagenmodelle sollen das System zukünftig um die Möglichkeit erweitern, weitere Anlagen und Gebäude im SiL-Test zu berücksichtigen, die lediglich virtuell als Rechenmodelle vorliegen (HiL-Simulation).

## 2.2 Geräte-Subsysteme

Jedes am Testaufbau beteiligte DUT wird innerhalb der RCP-Plattform durch ein Geräte-Subsystem repräsentiert. Um den Aufwand beim Anlegen neuer Geräte-Subsysteme zu minimieren ist der Aufbau einheitlich. Die Geräte-Subsysteme sind in einer Gerätebibliothek zentral abgelegt und können so je nach Versuchsaufbau zum Gesamtsystemmodell in Simulink hinzugefügt werden. Abbildung 2 veranschaulicht die gewählte Struktur sowie die Schnittstellen zu den weiteren Bestandteilen der RCP-Plattform.

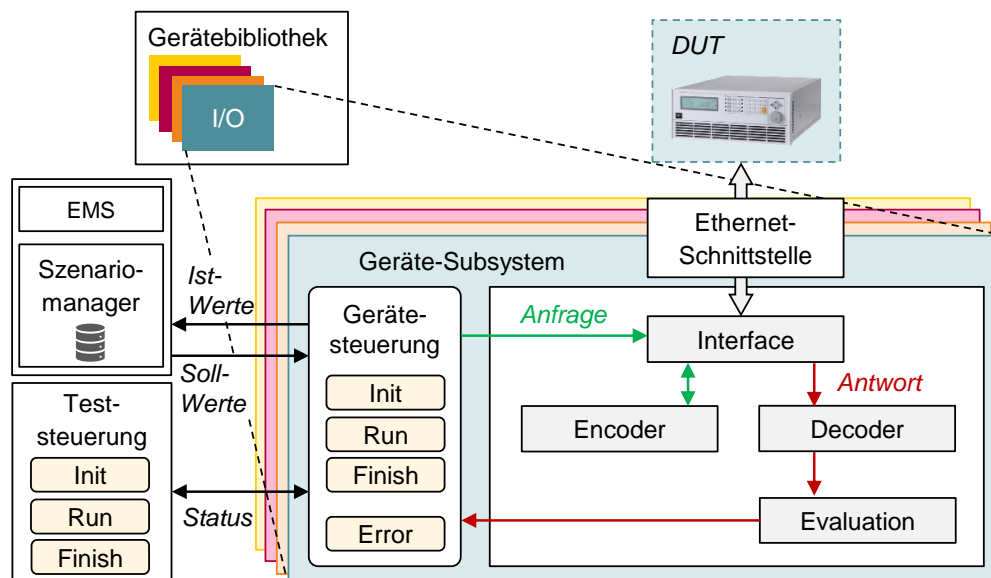


Abbildung 2: Bestandteile und Funktionen eines Geräte-Subsystems

Jedes Geräte-Subsystem enthält einen *Interface* Block, welcher über die Ethernet-Schnittstelle der RCP-Plattform eine Verbindung zum Labornetzwerk herstellt. Der Interface Block enthält die Verbindungsdaten (IP-Adresse, Port, Geräte-ID) und öffnet bzw. schließt die

Kommunikationsverbindung zum Gerät zu Testbeginn bzw. nach Testende. Analog zur übergeordneten Teststeuerung enthält jedes Geräte-Subsystem eine eigene *Gerätesteuerung*, welche die in den drei Testphasen erforderlichen Interaktionen zwischen Geräte-Subsystem und dem DUT sowie auch zum EMS-Subsystem koordiniert.

Für die Kommunikation zwischen Geräte-Subsystem und DUT sind die Simulink internen Datenformate bzw. Signale entsprechend dem gerätespezifischen Kommunikationsprotokoll zu encodieren bzw. zu decodieren. Hierfür übersetzt der Encoder Block die zu sendende Nachricht in die vom DUT-Hersteller festgelegte Protokollstruktur. Als Reaktion schickt das DUT eine ebenfalls protokoll- und gerätespezifische Nachricht, die vom Decoder-Block dekodiert wird. Der Decoder-Block vergleicht die Antwort mit einer von der Gerätesteuerung definierten Soll-Antwort. Stimmen diese nicht überein, geht das Geräte-Subsystem in einen Fehlerzustand (*Error-State*) über und meldet diesen an die übergeordnete Teststeuerung. Aktuell stehen Interface-Blöcke für die Protokolle MODBUS TCP, SCPI und JSON-basierte Nachrichtenstrukturen zur Verfügung. Simulink bietet keine native JSON Unterstützung, weswegen hierfür eine externe C-Bibliothek (cJSON) als S-Function eingebunden wurde.

In Tabelle 1 sind zur Übersicht alle als Geräte-Subsysteme integrierte DUT und deren Nenndaten aufgeführt.

Tabelle 1: Als Geräte-Subsysteme im Simulink-Modell der RCP-Plattform integrierte DUT

<b>Gerätetyp</b>	<b>Hersteller und Gerätemodell</b>	<b>Nennleistung lt. Datenblatt</b>	<b>Kommunikations-schnittstelle</b>	<b>Nachrichten-protokoll</b>
<b>Batterie-Wechselrichter</b>	SMA Sunny Island 4.4M	3.3 kW (1-phasig)	Ethernet	Modbus
<b>PV-Wechselrichter</b>	SMA Sunny Tripower 8000TL	8 kW (3-phasig)	Ethernet	Modbus
<b>DC-Quelle</b>	EA PSI 91000 – 30	10 kW	Ethernet	SCPI
<b>Aktiver Gleichrichter</b>	cinergia B2C20	20 kW (3-phasig, bidirektional)	Ethernet	Modbus
<b>DC-Quelle/Senke (Batterieemulator)</b>	cinergia BE20	18 kW (bidirektional)	Ethernet	Modbus
<b>Elektronische AC-Last</b>	3x Chroma 63802	3x 1,8 kW (Master-Slave-Betrieb)	RS232 (mit externem Wandler auf Ethernet gewandelt)	SCPI

Mit einer synchronen Ansteuerung der Geräte im Verbund kann das elektrische Verhalten eines Gebäudes auf Laborebene abgebildet werden. Eine im Gebäude installierte Wallbox und das zu ladende EV wird durch DC-seitiges verbinden des aktiven Gleichrichters mit dem Batterieemulator nachgebildet [8]. Der AC-Eingang/Ausgang des aktiven Gleichrichters stellt in diesem Fall die wechselstromseitige Verbindung zum Schaltschrank bzw. zum Hausanschlusskasten des fiktiven Gebäudes dar. Ergänzend zu den realen Geräten ist der in Kapitel 2.4 vorgestellte HiL-Controller als Gerätesubsystem (ebenfalls über Ethernet und spezifisches UDP-Protokoll) implementiert worden.

## 2.3 EMS-Subsystem

Das EMS-Subsystem steuert die Wirkleistung von Anlagen (z.B. eines Batteriespeichersystems) zur Optimierung von Zielfunktionen. Zielfunktionen sind beispielsweise die Minimierung von Netzbezugsstrom (Eigenverbrauchsmaximierung) oder die temporäre Anpassung der Residuallast als Reaktion auf externe Signale (Demand Response). Eine Zielfunktion in Kombination mit der zur Umsetzung benötigten Entscheidungslogik wird als Betriebsstrategie bezeichnet. Der Aufbau des EMS-Subsystems kann Abbildung 3 entnommen werden.

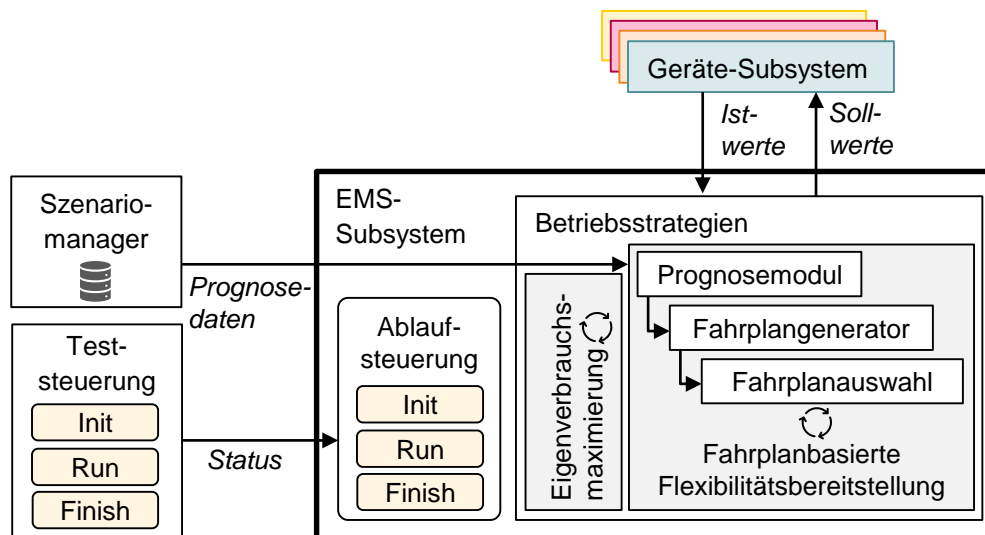


Abbildung 3: Bestandteile und Funktionen des EMS-Subsystems

In seiner derzeitigen Ausgestaltung kann für Tests zwischen den Betriebsstrategien Eigenverbrauchsmaximierung oder der fahrplanbasierten Flexibilitätsbereitstellung (siehe Kapitel 3.1) gewählt werden. Das EMS-Subsystem erhält über die Geräte-Subsysteme von den DUT zyklisch abgefragte Ist-Werte (z.B. aktueller SOC des Batteriespeichersystems) um diese in der Betriebsstrategie als Eingangswerte zu berücksichtigen. Auf Basis der gewählten Betriebsstrategie und der Eingangsdaten errechnet das EMS-Subsystem (Wirkleistungs-)Soll-Werte, die über die Geräte-Subsysteme an vom EMS steuerbare DUT kommuniziert werden (z.B. Lade- oder Entladeleistung für das Batteriespeichersystem).

Für die Generierung von Fahrplänen (*Fahrplangenerator*) ist ein *Prognosemodul* integriert, das derzeit ausschließlich ideale Prognosen ausgibt. Die zur Prognoseerstellung benötigten Prognosedaten (z.B. Wetterdaten, historische Gebäudelastdaten) werden vom Szenariomanager bereitgestellt. Die *Fahrplanauswahl* ermöglicht das Umschalten zwischen verschiedenen Fahrplanverläufen. Umschaltzeitpunkte werden von der Flexibilitätsplattform als UNIX-Zeitstempel an das EMS kommuniziert.

## 2.4 Integration von externen Softwaremodulen und Simulationsumgebungen

Zur Kopplung der RCP-Plattform mit externen, d.h. nicht Simulink-basierten, Softwaremodulen und Simulationsumgebungen wird ein HiL-Controller eingesetzt. Der schematische Aufbau des HiL-Controllers kann Abbildung 4 entnommen werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile und deren Funktionsumfang beschrieben.

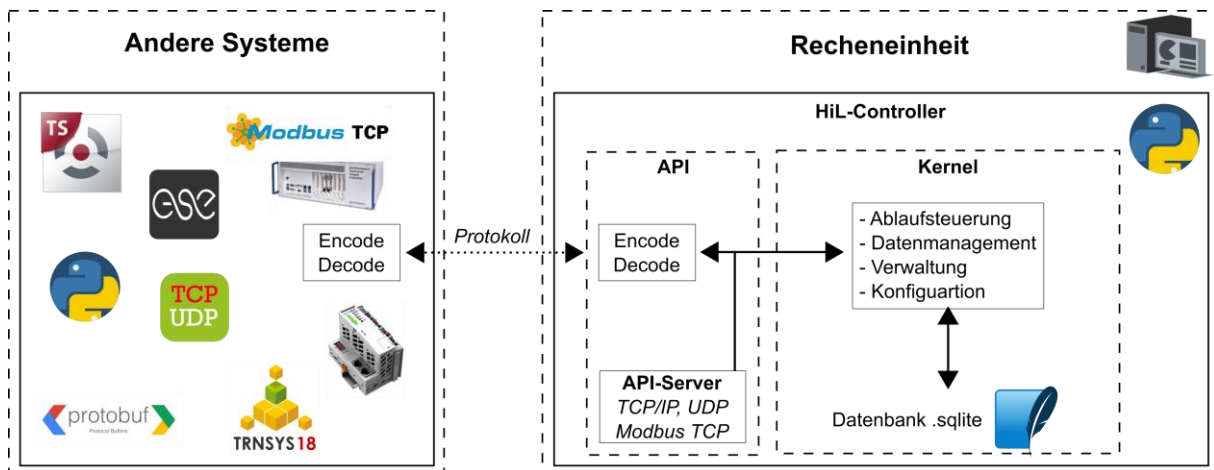


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des HiL-Controllers

### 2.4.1 Aufbau

Der HiL-Controller besteht aus einem Kernel-Modul und mehreren Schnittstellen (API) für anderen Systeme, welche im Kernel verwaltet werden. Das Kernel-Modul verwaltet die HiL-Simulationseigenschaften, wie zum Beispiel die Dauer einer Simulation oder den Speicherzyklus der Signale in eine angebundene SQLite-Datenbank. Zusätzlich kann ein Referenzzeitraum eingestellt werden, der es ermöglicht Simulationsmodelle schneller als die reale Zeit zu berechnen. Dies bewirkt eine zeitliche Entkopplung der Simulationsmodelle vom Laborversuch.

Die verwendeten Schnittstellen sowie die Eigenschaften und Signale werden in einer lokalen Datenstruktur gespeichert. Jedes Signal unterteilt sich dabei in weitere Signaleinheiten, um so mehrere Anlagen und Simulationsmodelle auf ein Signal zu mappen. Messwerte und Fahrplaninformationen sind in separaten Datenstrukturen getrennt organisiert. Der Informationsaustausch zwischen den Signaleinheiten wird durch Verbindungen realisiert. Alle Signaleinheiten und Verbindungen werden zusätzlich in einem Abhängigkeitsgraphen verwaltet, um in der HiL-Simulation eine definierte Abfolge der Schnittstellen zu erreichen. Alle ausgetauschten Signale und Fahrpläne werden zu einem definierten Zeitpunkt in die Datenbank zur nachgelagerten Analyse gespeichert.

### 2.4.2 HiL-Simulation

Nach dem Start der HiL-Simulation wird im ersten Schritt eine Vorbereitungsroutine gestartet. In dieser Routine werden alle Schnittstellen auf einen definierten Anfangszustand zurückgesetzt und die Simulationsreihenfolge der Schnittstellen in Abhängigkeit zu den definierten Signaleinheiten und Verbindungen bestimmt. Im Anschluss an diesen Schritt wird die eigentliche HiL-Simulation durchgeführt. Für jede Schnittstelle werden die identischen Methoden aufgerufen.

- *set\_data()*: Informationen anderer Schnittstellen oder Datenquellen werden der Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Eventuell werden bereits Informationen an das Geräte bzw. System übermittelt.
- *step()*: Durchführung eines Berechnungsschritts in der API. Abhängig vom API-Design werden Informationen an andere Systeme gesendet und abgefragt

- *get\_data()*: Informationen werden aus der Schnittstelle abgefragt und in eine lokale Datenstruktur des Kernels zwischengespeichert.

Die zeitliche Ansteuerung der Schnittstellen richtet sich nach der eingestellten Schrittweite jeder API. In der aktuellen Version wartet die HiL-Simulation bis die jeweilige Schnittstelle ihren Zeitpunkt erreicht hat. Ist die Gesamtsimulationsdauer erreicht, so wird die abschließende Methode *finish()* aufgerufen, um sowohl im Kernel als auch in den Schnittstelle Kennzahlen und eventuell Wirtschaftlichkeitsberechnung durchzuführen.

### 2.4.3 API-Server

Jede Schnittstelle besitzt die Möglichkeit einen separaten Server zu erstellen. Der API-Server besitzt die Funktion während der HiL-Simulation Signale von anderen Systemen und Geräten zu empfangen und der API zu übergeben. Durch eine vorherige Portaufteilung der API-Server im Kernel wird eine eindeutige Zuordnung von API und Server erreicht, so dass andere Systeme gezielt eine API ansprechen können. Aktuell werden die Protokolle TCP/IP, UDP und Modbus TCP unterstützt. In der Initialisierungsphase einer HiL-Simulation wird der vorher parametrisierte API-Server gestartet. Für die Verbindung vom HiL-Controller mit der RCP-Plattform wird an dieser Stelle ein UDP-Server eingesetzt, der ein definiertes JSON-Datenformat decodiert und encodiert.

## 2.5 Testablauf

Der Ablauf eines Tests wird durch Stateflow-Charts (Zustandsdiagramm) koordiniert, die nach Starten der Simulink-Applikation jeden Test in drei Phasen unterteilen:

In der Initialisierungsphase (Init-Phase) wird von der RCP-Plattform ein Verbindungstest für alle am Test beteiligten DUT initiiert sowie zu tätige Voreinstellungen an den Anlagen vorgenommen. Dies trifft u.a. auf die später im Anwendungsbeispiel verwendete DC-Quelle zu, die für die Emulation eines PV-Generators erst vom Constant-Voltage-Mode in den PV-Modus zu setzen ist.

Verläuft der Verbindungstest für alle im Test eingesetzten Anlagen erfolgreich und sind sämtliche Konfigurationsschritte abgeschlossen, geht das System in die Versuchsdurchführungsphase (Run-Phase) über. Während der Run-Phase findet ein zyklischer Austausch von Ist- und Sollwerten zwischen der Plattform und den am Test beteiligten Anlagen statt. Die Sollwerte sind Zeitreihen, die entweder direkt vom Szenariomanager bereitgestellt werden (z.B. Last oder Einstrahlungsprofile), oder berechnete Werte, die das EMS in Abhängigkeit der gewählten Betriebsstrategie und auf Basis des aktuellen Systemzustands bestimmt hat. Zur Kommunikation zwischen RCP-Plattform und den DUTs werden dem Gesamtsystemmodell Geräte-Subsysteme hinzugefügt (jeweils ein Subsystem pro DUT). Während des Tests können über den Simulink Simulation Data Inspector ausgewählte Signale in Echtzeit zum Entwicklungsrechner übertragen, visualisiert und plausibilisiert werden.

In der dritten und letzten Testphase, der Finalisierungsphase (Finish-Phase), werden zu den Anlagen aufgebaute Kommunikationsverbindungen geschlossen und die während der Testdurchführung aufgezeichneten Testergebnisse im Datenspeicher des Echtzeitrechnersystems archiviert.

### **3 Flexibilisierung von technischen Anlagen in Gebäuden**

Eine mögliche, mit der im Kapitel 2 vorgestellten RCP-Plattform zu untersuchende Betriebsstrategie, ist die Bereitstellung von fahrplanbasierten Flexibilitäten auf Gebäudeebene, wie sie im Forschungsvorhaben flexess betrachtet wird. Hierbei wird zunächst vom EMS für flexibel steuerbare Geräte oder Geräteverbunde ein sogenannter Referenzfahrplan (RF), welcher viertelstundenscharf den eigenverbrauchsoptimierten Einsatz ohne Flexibilitätsnutzung abbildet, berechnet. Unter Berücksichtigung technischer Grenzwerte und nutzerspezifischen Anforderungen können anschließend durch die schrittweise Variation des Zeitpunktes und der Höhe des Leistungsbezugs/-abgabe alternative Fahrpläne (AF) bestimmt werden, welche die Flexibilität eines Geräts wiedergeben. Die entstehenden Kosten bei der Abweichung vom optimalen Referenzfahrplan werden mittels numerischer Integration der fahrplanzugehörigen Residuallast bepreist. Der Preis je Fahrplan spiegelt damit die ggf. entstehenden Mehrkosten für den Anlagenbetreiber aufgrund eines höheren Netzbezugs oder entgangener Einspeisevergütung als Folge der Flexibilisierung wider.

Je nach Auflösung der Variationen wird auf diese Weise eine Alternativfahrplanschar vom EMS erstellt, welche zu einem festgelegten Zeitpunkt über den HiL-Controller an die in flexess entwickelte Flexibilitätsplattform flex-control gesendet wird. Diese Plattform koordiniert die Fahrplanverteilung an potenzielle Flexibilitätsnutzer (z. B. Netzbetreiber, Aggregatoren), welche basierend auf Engpass- oder Preisprognosen eine kosteneffiziente Kombination der angebotenen Alternativfahrplänen bestimmen, um ihren Bedarf zu decken.

Kontrahierte Flexibilitäten werden über die Plattform an den HiL-Controller gemeldet, welcher die Fahrplaninformationen an das EMS der RCP-Plattform übermittelt. Dort wird der ausgewählte Fahrplan in einen temporären Signalspeicher geladen, aus dem schrittweise die Leistungswerte an die Geräte gesendet werden. Für die Überprüfung der physischen Flexibilitätserbringung werden kontinuierlich Messwerte der flexibilisierten Geräte aufgenommen, welche abschließend zur zentralen Überprüfung mittels Baseline-Verfahren an die Flexibilitätsplattform übermittelt werden.

Zur beispielhaften Erprobung des in dieser Veröffentlichung vorgestellten RCP-Plattform werden im Folgenden für einen von der Flexibilitätsplattform flex-control losgelösten fiktiven Netzbetreiber die Bereitstellung, die optimierte Auswahl und die Erbringung fahrplanbasierter Flexibilitäten betrachtet.

#### **3.1 Fahrplanbasierte Flexibilitätsbereitstellung**

Die Fahrplangenerierung für die Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) und der Wallbox des Elektrofahrzeugs (EV) erfolgt auf der Basis von idealen Prognosen der solaren Einstrahlung sowie des Anwesenheitszeitraums des Elektrofahrzeugs. Der Prognosehorizont umfasst dabei den im Anwendungsbeispiel betrachteten, kompletten Tagesverlauf (24 h) in 15-minütiger Schrittweite. Hieraus ergeben sich insgesamt 96 Leistungswerte für die Prognosezeitreihen, die gleichzeitig die zeitliche Auflösung der generierten Fahrpläne darstellt. Auf Basis der idealen Prognosen werden zunächst die Wirkleistungsverläufe der RF generiert. Als RF wird für die PV-Anlage die prognostizierte Erzeugungskurve (nicht-abgeregelt) definiert. Für das EV wird der RF durch den prognostizierten Ankunftszeitpunkt und einem sofortigen Beginn



des Ladevorgangs bei maximal zulässiger Ladeleistung, in diesem Fall angesetzt (ungesteuertes Laden).

Zur Quantifizierung des Flexibilitätsangebots der einzelnen Anlagen werden im Anschluss AF generiert. AF stellen eine Auswahl von möglichen, alternativen Wirkleistungsverläufen dar, die von potentiellen Flexibilitätsnutzern im Rahmen der Einsatzplanung bedarfsabhängig gewählt werden können. Die Generierung der AF erfolgt in einem stufenweisen Prozess durch MATLAB-Funktionen. Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen exemplarisch generierte Fahrplanscharen für die PV-Anlage (links) und das EV (rechts) im Verbraucherzählpeilsystem. Nachfolgend werden die einzelnen Stufen des Generierungsprozesses im Detail beschrieben.

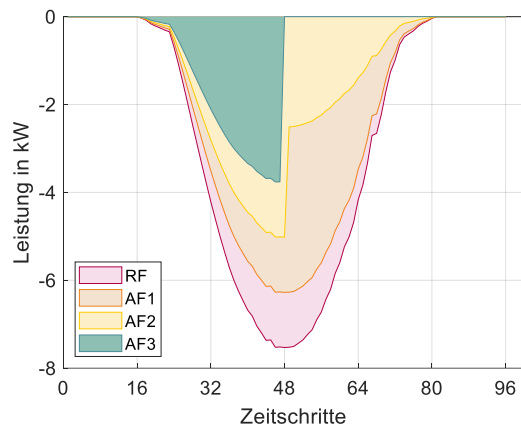


Abbildung 5: Fahrplanschar für die PV-Anlage

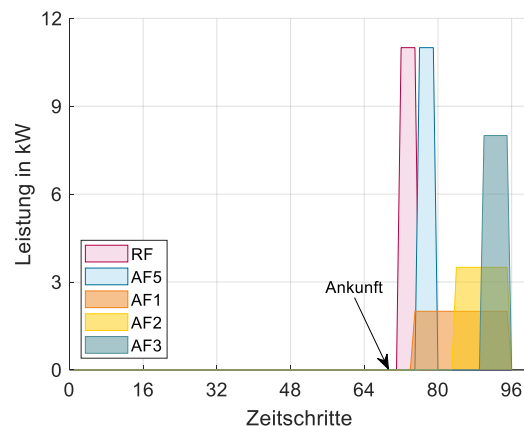


Abbildung 6: Fahrplanschar für das EV

Für die Fahrplangenerierung der PV-Anlage (siehe Abbildung 5), werden in der ersten Stufe ausgehend vom RF AF mit prozentual skalierten Leistungswerten aus dem RF generiert (vgl. AF1). In der zweiten Stufe wird die Erzeugungsleistung ab einem zuvor festgelegten  $t_{step}$  auf die Leistungswerte eines zuvor in der ersten Stufe generierten AF gesetzt (vgl. AF2 für  $t_{step} = 48$ ). In der dritten Stufe wird die Erzeugungsleistung beim Erreichen des gewählten Zeitschrittes  $t_{step}$  auf null abgeregelt (vgl. AF3). Insgesamt werden so eine Anzahl von  $n$  Alternativfahrplänen ausgegeben (siehe Abbildung 5 für  $n = 3$ ). Die Anzahl kann anwendungsfallsspezifisch vor Start des Generierungsprozesses eingestellt werden.

Zur Fahrplangenerierung des EV (siehe Abbildung 6) wird zunächst der state of charge (SOC) des EV zum Ankunftszeitpunkt aus der Prognosemethode abgefragt. Für diese Veröffentlichung wird von einer idealen Prognose, d.h. Bekanntsein des Anwesenheitszeitfensters ausgegangen. Anhand des SOC und des fahrzeugmodellabhängigen Nennenergieinhalts der Traktionsbatterie wird die zur vollständigen Ladung des EV benötigte Energie ( $E_{Batt\_needed}$ ) berechnet. Für jedes  $\Delta P$  wird die Ladedauer zu  $n \cdot \Delta t_{min}$  Zeitschritten berechnet, sodass für jeden Fahrplan die Gleichung

$$E_{Batt\_needed} = \Delta P \cdot \Delta t_{min} \cdot n$$

erfüllt ist. Jeder für das EV generierte Fahrplan führt somit zu einem SOC von 100 %.

Auch die Fahrplangenerierung für das EV wird stufenweise durchgeführt. In der ersten Stufe erfolgt eine zeitliche Verschiebung um  $\Delta t_{min}$  des RF (vgl. AF5). Dabei wird mit der maximalen Ladeleistung  $P_{max\_EV}$  gerechnet. In der zweiten Stufe wird die Differenz aus maximal möglicher

Ladeleistung  $P_{\max\_EV}$  und minimaler Ladeleistung  $P_{\min\_EV}$  in  $m \in \mathbb{N}$  wählbare Leistungsstufen geteilt und für jede Leistungsstufe ein AF generiert (vgl. AF2 und AF3).

$$P_{\text{Stufe}_m} = \frac{P_{\max\_EV} - P_{\min\_EV}}{m}$$

Die mit der neuen Ladeleistung  $P_{\text{Stufe}_m}$  erzeugten AF werden in der dritten Stufe des Generierungsprozesses um  $\Delta t_{\min}$  zeitlich verschoben.

Neben Erzeugungsanlagen und steuerbaren Lasten eignen sich Batteriespeichersysteme technisch zur Erbringung von Flexibilität aus Gebäuden. Durch die Steuerung der Ein- und Ausspeicherphasen kann sowohl positive als auch negative Flexibilität erbracht werden. Batteriespeichersysteme werden in der Praxis derzeit überwiegend zur Eigenverbrauchsmaximierung genutzt. Diese Betriebsweise stellt aus Anlagenbetreibersicht den ökonomisch besten Fall dar und bildet daher für die Fahrplangenerierung des Batteriespeichers den RF ab. Zur Fahrplangenerierung der RF und AF des Batteriespeichers wird ein in [4] formuliertes Optimierungsproblem genutzt (siehe Abbildung 7). Dieses wird im Rahmen der vorgestellten Betriebsstrategie zur Flexibilisierungsstrategie erweitert. Der Optimierungszeitraum beträgt einen Tag (24 h) in Viertelstundenauflösung (96 Zeitschritte).

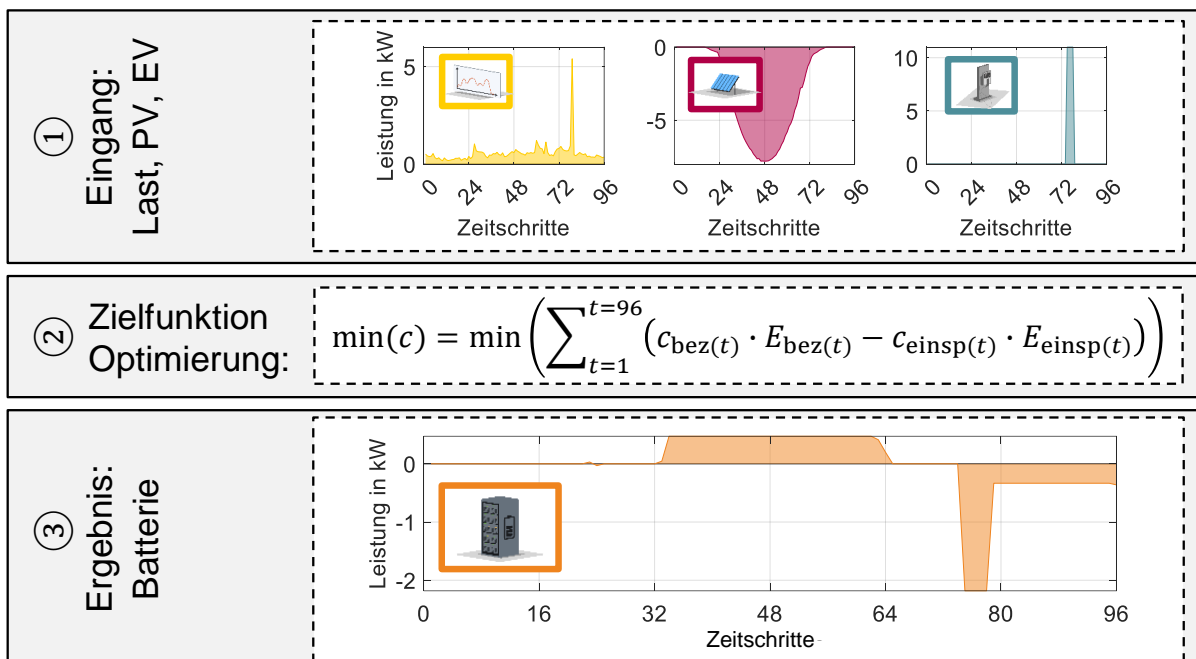


Abbildung 7: Eingangsdaten und Zielfunktion des Optimierers zur Generierung der Batteriespeicher-Fahrpläne

Als Eingangsdaten für die Optimierung werden die ideal-prognostizierten Leistungsverläufe der Anlagen (Gebäudegrundlast  $p_{\text{Last}}$ , Erzeugungsleistung  $p_{\text{PV}}$ , Ladeleistung  $p_{\text{EV}}$ ) sowie die Höhe des Netzbezugsstrompreises  $c_{\text{bez}(t)}$  und die Höhe der Einspeisevergütung  $c_{\text{einsp}(t)}$  nach EEG benötigt. Die Zielfunktion bildet den Wunsch des Anlagenbetreibers nach Minimierung der Kosten  $C$  in mathematischer Form ab. Das Lösen des Optimierungsproblems durch den Solver erfolgt unter Beachtung von technischen Nebenbedingungen, die ebenfalls in Gleichungsform formuliert werden. Hierzu zählen u.a. die nutzbare Kapazität sowie die elektrische Lade- und Entladeleistung des Batteriespeichers als auch die Berücksichtigung einer Einspeisegrenze am Netzanschlusspunkt (Einspeisemanagement). Um Gradienten in der Netzaustauschleistung zu minimieren, wird die Zielfunktion um einen Pönalisierungsterm

für Gradienten erweitert. Als Resultat wählt der Optimierer die minimal notwendige Ladeleistung um den Speicher zwar vollständig, jedoch gleichzeitig über eine möglichst lange, kontinuierliche Dauer während des Erzeugungsüberschusses zu laden (vorrasschauendes Laden). So wird der Entstehung einer Einspeisespitze zur Mittagszeit entgegengewirkt. Die Entladephase wird vom Optimierer so gewählt, dass große Lastspitzen, wie sie beim Laden des EV auftreten, minimiert werden.

Für die Generierung der AF des Batteriespeichersystems wird dem Optimierer mittels einer fiktiven, temporären Erhöhung des Netzbezugspreises bzw. der Einspeisevergütung innerhalb der Zielfunktion wird ein Anreiz gesetzt, in diesem Zeitabschnitt den Batteriespeicher mit maximaler Leistung zu entladen bzw. zu laden. Dies führt im resultierenden Residuallastverlauf zu einer temporären Senkung bzw. Steigerung der Netzaustauschleistung. Mittels zeitlicher Verschiebung des Preisanreizsignals wird so ein flexibler Betrieb ermöglicht.

Für alle flexibilisierten Geräte werden vom EMS die zu den RF und AF Fahrplänen dazugehörigen Residuallasten berechnet. Aus der über das Flächenintegral quantifizierbaren, über den Tag eingespeisten bzw. aus dem Netz bezogenen Energiemenge  $E_{\text{einsp } n}$  bzw.  $E_{\text{bez } n}$  wird durch Multiplikation mit der EEG-Einspeisevergütung  $C_{\text{einsp}}$  bzw. dem Netzbezugstarif  $C_{\text{bez}}$  für jeden Residuallastverlauf  $n$  der Preis  $C_{\text{Res } n}$  bestimmt, der vom Anlagenbetreiber an den Energieversorger bei exakter Einhaltung des jeweiligen Residuallastfahrplans zu zahlen wäre:

$$C_{\text{Res } n} = C_{\text{bez}} \cdot E_{\text{bez } n} - C_{\text{einsp}} \cdot E_{\text{einsp } n} \text{ mit } C_{\text{bez}} \text{ in } \frac{\text{€}}{\text{kWh}}, C_{\text{einsp}} \text{ in } \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Um einen fahrplanspezifischen Preis zur Weitergabe an die Flexibilitätsplattform zu erhalten, wird die Prämisse aufgestellt, dass der Flexibilitätsanbieter die Mehrkosten eines AF gegenüber dem Referenzfahrplan als Fahrplanpreis von einem potentiellen Flexibilitätsnutzer einfordert. Der vom Anlagenbetreiber geforderte Preis für den jeweiligen Anlagenfahrplan  $C_{\text{Fahrplan } n}$  ergibt sich damit als Differenz zu den Kosten der zum Referenzfall zugehörigen Residualleistung  $C_{\text{RF}}$  zu:

$$C_{\text{Fahrplan } n} = C_{\text{Res } n} - C_{\text{RF}}$$

Die aus den Anlagenfahrplänen generierten Residuallastverläufe und die Fahrplanpreise stellen die Grundlage für die nachfolgend erläuterte Einsatzplanung dar.

### 3.2 Fahrplanbasierte Einsatzplanung

Für jedes flexibel steuerbare Gerät oder jeden Geräteverbund können Flexibilitätsanbieter eine Fahrplanschar bestehend aus einem Referenz- und mehreren Alternativfahrplänen bereitstellen. Das in diesem Anwendungsfall betrachtete Gebäude stellt einen solchen einzelnen Anbieter dar und stellt auf Basis der vorgestellten Methodik eine Auswahl an möglichen Fahrplänen bereit. Aus diesem Portfolio an möglichen Leistungsänderungen können Flexibilitätsnutzer (z.B. Netzbetreiber, Aggregatoren) auf der Grundlage von Engpass- oder Preisprognosen kosteneffiziente Kombinationen der angebotenen Flexibilitäten wählen, um ihren Bedarf zu decken. Um eine geeignete Lösung für dieses kombinatorische Optimierungsproblem zu bestimmen, müssen die Fahrpläne einzelner Anbieter in Relation zueinander bewertet werden, da die Auswahl eines Fahrplans die Auswahl des nächsten Fahrplans beeinflusst (nicht separierbares Problem) [5]. Dies führt zu einer multiplikativen

Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten in Abhängigkeit der Anzahl angebotener Alternativfahrpläne.

$$\text{Kombinationen} = \prod_{i=1}^{n_{\text{Agenten}}} n_{\text{Alternativfahrpläne}_i}$$

Zur optimierten Koordination des Flexibilitätseinsatzes, der in dieser Veröffentlichung betrachteten beispielhaften Einsatzplanung eines fiktiven Netzbetreibers, wird der Combinatorial Optimisation Heuristic for Distributed Agents (COHDA) Ansatz verwendet [5]. Jede gerätespezifische Alternativfahrplanschar wird hierbei durch einen eindeutig identifizierbaren Agenten abgebildet. Die einzelnen Agenten sind zu einem Verbund mit einer schwarmbildenden Overlay-Topologie verbunden, welche den Kommunikationsaufwand während der Einsatzplanung reduziert.

Das primäre Optimierungsziel eines Verbundes ist die Deckung von dem Bedarf des Flexibilitätsnutzers, welche an der sogenannten Lieferqualität gemessen wird. Dabei werden die Differenzen zwischen den Alternativfahrplänen zum Referenzfahrplan am Netzanschlusspunkt betrachtet (Differenzfahrpläne). Da zur Lösung eines Netzengpasses ausschließlich die mögliche Leistungsverschiebung zu den der Engpassberechnung zugrundeliegenden Referenzfahrplänen relevant ist. Sobald der Bedarf vollständig gedeckt werden kann, versucht der Verbund die kostengünstigste Lösung zu finden (Erhöhung der Kostenqualität) [6].

Abbildung 8 zeigt eine mögliche Lösung für den fiktiven Flexibilitätsbedarf des fiktiven Netzbetreibers (rote Linie). Der Bedarf nach positiver Flexibilität (Reduktion der Einspeisung/Steigerung der Ausspeisung) in den Zeitschritten zwischen 50 bis 58 tritt aufgrund erhöhter PV-Erzeugung auf. Flexibilitätsanbieter (Agent\_Nr.\_Fahrplan-Nr.), die ihre Last zu diesem Zeitpunkt erhöhen oder ihre Erzeugung senken können, werden kontrahiert. Da zur Lösung eines Netzengpasses Differenzfahrpläne der Anlagenbetreiber betrachtet werden, sind Nachholeffekte ebenfalls abgebildet und können gegebenenfalls zur Deckung eines Flexibilitätsbedarfs in die andere Richtung genutzt werden.

In den späteren Abendstunden (Zeitschritt 65 - 74) hat der Netzbetreiber einen Bedarf nach negativer Flexibilität (Steigerung der Einspeisung/ Reduktion der Ausspeisung), da z.B. schrittweise Elektrofahrzeuge zum Laden angeschlossen werden. Zur Deckung dieses Bedarfs wird unter anderem der fünfte Alternativfahrplan des in der Laborumgebung abgebildeten Gebäudes ausgewählt (blau, Agent\_1\_5), welcher den Ladezeitpunkt des Elektroautos um vier Zeitschritte verschiebt. Die Informationen über ausgewählte Fahrpläne werden an die Flexibilitätsanbieter übermittelt und sind von diesen umzusetzen.

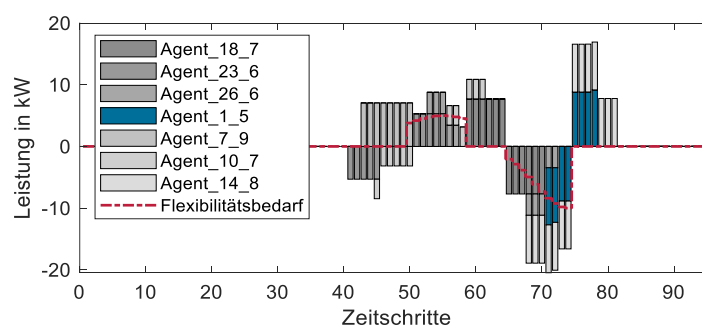


Abbildung 8: Beispielhafter Lösungskandidat für einen fiktiven Netzengpass

## 4 Funktionale Validierung der RCP-Plattform

Die in dieser Veröffentlichung vorgestellte RCP-Plattform wurde mit dem Ziel entworfen, unterschiedliche Betriebsstrategien für Energiemanagementsysteme auf Laborebene zu erproben. Der Funktionstest des EMS-Subsystems und der Gerätesteuerung durch die RCP-Plattform erfolgt anhand der vorherigen Kapitel vorgestellten Flexibilisierungsstrategie. Hierzu werden durch Ansteuerung der Geräte im Labor die Wirkleistungsflüsse eines Gebäudes über einen Tag nachgebildet. Während der Durchführung werden alle Anlagenleistungen mit einem Mehrkanal-Messsystem erfasst und aufgezeichnet. Zur funktionalen Validierung wird der vorgegebene Wirkleistungsverlauf für jedes Gerät mit dem am Geräteausgang gemessenen Wirkleistungsverlauf verglichen und Abweichungen analysiert. Anschließend wird durch die Addition der gemessenen Geräteverläufe die Residuallast für das fiktive Gebäude berechnet und mit dem vor Versuchsbeginn durch die Flexibilitätsplattform gewählten Residuallastverlauf verglichen. Der genutzte Versuchsaufbau ist auf Abbildung 9 dargestellt und umfasst die in Kapitel 2.2 aufgeführten Geräte. Der Schaltschrank stellt den Netzanschlusspunkt dar und verbindet alle Geräte AC-seitig.

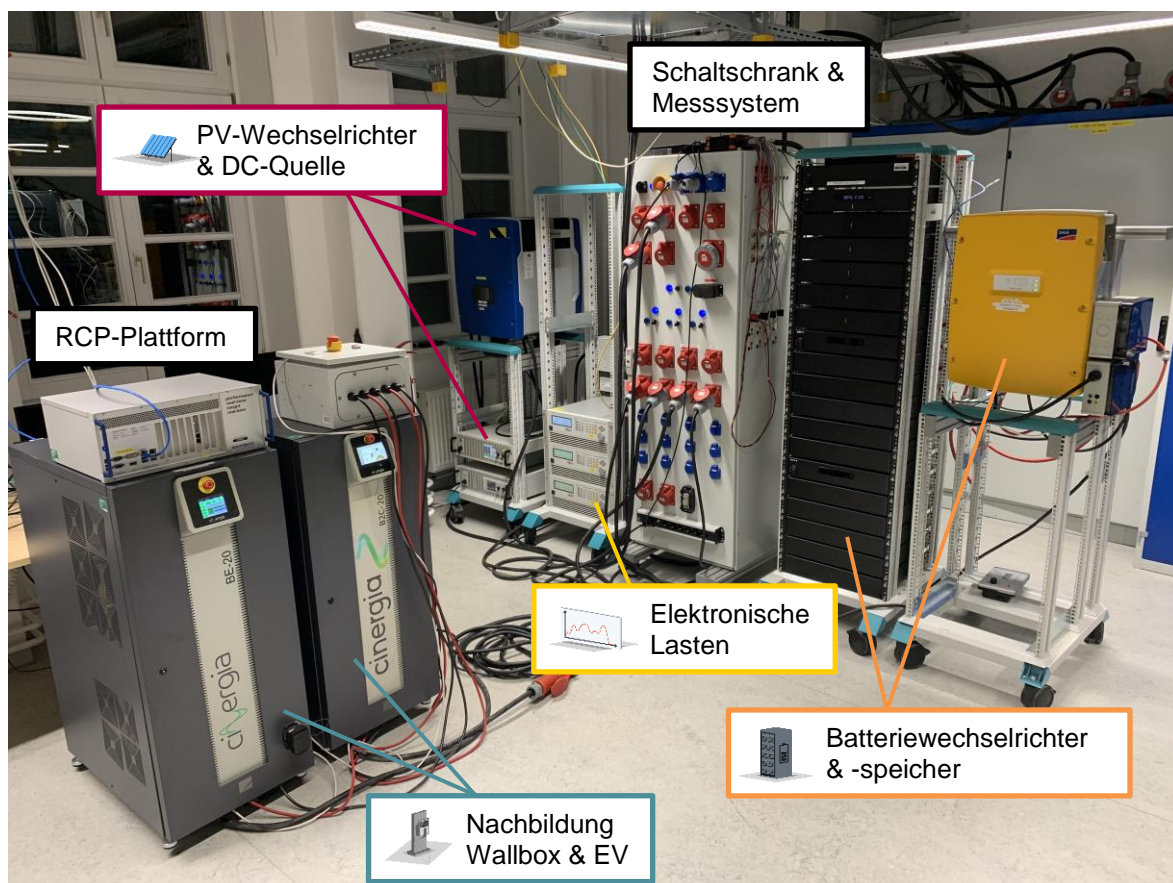


Abbildung 9: Versuchsaufbau mit den von der RCP-Plattform gesteuerten Anlagen

### 4.1 Versuchsszenario

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wird aus den in [7] veröffentlichten Profildaten ein einzelner Tag ausgewählt an dem ein Leistungsüberschuss zur Mittagszeit durch die PV-Anlage zum Laden des Batteriespeichers zu Verfügung steht. Durch die Auswahl sind

Einspeisekurve und Grundlastkurve des Gebäudes definiert. Als Anwesenheitszeitraum für das zu ladende EV wird ein Zeitraum von 18:00 bis 23:45 Uhr definiert. Diese Vorgaben nutzt das EMS-Subsystem in Form einer idealen Prognose um Fahrpläne nach der in Kapitel 3.1 vorgestellten Methodik zu generieren, zu bepreisen und an die Flexibilitätsplattform zu übertragen. Die Auswahl eines passenden Fahrplans seitens der Flexibilitätsplattform erfolgt anhand der zuvor auf Abbildung 8 dargestellten Bedarfskurve. Die Simulationsschrittweite des Simulink-Modells auf der RCP-Plattform wird auf 1 Sekunde in Echtzeit festgelegt, d.h. alle Geräte erhalten pro Sekunde einen neuen Soll-Wirkleistungswert. Die Simulations- bzw. Testdauer zur Abbildung des 24 h-Tags wird auf 40 Minuten = 2400 Sekunden in Echtzeit festgelegt (Zeitraffer-Testmodus). Das Sollwertprofil für die nicht durch einen Fahrplan definierte Gebäudegrundlast liegt in 1-minütlicher Auflösung vor, d.h.  $24 \cdot 60 = 1440$  Werte für 24 h. Es wird für die Nachbildung des kompletten Tagesverlaufs in  $1440/40 = 36$ -facher Geschwindigkeit von der RCP-Plattform abgefahren. Die Sollwertvorgabe für die übrigen Geräte erfolgt fahrplanbasiert, d.h. in viertelstündiger Auflösung, was  $1440/15 = 96$  Werten entspricht. In der beschleunigten Testzeit würden sich die fahrplanbasierten Sollwertvorgaben daher nur alle  $15/1440 \cdot 40 \cdot 60 = 25$  Sekunden ändern. Statt 25 Sekunden lang einen identischen Sollwert vorzugeben, wird vom EMS-Subsystem zwischen den Werten linear interpoliert.

## 4.2 Validierung und Auswertung

Auf Abbildung 10 sind die von der RCP-Plattform vorgegebenen und die gemessenen Wirkleistungsverläufe der einzelnen Anlagen (Grundlast, Wallbox/EV, PV-Anlage und Batteriespeicher) dargestellt. Die Leistungsverläufe stellen in Summe das elektrische Verhalten des nachgebildeten Gebäudes dar. Da es sich bei der vorgestellten RCP-Plattform um eine Steuerung im Sinne eines offenen Regelkreises handelt, sind Abweichungen das Ergebnis von Einstellungenauigkeiten (Regelabweichungen) der Geräte selbst sowie durch das Messsystem eingebrachte Messungenauigkeiten. Unter diesen Gesichtspunkten wird auf eine ausführliche Fehlerbetrachtung verzichtet, stattdessen erfolgt die Angabe der mittleren, relativen Messwertabweichung vom Sollwert für jedes Gerät. Anschließend werden Auffälligkeiten beschrieben und mögliche Ursachen analysiert.

Aus den Leistungsverläufen ist qualitativ eine Übereinstimmung zwischen den Vorgaben der RCP-Plattform und den gemessenen Wirkleistungsverläufen der einzelnen Anlagen zu erkennen. Die relativen Fehler zwischen den Sollwert-Vorgaben der RCP-Plattform und den gemessenen Wirkleistungsverläufen betragen 2,7 % für die elektronische Last, 0,2 % für die Nachbildung der Wallbox/EV, 10,2 % für die PV-Anlage und 0,4 % für das Batteriespeichersystem. Den Abweichungen werden folgende Ursachen gegenübergestellt:

1. Die zur Nachbildung der Gebäudegrundlast genutzte Last besteht aus 3 einphasigen Lasten im Master-Slave Betrieb. Am Messsystem stand jedoch nur ein Leistungsmesskanal zu Verfügung, weswegen die Leistung auf Phase L1 gemessen wurde und diese anschließend mit dem Faktor drei multipliziert wurde. Es wird davon ausgegangen, dass eine unsymmetrische Aufteilung der Gesamtlastvorgabe in Kombination mit der einphasigen Messung zu der relativen Abweichung geführt hat.
2. Die Vorgabe der Ladeleistung für das simulierte EV erfolgte DC-bezogen, d.h. die von der RCP-Plattform gesendete Ladeleistung wird durch den aktiven Gleichrichter auf der DC-



Seite des Batterieemulators eingeregelt. Die AC-seitig gemessene Leistungsaufnahme ist daher um den Eigenbedarf des Geräts sowie die Umwandlungsverlusten erhöht. Der Eigenverbrauch wurde vor der Versuchsdurchführung mit 672 W bestimmt und für die Leistungsmessung genullt. Die Gesamteffizienz des aktiven Gleichrichters gibt der Hersteller im technischen Datenblatt mit  $\geq 91\%$  an. Bezogen auf die 11 kW Sollwert-Vorgabe ab Zeitschritt 75 kann die gemessene AC-Leistungsaufnahme damit bis auf  $11\text{ kW} \cdot 1,09 = 11,99\text{ kW}$  ansteigen. Der nach Abzug des Eigenbedarfs gemessene Spitzenwert von 11,72 kW liegt unterhalb dieses Grenzwerts.

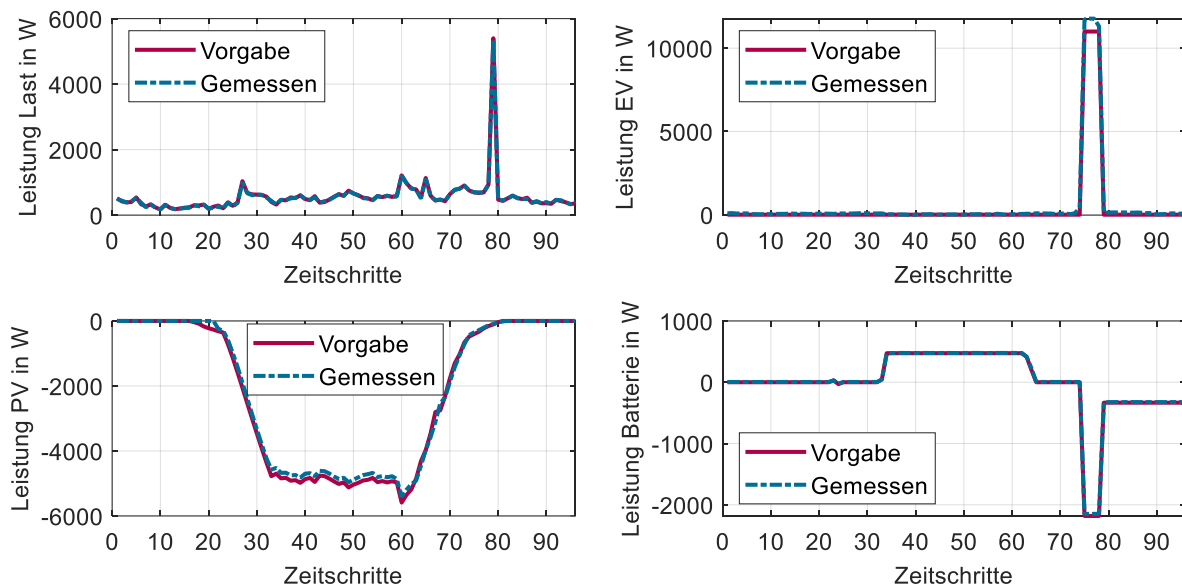


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen mit den durch die RCP-Plattform vorgegebenen Anlagen-Leistungen

3. Für die PV-Anlage erfolgt die Sollwertvorgabe in Form von prozentualen Einstrahlungswerten. Die Soll-Wirkleistungsverläufe werden hierzu vom Geräte-Subsystem in Einstrahlungswerte umgerechnet und an die DC-Quelle übertragen. Da die Messung der Wirkleistung aus Gründen leichter Zugänglichkeit AC-seitig erfolgte, fallen die Messwerte um den Eigenverbrauch sowie den (arbeitspunktabhängigen) Wirkungsgrad des Wechselrichters niedriger aus. An den Zeitschritten 17 bis 22 ist zu erkennen, dass der PV-Wechselrichter mit der Einspeisung verzögert beginnt. Die von der DC-Quelle ausgegebene Spannung lag während dieses Intervalls unterhalb der Mindesteinschaltspannung des Wechselrichters. Nach Bereinigung des mittleren relativen Messfehlers um die Zeitschritte 17 bis 22 beträgt die relative mittlere Abweichung 4,7 %. Umwandlungsverluste in dieser Höhe liegen im üblichen Wirkungsgradkennfeld für das verwendete Wechselrichtermode.
4. Für den eingesetzten Batteriewechselrichter stellt der Hersteller keine Angaben zur Einstellgenauigkeit bereit. Der größte absolute Fehler wurde während der Entladephase beginnend mit dem Zeitschritt 75 zu  $2148\text{ W} - 2181\text{ W} = 33\text{ W}$  bestimmt. Dies entspricht einer maximalen relativen Abweichung von 1,5 %.

Insgesamt kann durch die koordinierte, simultane Steuerung der Anlagen das elektrische Gebäudeverhalten hinreichend genau abgebildet werden. Abschließend werden die

gemessenen und die Sollwert-Leistungsverläufe der Anlagen jeweils addiert um die gemessene und vorgegebene Residuallast miteinander zu vergleichen (siehe Abbildung 11).

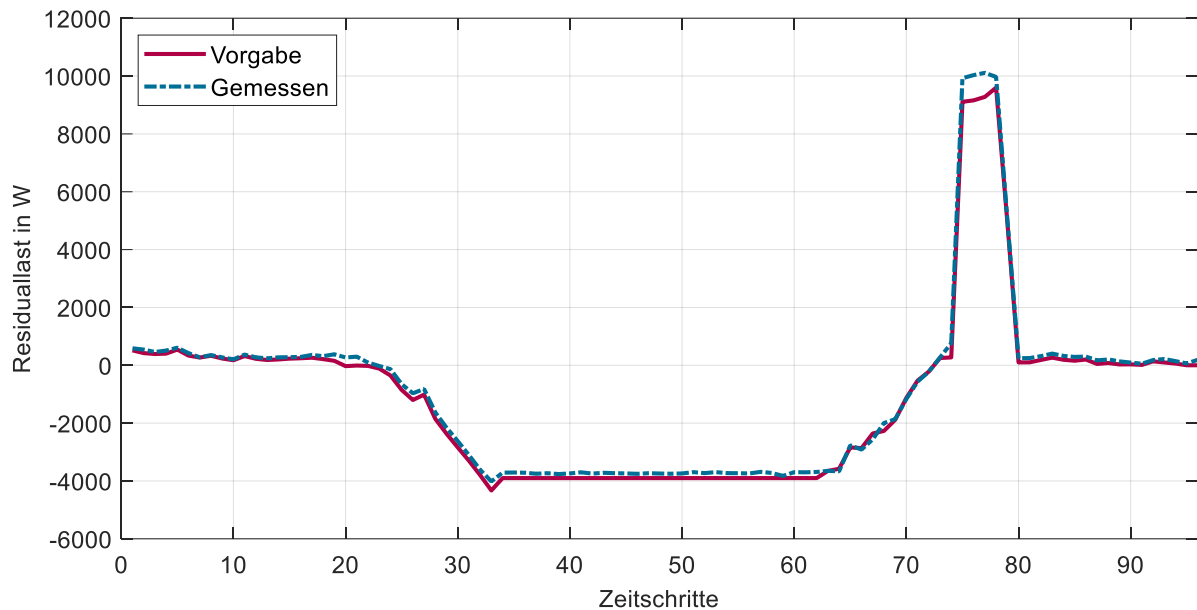


Abbildung 11: Vergleich der gemessenen und der von der Flexibilitätsplattform ausgewählten Residuallast

Der Residuallastverlauf zeigt den Ladevorgang des Elektrofahrzeugs beginnend mit dem Schritt 76, was dem in Kapitel 3.2 von flex-control ausgewählten Alternativfahrplan AF5 entspricht. Abweichungen zwischen der Residuallast-Vorgabe und gemessenen Residuallast resultieren aus den zuvor analysierten Abweichungen der einzelnen Geräteverläufe. Die in Kapitel 3 vorgestellte Prozesskette zur Flexibilisierung von Gebäuden, angefangen bei der Bestimmung der Referenzfahrpläne, der anschließenden Generierung und Übermittlung der Alternativfahrpläne an die Flexibilitätsplattform sowie die Ansteuerung der Anlagen durch das EMS-Modell nach Rückmeldung durch die Flexibilitätsplattform wurde erfolgreich umgesetzt. Sowohl die ethernetbasierte Kommunikation als auch die Protokoll-Encoder/Decoder innerhalb der Geräte-Subsysteme konnten funktional validiert werden.

## 5 Zusammenfassung

Ziel dieser Veröffentlichung ist die Beschreibung und funktionale Validierung einer Steuerungsplattform nach dem Rapid Control Prototyping Ansatz, mit denen Betriebsstrategien von EMS auf Laborebene mittels realer Anlagen erprobt werden können. Durch die Abbildung von realen Anlagen als standardisierte Geräte-Subsysteme kann das Gesamtsystemmodell je nach Versuchsaufbau bedarfsgerecht und zeiteffizient angepasst werden. Neue Betriebsstrategien können mittels grafischer Programmierung umgesetzt und im Labor erprobt werden. Zuvor simulativ implementierte Betriebsstrategien können durch eine einheitliche Toolchain mit verhältnismäßig geringen Portierungsaufwand getestet werden. Ein Labortest mit realen Anlagen anstatt Simulationsmodellen zeichnet sich durch die Berücksichtigung aller geräteseitig ggf. vorhandenen, technischen Randbedingungen aus, die Simulationsmodelle nur mit erhöhtem Aufwand abbilden können.

Zur Veranschaulichung wurde der aus dem Forschungsvorhaben flexess motivierte Anwendungsfall der fahrplanbasierten Flexibilisierung von Anlagen eines Gebäudes



präsentiert. Das elektrische Verhalten des Gebäudes wurde durch reale Geräte im Labor abgebildet. Die RCP-Plattform bildet das Gebäude-EMS ab und übernimmt die Wirkleistungsvorgaben für die Geräte mittels Ethernet-Schnittstellen zur Nachbildung eines Typtages. Neben der erfolgreichen, synchronen Ansteuerung der Anlagen konnte die vorgestellte Prozesskette zur Flexibilisierung des Gebäudes, angefangen bei der Generierung der Fahrpläne durch das EMS über das Übertragen und Anbieten der Fahrpläne gegenüber der Flexibilitätsplattform bis hin zur Umsetzung des gewünschten Residuallastverlaufs durch die Anlagen erfolgreich validiert werden.

## 6 Ausblick

Die vorgestellte RCP-Plattform stellt eine Basis für die Untersuchung zukünftig relevanter Forschungsfragen für Gebäude-Energiemanagementsysteme dar. Zu den geplanten funktionalen Erweiterungen zählt die Berücksichtigung der Wärmeerzeugung, -verbrauchs und -speicherung mittels Wärmepumpen und Pufferspeichern. Aus diesem Grund soll die im Energiemanagementlabor des elenias installierte Luft/Wasser-Wärmepumpe als Gerätemodell in die RCP-Plattform integriert werden. Als Herausforderung sind hier die im Vergleich zur elektrischen Seite verhältnismäßig großen Zeitkonstanten beim Einstellen von gewünschten Temperaturzuständen zu nennen. Zur Nachbildung variierender Umgebungsbedingungen für die Wärmepumpe wird die Integration von Außentemperaturprofilen in den Szenariomanager zur Vorgabe an eine bestehende Klimakammer angestrebt. Die in dieser Veröffentlichung genutzte Anordnung aus zwei bidirektionalen DC-Quellen für die Nachbildung der Wallbox und des EV stellt eine in [8] erarbeitete Ersatzlösung dar, da die eigentlich geplante Anordnung aus einer DC-Quelle und einem realen EV mit Berücksichtigung einer normgerechten Fahrzeug-/Ladesäulenkommunikation nach [9] aufgrund nicht rechtzeitig zu lösender technischer Schwierigkeiten nicht verwendbar war. Diese realitätsnähere Lösung soll im Nachgang in den Gesamtsystemaufbau integriert werden. Zusätzlich soll die Implementierung von im Bereich der Gebäudeautomatisierung und des Smart-Meterings relevanten Kommunikationsprotokollen (z.B. EEBus) auf möglichen Nutzen evaluiert werden. So könnten Fragestellungen hinsichtlich der Anbindung von Gebäude-EMS an Smart-Meter-Infrastruktur untersucht werden.

## Danksagung

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die vorliegenden Erkenntnisse wurden im Rahmen des BMWK-geförderten Verbundvorhabens „flexess – Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Ausschöpfung zukünftiger Flexibilitätspotentiale vollelektrischer Haushalte, Gewerbe, Industrien und Elektromobilität“ (Förderkennzeichen: 03EI4005A) ermittelt. Die Autoren danken dem BMWK für die finanzielle Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren und spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Projektkonsortiums flexess wider.

## 7 Referenzen

- [1] Energy Saxony e.V., "EU-Aktionsplan für die Digitalisierung des Energiesektors – Roadmap veröffentlicht" Pressemitteilung, <https://www.energy-saxony.net/aktuelles/eu-aktionsplan-fuer-die-digitalisierung-des-energiesektors-roadmap-veroeffentlicht.html> (Aufgerufen 07.Dezember, 2021).
- [2] Hadlak et al., M., "Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Ausschöpfung zukünftiger Flexibilitätspotenziale vollelektrischer Haushalte, Gewerbe, Industrien und Elektromobilität", Whitepaper, S. 54, [https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute\\_Fakultaet\\_5/Elenia/Forschung/Forschungsprojekte/flexess/dokumente/flexess\\_AP\\_1\\_2\\_Potenzialanalyse.pdf](https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_5/Elenia/Forschung/Forschungsprojekte/flexess/dokumente/flexess_AP_1_2_Potenzialanalyse.pdf) (Aufgerufen 07.Dezember, 2021).
- [3] Bélanger et al., J., "The What, Where and Why of Real-Time Simulation" S. 40, [https://blobdevweb.opal-rt.com/medias/L00161\\_0436.pdf](https://blobdevweb.opal-rt.com/medias/L00161_0436.pdf) (Aufgerufen 09.Dezember, 2021).
- [4] Martins, Rodrigo & Musilek, Petr & Hesse, Holger. (2016). Optimization of photovoltaic power self-consumption using linear programming. 1-5. 10.1109/EEEIC.2016.7555581.
- [5] Hinrichs, C.: Selbstorganisierte Einsatzplanung dezentraler Akteure im Smart Grid, Universität Oldenburg, 2014
- [6] Hadlak, M., Reinhold, C., Ries, J., Engel, B.: Optimized Schedule-Based Operation Planning of Flexibilities, INREC, digital, 15.-16. September 2021
- [7] J. Bergner, J. Weniger, T. Tjaden, V. Quaschnig: Verbesserte Netzintegration von PV-Speichersystemen durch Einbindung lokal erstellter PV- und Lastprognosen. 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie. Bad Staffelstein, 2015
- [8] Wussow, J., Di Modica, G., Engel, B.: Grid-Oriented Charging of Electric Vehicles as Approach for Increasing Penetration in Residential Areas, ETG Kongress, Esslingen am Neckar, 8.- 9. Mai 2019
- [9] Di Modica, G., Choi, W., Dietrich, T., Ebbert, L., Effenberger, R., Meins, J., Schillingmann, H., Wussow, J., Engel, B., Henke, M.: LISA4CL - Development and Grid Integration of an Inductive Charging System for City Logistics, NEIS 2021 - Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, NEIS 2021 - Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg digital, 13.-14. September 2021, S. 180-185. ISBN 978-3-8007-5651-3