

Abschlussbericht

**Resilientes Energiemanagement für
Microgrids mit Schwerpunkt auf volatilen
erneuerbaren Erzeugern**

**Fördermaßnahme: Anwendungsorientierte nichtnukleare FuE
im 7. Energieforschungsprogramm**

Förderbereich: Stromnetze

Akronym: RESUME

Förderkennzeichen: 03EI6042A/B

Berichtszeitraum: 01.02.2021 bis 31.07.2024

Verbundkoordinator

Prof. Dr.-Ing. Jörg Raisch

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Regelungssysteme
Sekretariat EN 11
Einsteinufer 17
10587 Berlin

Telefon +49 (0)30 314-22945
Telefax +49 (0)30 314-21137
E-Mail raisch@control.tu-berlin.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Berlin, 17. März 2025

Unterschrift

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den folgenden Autoren.

- Steffen Hofmann (Fachgebiet Regelungssysteme, Technische Universität Berlin)
- Ujjwal Pratap (Fachgebiet Regelungssysteme, Technische Universität Berlin)
- Jörg Raisch (Fachgebiet Regelungssysteme, Technische Universität Berlin)
- Erich Bosch (Autarsys GmbH)

Inhaltsverzeichnis

1. Aufgabenstellung	1
1.1. Gesamtziel des Vorhabens	1
1.2. Bezug zu förderpolitischen Zielen	2
1.3. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele	4
2. Voraussetzung des Vorhabens	7
2.1. Fachgebiet Regelungssysteme	7
2.2. Autarsys GmbH	8
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	9
3.1. 1. Halbjahr 2021	9
3.2. 2. Halbjahr 2021	10
3.3. 1. Halbjahr 2022	11
3.4. 2. Halbjahr 2022	12
3.5. 1. Halbjahr 2023	12
3.6. 2. Halbjahr 2023	13
3.7. 1. Halbjahr und Juli 2024	14
4. Wissenschaftlich-technischer Stand	19
4.1. Stand von Wissenschaft und Technik	19
4.1.1. Betrieb und Regelung von Microgrids (MGs)	19
4.1.2. EMS-Entwurf	20
4.1.3. Verwandte Arbeiten und deren Limitierungen	25
4.2. Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste	27
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	29
5.1. Zusammenarbeit der Partner	29
5.1.1. Notwendigkeit der Teilnahme am Verbund	29
5.1.2. Arbeitsteilung	30
5.2. Zusammenarbeit mit Dritten	30
5.2.1. Fachgebiet Regelungssysteme	31
5.2.2. Autarsys GmbH	31
6. Erzielte Ergebnisse	33
6.1. Definition der Unsicherheiten und kritischen Ereignisse (AP 1)	33
6.2. Auswahl geeigneter Reglerentwurfsverfahren und Bewertungskriterien (AP 2)	37
6.3. Erweiterung einer Simulations-Software (AP 3)	37
6.3.1. Erweiterung der bestehenden Simulationssoftware	37

6.3.2. Grafisches Web-basiertes Frontend	42
6.3.3. Simulationsbeispiel	49
6.4. Erstellung von Test-Szenarien aus Felddaten (AP 4)	54
6.5. Robustifizierung der zentralen und verteilten Energiemanagementsystem (EMS)e für Vorhersageunsicherheiten (AP 5)	55
6.5.1. Beschreibung des MGs	55
6.5.2. Robustes Sättigungs-bewusstes Minimax Model Predictive Control (MPC) Energiemanagement	59
6.5.3. Simulationsbeispiel	62
6.5.4. Robustes Multi-Szenario sättigungs-bewusstes Minimax MPC Energie- management	66
6.5.5. Sättigungsbewusstes MM MPC-EMS mit Berücksichtigung der Leis- tungsgrenzen der Übertragungsleitungen	71
6.6. Resilienter zentraler und verteilter EMS-Entwurf (AP 6)	79
6.6.1. Dezentrales Multi-Agenten EMS	82
6.7. Digital-Twin-HiL-Tests der EMSe – Parallelbetrieb mit operativen MGs (AP 7)	85
6.8. Lab-in-the-Loop Feldtest (AP 8)	88
7. Zahlenmäßiger Nachweis	93
7.1. Fachgebiet Regelungssysteme	93
7.2. Autarsys GmbH	94
8. Geleistete Arbeit	99
9. Voraussichtlicher Nutzen	101
9.1. Fachgebiet Regelungssysteme	101
9.2. Autarsys GmbH	102
10. Fortschritte Anderer	105
10.1. Wissenschaftlicher Fortschritt	105
10.2. Technischer Fortschritt	108
11. Veröffentlichung der Ergebnisse	109
11.1. Abschlussarbeiten	109
11.2. Bestehende Veröffentlichungen	110
11.3. Geplante Veröffentlichungen	110
A. Literaturverzeichnis	113
B. Akronyme	127

1. Aufgabenstellung

1.1. Gesamtziel des Vorhabens

Das Energiekonzept der Bundesregierung sieht vor, dass 2050 der Anteil erneuerbar erzeugter Energie am Bruttoverbrauch an elektrischer Energie mindestens 80% betragen soll. Damit geht eine Veränderung der Netzstruktur von der Versorgung durch Großkraftwerke hin zu einer großen Zahl kleinerer verteilter Erzeugereinheiten einher. Außerdem weisen viele der verteilten Energieerzeuger wie Windkraftanlagen und Solaranlagen eine hohe Volatilität in der verfügbaren Leistung auf. Einerseits stellen diese geänderten Bedingungen den Betrieb der Netze vor neue Herausforderungen. Andererseits eröffnet die verteilte Anordnung der Erzeuger auch Chancen für einen räumlich nahen Ausgleich von Stromangebot und -Nachfrage. Ebenfalls wird ein "Bottom-up" Ansatz der Elektrifizierung für abgechiedene Gebäude und Komplexe, ländliche Gebiete, etc. ermöglicht.

Zur erfolgreichen Einbindung erneuerbar Erzeuger ist das Microgrid (MG)-Konzept ein vielversprechender Ansatz. In einem MG findet ein Ausgleich zwischen Lasten und Erzeugern typischerweise in einem kleinen geografischen Bereich statt. Wenn bzw. während ein MG nicht mit einem größeren Stromnetz verbunden ist spricht man von einem Inselbetrieb. Ein Energiemanagementsystem (EMS) kann für den sicheren und effizienten Betrieb eines MGs sorgen. Da dabei Aspekte wie Kommunikation, Echtzeit-Planung und Optimierung eine wesentliche Rolle spielen, kann man von einem sog. Smart Grid sprechen. Weiterhin kann zwischen einem zentralen (Planung durch eine zentrale Reglereinheit) und einem verteilten (Planung durch mehrere interagierende Reglereinheiten) EMS unterschieden werden.

In vorausgegangener Forschung haben wir auf Basis der Theorie optimaler Steuerung und modellprädiktiver Regelung (Model Predictive Control, MPC) ein zentrales und ein verteiltes EMS entworfen.¹ Der Entwurf zielte dabei auf MGs mit einem hohen Anteil erneuerbar erzeugter Energie ab. Neben den erneuerbaren Energiequellen wurden Batteriespeicher und konventionelle Generatoren berücksichtigt. Die entworfenen EMSe koordinieren die Erzeugung und Speicherung von Energie mit dem Ziel, den Anteil konventionell erzeugter Energie zu minimieren, jedoch unter der strikten Vorgabe, stets die durch die Verbraucher angeforderte Leistung bedienen zu können. Die EMSe verwenden Wettervorhersagen und eine auf Optimierung basierende MPC. Die Ausgereiftheit der entwickelten EMSe ist an einem Hardware-in-the-Loop (HiL)-Teststand bei der Autarsys GmbH demonstriert worden.

Während des Entwicklungsprozesses haben sich Herausforderungen aufgezeigt, die für einen Einsatz in realen Netzen bewältigt werden müssen und daher weiterer Auseinan-

¹Ein Teil dieser Forschung wurde durch das BMWi gefördert im Projekt "Verteiltes Energiemanagement für Microgrids mit hohem Anteil erneuerbarer Energien (EMERGE)", Förderkennzeichen: 0324024A.

1. Aufgabenstellung

dersetzung bedürfen. Unseres Erachtens sind diese aus systemtheoretischer Sicht relevant und ihre Lösung für das Vorantreiben des Technologie-Reifegrads (Technology Readiness Level, TRL) der MG-Regelung unabdingbar. Im Rahmen unserer Forschung zeigte sich, dass insbesondere die folgenden Einflüsse einen zuverlässigen und effizienten praktischen Betrieb eines MGs behindern können: 1) Mangelnde Qualität oder Verfügbarkeit der für die Wetter- und Lastvorhersage benötigten Informationen. 2) Mögliche Fehlfunktionen der Anlagen und der Infrastruktur (inklusive Kommunikationsnetzwerk). Eine Maßnahme, die es erleichtert, den MG-Betrieb trotz dieser Störungen aufrecht erhalten zu können, besteht in der Erhöhung der installierten Energie-Speicherkapazität und der jederzeit verfügbaren Leistung konventioneller Generatoren. Dies konkurriert jedoch mit ökonomischen und ökologischen Zielen der jeweiligen Anwendung und den Zielen der Energiewende.

Im Resilientes Energiemanagement für Microgrids mit Schwerpunkt auf volatilen erneuerbaren Erzeugern (RESUME)-Projekt war daher beabsichtigt, das EMS-Design durch die folgenden Ansätze zu verbessern: a) Robustifizierung gegenüber unsicherheitsbehafteten Vorhersagen. b) Ausstattung mit Fallback-Strategien für Fehlfunktionen bzw. Ausfälle, insbesondere des Kommunikationsnetzwerks. c) Betrachtung der Herausforderungen und der Vor- und Nachteile von zentralen und verteilten EMS-Designs in Bezug auf a) und b). d) Untersuchung des Einflusses des MG-Aufbaus, insbesondere der Kapazität und Verteilung der Batteriespeicher, auf das EMS-Design c) und die Aufgaben a) und b). Eine Herausforderung besteht darin, die genannten Aufgaben mit einer möglichst geringen Speicherkapazität lösen zu können.

Um den Technologie-Reifegrad (TRL) des entwickelten Systems zu erhöhen, war beabsichtigt, Benchmark-Bewertungen auf Basis echter Daten und Szenarios von in Betrieb befindlichen MGs einzubeziehen. Diese Vorgehensweise sollte den Weg zur Marktreife ebnen, und im Rahmen des Projekts insbesondere in der praktischen Erprobung im Feldtest auf einem von der Autarsys GmbH betriebenen MG münden. Um das zu erreichen, planten das Fachgebiet Regelungssysteme (FGRS) und die Autarsys GmbH ihre bestehende Kooperation fortzusetzen und auf den Grundlagen und Erkenntnissen des vorangegangenen Projekts aufzubauen.

1.2. Bezug zu förderpolitischen Zielen

Das Projekt im Bereich angewandte Forschung und Entwicklung passte unseres Erachtens sehr gut zu den Zielen des 7. Energieforschungsprogramms. In der entsprechenden Bekanntmachung der Förderung im 7. Energieforschungsprogramm (im Folgenden mit [FBM] bezeichnet) ist eines der erklärten Ziele, "... den Weg [zu] ebnen für einen hohen Anteil erneuerbarer Energien im Energieversorgungssystem". Um das und andere Ziele zu erreichen, wird gefordert,

"... einen deutlich erweiterten und autonomen Betrieb der Versorgungsnetze gegenüber dem aktuellen Stand mittelfristig zu ermöglichen. Dabei stellt die Sicherstellung einer hohen Versorgungsqualität das übergeordnete Ziel dar, unter dessen Beibehaltung die Kosten zu minimieren sind." ([FBM], Seite 16).

Das FGRS und die Autarsys GmbH haben mit der Entwicklung eines Vorhersage- und Optimierungsbasierten EMS bereits einen wesentlichen Beitrag zu diesem Ziel geleistet. Das Projekt sollte einen weiteren entscheidenden Beitrag leisten, indem das zuvor entwickelte EMS einerseits im regelungstechnischen Sinn robustifiziert und andererseits zur Berücksichtigung und Bewältigung kritischer Ereignisse ertüchtigt werden sollte. In der Beschreibung des 7. Energieforschungsprogramms (im Folgenden mit [7. EFP] bezeichnet) wird die Bedeutung damit zusammenhängender Aspekte explizit hervorgehoben. So wird festgestellt, dass

“[...] mit zunehmender fluktuierender Einspeisung und digitaler Vernetzung die technische Robustheit und Resilienz des Versorgungssystems eine strategisch wichtige Aufgabe [...]” ([7. EFP], Seite 13).

“Die Digitalisierung ist dabei sowohl Chance als auch Herausforderung. Das Ziel sind resiliente Stromnetze als zentrale Komponente eines sicheren Energiesystems.” ([7. EFP], Seite 49).

Außerdem war beabsichtigt, zu untersuchen, in welchem Umfang Einsparungen bei der installierten Batteriekapazität möglich sind, ohne den sicheren Betrieb zu gefährden.

Das Vorhaben ist hauptsächlich dem Förderschwerpunkt “III. Systemintegration” aus der Bekanntmachung [FBM] zuzuordnen, insbesondere dem Förderpunkt (FP) “3.11 Stromnetze”, als auch dem FP “3.12 Stromspeicher”. Es bestehen aber Verbindungen zu anderen Förderbereichen wie “3.1 Gebäude und Quartiere”, “3.12 Stromspeicher” und “3.16 Digitalisierung der Energiewende” sowie zu der Maßnahme “Reallabore der Energiewende” (FP 3.19). Insbesondere zutreffend sind die FPe 3.11.4 und 3.11.5 ([FBM], Seite 17). In 3.11.4 werden explizit Microgrid-Lösungen genannt.

In [7. EFP] wird festgestellt:

“Von besonderer Bedeutung ist die Ertüchtigung der volatilen erneuerbaren Erzeuger hin zu systemstabilisierendem Verhalten. Denn mit Wegfall regelbarer konventioneller Kraftwerke entfällt auch deren stabilisierende Wirkung auf das Stromnetz.” ([7. EFP], Seite 51).

In diesem Zusammenhang werden auch “[...] Inselnetze mit hohem Anteil erneuerbarer Erzeuger [...]” als zukünftiger Nutzungsfall aufgeführt. Anknüpfend an vorherige Arbeiten der Antragsteller sowie anderer Autoren beabsichtigten wir, die aktive Beteiligung erneuerbarer Erzeugeranlagen an der Frequenzhaltung als integralen Aspekt des Microgrid-Betriebs zu berücksichtigen. Besonders zur Bewältigung kritischer Ereignisse wie z.B. Kommunikationsausfälle erachten wir eine Erhöhung der Autonomie der verteilten Einheiten als sinnvolle Strategie. Das MG kann dann zutreffend als Multiagentensystem (vgl. FP 3.11.5) aufgefasst werden.

Außerdem trifft der Unterpunkt “Resilienz digitalisierter Netze durch und trotz IKT” (unter FP 3.11.4) wesentliche Aspekte des geplanten Vorhabens. Einerseits kann beispielsweise die Abfrage von Systemzuständen mittels IKT eine vorausschauende Planung mit Bildung Robustheitsfördernder Reserven ermöglichen. Andererseits gibt es gute Gründe, die Versorgungsqualität nicht von einer ständigen Verfügbarkeit der Kommunikation abhängig zu machen. Diese kann selbst bei bestmöglicher algorithmischer Übertragungsfehler-

1. Aufgabenstellung

Toleranz und Absicherung der IKT-Systeme nicht garantiert werden, wenn der Kommunikationskanal nicht physisch ausreichend geschützt bzw. abgesichert werden kann. Beispielsweise können bei Übertragung der Daten durch das Internet der Kanal bzw. die Ressourcen der IKT-Systeme durch die Kommunikation anderer Teilnehmer überflutet werden (z.B. bei einer sog. Denial Of Service Attacke). Dies betrifft auch drahtlose Kommunikation über Mobilfunknetze. Aber auch bei einer zweckgebundenen drahtlosen Übertragung kann die Funkverbindung Störungen ausgesetzt sein. Auch FP 3.11.5 ([FBM]) befasst sich mit der Bedeutung von IKT und deren Sicherheit. Eines der erklärten Ziele des angestrebten Projekts ist es daher, die zuvor entwickelten Reglerkonzepte so weiterzuentwickeln, dass der bestmöglichen Nutzen aus der Kommunikation gezogen werden kann, ohne ein unzumutbares Risiko für die Versorgungsqualität einzugehen. Hierzu sollten in der ersten Projektphase zunächst Annahmen über die Verfügbarkeit der Kommunikationskanäle (vgl. die Einordnung der IKT als "neues Betriebsmittel", [7. EFP], Seite 51) und anderer Betriebsmittel getroffen und mathematisch modelliert werden. Anschließend sollte das EMS gegen Ausfälle im Rahmen dieser Annahmen robustifiziert werden.

Mit dem zuvor abgeschlossenen EMERGE-Projekt hatte das vom FGRS und der Autarsys GmbH entwickelte EMS einen Technologie-Reifegrad (TRL) von 5 erzielt. Der mit dem RESUME-Projekt angestrebte TRL kann mit 6 bis 7 beziffert werden, da das unter Einbeziehung der zusätzlichen Anforderungen "gehärtete" EMS in einem von der Autarsys GmbH betriebenen real existierenden MG als Pilotvorhaben erprobt werden sollte. Man kann somit von der Transformation eines real existierenden MGs in ein "Reallabor der Energiewende" (FP 3.19) sprechen. Hierfür sollte unter Leitung der Autarsys GmbH ein Netzleittechniksystem (vgl. [FBM], FP 3.11.1) für MGs entwickelt werden. Dieses sollte einen reibungslosen simulativen Parallelbetrieb ("Digital Twin" des realen MG) und anschließend die Einführung in den Realbetrieb und die Überwachung ermöglichen und somit Vertrauen für den praktischen Einsatz von hochentwickelten regelungstechnischen Methoden schaffen.

1.3. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Ziel des gemeinsamen Projekts war die Weiterentwicklung von zentralen und verteilten Optimierungs-basierten EMSen für MGs mit hohem Anteil erneuerbarer Energie (EE). Das EMS sollte einerseits gegenüber Vorhersageunsicherheiten robustifiziert und andererseits gegenüber kritischen Ereignissen abgesichert werden. Mit kritischen Ereignissen sind hier z. B. usfälle von Erzeugereinheiten und Infrastruktur, und insbesondere Ausfälle von Kommunikationsverbindungen gemeint. Es wurden folgende Neuerungen angestrebt:

1. Die folgenden Ziele basieren auf den im Projekt EMERGE entwickelten EMSen:
 - a) Es werden EMSe für Netze mit hohem Anteil EE weiterentwickelt, die den folgenden Anforderungen genügen.
 - i. Sie erlauben den kontinuierlichen Zubau von EE mit automatischer Anpassung des EMS.
 - ii. Sie ermöglichen die nahtlose Integration von MGs in die bestehende Netzinfrastruktur.

1.3. Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

- iii. Sie berücksichtigen EE und Speichereinheiten aktiv in der Netzregelung.
 - b) Es werden sowohl zentrale als auch verteilte Ansätze zum Energiemanagement von MGs berücksichtigt.
 - c) Die erarbeiteten Energiemanagementsysteme tragen in Netzen mit hohem Anteil EE aktiv zur Verringerung der „Must-Run“-Leistung bei.
 - d) Durch einen modellbasierten Ansatz lassen sich neue Algorithmen zum Energiemanagement im Hardware-in-the-Loop Simulator frühzeitig, kostengünstig und mit geringem Risiko auf realen Steuergeräten testen.
2. Durch die folgenden Ziele sollen die EMSe „gehärtet“ und noch bestehende Lücken auf dem Weg zur Marktreife geschlossen werden:
- a) Die verwendeten Regelalgorithmen sollen robust gegenüber Unsicherheiten in den Wetter- und Lastvorhersagen sein, also
 - i. die Einhaltung bestimmter Vorgaben für ein Spektrum von zukünftigen Szenarien garantieren oder sehr wahrscheinlich machen und
 - ii. dabei nach ökonomischen bzw. ökologischen Maßstäben planbar gute Ergebnisse erzielen.
 - b) Die EMSe sollen resilient sein, d.h.
 - i. trotz des möglichen Auftretens von kritischen Ereignissen, wie z. B. einem Ausfall von Erzeugereinheiten, und insbesondere dem Ausfall von Kommunikationsverbindungen, in der Lage sein, einen sicheren und möglichst ökonomischen bzw. ökologischen Betrieb des MGs aufrechtzuerhalten.
 - ii. Es sollen also den EMS-Entwurf betreffende Aufgaben zur Absicherung des MG-Betriebs gegen derartige Störungen gelöst werden.
 - c) Aspekte des MG-Designs und der Auslegung der Komponenten, insbesondere die Größe der Energiespeicher, können sich auf die geforderten Robustheits- und Resilienzeigenschaften auswirken. Deshalb soll der Zusammenhang zwischen solchen Designaspekten und dem EMS-Entwurf untersucht und wenn möglich eine Kostenreduktion erzielt werden.
 - d) Die entwickelten zentralen und verteilten EMS-Lösungen sollen bis zu einem TRL von 6 bis 7 ausgereift sein, und dies soll durch einen Feldtest an einem von der Autarsys GmbH betriebenen MG demonstriert werden.

Somit entsteht ein intelligentes, sicheres und im praktischen Einsatz getestetes Energiemanagement (EM)-Konzept für MGs mit hohem Anteil volatiler erneuerbarer Erzeuger. Es wurde angestrebt, dass die dabei gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse in einem weiter gefassten Feld (z. B. Transformation von Stromnetzen für die Energiewende, Anbindung elektrischer Fahrzeuge an das Stromnetz, größere Klassen cyber-physikalischer Systeme) nützlich sind.

2. Voraussetzung des Vorhabens

Im Folgenden werden die Voraussetzungen des Vorhabens aufgeführt. Diese betreffen insbesondere die Qualifikation der Projektpartner, und sollen unter Anderem durch Nennung von Vorarbeiten und Kooperationen verdeutlicht werden.

2.1. Fachgebiet Regelungssysteme

Aus systemtheoretischer Sicht sind Energiesysteme mit hohem Anteil verteilter EE dem Gebiet komplexer verteilter Systeme zuzuordnen. Das FGRS der Technischen Universität Berlin (TU Berlin) hat in damit zusammenhängenden Bereichen große Erfahrung, insbesondere auf den Gebieten der hierarchischen Regelung, der Regelung ereignisdiskreter und hybrider Systeme, der Regelung verteilter Systeme und der kooperativen, konsensbasierten Regelung, die allesamt methodische Grundlagen für das angestrebte Vorhaben bilden. Neben einem starken Hintergrund in der Theorie von Regelungssystemen betreibt unsere Gruppe auch anwendungsorientierte Forschung in den Bereichen Medizintechnik, Chemische Verfahrenstechnik und Energietechnik.

Wir haben bereits mit einigen Unternehmen zusammengearbeitet (u.a. Siemens AG, Younicos AG, Autarsys GmbH), die im Energiesektor tätig sind. Das FGRS hat im Bereich Stromnetze Regelungsmethoden für Herausforderungen in jeder Regelschicht entwickelt [47, 49, 60, 61], und untersucht auch Ansätze, die sich auf die hierarchische und verteilte Natur des Stromsystems konzentrieren, z.B. im Zusammenhang mit der Schwarm-Elektrifizierung sowie mit Prosumer-orientierten Netzen [60].

Im EMERGE-Projekt haben wir mit der Autarsys GmbH zur Entwicklung von EMSen für MGs zusammengearbeitet. Dabei haben wir Prognoseverfahren für unsicherheitsbehaftete Variablen (z.B. erneuerbare Einspeisung), zentralisierte und verteilte EMSen und fortschrittliche Ansätze zur Berücksichtigung von Unsicherheiten beim Reglerentwurf untersucht. Mit den entwickelten Verfahren kann die Einspeisung aus erneuerbaren Erzeugern gesteigert werden, ohne die Versorgungsqualität zu gefährden [47, 49]. Insbesondere konnte durch Verbesserung eines robusten EMS-Entwurfs eine deutliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit des MG-Betriebs erzielt werden. Wir haben auch erste Strategien erarbeitet, die es dem EMS ermöglichen, Kommunikationsfehler zu bewältigen [66].

Das FGRS steht im Rahmen von Forschungsarbeiten in der Energietechnik in engem Kontakt und Austausch mit dem Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK), der School of Electronics, Electrical Engineering and Computer Science an der Queen's University Belfast und dem Dept. of Electrical Engineering (ESAT), KU Leuven, Belgien. Weitere Informationen über das FGRS finden sich unter www.control.tu-berlin.de.

2.2. Autarsys GmbH

Die Autarsys GmbH wurde im Juni 2013 von den zu gleichen Teilen geschäftsführenden Gesellschaftern Erich Bosch und Matthias Roß gegründet. Erich Bosch hat als technischer Leiter der Wuseltronik GbR und der Skytron energy GmbH, sowie als leitender Ingenieur der Younicos AG langjährige Forschungs- und Entwicklungserfahrung im Aufbau und Betrieb von Energieversorgungssystemen mit hohem Anteil EE. Matthias Roß hat als Geschäftsführer die Entwicklung vielfältiger Projekte im Energie- und Bauwesen verantwortet.

Ziel des Unternehmens ist die Entwicklung, die Produktion und der Vertrieb von integrierten Energieversorgungssystemen, die aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen, sowie rotierenden Generatoren und Energiespeichern bestehen. Aufgrund der hohen Strom-Gestehungskosten in entlegenen Regionen sind solche Systeme mit hohem Anteil EE schon heute eine wirtschaftliche Alternative zur netzfernen Stromversorgung mit Dieselgeneratoren. Die Erfahrung, dass die kurze Lebensdauer von üblichen Blei-Säure-Batterien oft nicht den hohen Investitionsaufwand von Projekten mit solchen Systemen rechtfertigt hat zur Gründung der Autarsys GmbH geführt. Diese hat sich zum Ziel gesetzt, ein modulares, einfach zu konfigurierendes Energieversorgungssystem auf Basis von Lithium-Ionen-Batterien zu entwickeln, das schlüsselfertig geliefert wird. Die Autarsys GmbH hat bereits 25 Microgrids, hauptsächlich basierend auf erneuerbarer Energieerzeugung, in mehreren Ländern in Asien und Afrika und auch in Deutschland aufgebaut. Weiterhin hat Autarsys noch 6 netzgekoppelte Systeme, hauptsächlich zur Erprobung verschiedener Betriebsmodi im Verbundnetz, aufgebaut. Insgesamt hat Autarsys Batteriespeicher mit einer zusammengekommenen Kapazität von ca. 25 MWh in den verschiedenen Systemgrößen von 30 kVA bis 2 MVA an deutsche und internationale Kunden geliefert. Weitere Projekte für die Folgejahre sind darüber hinaus bereits in Planung.

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Autarsys GmbH konzentrieren sich auf MGs in denen rotierende Generatoren teilweise oder vollständig durch netzbildende Energiespeicher ersetzt werden. Der Schwerpunkt liegt, neben konkurrenzfähigen Strom-Gestehungskosten, auf einer Erhöhung der Versorgungssicherheit und Spannungsqualität. Ein wichtiger Baustein dafür ist ein EMS, das die nahtlose Erweiterung vorhandener Systeme und den optimalen Einsatz bestehender Ressourcen erlaubt. Das gemeinsame Projekt leistet hierfür einen wichtigen Beitrag.

Die Autarsys GmbH beschäftigt zur Zeit sechs Ingenieur:innen aus der Energie- und Elektrotechnik, vier Facharbeiter:innen sowie drei Mitarbeiter:innen in Administration und technischem Vertrieb am Sitz in Berlin. Weitere Informationen über die Autarsys GmbH finden sich unter www.autarsys.com.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Folgenden wird, gegliedert nach Arbeitspaketen, der Ablauf des Projekts beschrieben und insbesondere auf Abweichungen von der im Projektantrag vorgenommenen Planung eingegangen. Eine eingehende Beschreibung der erzielten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete findet sich in Kapitel 6. Der geplante zeitliche Ablauf des Projekts mit Meilensteinen findet sich in Tabelle 3.1. Der tatsächliche zeitliche Ablauf findet sich in Tabelle 3.2. Dort ist eingetragen, in welchen Monaten seit Projektbeginn die entsprechenden Teile der Arbeitspakete bearbeitet wurden.

Die verspätete Einstellung von wissenschaftlichem Personal (insbesondere auf der E14-Stelle) und der Wechsel auf der E14-Stelle (der eine Unterbrechung der Besetzung dieser Stelle von 9,5 Monaten beginnend April 2022 verursacht hat), sowie verspätete Einstellung und Personalwechsel der studentischen Hilfskraft haben zu einem Gesamt-Besetzungsdefizit von neun Personenmonaten geführt. Trotz großer Anstrengungen war abzusehen, dass diese Verzögerung vom Fachgebiet Regelungssysteme (FGRS) nicht im Rahmen der ursprünglichen Projektlaufzeit und des ursprünglichen Projektumfangs kompensiert werden konnte, wovon die Arbeitspakete 5, 6 und 7 betroffen waren. Deshalb wurde das Projekt auf unseren Antrag und mit Bewilligung durch das Projektträger Jülich (PTJ) kostenneutral um sechs Monate verlängert, was eine Weiterbeschäftigung (jeweils um sechs Monate) der beiden wissenschaftlichen Mitarbeiter und der studentischen Hilfskraft ermöglichte. Um den verbleibenden Rückstand von drei Monaten aufzuholen, sowie aufgrund der geopolitischen Situation im Irak, wurde gleichzeitig mit Bewilligung durch das PTJ eine Änderung der Verfahrensweise bei der praktischen Erprobung in AP 8 vorgenommen. Der ursprünglich geplante Feldtest an der realen Anlage im Irak wurde durch einen sog. Lab-in-the-Loop-Feldtest ersetzt, bei dem ein Laboraufbau in Verbindung mit softwareseitiger Simulation die reale Anlage möglichst genau emulieren sollte. Diese Änderung und die Gründe dafür werden in Abschnitt 3.6 im Detail aufgeführt. Die Autarsys GmbH beantragte ihrerseits eine kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate und Anpassung der Projektziele. Somit konnten letztlich alle Arbeitspakete abgeschlossen und die Projektziele erreicht werden.

3.1. 1. Halbjahr 2021

Aufgrund fehlender Zeit zwischen der Bewilligung des Projekts und dem Projektstart konnte die Stelle des wissenschaftlichen Mitarbeiters E13 erst Anfang April 2021 wie geplant mit Herrn Steffen Hofmann besetzt werden. Herr Ajay Sampathirao, mit dem die Stelle des wis-

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

senschaftlichen Mitarbeiters E14 planmäßig hätte besetzt werden sollen, stand leider nicht mehr für die Mitarbeit am Projekt zur Verfügung, und die Stelle wurde nach Rücksprache mit dem PTJ neu ausgeschrieben und mit Herrn Sid Ahmed Attia besetzt. Die Einstellung konnte aufgrund einer IT-Störung erst Anfang Juli 2021 erfolgen. Aufgrund fehlender Zeit und der Verzögerung auf der Seite der TU Berlin ist auch bei der Autarsys GmbH eine viermonatige Verzögerung entstanden.

Steffen Hofmann begann mit der Arbeit an AP 1, das sich auf die Identifizierung von Unsicherheiten und kritischer Ereignisse konzentrierte. Das FGRS identifizierte auf der Grundlage von der Autarsys GmbH vorgeschlagener Anwendungsfälle mehrere Unsicherheiten, z. B. bei Wetter- und Lastanforderungen. Darüber hinaus könnten die Systeme auch von kritischen Ereignissen wie Kommunikationsausfällen, Ausfällen von verteilten Erzeugern wie PV-Anlagen und Ausfällen/Wiederherstellungen des sporadisch verfügbaren öffentlichen Stromnetzes betroffen sein. Weiterhin wurden Bewertungskriterien durch die Autarsys GmbH und das FGRS definiert.

3.2. 2. Halbjahr 2021

Die Einstellung der studentischen Hilfskraft hat sich aufgrund einer IT-Störung weiter verzögert, jedoch hat Herr Hannes Wolf Anfang Oktober 2021 seine Arbeit auf dieser Stelle aufgenommen und mit der Weiterentwicklung der MG-Simulationssoftware (AP 3) begonnen. Die für die wissenschaftlichen Mitarbeiter vorgesehenen Laptops wurden angeschafft. Am 14.09.2021 fand ein Konsortialtreffen (Kick-off-Meeting) statt, bei dem das FGRS einen Überblick über den Arbeitsplan und die bereits geleisteten Arbeiten in AP 1 und AP 3 gab und das PTJ uns auch über die geltenden Verfahren und Richtlinien informierte. Darüber hinaus wurden bei informellen Treffen mit Autarsys die kritischen Ereignisse konkretisiert, z.B. in Bezug auf Kommunikationsausfallszenarien und Ereignisketten bei Überlastung und großen Frequenzausschlägen (AP 1), und Anforderungen an die Betriebsfähigkeit und Optimierungskriterien (z.B. auch die Minimierung der Batteriealterung) erörtert (AP 2). Ebenfalls besprochen wurden praktische Aspekte der Durchführung der Digital-Twin-Tests und des Feldtests an einem der betreffenden MGs (im Irak), sowie Aspekte der Modellierung dieser MGs (AP 3).

Des Weiteren hat das FGRS im Rahmen von AP 2 eine umfangreiche Literaturrecherche zu projektrelevanten Themen im Bereich Stromnetze bzw. Energiesysteme durchgeführt, z.B. betreffend Aspekte wie Resilienz, Digital Twin, Energiemanagementsysteme sowie Designaspekte wie die Auslegung und Platzierung von Energiespeichern. Außerdem wurden nah angrenzende bzw. methodische Bereiche wie Stabilität, Cyber-Sicherheit, Vorhersagemethoden, Energiespeichertechnologien, Multi-Microgrids und Cyber-physikalische Systeme, modellprädiktive Regelung (MPC), verteilte Regelungsansätze, Optimierungsverfahren und die Anwendung von maschinellem Lernen (insbesondere Reinforcement Learning) berücksichtigt.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der MG-Simulationssoftware (AP 3) wurden aus eigenen Vorarbeiten stammenden Konzepte zur Berücksichtigung von Sättigungseffekten und Fallback-Strategien für Kommunikationsausfälle überarbeitet und in die Software in-

tegiert. Außerdem wurden Konzepte zur Erhöhung der Modularität und Flexibilität besprochen und es wurde mit der Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche begonnen, mit dem Ziel, Simulationen zu konfigurieren und zu visualisieren.

Die Autarsys GmbH hat im Rahmen von AP 4 dem FGRS einen Überblick über das beispielhafte MG im Nord-Irak gegeben und mit der Sicherung von Messdaten dieses MGs begonnen.

Es wurden zwei Bachelorarbeiten abgeschlossen, von denen sich eine mit der Kombination von robusten Energiemanagementkonzepten und gegen Kommunikationsausfälle gehärteten Konzepten befasste und die andere mit einem Multi-Agenten-basierten, kommunikationsausfalltoleranten EMS-Konzept.

3.3. 1. Halbjahr 2022

Das Projekt erfuhr auf Seite des FGRS weitere Verzögerungen, da einer der wissenschaftlichen Mitarbeiter, S. Ahmed Attia, zum 31. März 2022 kündigte und es Probleme mit dem Visum eines potenziellen Nachfolgers gab, wodurch sich die Gesamtverzögerung auf etwa 5,5 Monate verlängerte. Durch damit verbundene Koordinationsprobleme und auch eigene Personalengpässe ist der Rückstand auch bei der Autarsys GmbH auf etwa 5,5 Monate angewachsen. Der Simulationsserver wurde geliefert und eingerichtet. Abschlussarbeiten im Zusammenhang mit dem Entwurf robuster Steuerungen trugen zur Weiterentwicklung des MG-Simulationsmodells (AP 3) und des robusten Reglerentwurfs (AP 5) bei.

In AP 3 arbeiteten das FGRS und die Autarsys GmbH zusammen, um die Softwarearchitektur weiterzuentwickeln, wobei der Schwerpunkt auf Modularität und Flexibilität lag, um die Implementierung neuer Funktionalitäten vorzubereiten, darunter eine vom Ladezustand der Batterie abhängige Droop-Regelung. Als weitere Entwicklung der grafischen Benutzeroberfläche wurde mit der Entwicklung eines webbasierten Simulations-Frontends begonnen. Diese Schnittstelle ermöglicht zusammen mit der Simulationssoftware, die als Backend dient, eine nahtlose MG-Planung sowie eine einfache Verwaltung und Visualisierung von Simulationsszenarien und -ergebnissen.

Im Rahmen von AP 4 hat die Autarsys GmbH die Beschaffung von Daten des für den Feldtest angedachten MGs fortgesetzt. Die Anlage ist in einem Flüchtlingscamp im Nord-Irak in Mam Rashan, nahe Mosul. Das Micro-Grid wird immer dann zur Versorgung der Bewohner eingesetzt, wenn das öffentliche Netz aufgrund von Energieknappheit abgeschaltet wird. Die Betriebs- bzw. Abschaltzeiten des öffentlichen Netzes sind willkürlich und nur scheinbar deterministisch. Bei der Datenaufbereitung zeigten sich leider Unzulänglichkeiten bzw. Unzuverlässigkeiten von Energiemessgeräten an den Erzeugern und Lasten, was eine zusätzliche Beschaffung von Smart-Metern finanziert über eine zu beantragende Umwidmung von Mitteln nahelegte.

Im Rahmen von AP 5 wurde eine Bachelorarbeit abgeschlossen, die sich auf die Optimierung mehrerer Ziele für robuste Energiemanagementsysteme (EMS) konzentriert, die sowohl Worst-Case- als auch Best-Case-Kosten in die optimale Steuerungsstrategie integrieren. Vorläufige Simulationen zeigten, dass beide Ziele oft gleichzeitig vollständig erreicht werden können und nur manchmal ein Kompromiss notwendig ist. Darüber hinaus wur-

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

den mehrere Forschungsthemen untersucht, wie die Modellierung von MGs und das Energiemanagement unter Verwendung von Reinforcement Learning, sowie Energievorhersagen als Alternative zu Leistungsvorhersagen für erneuerbare Generatoren und Lasten.

In einer abgeschlossenen Bachelorarbeit wurde ein kooperatives autonomes verteiltes Energiemanagement für MGs untersucht. Dabei wurden die Leistungsfähigkeit und das Verhalten auch unter Berücksichtigung von Kommunikationsausfällen und Fallback-Strategien untersucht.

3.4. 2. Halbjahr 2022

Die Gesamtverzögerung, die hauptsächlich auf die unbesetzte Stelle des wiss. Mitarbeitenden E14 zurückzuführen ist, erhöhte sich auf 9 Monate. Herr Ujjwal Pratap übernahm diese Position am 16. Januar 2023. Darüber hinaus trat Herr Hannes Wolf, der studentische Mitarbeiter, im September 2022 zurück und Herr Xiaozhu Luo wurde an seiner Stelle ausgewählt. Am 18. Oktober 2022 fand eine Konsortialbesprechung per Videokonferenz statt, an der Steffen Hofmann, Erich Bosch und Alexander Heidt sowie Marlene Lenz (PTJ) teilnahmen. Bei dem Treffen wurden die Projektziele, der Status und der Feldtest für eine MG-Anlage im Irak besprochen und sowohl technische als auch administrative Aspekte wie die Beschaffung von Hardware, Verhandlungen mit Betreibern und die Bereitstellung von Daten diskutiert.

In AP 3 entwickelte das FGRS das MG-Simulationsmodell weiter und konzentrierte sich dabei auf die Entwicklung der grafischen, webbasierten Benutzeroberfläche und eine verbesserte Kommunikation zwischen Matlab und der Benutzeroberfläche. Darüber hinaus arbeitete FGRS an einem robusten EMS-Design, einschließlich Droop-Regelung und Beteiligung erneuerbarer Erzeuger an der Lastverteilung.

In AP 4 wurden in zwei abgeschlossenen Masterarbeiten die Modellierung von MGs und das Energiemanagement mittels Reinforcement Learning untersucht. Das FGRS setzte die Untersuchungen zu den Themen Energievorhersage als Alternative zur Leistungsvorhersage für erneuerbare Erzeuger und Lasten sowie regelbasierte Energiemanagementsysteme fort. Das FGRS eröffnete im Rahmen einer BSc-Arbeit auch ein Teilprojekt zur Entwicklung eines Schaltungsentwurfs und Programmierung eines Mikrocontroller-basierten MG-Demonstrators.

3.5. 1. Halbjahr 2023

Das Projekt verzögerte sich um etwa 9 Monate, was hauptsächlich auf personelle Veränderungen und Zeiten unbesetzter Stellen zurückzuführen war. Darüber hinaus nahm die Entwicklung des grafischen webbasierten Simulations-Frontends mehr Zeit als erwartet in Anspruch, was zu einem Arbeitsrückstand führte. Daher erhöhte sich der Gesamtrückstand auf etwa 10 Monate.

Herr Xiaozhu Luo, der im März 2023 als studentischer Mitarbeiter seine Tätigkeit aufnahm, machte sich im Rahmen der Literaturrecherche mit verschiedenen projektrelevanten

ten Themen (z. B. verteilte Model Predictive Control (MPC), Digital Twin) vertraut und trug zur Softwareentwicklung bei. In einem informellen Treffen zwischen dem FGRS und der Autarsys GmbH am 23.05.23 wurden die Anforderungen an die Felddaten, aus denen Simulationsszenarien generiert werden, besprochen. Das Layout der MG-Anlage im Irak wurde von der Autarsys GmbH als Grundlage für die Erläuterung der Messpunkte gezeigt. Autarsys GmbH stellte uns anschließend die entsprechenden Datensätze zur Verfügung.

Während der Entwicklung des grafischen webbasierten Simulations-Frontends (siehe AP 3 und teilweise in AP 7) wurde die Kommunikation zwischen der Matlab-Simulationsumgebung und dem grafischen Frontend erfolgreich implementiert, sodass ein Datenaustausch zwischen beiden möglich ist. Darüber hinaus wurde an Anzeige- und Bearbeitungsaspekten wie dem Andocken von Verbindungsleitungen an Erzeuger-/Verbrauchereinheiten und anderen Objekten im MG gearbeitet.

In AP 5 wurde die Arbeit an der Entwicklung robuster EMS-Designs fortgesetzt, einschließlich der Integration der Sättigungs-Droop-Regelung und erneuerbarer Erzeuger in die Lastaufteilung. Zu diesem Zweck wurde eine Analyse der Primärregelung einschließlich der Droop-Sättigung durchgeführt, um die praktische Durchführbarkeit dieser Funktion zu untersuchen, die aus EMS-Sicht vorteilhaft ist. In Simulationen wurde ein stabiler Betrieb unter diesen Bedingungen nachgewiesen. Das FGRS arbeitete auch daran, die Leistungsbeschränkungen von elektrischen Leitungen in das EMS-Design zu integrieren, und setzte die Untersuchung eines regelbasierten Energiemanagementsystems mit sättigungsbehäfteter Droop-Regelung fort, das auch als Thema für eine Bachelorarbeit gewählt wurde. Insbesondere wurde eine frequenzabhängige Ein-/Ausschaltstrategie für Dieselgeneratoren in das regelbasierte System aufgenommen. Unter bestimmten Bedingungen kann so ein vollständig dezentrales und wirtschaftlich optimales MG-Steuerungssystem implementiert werden.

Darüber hinaus wurden eine Masterarbeit zum erneuerbare Erzeuger- und Lasten-Energievorhersage-basierten EMS sowie eine Bachelorarbeit zu Entwurf und Programmierung eines Mikrocontroller-basierten MG-Demonstrators abgeschlossen und somit konnten Beiträge zur Weiterentwicklung zentraler, dezentraler und verteilter EMS-Systeme erbracht werden AP 5.

3.6. 2. Halbjahr 2023

Das Projekt hatte eine neunmonatige Verzögerung und im Dezember 2023 wurde eine kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate gewährt. Im Rahmen dieser Verlängerung wurde eine Änderung des geplanten Feldtests in AP 8 genehmigt, wobei der Feldtest im Irak durch einen Lab-in-the-Loop-Feldtest mit Hardware-Unterstützung von Autarsys GmbH ersetzt wurde. Der studentische Mitarbeiter Herr Xiaozhu Luo verließ das Projekt am 1. Oktober 2023 vorübergehend für ein Praktikum und ist am 1. April 2024 wieder eingestiegen.

Während eines Videokonferenz-Treffens unter Anwesenheit des PTJ, der Autarsys GmbH und des FGRS am 20. November 2023 informierte das FGRS über aktuelle Ergebnisse und Entwicklungen in den Arbeitspaketen, unter anderem ein robustes EMS-Design, die Entwicklung einer Simulationsplattform und vorgeschlagene Änderungen am Feldtest betref-

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

fend.

In AP 5 arbeitete das FGRS an der Umsetzung eines Multi-Objective-Ansatzes zur Optimierung unter verschiedenen Fehlerszenarien, der Entwicklung eines robusten EMS-Designs unter Berücksichtigung von Leistungsbeschränkungen der Stromleitungen und der Fehlerausbreitungsanalyse zur Vermeidung von Kaskadeneffekten in großen Netzwerken. In einer abgeschlossenen Bachelorarbeit wurde an der Realisierung eines regelbasierten Energiemanagementsystems in Verbindung mit einer sättigungsbehafteten Droop-Regelung gearbeitet. Dies würde auch die Resilienz des Systems erhöhen und könnte als Alternative oder Benchmark für dezentrale sowie verteilte und zentrale EMS-Entwürfe verwendet werden. In AP 6 wurden weitere Anstrengungen zur Verbesserung der Robustheit und Resilienz der EMS-Entwürfe. Insbesondere konzentrierte sich die Arbeit auf die Integration der Leistungsbeschränkungen in den sättigungsbewussten MPC-basierten robusten EMS-Ansatz. Mit Bezug auf AP 3 und AP 7 hat das FGRS die Simulations-/Digital-Twin-Plattform weiter verbessert und sich dabei darauf konzentriert, die Simulationskomponente in die Lage zu versetzen, strukturelle Änderungen am MG auch online (d.h. während laufender Simulation) zu unterstützen. Diese Bemühungen zielten darauf ab, die Robustheit des EMS zu stärken, die Simulationsfähigkeiten zu verbessern und die Projektkontinuität trotz der Verzögerungen sicherzustellen.

3.7. 1. Halbjahr und Juli 2024

Das Projekt wurde im Dezember 2023 um sechs Monate kostenneutral verlängert und endete am 31. Juli 2024, um die vorherigen Verzögerungen auszugleichen. Während dieses Zeitraums wurde der geplante Feldtest im Irak durch einen Lab-in-the-Loop-Feldtest mit Hardware-Unterstützung von Autarsys ersetzt. Der studentische Mitarbeiter Herr Xiaozhu Luo, der im Oktober 2023 vorübergehend ausgeschieden war, kehrte am 1. April 2024 zum Projekt zurück. Ujjwal Pratap präsentierte die Projektergebnisse auf einem Workshop an der Universität Oxford, um neue Kooperationen zu fördern. Das FGRS und die Autarsys GmbH hatten mehrere Treffen zur Planung und zum Lab-in-the-Loop-Feldtest.

In AP 5 und AP 6 untersuchte das FGRS die Auswirkungen des sättigungsberücksichtigenden robusten EMS auf die Primärregelung, wobei die Droop-Regelung in die Simulationen auf einer schnellen Zeitskala integriert wurde. Dies ermöglicht einen verbesserten Konzeptnachweis für das betreffende EMS-Design und seinen Erweiterungen. Eine solche Erweiterung, an deren Analyse und Implementierung ausserdem gearbeitet wurde, ist eine robuste Multi-Objective-Version des sättigungsberücksichtigenden EMS, wobei hier eine unter allen Bedingungen optimalen Steuerung gemeint ist. Das FGRS arbeitete auch weiter an dem robusten EMS-Regler, der die Leistungsbeschränkungen der Übertragungsleitungen berücksichtigt, und der ehemalige studentische Mitarbeiter Xiaozhu Luo setzte diese Forschungsrichtung im Rahmen seiner MSc-Arbeit fort. Um eine effiziente Reformulierung als gemischt-ganzzahliges lineares Programm (MILP) zu erreichen, lautete die Schlüsselfrage, welche Werte unsicherer Variablen wie Lastbedarf und Wetterbedingungen zu einer Maximierung des Leistungsflusses in den Übertragungsleitungen führen würden.

In AP 7 integrierte das FGRS das MG-Simulationsmodul mit dem webbasierten Frontend,

um so die Simulation veränderbarer Netzstrukturen, Benutzereingaben und Systemausfälle (z. B. Leitungs- oder Geräteausfälle) zu ermöglichen. Auch das webbasierte Frontend selbst wurde verbessert, um Online-Anpassungen der Systemstruktur und der Parameter zu ermöglichen. Die Autarsys GmbH integrierte eine Droop-Sättigungsfunktion in die Low-Level-Einheitssteuerungen.

In AP 8 überarbeitete das FGRS in Zusammenarbeit mit der Autarsys GmbH die Kommunikationsschnittstellen zu den Low-Level-Einheitssteuerungen und finalisierte die EMS-Regler für die Tests, einschließlich der robusten sättigungsberücksichtigenden Minimax-MPC. Die Autarsys GmbH half bei der Konfiguration der MG-Simulationssoftware auf Grundlage der Struktur und Parameter der Anlage im Irak.

Leider konnte der Lab-in-the-Loop-Feldtest auch mit dem Projektende noch nicht vollständig abgeschlossen werden. Es besteht die Absicht, den verbleibenden Rückstand (siehe auch Tabelle 3.1) mit Hilfe von eigenen Mitteln des FGRS und der Autarsys GmbH aufzuholen

Eine MSc-Arbeit untersuchte und simulierte das entwickelte EMS anhand einer MG-Anlage an einer gemeinnützigen Schule, die von der Step-Together-Stiftung im Libanon betrieben wird. Ziel war es, die Gesamtkosten durch Optimierung der Energieausbeute der PV-Anlage und eine Finanzanalyse im Zusammenhang mit der verwendeten Hardware und den Steuerungen zu senken. Ferner trug eine abgeschlossene BSc-Arbeit zur Weiterentwicklung des webbasierten kooperativen Mehrbenutzer-Simulations-Frontends/-Backends bei, das es Benutzern ermöglicht, MGs schnell aus Komponenten grafisch aufzubauen und zu konfigurieren und mit den gewünschten Parametern zu simulieren.

Insgesamt wurden im Rahmen des Projekts bedeutende technische Fortschritte erzielt, insbesondere bei der EMS-Weiterentwicklung und der Entwicklung von Digital Twins für einen Einsatz im Feldtest.

Tabelle 3.2.: Tatsächlicher Projektverlauf

AP Bezeichnung	Partner	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Σ PMi	Σ PS
1	FGRS	0.7	0.7	0.7	2	0.2	0.6	1.6												6.5	793.5
	WIMI E14	0.1	0.1	0.1	1.05	0.2	0.6	0.6												2.75	377
	WIMI E13 HWI	0.6	0.6	0.6	0.95															2.75	377
2	Autarsys	0.14	0.28					1												0.42	72
	2 Entw.-Ings.	0.14	0.28																	0.42	72
	FGRS	1.8	1.4	1.4	1.9	1	1													8.5	873.5
3	WIMI E14	0.8	0.4	0.65	0.9															2.75	377
	WIMI E13 HWI	1	1	0.75																2.75	377
	Autarsys	0.14	0.09																	0.23	40
4	2 Entw.-Ings.	0.14	0.09																	0.23	40
	FGRS	1.85	2.75	1.75	1	1	1.75	0.75	0.9	1	0.4	0.9	0.9	0.8						1.75	1816
	WIMI E14	0.25	0.75	0.75																5.75	788
5	WIMI E13 HWI	0.6	1				0.75	0.75	0.9	1	0.4	0.9	0.9	0.8						5.75	788
	Autarsys	0.09	0.42																	6	240
	2 Entw.-Ings.	0.09	0.42																	0.51	88
6	FGRS																			0.51	88
	WIMI E14																			0	0
	WIMI E13 HWI																			0	0
7	Autarsys																			0	0
	2 Entw.-Ings.																			0	0
	FGRS	0.23	0.83	0.46	0.55	0.14	0.28	0.14												2.63	456
8	WIMI E14	0.23	0.83	0.46	0.55	0.14	0.28	0.14												2.63	456
	WIMI E13 HWI	0.4	0.8	2.3	2.3	1.6	1.6	0.95	0.6	0.8										2.2	2238
	Autarsys	0.05	0.05																	7.6	1041
9	2 Entw.-Ings.	0.05	0.05																	6.4	876.8
	FGRS	0.4	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	0.8										8	320
	WIMI E14	0.4	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	0.8										0.15	24
10	WIMI E13 HWI	1	1	1	1	1	1.15	0.5												0.15	24
	Autarsys	0.05	0.05																	0.15	24
	2 Entw.-Ings.	0.05	0.05																	0.15	24
11	FGRS	2	2.5	1.9	2.9	2.8	2.4	2.4	1.7											2.2	2238
	WIMI E14	0.5	1	0.5	0.9	1	0.6	0.6	0.9											7.6	1041
	WIMI E13 HWI	0.5	1	0.5	0.9	1	0.6	0.6	0.9											6.4	876.8
12	Autarsys	0.05	0.05																	8	320
	2 Entw.-Ings.	0.05	0.05																	0.15	24
	FGRS	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3											4	546
13	WIMI E14	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1											0.8	109.6
	WIMI E13 HWI	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4											3.2	438.4
	Autarsys	0.42	0.23	0.83	0.46	0.46	0.32	0.32	0.14	0.23	0.69	0.23	0.51	0.55						6.08	1056
14	2 Entw.-Ings.	0.42	0.23	0.83	0.46	0.46	0.32	0.32	0.14	0.23	0.69	0.23	0.51	0.55						6.08	1056
	FGRS																			1.8	108
	WIMI E14																			0.2	1
15	WIMI E13 HWI																			3.2	438.4
	Autarsys																			0.6	1
	2 Entw.-Ings.																			1	1
16	Meilensteine																			0.23	0.32
	0.23	0.32	0.32	0.74	0.74	0.78	1.11	0.97												5.21	904
	0.23	0.32	0.32	0.74	0.74	0.78	1.11	0.97											5.21	904	

4. Wissenschaftlich-technischer Stand

Im folgenden Abschnitt wird zunächst der Stand von Wissenschaft und Technik beleuchtet. Danach werden die Vorarbeiten der Antragsteller dargestellt und abschließend die Entwicklungsschritte des Projekts gegenüber dem Stand der Technik abgegrenzt.

4.1. Stand von Wissenschaft und Technik

Die Anstrengungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen aus dem Strom-Sektor führen zu einer Zunahme des Anteils erneuerbarer Energiequellen an der Nettostromerzeugung (auf etwa 46 Prozent in Deutschland in 2019 [1]). Erneuerbare Energiequellen sind oft kleine dezentrale Einheiten wie Photovoltaikanlagen und Windkraftanlagen, die sich durch eine volatile Einspeisung auszeichnen. Die Volatilität der erneuerbaren Energiequellen hat zu neuen Herausforderungen bei der Integration in das Stromnetz geführt. In diesem Zusammenhang werden MGs als eine vielversprechende Lösung betrachtet, um der Volatilität zu begegnen und eine reibungslose Integration zu ermöglichen. Ein MG ist ein eigenständiges, kleinskaliges Energiesystem, das in einem bestimmten räumlichen Bereich angesiedelt ist und seinen lokalen Lastanforderungen mit seinen lokalen Erzeuger- und Speichereinheiten gerecht wird [28].

In [10] wurden MG-Fallstudien vorgestellt, die der Versorgung von Campussen, kommerziellen und landwirtschaftlichen Bereichen und ähnlichen Zwecken auf der ganzen Welt dienen. Diese zeigen, dass sich MG-Lösungen gut in das Stromnetz integrieren lassen, ohne den normalen Betrieb zu unterbrechen. Vor kurzem führte das im europäischen H2020-Programm geförderte ECOSMIC-Projekt [87] eine technologisch-ökonomische Analyse von existierenden experimentellen MG-Aufbauten für verschiedene Betriebs- und Klimabedingungen durch. In diesem Projekt wurden vier verschiedene Netz-Konfigurationen bestehend aus Photovoltaikanlage, Windkraftanlage, Energiespeicher, Dieselgenerator und Netzanschlusspunkt betrachtet. All dies deutet darauf hin, dass die MG-Lösung eine Schlüsselrolle bei der Erreichung der Ziele für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien spielen kann.

4.1.1. Betrieb und Regelung von MGs

In diesem Abschnitt stellen wir die Regelarchitektur des MGs vor und gehen danach insbesondere auf die vorhandenen, für das EMS-Design zur Verfügung stehenden Reglerentwurfverfahren ein. Die Regelung von MGs ist ein komplexes technisches Problem, da ver-

4. Wissenschaftlich-technischer Stand

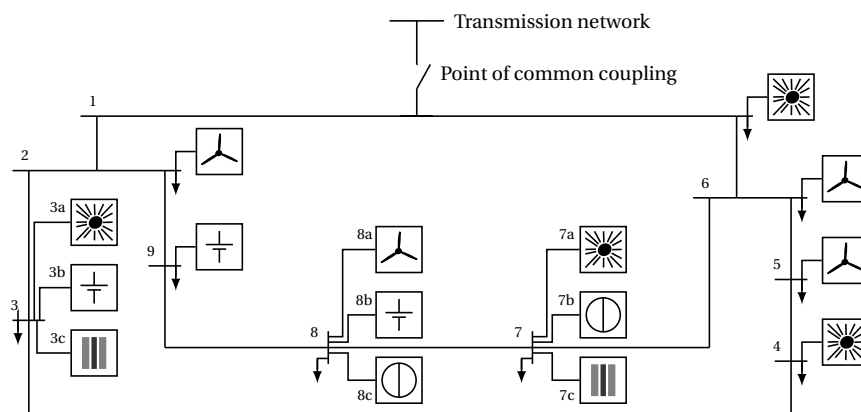


Abbildung 4.1.: Beispiel Microgrid nach CIGRE Benchmark [84] für Mittelspannungsnetze

schiedene Ziele wie der Ausgleich von Angebot und Nachfrage, die schnelle Dynamik im Zusammenhang mit leistungselektronischen Geräten, die hohe Volatilität in der Erzeugung, die physikalischen Betriebsgrenzen und der wirtschaftliche Betrieb berücksichtigt werden müssen.

Motiviert durch die konventionelle Stromnetz-Regelung wurde auch für MGs eine hierarchische Regelstruktur in vielen Publikationen vorgeschlagen [107]. Diese lässt sich in drei Ebenen unterteilen:

- *Primärregelung* ist oft implementiert als dezentraler Proportionalregler. Sie soll Stabilität und Lastaufteilung sicherstellen. Die Zeitskala dieser Schicht liegt im Bereich von Millisekunden bis Sekunden. Mit der Primärregelung beschäftigen sich in jüngerer Zeit z. B. [73, 89, 91, 93].
- *Sekundärregelung* soll stationäre Abweichungen in Frequenz ausregeln und sicherstellen, dass die Spannungen in einem bestimmten Bereich bleiben. Typischerweise arbeitet diese Ebene auf einer Zeitskala von Sekunden bis wenigen Minuten. Mit der Sekundärregelung beschäftigen sich in jüngerer Zeit z. B. [6, 59, 92, 94].
- *Das EMS* gewährleistet einen ökonomisch sinnvollen und sicheren Betrieb. Diese Schicht arbeitet im Bereich von Minuten bis zu Teilen von Stunden. In den folgenden Abschnitten wird detailliert auf den EMS-Entwurf eingegangen.

Die Sekundärregelung und das EMS können entweder zentrale oder verteilte Regelarchitekturen aufweisen.

4.1.2. EMS-Entwurf

Im Rahmen der folgenden Übersicht halten wir es für nützlich, im Großen und Ganzen zwischen zwei Herangehensweisen für den EMS-Entwurf für MGs zu unterscheiden. Wir möchten diese Methodiken bezeichnen als 1) *klassischer* Ansatz und 2) *bottom-up*-Ansatz.

Der *klassische* Ansatz für den EMS-Entwurf ist von der klassischen hierarchischen Regelarchitektur für Stromnetze inspiriert. Die EMS-Entwurfsverfahren in [57, 65, 77, 98, 99]

sind Beispiele für diesen Ansatz. Hierbei arbeitet das EMS auf einer Zeitskala von Minuten bis zu Teilen von Stunden und bestimmt Leistungssollwerte für die einzelnen Einheiten im MG. Diese Leistungssollwerte werden unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Ziele und der operativen Grenzen der Einheiten festgelegt. Bei diesem Ansatz verwendet das EMS üblicherweise Vorhersagen über die verfügbare erneuerbare Energie und den Bedarf der Verbraucher und ein Bilanz-Modell des MGs zur Bestimmung der Leistungssollwerte. Das Bilanz-Modell basiert auf der Leistungsbilanzgleichung und berücksichtigt nicht die Reaktionen der unter der EMS-Ebene liegenden Regelschichten.

In [77] wird ein EMS auf Basis eines prädiktiven Regelalgorithmus vorgeschlagen, um die Erzeugung durch konventionelle Generatoren und die Energiespeicherung in Batteriespeichereinheiten zu planen. Beim EMS-Entwurf können auch langfristige Einflüsse auf die Kosten des MG-Betriebs berücksichtigt werden, wie die Degeneration der Energiespeichereinheiten durch die Lade-/Entladezyklen [57]. In [65] wird ein mehrschichtiger EMS-Entwurf vorgeschlagen, bei dem EE- und Energiespeicher-Einheiten auf einer schnellen, konventionelle Generatoren hingegen auf einer langsamen Zeitskala geregelt werden. Dieser mehrschichtige Ansatz mit unterschiedlichen Zeitskalen ermöglicht auch die Reaktion auf sich langsam ändernde Marktanforderungen einerseits und sich schnell ändernde lokale Bedingungen andererseits. In [65], schlug einen mehrstufigen In letzter Zeit findet der Entwurf verteilter EMSe verstärkte Beachtung, da diese potenziell einen zuverlässigeren Betrieb, ein flexibles Plug-and-Play (PNP) der Einheiten und eine verringerte Komplexität der Berechnungen ermöglichen. Ein Überblick über die Anwendung verteilter Algorithmen im MG-Kontext wird in [113] gegeben. Ein auf verteilter iterativer Optimierung basierender EMS-Entwurf wird in [16], und ein multi-Agenten-basierter EMS-Entwurf in [63], vorgeschlagen. Weitere Aspekte des EMS-Entwurfs, die Aufmerksamkeit erhalten, sind die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Vorhersage z. B. erneuerbaren Erzeugung und des Einflusses kritischer Ereignisse wie z. B. Ausfällen bei der Infrastruktur [14, 85, 118]. In den genannten Arbeiten wird auch ersichtlich, dass der *klassische* Ansatz die Flexibilität bietet, verschiedene Arten von Erzeuger- und Speichereinheiten in der MG-Topologie zu berücksichtigen.

Der *bottom-up*-Ansatz für den EMS-Entwurf ist inspiriert vom Verhalten der unteren Regelschichten beim MG. Im Gegensatz zu traditionellen Stromversorgungssystemen sind die unteren Regelschichten beim MG so ausgelegt, dass sie die Wirk- und Blindlastaufteilung im Zusammenspiel aller oder der meisten Einheiten bewerkstelligen, zusammen mit Frequenz- und Spannungsstabilität [3, 89, 106]. Durch die Lastaufteilung wird der Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch von allen netzbildenden Einheiten im System gemeinsam verantwortet [88]. Damit entfällt die Anforderung, dass eine einzelne Einheit (gemeinhin als „Slack Bus“ bezeichnet) die Schwankungen kompensieren muss und somit einer größeren Gefahr der Überlastung ausgesetzt ist. Der *bottom-up*-Ansatz besteht nun darin, die Funktionalität der unteren Regelschichten so zu erweitern, dass auch ökonomische Ziele erreicht werden [30, 75, 76]. Ein Zusammenhang zwischen den in der primären Regelschicht verwendeten Droop-Parametern und der wirtschaftlichen Kostenfunktion (auf deren Basis auch ein *klassischer* EMS-Entwurf erfolgen könnte) wird in [30] hergestellt. In diesem Artikel wird außerdem die Generalisierbarkeit dieses Zusammenhangs in Gestalt von komplexeren Betriebs-Kostenfunktionen und dazu passenden nichtlinearen Droop-

4. Wissenschaftlich-technischer Stand

Kurven festgestellt. In [75, 76] werden Kosten für Emissionen und Betriebskosten auf Basis der Lastbedingungen für die Auslegung der Droop-Parameter konventioneller Erzeugereinheiten in der unteren Regelschicht herangezogen. In ähnlicher Weise wird in [23] nichtlinearen Emissions- und Betriebskosten mittels Droop-Parametern begegnet, die in Abhängigkeit des Gradienten der Kostenfunktion variieren.

Ansatz	Vorteile	Nachteile
<i>klassisch</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baut auf vorhandenen, bewährten Modellen für Stromnetze auf. 2. Kann flexibel für verschiedene Topologien und Konfigurationen des MGs angewendet werden. 3. Verteilte Regelarchitekturen sind möglich. 4. Der Entwurf kann zur Berücksichtigung von Unsicherheiten z. B. n der Einspeisung erneuerbarer Erzeuger und von kritischen Ereignissen erweitert werden. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Berücksichtigt nicht das Verhalten der unteren Regelschichten. 2. Stützt sich auf komplexe und rechenintensive Optimierungsmethoden, was die Reaktionsfähigkeit auf schnelle Schwankungen im System einschränken kann. Dies wirkt sich besonders beim Betrieb von MG aus, da diese eine niedrigere Trägheit aufweisen und starke Fluktuationen in der Einspeisung erneuerbarer Erzeuger auftreten.

<i>bottom-up</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Einbeziehung der unteren Regelschichten zur Erreichung wirtschaftlicher Ziele. 2. Reduzierung der Hierarchieebenen und damit der Komplexität. 3. Verringert die Reaktionszeit, da die Einheiten durch die unteren Regelschichten in die Lage versetzt werden, auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sofort auf Veränderungen der unsicheren Variablen (z. B. verfügbare erneuerbare Leistung) zu reagieren. Die Reaktion kann also früher abgeschlossen sein als bei einer hierarchischen Regelstruktur mit langen Abtastzeiten auf der oberen EMS-Ebene. 4. Verteilte oder sogar dezentrale Regelarchitekturen bieten sich an, da die unteren Regelschichten ursprünglich diese Struktur aufweisen und auf der Basis von Messungen globaler Variablen wie der Frequenz arbeiten. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Abhängig von der Topologie und Konfiguration des MGs. 2. Die Berücksichtigung des Ladezustands der Energiespeicher und dessen Begrenzungen ist eine offene Herausforderung. 3. Auch die Berücksichtigung von Unsicherheiten und kritischen Ereignissen ist eine offene Herausforderung.
------------------	---	--

4.1.2.1. EMS-Entwurf im EMERGE-Projekt

Der *klassische* Ansatz für den EMS-Entwurf bezieht das Verhalten der unteren Regelschichten nicht explizit ein, obwohl diese bei hoher erneuerbarer Erzeugung eine wichtige Rolle bei der Kompensation bzw. Bewältigung der entsprechend hohen Fluktuationen spielen. Deshalb ist dieser Ansatz nicht ideal für typischerweise in MGs anzutreffende Verhältnisse. Die Arbeiten, die gemäß dem *bottom-up*-Ansatz vorgehen, berücksichtigen noch keine Energiespeicher-Einheiten wie z. B. Batteriespeicher, was für die Anwendbarkeit auf MGs ei-

4. Wissenschaftlich-technischer Stand

ne große Restriktion darstellt. Ebenso fehlen hier Ergebnisse zum Umgang mit Unsicherheiten bei der verfügbaren erneuerbaren Energie sowie der Möglichkeit kritischer Ereignisse. Das FGRS hat bei seiner Forschung einen Weg eingeschlagen, der als *hybrid*-Ansatz verstanden werden kann. Auf diese Weise können die Vorteile der beiden zuvor besprochenen Ansätze kombiniert und die Nachteile reduziert werden. Beim *hybrid*-Ansatz wird die hierarchische Regelstruktur und das Verhalten der unteren Regelschichten bei der Bestimmung der Leistungs-Sollwerte durch das EMS einkalkuliert. Dabei können auch Unsicherheiten bei Variablen wie der verfügbaren Leistung erneuerbarer Erzeuger explizit berücksichtigt werden. So kann das EMS vorausschauend planen und dabei auf ein bestimmtes Verhalten der unteren Regelschichten und deren schnelle Reaktion auf Fluktuationen der unsicherheitsbehafteten Variablen setzen. Einige Arbeiten am FGRS zum EMS-Entwurf, bei denen dieser Ansatz verfolgt wird, und die teilweise im Rahmen des EMERGE-Projekts in Zusammenarbeit mit der Autarsys GmbH entstanden sind, sind [44, 45, 47, 49, 66].

Im EMERGE-Projekt wurde die modellprädiktive Regelung, ein optimierungsbasierter Ansatz, bei der Entwicklung von EMSen verwendet. Als Ergebnisse des Projekts wurde die Theorie eines zentralisierten Ansatzes erweitert und eine neue verteilte Lösung entwickelt. Die technologische Reife dieser Lösungen wurde auf einen Stand gebracht, der Hardware-in-the-Loop-Tests und anschließend Tests am Hardware-Versuchsstand ermöglichte. Die besonderen Merkmale der im EMERGE-Projekt entwickelten Lösungen sind 1) die Verwendung von Verfahren zur Vorhersage der Erzeugung erneuerbarer Energiequellen und der Lastanforderung, 2) die Annahme eines hohen Anteils an erneuerbar erzeugbarer Energie, 3) der Einsatz eines zentralisierten, robusten Regelungskonzepts für das EMS, welches das Verhalten der Primär- und Sekundärregelung berücksichtigt, 4) die Einbeziehung von Batteriespeichern und schaltbaren konventionellen Generatoren in den Entwurf der zentralisierten und der verteilten Lösungen, und 5) die Verwirklichung von Plug-and-Play in Form eines geplanten Abschaltens von Einheiten zu Wartungszwecken.

Wir sehen den nächsten logischen Schritt, der an unsere Vorarbeiten anknüpft darin, den technologischen Reifegrad der zentralen wie auch der verteilten EMSe bis zur Anwendung im Feldversuch zu bringen. Auf dem Weg dahin sehen wir insbesondere die folgenden offenen Herausforderungen: 1) Robustheit bzw. Resilienz der zentralen und verteilten EMSe gegenüber Vorhersagefehlern, Komponenten- und Infrastrukturausfällen; 2) Die Auswirkungen des Reglerentwurfs auf die optimale Batteriegröße. Die im EMERGE-Projekt entwickelten EMSe konzentrierten sich größtenteils auf den Regelbetrieb mit genauen Vorhersagen, einem funktionalen Kommunikationsnetz und funktionalen Erzeugungseinheiten. Es ist jedoch erforderlich, Betriebsstrategien zu entwickeln, die Vorhersagefehler und kritische Ereignisse wie z.B. Kommunikationsausfälle berücksichtigen. Darüber hinaus ist eine Robustifizierung des verteilten EMS-Entwurfs vor dem Feldversuch ausstehend. Bei der Planung einer MG-Anlage sollte eine ausreichend große Kapazität und geeignete Verteilung der Batterie-Speichereinheiten vorgesehen werden, um einen sicheren Betrieb stets zu gewährleisten. Hierbei ist es wichtig, zu untersuchen, welchen Einfluss der Reglerentwurf auf die notwendige Batteriekapazität hat.

4.1.3. Verwandte Arbeiten und deren Limitierungen

4.1.3.1. Vorhersage-Unsicherheiten

Das EMS stützt sich auf die Vorhersage der verfügbaren Leistung erneuerbarer Erzeuger und des Leistungsbedarfs der Verbraucher. Allerdings sind diese Vorhersagen unsicherheitsbehaftet, was sich insbesondere bei einem hohen Anteil an erneuerbaren Erzeugern störend auf den Gesamtbetrieb auswirken kann. Daher sollte das EMS eine gewisse Toleranz gegenüber den Vorhersageunsicherheiten herstellen. Diese Toleranz kann im EMS-Design entweder durch robuste (z.B. [118]) oder stochastische Reglerentwurfverfahren (z.B. [14]) hergestellt werden. Bei robusten Entwurfverfahren werden die Leistungssollwerte basierend auf der Betrachtung von Worst-Case-Bedingungen berechnet. Der Nachteil eines robusten Entwurfs ist dessen Konservativität, da die Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Worst-Case-Bedingungen ignoriert wird. Beim stochastischen Reglerentwurf werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der unsicheren Variablen betrachtet und Leistungssollwerte dementsprechend berechnet. In [118] and [14] wird jedoch nicht die Möglichkeit berücksichtigt, die Einspeisung aus erneuerbaren Erzeugern aktiv zu beeinflussen. Dabei sind sowohl Energiespeicher als auch die Möglichkeit einer aktiven Beschränkung der Einspeisung erneuerbarer Erzeuger als essenzielle Bestandteile einer wirtschaftlichen Lösung mit hohem Anteil erneuerbarer Energie identifizieren worden [116].

Die in unserer Gruppe entwickelten EMS-Entwürfe berücksichtigen eine solche aktive Beschränkung der Leistung erneuerbarer Erzeuger. Dabei wurde in [44] ein robuster EMS-Entwurf vorgeschlagen. In [46] wurde ein szenariobasiertes EMS für ein MG entwickelt, das verschiedene erneuerbare Erzeugung- und Lastnachfragebedingungen in Form von Szenarios und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt. Im Rahmen des EMERGE-Projekts wurde schließlich die Konservativität des robusten EMS-Entwurfs entscheidend verringert. Dies wurde ermöglicht durch Hinzufügen bzw. Berücksichtigung von einer sättigungsbehafteten Primärregelung, welche auch die erneuerbaren Erzeuger einschließt. Bis jetzt konnte dieser Entwurf jedoch nur für zentrale EMSe durchgeführt werden. Die entworfenen verteilten EMSe weisen entsprechend noch nicht die geforderten Robustheitseigenschaften auf. Gemessen an der generell hohen Zahl von Forschungsarbeiten zum Thema robuste Regelung hat unseres Erachtens der Entwurf robuster verteilter Regelungen noch wenig Aufmerksamkeit erhalten.

4.1.3.2. Ausfälle von Komponenten und Infrastruktur, insbesondere Kommunikationsverbindungen

Die Fehlererkennung und -Isolierung und Betriebs-Aufrechterhaltung oder -Wiederherstellung gelten als Schlüsselaspekte in zukünftigen Stromnetzen [121]. Das EMS benötigt eine Kommunikationsinfrastruktur zur Überwachung und Steuerung der Einheiten [36]. Folglich beinhaltet die Gesamtheit möglicher Störfälle auch Ausfälle von Kommunikationsverbindungen. Neuere Studien haben kritische Verbindungen im kombinierten Strom- und Kommunikationsnetz identifiziert [32, 95]. In [33] stellten die Autoren fest, dass der Ausfall von Kommunikation zu einem Kontrollverlust und als Folge davon zu einem Anstieg der Betriebskosten führt. Die hauptsächliche Einschränkung der genannten Arbeiten

4. Wissenschaftlich-technischer Stand

besteht darin, dass sie weder Betriebsstrategien bei einem Kommunikationsausfall besprechen noch die Erzeugung erneuerbarer Energie berücksichtigen.

Kommunikationsausfälle sind eine der untersuchten Bedrohungen im Rahmen der Cyber-Sicherheit von Stromversorgungssystemen. Eine breit angelegte Literaturübersicht [39] zeigte, dass relativ wenige Arbeiten die Reaktion auf Angriffe auf Cyber-physikalische Systeme untersuchen und nicht nur die Prävention und Erkennung von Angriffen. Bei der sog. fehlertoleranten Regelung und Rekonfiguration werden speziell Reglerentwurfsverfahren betrachtet, die eine Toleranz gegenüber Fehlern in Stellgliedern oder Sensoren herstellen. In [82] wurde dieses Verfahren im Rahmen von EMSen angewendet. Diese Lösung erfordert jedoch, dass die Batterien überschüssige Energie speichern, um einen Ausfall der Erzeugung kompensieren zu können. Ein Ausfall einer Kommunikationsverbindung bedeutet jedoch nicht unbedingt auch eine elektrische Trennung der entsprechenden Einheit. Eine Reaktionsstrategie, bei der sich eine betroffene Einheit vorsorglich selbst abschaltet, kann einen Ausfall der Stromversorgung und hohe Kosten nach sich ziehen, z.B. bei einem abgelegenen MG.

4.1.3.3. Dimensionierung und Verteilung von Energiespeicher-Einheiten

Bei der Konstruktion eines MGs ist eine der wesentlichen Aufgaben die Festlegung der Größe und Platzierung der Energiespeicher (z.B. Batteriespeicher). Die bei der Planung zu berücksichtigen Faktoren sind Investitionskosten, Servicequalität, Art und installierte Leistung der erneuerbaren Erzeuger und prognostizierter Lastbedarf [35]. In [5] wurden geschätzte Treibhausgasemissionen in die Dimensionierung der Einheiten im MG einbezogen. Die Dimensionierung und Platzierung ist ein Offline-Verfahren, das vor der Inbetriebnahme des MG durchgeführt wird. Typischerweise wird erst danach das EMS entworfen bzw. konfiguriert, um den Routinebetrieb und möglicherweise die Behandlung kritischer Ereignisse zu bewältigen. Bei dieser Vorgehensweise sind die Dimensionierung und Platzierung von Speichereinheiten und das EMS Design entkoppelt, was zu Nachteilen wie überdimensionierten Speichereinheiten führen kann. Der naive Ansatz, mehr und größere Speichereinheiten zu installieren, kann die Nutzung erneuerbarer Energien erhöhen. Ebenso kann der Zubau von Energiespeichern eine einfache Strategie sein, um die Toleranz gegenüber kritischen Ereignissen wie Geräteausfälle zu erhöhen. Dies steht jedoch im Widerspruch zu den ökonomischen und ökologischen Zielen für das Stromversorgungssystem. Daher ist es unerlässlich, bestimmte Aspekte der MG-Planung (z.B. Batteriegröße) mit dem EMS-Entwurf zu koppeln. Nur so können die Gesamtkosten, die sich aus Investitions- und Betriebskosten zusammensetzen, eines MGs mit hohem Anteil an volatiler erneuerbarer Erzeugung minimiert werden.

Der Betrieb der Batteriespeicher nahe den Betriebsgrenzen wirken sich auf deren Gesamtlebensdauer aus [97]. Eine Alternative, um eine höhere Lebensdauer zu erzielen ist die Installation eines überdimensionierten Batteriespeichers, so dass ein Betrieb in kritischen Zonen vermieden wird. Dies kann jedoch den anfänglichen Investitionsaufwand erhöhen. In [12] wird die Herausforderung bei der Auswahl der optimalen Batteriegröße hervorgehoben, die eine Abwägung zwischen wirtschaftlichen Kosten und der Robustheit gegenüber Unsicherheiten bei der erneuerbaren Erzeugung erfordert. Diese Arbeiten be-

schäftigen sich jedoch *nicht* mit der Rolle der Regelung durch das EMS und deren Einfluss auf die richtige Dimensionierung der Energiespeicher.

4.2. **Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste**

Für das Projekt wurden ursprünglich Mittel für die Anschaffung von Fachliteratur zu verschiedenen projektrelevanten Themen bewilligt. Auf den Neuerwerb von Büchern konnte aufgrund alternativer Literatur verzichtet werden (siehe Abschnitt 7.1). Darüber hinaus wurden Artikel aus unterschiedlichen Fachzeitschriften und Konferenzbänden verwendet. Die entsprechenden Zitationen finden sich im Literaturverzeichnis. Die Artikel wurden unter anderem über folgende Online-Plattformen bezogen:

- Google Scholar (<https://scholar.google.de>),
- IEEE Xplore (<http://ieeexplore.ieee.org>),
- Researchgate (<https://www.researchgate.net/>),
- Arxiv (<https://arxiv.org/>), und
- HAL (<https://hal.science/>).

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Folgenden wird die Zusammenarbeit mit Anderen aufgeführt. Die Autarsys GmbH und das FGRS haben dieses Projekt gemeinsam durchgeführt und verfassen den Abschlussbericht zusammen. Daher wird zunächst in Abschnitt 5.1 die Zusammenarbeit der Partner miteinander dargelegt. Danach werden in Abschnitt 5.2 Kooperationen mit Dritten beschrieben.

5.1. Zusammenarbeit der Partner

Im Folgenden wird zunächst dargelegt wieso der gebildete Forschungs- und Entwicklungsverbund für die Umsetzung des Vorhabens notwendig und geeignet war. Danach wird die tatsächliche der geplanten Arbeitsteilung gegenübergestellt

5.1.1. Notwendigkeit der Teilnahme am Verbund

Die Kooperation zwischen dem FGRS und der Autarsys GmbH begann bereits im Rahmen des Vorgängerprojekts EMERGE. Die im dazugehörigen Abschlussbericht genannten Punkte, die die Teilnahme am Verbund notwendig machten, treffen auch auf das RESUME-Projekt zu. Die Weiterführung des Verbundes war folgerichtig, um die noch offenen wissenschaftlichen und technischen Probleme zu lösen und den Technology Readiness Level (TRL) auf den Zielwert von 6 bis 7 voranzutreiben.

In einem sich rapide entwickelnden wissenschaftlichen State-of-the-Art und aktuellen Herausforderungen wie Resilienz ist die regelungstechnisch-methodische Expertise des FGRS und die langjährige praktische Erfahrung der Autarsys GmbH in der Regelung und Betriebsführung von MGs unerlässlich.

Im Rahmen des geplanten Feldtests wurde zudem ein geeignetes Testnetz benötigt, das beispielhaft die im Projektantrag genannten Charakteristika und Herausforderungen aufweist und auf das wir aus rechtlicher Sicht Zugang erhalten können. Da weder das FGRS noch die Autarsys GmbH die genannten Anforderungen alleine erfüllen konnten, war die Fortführung des Entwicklungsverbunds der Projektpartner unerlässlich.

Dass dieser Verbund gut für die Umsetzung des Projektvorhabens geeignet war, zeigte sich anhand folgender Punkte. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben kann das FGRS langjährige und umfangreiche regelungstechnische Expertise aufweisen. Diese umfasst auch die Modellierung und Regelung von Microgrids mit hohem Anteil EE. Das Team der Autarsys GmbH verfügt, wie in Abschnitt 2.2 aufgezeigt, über langjährige praktische Erfahrung

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

in der Regelung und Betriebsführung von Netzen mit hohem Anteil EE. Des Weiteren ist die Autarsys GmbH Betreiberin zahlreicher über den Globus verteilter MG-Projekte und damit in einer prädestinierten Position, um entsprechende Anlagen für zeitlich begrenzte wissenschaftlich-technische Erprobungen im Rahmen eines Feldtests verfügbar zu machen. Der Autarsys GmbH stehen ausserdem Laborräume und -Gerät zur Verfügung, was eine wichtige Voraussetzung im Rahmen eines geänderten Arbeitsplans (in Absprache mit dem PTJ genehmigt) darstellte.

Somit waren die genannten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung des Projektvorhabens durch den Zusammenschluss der Projektpartner gegeben.

5.1.2. Arbeitsteilung

Das abgeschlossene Projekt lässt sich in drei Phasen unterteilen: 1. Erarbeiten der notwendigen theoretischen Grundlagen, z. B. mathematische Modelle und Regelungsmethoden (Arbeitspakete (APe) 1–2); 2. Entwurf und Softwaresimulation (APe 3–6); 3. Praktische Erprobung (APe 7 und 8). Hieraus ergab sich die Arbeitsteilung zwischen den Projektpartnern. Während der ersten beiden Phasen sollte das FGRS federführend sein. Die Autarsys GmbH sollte hier zunächst eine beratende und unterstützende Rolle übernehmen. Für die Softwaresimulation sollte die Autarsys GmbH jedoch im von ihr allein durchgeführten APe 4 aus der für den Feldtest vorgesehenen Anlage Daten sammeln und daraus Simulationsszenarien generieren.

Die letzte Phase sollte unter der Federführung der Autarsys GmbH stattfinden und aus dem Entwurf einer Digital Twin (DT) Soft- und Hardware-Umgebung und einer Abfolge von Simulation, Parallelbetrieb und Feldtest am im Betrieb befindlichen MG bestehen. Aufgrund von Verzögerungen und der geopolitischen Situation im Irak mussten diese Pläne jedoch in Absprache mit dem PTJ abgeändert werden. Die MG-Komponenten im Feld sollten durch Laboraufbauten im Rahmen eines “Lab-in-the-Loop-Feldtests” emuliert werden. Das FGRS sollte jedoch auch in dieser Phase entscheidende Arbeit leisten und die entwickelten EMS-Konzepte überwachen und justieren und die Tests somit wissenschaftlich zu begleiten.

Während der Durchführung des Projektes konnte die Arbeitsteilung zwischen den Projektpartnern wie geplant umgesetzt werden. In regelmäßigen Projektbesprechungen wurde ein reger Austausch der Projektpartner sichergestellt.

Das Projekt hat mit dem Weggang des Mitarbeiters Sid Ahmed Attia (FGRS) und der Neueinstellung von Herrn Ujjwal Pratep einen Mitarbeiterwechsel erfahren. Auch auf der Stelle der studentischen Hilfskraft gab es einen Personalwechsel. Trotz dieser Wechsel konnte eine durchgehend enge und konstruktive Zusammenarbeit der Projektbeteiligten gewahrt werden konnte.

5.2. Zusammenarbeit mit Dritten

In diesem Abschnitt wird die Zusammenarbeit der Projektpartner mit Dritten aufgeführt. Hierzu werden zunächst die Kooperationen, die stärker auf der Seite des FGRS liegen ge-

nannt. Danach wird die Zusammenarbeit mit Partnern, die eher der Autarsys GmbH zugehören aufgeführt.

5.2.1. Fachgebiet Regelungssysteme

Das FGRS steht im Rahmen von Forschungsk Kooperation in engem Kontakt mit Unternehmen im Energiesektor. Im Rahmen unterschiedlicher Kooperationen wurden verschiedene Herausforderungen bei der Integration erneuerbarer Energieerzeuger adressiert. Beispielsweise stand das FGRS im Rahmen von Forschungsarbeiten in der Energietechnik in engem Kontakt und Austausch mit dem Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Fachbereich Elektrotechnik und Informatik und Universität Kassel, department of computer science an der University of Oxford, der School of Electronics, Electrical Engineering and Computer Science an der Queen's University Belfast und dem Dept. of Electrical Engineering (ESAT), KU Leuven, Belgien. Darüber hinaus besteht eine Kooperation mit dem Lehrstuhl für Angewandte Mathematik der Universität Bayreuth und der School of Electrical Engineering and Computing, University of Newcastle, Australia. Beide Gruppen sind international bekannt für ihre Expertise im Bereich der Optimierung und Regelungstechnik. Es wird ausserdem gerade eine Kooperation mit der Polytechnic University of Bari aufgebaut, siehe Abschnitt 9.1.

5.2.2. Autarsys GmbH

Die Autarsys GmbH pflegt als Systemintegrator ein weitreichendes Netz von Partnerschaften in der Energietechnik und-wirtschaft. Dieses beinhaltet sowohl Komponentenlieferanten, mit denen seit mehreren Jahren intensive Geschäftsbeziehungen bestehen. Die sind Batteriehersteller, Elektroautohersteller und auch Wechselrichterhersteller. Die Beziehungen reichen so weit, dass die Autarsys GmbH unter anderem an der Erarbeitung der Wechselrichter-Firmware intensiv beteiligt wurde. Maschinenfabrik Reinhausen GmbH konnte in diesem Zusammenhang über die Vereinbarung einer exklusiven Entwicklungspartnerschaft als Batteriewechselrichterlieferant für anspruchsvolle Sonderanwendungen sowohl im Bereich der netzdienlichen Anwendung im C&I-Bereich gekoppelt mit Arbitrage als auch beim unterbrechungsfreien Übergang zum Inselbetrieb gezeigt werden. Bei dem Verbundprojekt 0350041E_OVRTuere wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Ise, der FGH e.V., FGH GmbH und M.P.E. Untersuchungen zur Netzstabilität im Bereich der Netzstabilisierung mit Wechselrichtern und Energiespeichern am Verbundnetz mit Hilfe von Autarsys GmbH-BESS-Komponenten untersucht. Die erarbeiteten Lösungen haben auch Auswirkungen auf die Steuerung der weiteren Teilnehmer in einem Microgrid. Deshalb hat Autarsys Kontakte zu den Entwicklern bei Ihren Lieferanten die die PV-Wechselrichter liefern aufgebaut. Anforderungen an die Netz-Dienlichkeit von erneuerbaren Erzeugungsanlagen werden mit den Lieferanten bei der Planung und Errichtung neuer Microgrids implementiert, parametrisiert und getestet.

Da die Autarsys GmbH darüber hinaus in MG-Projekten als Projektentwickler und Unterlieferant von Steuerungen auftritt, wird sie aktiv auf potentielle Kunden zugehen, um bei geeigneten Projektstrukturen die Anwendung der erarbeiteten Lösungen anzuregen.

6. Erzielte Ergebnisse

6.1. Definition der Unsicherheiten und kritischen Ereignisse (AP 1)

Auf Basis mehrerer von der Autarsys GmbH vorgeschlagener Anlagen konnten als Unsicherheiten die folgenden identifiziert werden:

1. Wetterbedingungen
2. Lastbedarf: Bei zu- und abschaltbaren Lasten (wie im Fall der Anlage in Mam Rashan) kann das Einschalten einer Last eine sprungartigen Störung ungewisser Höhe bedeuten

Als kritische Ereignisse konnten die folgenden identifiziert werden:

1. Ausfälle an Kommunikationsverbindungen bzw. -Anlagen. Insbesondere drahtlose Kommunikationsverbindungen wie im Fall der Anbindung der PV-Anlagen des Microgrids in Mam Rashan können potenziell von Störungen bzw. Ausfällen betroffen sein. Jedenfalls ist das System insofern offen als es beispielsweise ohne Zugang zu Betriebsräumen durch Störsender beeinträchtigt werden kann. Ein Kommunikationsdiagramm des Microgrids in Mam Rashan ist dem Bericht angehängt.
2. Mögliche Ausfälle der verteilten Stromerzeuger wie PV-Anlagen oder Generatoren
3. Die Ausfälle und Wiederherstellungen des sporadisch zur Verfügung stehenden öffentliche Netzes im Fall der Anlage in Mam Rashan sind als kritische Ereignisse einzuordnen. Die leider verhältnismäßig häufig auftretenden Ausfälle bieten insofern auch eine Chance zur Erprobung des im Projekt zu entwickelnden resilienten Energiemanagementsystems, was die Reaktion auf Ausfälle an Erzeugereinheiten bzw. bei Stromlieferanten angeht.
4. Ausfälle innerhalb der Netz-Verteil-Infrastruktur, dabei sind folgende Fälle zu unterscheiden:
 - Leitungsunterbrechungen
 - Kurzschlüsse in der Verteilung oder selbst in den Kundenanlagen

Während dem reibungslosen und effizienten Weiterbetrieb im Fall von Kommunikationsausfällen in diesem Projekt besondere Aufmerksamkeit zukommen soll, halten wir es im Hinblick auf den geplanten Feldtest und eine praktische Anwendung auch für wichtig und

6. Erzielte Ergebnisse

vielversprechend, mögliche Ausfälle bei Erzeugereinheiten bzw. dem Versorgungsnetz oder anderen angekoppelten Stromlieferanten in den resilienten Energiemanagementsystem-Entwurf einzubeziehen.

Die Bewertung der Stromversorgungsqualität ist essenziell für die Zuverlässigkeit und Effizienz eines Energiesystems. Dabei werden Aspekte wie Netzverfügbarkeit, Versorgungsunterbrechungen und die Einhaltung von Netzqualitätsstandards analysiert. Zusätzlich spielt die Fehlertoleranz eine wichtige Rolle, insbesondere im Umgang mit ungeplanten Ereignissen und deren Auswirkungen auf das Energiemanagement. Auch potenzielle Fehler in der Infrastruktur, wie Kommunikationsausfälle oder Störungen in der Stromverteilung, werden berücksichtigt. Um Verbesserungen zu bewerten, werden historische Anlagendaten analysiert, mit dem Ziel, ein theoretisches Optimum als Referenzwert zu definieren. Im Detail werden folgende Kriterien definiert:

1. Die Qualität der Stromversorgung wird gemäß folgenden Kriterien bewertet:
 - a. Verfügbarkeit der Netzversorgung für die Verbraucher;
 - angekündigte
 - unangekündigte Ausfälle
 - b. Anzahl der Versorgungsunterbrechungen, Unterteilung in
 - Kurzunterbrechungen (< 3 sec.) und
 - Versorgungsausfälle
 - c. Einhaltung der Netzqualitätskriterien, das heißt, ist die Netzspannung und Netzfrequenz innerhalb der Toleranz (z. B.: EN50160)? (geplante Abweichungen von der Normspannung/frequenz sind zu berücksichtigen).
2. Weiterhin ist der Einfluss der Fehlertoleranz auf die Zuverlässigkeit der Stromversorgung ein weiteres Kriterium:
 - a. Die Häufigkeit von ungeplanten Ereignissen im Netzmanagement, die auf Ausfälle einzelner Anlagen zurückzuführen sind z. B: Kommunikationsausfälle von einzelnen Teilanlagen oder allen Kommunikationssträngen? Wie reagiert das Energiemanagement auf solche Ereignisse?
 - b. Bewertung des EMS abhängig von der Fehlerursache nach:
 - erwartetem, vorhersehbarem und vorhersagbarem Verhalten und
 - unvorhersehbarem, schlimmstenfalls nicht netzdienlichem Verhalten des EMS.
3. Autarsys beschafft historische Daten einer möglichen Anlage, bei der Verbesserungen überprüft werden sollen, mit dem Ziel, dass ein theoretisches Optimum definiert werden soll. Dies ist der Referenzwert, mit dem das existierende und das neue zu entwickelnde Energiemanagement bewertet werden soll. (Dieser Aufgabenbereich wird dem FGRS zugeordnet). Es ist allen bewusst, dass dieser Wert mit keinem real implementierbaren vorausschauenden Regler bzw. Energiemanagementsystem zu erreichen sein wird.

6.1. Definition der Unsicherheiten und kritischen Ereignisse (AP 1)

Liste möglicher Anlagen, an denen die Verbesserungen des EMS getestet werden könnten: Von Autarsys wurden im Vorfeld folgende Anlagen vorgeschlagen, die auch von der Verwertung am Projektende als Erstanwender profitieren sollen:

1. New Ibahay: Dorfstromversorgung auf den Philippinen

- Batterie 60 kVA, 248kWh nom.
- PV-Anlage 2 x 35 kWp,
- PV inverter 2 x SMA Core1 50 kW
- Generator 125 kVA
- Verbraucher ist ein Dorf auf den Philippinen, keine Möglichkeiten die Last zu beeinflussen.
- Bemerkung: Zustimmung für Testbetrieb nicht erteilt

2. Hof Grabenmeier: Netzunabhängiger Bauernhof in Ahlen Westfalen

- Batterie 84 kVA, 143kWh nom.
- PV-Anlage 3 x 35 kWp,
- PV inverter 3 x Solar Edge 30 kW
- Generator: 1 x Rapsöl-BHKW 10 kVA, 1 x Rapsöl-BHKW25kVA
- Verbraucher ist ein Bauernhof in der Nähe von Ahlen Westfalen die Last ist zum Teil dauerhaft zu versorgen, allerdings können manche Lasten auch abgeschaltet werden, zum Beispiel Boiler oder der Güllemixer und die Rapsölmühle
- Bemerkung: Zustimmung ist ausstehend und fraglich, das unter anderem auch Mietparteien mit dem Erneuerbaren System versorgt werden.

3. Haffhus, Hotel und Spa: Ueckermünde, MV, netzunabhängig

- Batterie 200 kVA (+ backup 200kVA), 525kWh nom. wird demnächst auf 1053kWh nom erweitert
- PV-Anlage 5 x Teilanlagen mit unterschiedlichen Teil-Größen gesamt 118kWp
- PV inverter 1 x SMA Core1 50kW, 3 x SMA Tripower 20kW und 1 x 10kW
- Generator: 2 x Glock-Hackschnitzel-BHKW 20 kVA,
- Verbraucher ist ein Hotel in Ueckermünde, die Last ist zum Teil dauerhaft zu versorgen, allerdings können manche Lasten auch mittels eines externen Energiemanagement abgeschaltet werden, zum Beispiel Boiler oder auch die Nachheizung des Außenpools, auch zum Teil die Stromtankstellen für den EV- Fuhrpark allerdings dürfen die Ladewünsche der Hotelgäste nicht beeinträchtigt werden.
- Bemerkung: Zustimmung ist ausstehend und fraglich. Auf jeden Fall werden auch nur KU protokolliert und müssen entsprechend untersucht werden.

6. Erzielte Ergebnisse

4. Refugee-Camp Mam Rahan: in Mam Rahan Iraq

- 2 unabhängige ESS Batteriesysteme
 - ESS1: 200 kVA 225kWh nom.
 - ESS2: 400 kVA 525kWh nom.
- PV-Anlage 2 x Teilanlagen
 - PV1: 300kWp, Süd-Ausrichtung allerdings entlang eines Tals, 13 WR RefuSol 25 kW Anbindung über USS-Protokoll und ZigBee an ESS1
 - PV2: 500kWp, Ost- West Ausrichtung, 2 x 5 Kaco 50kW WR, jeder ist einzeln begrenzt, Ankopplung über ModBus-TCP über WiFi
- Kein Generator, die Versorgung ist eigentlich über das öffentliche Netz, das aber leider nur sporadisch zur Verfügung steht. Allerdings können die Batterien nicht über das öffentliche Netz aus rechtlichen Gründen geladen werden.
- Verbraucher sind 400 Wohn-Container, die von 1800 Flüchtlingen über ein separates Netz versorgt werden. Dieses Netz ist in 11 Segmente aufgeteilt, die über das Lastmanagement zugeschaltet werden können.
- Bemerkung: Eine Zustimmung ist noch ausstehend, aber es gab schon durchaus positive Signale des Stifters der Anlage, der auf eine kostenlose Optimierung des Lastmanagements hofft.

Der von Autarsys bevorzugte Favorit für die reale Anlage, mit der die Evaluierung der verbesserten Regelung getestet werden soll, ist das Microgrid in Mam Rahan Iraq.

- Dort gibt es sowohl ein komplexes Konstrukt aus mehreren Erzeugern, Batteriesystemen, steuerbaren Lasten und 2 voneinander unabhängig operierenden Energiemanagementsystemen.
- Außerdem sind immer wieder Zeiten, zu denen das öffentliche Netz vorhanden ist, so dass auch ohne Beeinträchtigung der Performance ein update an den Anlagen durchgeführt werden kann.

Das FGRS und die Autarsys GmbH haben im Zuge der Modellierung bestimmter kritischer Ereignisse die Ereignisketten bei Überlastung und großen Frequenzausschlägen erörtert. Für ersteres Szenario soll ein zusätzliches Simulationsmodell auf der Grundlage der Autarsys-Lastabwurfstrategien in die Simulationsumgebung aufgenommen werden. Für die Frequenzausschläge soll ein zusätzliches Modul mit Totzonen- und Leistungsanlauf-/Ablaufsimulationsmodell in unsere Simulationsumgebung aufgenommen werden. Kommunikationsausfälle wurden ebenfalls besprochen. Bisher (Vorarbeiten aus dem EMERGE-Projekt) wurde der Kommunikationsverlust als ein Ein-Aus-Ereignis modelliert. Nach den Gesprächen mit Autarsys ist ein periodisches Modell mit Stochastik in Bezug auf die Dauer des Ausfalls und seine Periodizität zur mathematischen Beschreibung des Verhaltens der Ein-Aus-Variable geeignet. Die verschiedenen Module und ihre konfigurierbaren Parameter werden im Rahmen der weiteren SW-Entwicklung einbezogen.

Damit wurden die Arbeiten in AP 1 inhaltlich wie geplant durchgeführt.

6.2. Auswahl geeigneter Reglerentwurfverfahren und Bewertungskriterien (AP 2)

In **Arbeitspaket 2** hat das FGRS in Zusammenarbeit mit der Autarsys GmbH die folgenden Ergebnisse erzielt:

In einem informellen Treffen diskutierten Autarsys GmbH und FGRS die Anforderungen an die Funktionsfähigkeit und Optimierungskriterien wie die Minimierung der Batterielebensdauer.

Es wurde eine umfangreiche Literaturrecherche zum Themenkomplex Stromnetze bzw. Energiesysteme durchgeführt, wobei besonders auf die für das Projekt relevanten Aspekte Resilienz, Digital Twin, Energiemanagementsysteme sowie Designaspekte wie die Auslegung und Platzierung von Energiespeichern geachtet wurde. Außerdem wurden nah angrenzende Bereiche wie Stabilität, Cyber-Sicherheit, Vorhersagemethoden, Energiespeichertechnologien, Multi-Microgrids und Cyber-physikalische Systeme berücksichtigt. Des Weiteren wurde auf methodische Aspekte wie MPC, verteilte Regelungsansätze, Optimierungsverfahren und die Anwendung von maschinellem Lernen (insbesondere Reinforcement Learning) geachtet.

Aufgrund des Umfangs der Literatur wurde entschieden, den Fokus auf Übersichtsartikel zu legen, in denen jeweils eine Vielzahl von Einzelartikeln besprochen und eingeordnet werden. In einer Akquisephase wurden mehr als 1200 Übersichtsartikel, welche die genannten Bereiche abdecken, gesichtet, von denen etwa 800 allein auf die Zeit seit 2019 entfallen. Die Artikel wurden tabellarisch mit Kennzeichnung des Jahrs der Veröffentlichung, der Zeitschrift bzw. Konferenz sowie einer Auswahl bei erster Sichtung erkennbarer behandelte Themenbereiche aufgelistet. Eine Auswertung findet sich im Rahmen der Besprechung der Fortschritte Anderer in Kapitel 10.

Die Literaturrecherche zu Themen wie Resilienz, Cybersicherheit und verteilte Steuerungs- und Optimierungsansätze (einschließlich Marktmechanismen) wurde während der gesamten Projektlaufzeit fortgesetzt, da sie im Mittelpunkt unserer Forschung standen.

Damit wurden die Arbeiten in AP 2 inhaltlich wie geplant durchgeführt.

6.3. Erweiterung einer Simulations-Software (AP 3)

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Erweiterung des im Rahmen des EMERGE-Projekts entwickelten Simulationsmodells um Komponenten für Unsicherheiten und kritische Ereignisse. Dies umfasst theoretische Modellbildung, Kommunikations- und Datenschnittstellen, die Software-Implementierung, eine parallele Simulationsumgebung sowie die Szenariosimulation.

6.3.1. Erweiterung der bestehenden Simulationssoftware

Zunächst wurden an der Softwarearchitektur Anpassungen zur Erhöhung der Modularität und Flexibilität vorgenommen, beispielsweise ein verbessertes Parsing der bei der Initialisierung von Objekten übergebenen Parameter.

6. Erzielte Ergebnisse

Die aus Vorarbeiten (EMERGE-Projekt) stammende Implementierung der sättigungsbehafteten Droop-Regelung wurde überprüft, überarbeitet und in den Hauptentwicklungszweig der Software überführt.

Zunächst wurde, wie zuvor für die "gewöhnliche" Droop-Regelung, eine von der unteren Regelschicht abstrahierte Version der Lastaufteilung programmiert. Dafür werden die Bedingungen für den Gleichgewichtszustand (power balance) aufgestellt und nach der Frequenz und den daraus folgenden Erzeugerleistungen gelöst. Da die Leistungserzeugung jetzt durch die Sättigung nichtlinear von der Frequenz abhängen kann (siehe Abb. Fig 6.1) müssen Gleichungen iterativ (z.B. mit Bisektion, oder durch separate Betrachtung aller linearen Teilbereiche) gelöst werden. Um einen realitätsnäheren simulativen Proof-of-Con-

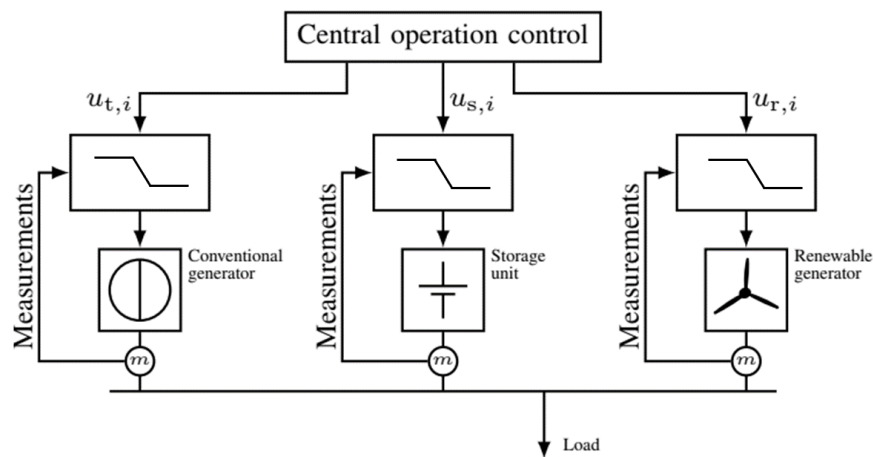


Abbildung 6.1.: MG mit sättigender Droop-Regelung und EMS.

cept zu erhalten wurde anschließend auch die untere Regelschicht (Droop-Regelung) in die Simulationssoftware integriert. Dabei wurden zwei verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung der Sättigung implementiert:

- Umschalten zwischen Grid-forming (GFM) und Grid-following (GFL) control modes. Dies und ähnliche Konzepte wurden bereits in einigen Artikeln (siehe z.B. [80] sowie Referenzen in Übersichtsartikeln wie [11, 104]) eingeführt.
- Eine von der Autarsys GmbH verwendete zusätzliche Regelschicht, bei der die Frequenzsollwerte in Abhängigkeit zur Überschreitung der Leistungs- und Energiegrenzen angepasst werden.

Hier geben wir eine kurze Beschreibung der Simulationssoftware für MGs, die in MATLAB programmiert wurde. Die Entwicklung dieser Software begann im Rahmen des Projekts EMERGE und wurde im RESUME-Projekt erheblich vorangetrieben. Sie ermöglicht ein sicheres und konsistentes Testen neuer Regler, indem sie eine digitale Darstellung des MGs bereitstellt, in der Strukturen und Bedingungen nach Bedarf geändert werden können. Diese Simulationssoftware entspricht dem in Abschnitt beschriebenen MG-Modell. Abschnitt 6.5.1. Genaue Simulationen sind für die Bewertung der Leistungsfähigkeit und Ausfallsicherheit von Reglern unerlässlich und erfordern eine detaillierte Modellierung der

MG-Komponenten. Simulationsdaten werden als historische Zeitreihen für die Analyse gespeichert. Die Software wird mithilfe objektorientierter Programmierung (OOP) implementiert und ist in vier Repositorien unterteilt: MG-Modell, Regler, Vorhersagemodul und Simulator. Diese Komponenten interagieren, um nahtlose Simulationen zu ermöglichen und die Entwicklung robuster MG-Regelungsstrategien zu ermöglichen. Es folgt eine kurze Beschreibung dieser Repositorien.

6.3.1.1. MG-Modell

Das MG-Modell-Repository stellt alle erforderlichen Komponenten für die Erstellung eines digitalen Abbilds eines MGs bereit und bildet die Grundlage für die Simulation. Das MG selbst wird zusammen mit seinen Komponenten durch verschiedene Klassenhierarchien dargestellt, nämlich `microgrid`, `mridModel`, `mmit`, `moadDemand` und `communicatoin`, wie Abb. 6.2 dargestellt. Die Kommunikation zwischen dem MG und dem Regler wird von der separaten Kommunikationsklasse (`communication`) verwaltet.

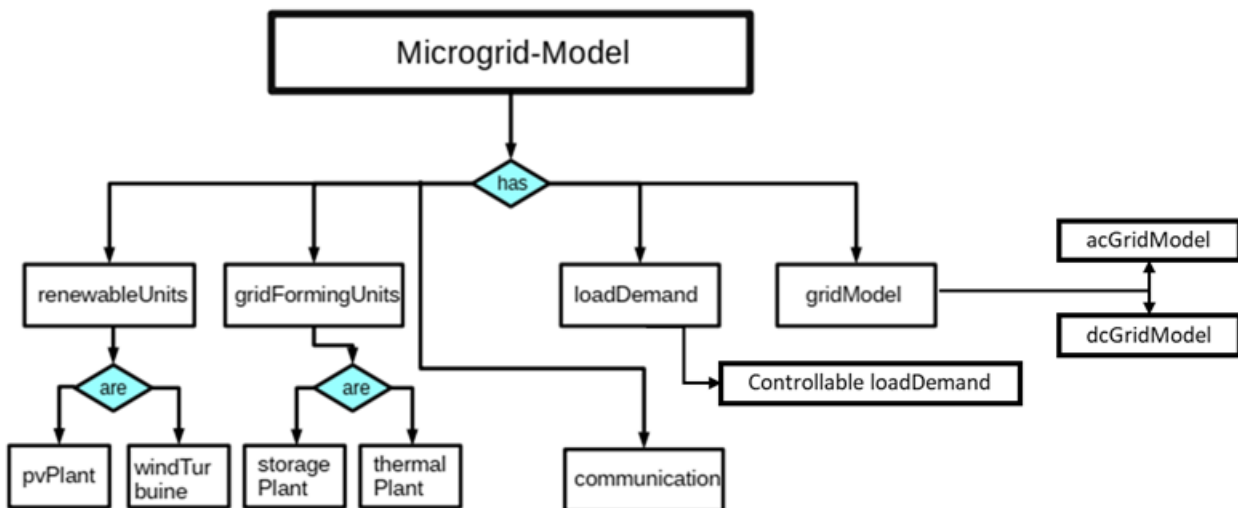


Abbildung 6.2.: MG-Modell Repository

6.3.1.2. Regler

Dieses Repository ermöglicht die Erstellung von Regler-Objekten, die den MG-Betrieb steuern bzw. regeln. Die hierarchische Klassenstruktur definiert eine übergeordnete Klasse, die die zugrunde liegenden Anforderungen wie Einschränkungen und Kostenfunktionen der MG-Komponenten enthält, welche für die Anwendung eines MPC-basierten Ansatzes für das Energiemanagement erforderlich sind. Die davon erbenenden Unterklassen stellen verschiedene MPC-Ansätze dar, nämlich `simpleMpc`-, das eine grundlegende MPC-Implementierung bietet, `minimaxMpc`- und `simpleRuleBased-Controller`, wie in Abb. 6.3 dargestellt, die auf den in späteren Abschnitten entwickelten Ansätzen basieren. Die Nebenbedingungen für das MPC-Problem umfassen Einheitenmerkmale wie Mindest- und

6. Erzielte Ergebnisse

Höchstleistungs- oder SoC-Grenzwerte, netzbezogene Anforderungen wie Leistungsbilanz und Leistungsaufteilung oder Kommunikationsfehler. Die Kostenfunktionen umfassen ungenutzte erneuerbare Energien und den Betrieb von thermischen Generatoren und Speicherkraftwerken. Die Reglereigenschaften umfassen Gewichtungen für die verschiedenen Kostenfunktionen. Bei der Initialisierung des Controllers wird ein Optimierungsobjekt erstellt, das das Optimierungsproblem basierend auf den Einschränkungen und Kostenfunktionen darstellt, die für jeden Controller von Bedeutung sind. Das Optimierungsobjekt wird verwendet, um das Optimierungsproblem in jedem Zeitschritt zu lösen. Die Wettervorhersagen der erneuerbaren Einheiten, die Schaltzustände der thermischen Generatoren und der Ladezustand der Speicherkraftwerke dienen als Eingaben. Die Lösung des Optimierungsproblems liefert die Leistungssollwerte und Schaltzustände aller Einheiten für den nächsten Zeitschritt.

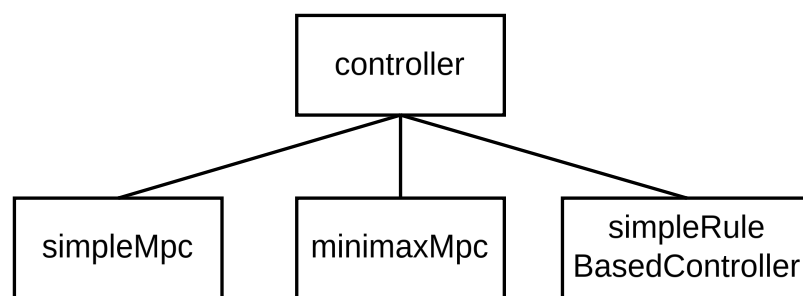


Abbildung 6.3.: Controller-repository

6.3.1.3. Forecast-module

Die Leistung der volatilen Quellen, PV-Anlagen, Windturbinen und Lasten, unterliegt unbeständigen Wetter- und Lastanforderungen. Dem Controller ist nur die aktuelle Leistung der Einheiten bekannt. Die Prognoseklasse generiert Prognosen, die der Controller zur Lösung des Optimierungsproblems benötigt. Jede Einheit, die Schwankungen unterliegt, verfügt über ein Prognoseprogramm als Eigenschaft. Der Prognostiker speichert alle vorherigen Istwerte als Zeitreihe. Auf der Grundlage dieser historischen Daten werden die Prognosen erstellt und dem Controller zur Verfügung gestellt, wobei der Zeitraum der Prognose vom Vorhersagehorizont des Controllers abhängt. Um bereits zu Beginn einer Simulation auf historische Daten für die Erstellung von Prognosen zurückgreifen zu können, obwohl noch keine vorherigen Stichproben hinzugefügt wurden, wird der Prognostiker mit einem historischen Datensatz initialisiert. Ein optionales Argument bei der Erstellung des Prognostikers ist eine Sammlung von Zeitreihen mit unteren und oberen Rändern, die das gleitende robuste Intervall um die tatsächliche Prognose darstellen. Dies führt zu einer Zeitreihensammlung mit den prognostizierten unteren und oberen Datenpunkten. There are three sub-classes which differ in their forecasting methods namely naive forecaster, fullInfo forecaster and knn forecaster.

6.3.1.4. Simulator

Das Simulator-Repository enthält alle Komponenten, die für die Einrichtung und Ausführung von Simulationen, die Konfiguration der MG-Umgebung, des Controllers und des Prognostikers sowie für die Ausführung aller Komponenten in der richtigen Reihenfolge erforderlich sind. Beim Einrichten eines Simulatorobjekts kann die Simulation über die übergebenen Argumente konfiguriert werden. Nach dem Aufbau und der Initialisierung des Simulators mit den ausgewählten Komponenten kann die Simulation gestartet werden. Eine Schleife ruft die Schrittfunktion des Simulators auf, bis die gewünschte Dauer erreicht ist, wobei die Simulationszeit bei jeder Iteration um einen Zeitschritt erhöht wird.

Simulation durchspielen wie in Abb. 6.4 gezeigt:

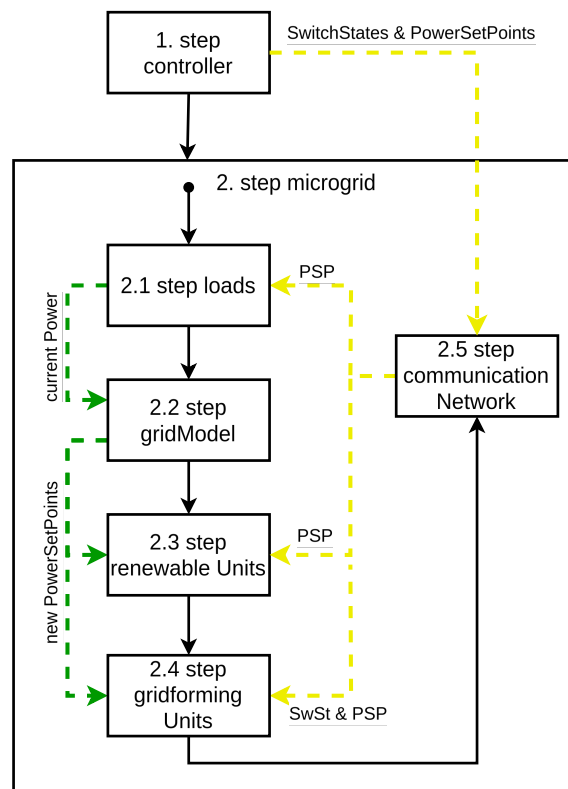


Abbildung 6.4.: Initialisierung und Ausführung einer Simulation

1. Step the controller: Berechnet eine Reihe von Steuerungsaktionen, die dem Netz zur Verfügung gestellt werden. Die berechnete Steuerungsaktion hängt vom aktuellen Zustand des MG und den Prognosen ab. Die resultierenden Leistungswerte, die Steuerungsaktion für jede Einheit und die Schaltzustände zum Ein- und Ausschalten der thermischen Generatoren werden dem Kommunikationsnetzwerk zur Verfügung gestellt.
2. Step the MG:

6. Erzielte Ergebnisse

- a) Stufenlasten: Aktualisierung des aktuellen Lastbedarfs auf der Grundlage der Bedarfszeitreihe.
- b) Stufenrastermodell: das Problem der Stromaufteilung zusammen mit dem Stromflussmodell des Stromnetzes lösen, um die stationären Stromerzeugungen aus den netzbildenden Einheiten zu ermitteln.
- c) Schritt erneuerbare Einheiten: Aktualisierung der aktuellen Leistung in Abhängigkeit von der verfügbaren Leistung, die durch die Wind-Einstrahlungs-Zeitreihe, den Leistungssollwert und die Lösung des Problems der Leistungsaufteilung bereitgestellt wird.
- d) Stufenrastereinheiten: Aktualisierung der aktuellen Leistung in Abhängigkeit vom Schaltzustand, dem Leistungssollwert und der Lösung des Problems der Leistungsaufteilung.
- e) Schritt Kommunikationsobjekt: Aktualisierung des Status aller Verbindungen auf der Grundlage der Kommunikationsstatus-Zeitreihe.

Mit diesem Softwarepaket als Backend wurde auch ein Frontend entwickelt, um ein vollständiges Softwarepaket mit Plug-and-Play-Funktion zu erstellen. Im nächsten Abschnitt beschreiben wir das webbasierte Frontend.

6.3.2. Grafisches Web-basiertes Frontend

Als Neuerung wurde im Rahmen des Projekts ein Web-Technologie-basiertes grafisches Frontend entwickelt, das dem Aufbau, der Konfiguration bzw. Parametrierung, der Simulation, Visualisierung und Auswertung von MGs dienen soll. Es handelt sich um eine Javascript-basierte Webseite, die per Websockets kontinuierlich mit einem Python-basierten Broker kommuniziert. Ziel war es, dass mehrere Benutzer-Instanzen und die Matlab-basierte Simulationssoftware gleichzeitig an der Sitzung teilnehmen und somit interagieren können. Damit wurden die Arbeiten in AP 3 inhaltlich wie geplant durchgeführt. – Grafische Darstellung Frontends, Simulation, Backend, siehe Abb. 6.5. –

Wie in der Abbildung 6.5 dargestellt, stellt die Server-Client-Struktur eine Verbindung zwischen dem Matlab-Client und dem Webclient her. Der Matlab-Client führt die Simulation aus, während der Webclient die grafische Front-End-Schnittstelle bereitstellt, die den MG-Zustand während der Simulation visualisiert. Die Verbindung ermöglicht die Datensynchronisierung zwischen den Clients, die ihre Zustände entsprechend den vom geänderten Client gesendeten Zustandsunterschieden aktualisieren. Durch die Beiträge dieser Arbeit wurde die kooperative Mehrbenutzer-Simulationssoftware so entwickelt, dass die MG-Struktur durch Benutzerinteraktionen angepasst werden kann. Die Front-End-Funktionen können genutzt werden, um das MG-Diagramm schnell und auf intuitive Weise grafisch zu erstellen und neu zu konfigurieren. Daher ist die Simulationskonfiguration nicht nur auf vordefinierte Konfigurationen beschränkt, sondern kann auch während des Betriebs im Plug-and-Play-Stil angepasst werden, um die erforderlichen Layouts zu erreichen. Der Benutzer hat eine nahtlose Kontrolle über die Simulation, die wesentliche Steuerungsaktionen umfasst. Die Hauptfunktionen, die ein Benutzer ausführen kann, sind wie folgt:

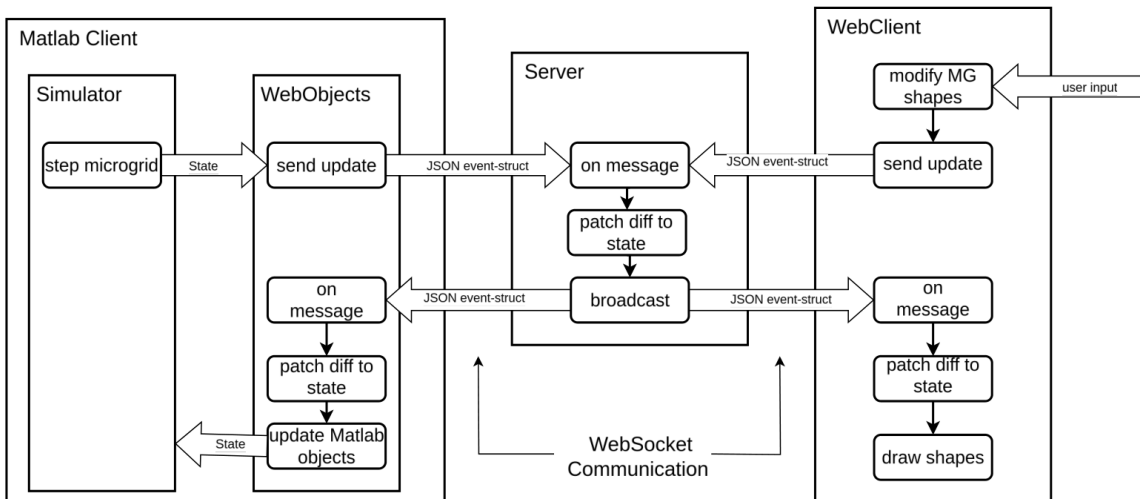


Abbildung 6.5.: Grafische Darstellung Frontends, Simulation, Backend [58].

- Erstellung eines benutzerdefinierten MG-Schemas , zum Beispiel wie in 6.6
 - Integration der elektrischen Netzverbindungen und anderer struktureller Eigenschaften als modifizierbare Objekte.

- Bearbeitung des MG auf der Web-Oberfläche
 - Aktualisierung der MG-Struktur entsprechend den Änderungen auf der Web-Oberfläche vor oder während einer Simulation
 - Korrekte Neuinitialisierung neuer Geräteinstanzen (MG-Komponenten), die durch Kopieren der vorhandenen erstellt wurden
 - Anpassung der Eigenschaften von Komponenten, die mit der MG-Struktur in Zusammenhang stehen, bei aktualisierungen

- Steuerung von Simulationen
 - Nahtlose Steuerung der Simulation mit Start-, Stopp- und Reset-Taste
 - Eingabe der Simulationsdauer
 - Speichern und Laden von Simulationen

6. Erzielte Ergebnisse

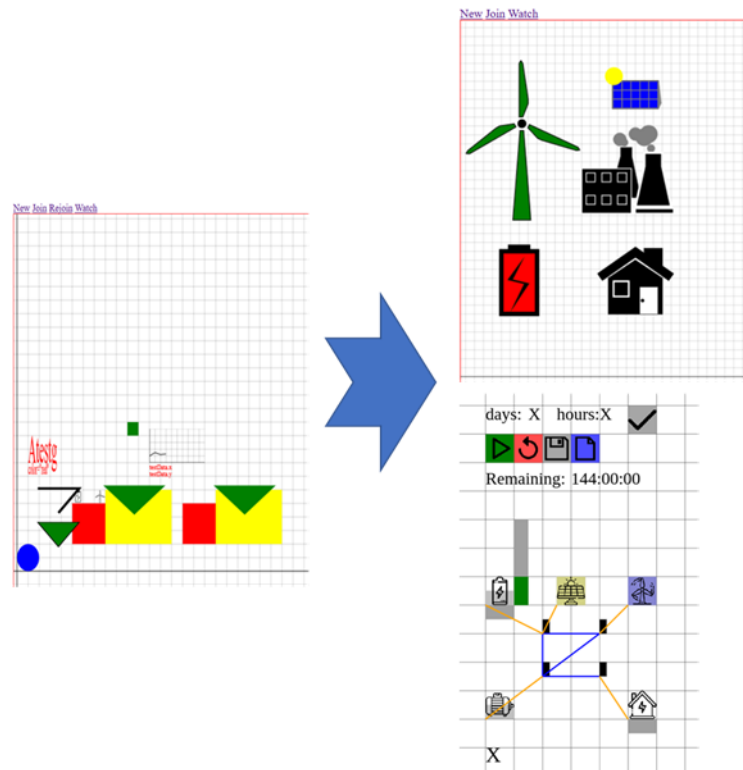


Abbildung 6.6.: Erstellung benutzerdefinierter MG und Formen für Simulationen. Screenshot der in diesem Projekt entwickelten Web-Oberfläche

Nachfolgend finden Sie einen Beispiel-Workflow für die Erstellung eines benutzerdefinierten MG-Modells, die Ausführung einer Simulation und das Speichern der Simulationsergebnisse. Das Bild 6.8 veranschaulicht die Benutzerinteraktion auf der Benutzeroberfläche für jeden Schritt. Die begleitenden Beschreibungen enthalten eine detaillierte Erläuterung der einzelnen Schritte und heben die spezifischen Funktionen hervor. Die Workflow-Schritte wurden auch in Abb. 6.7 zusammengefasst.

6.3. Erweiterung einer Simulations-Software (AP 3)

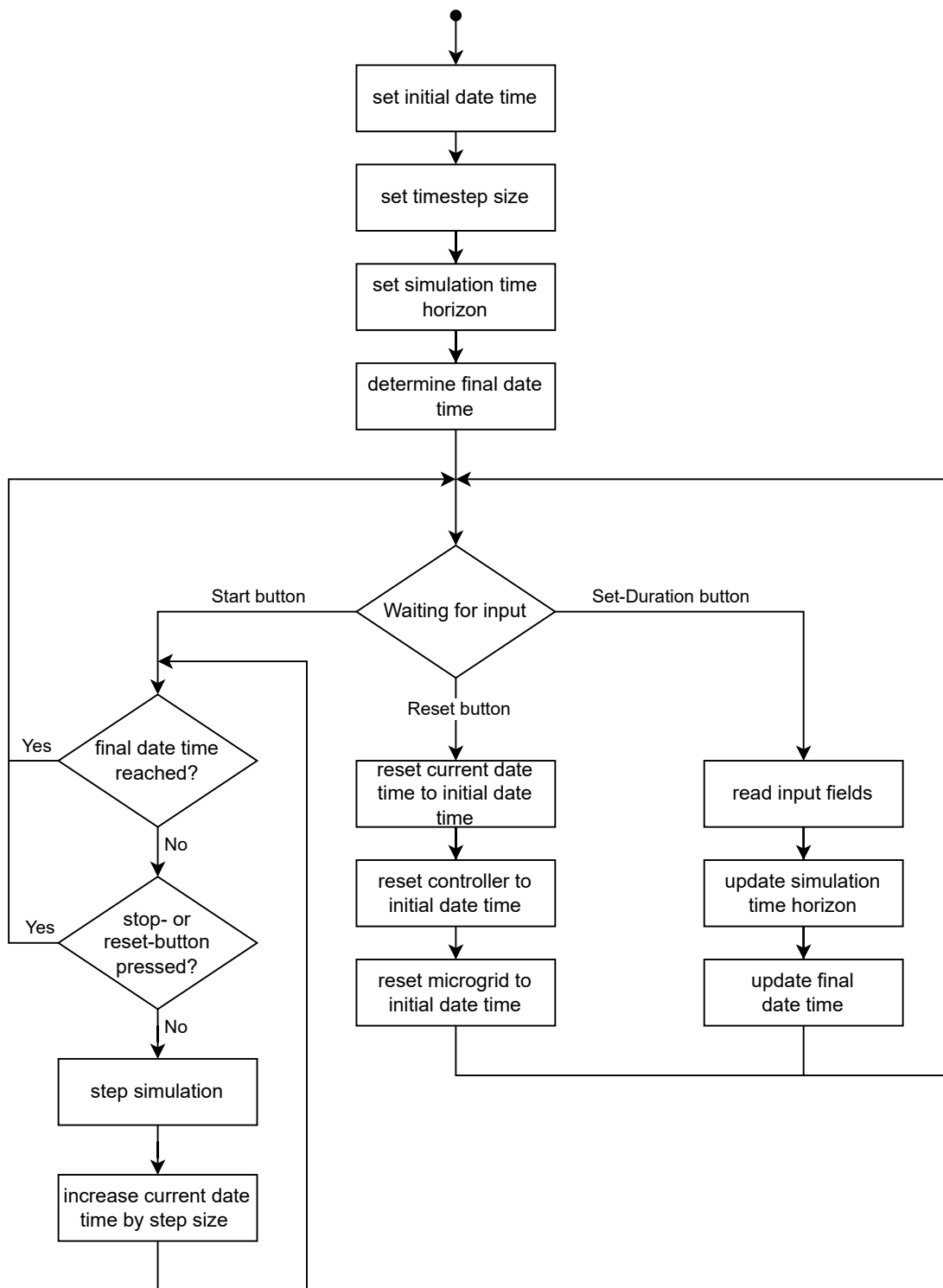


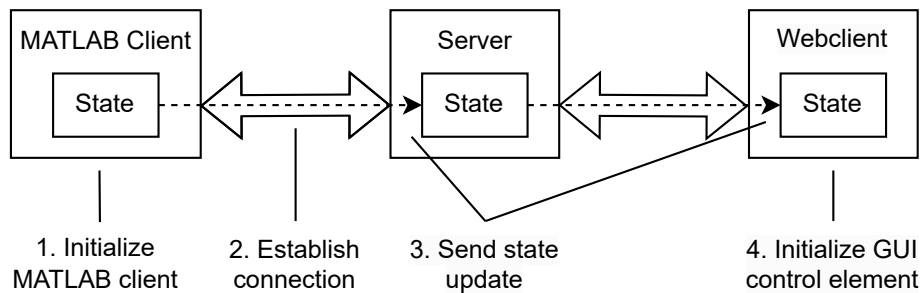
Abbildung 6.7.: Simulationsablauf. [58]

6. Erzielte Ergebnisse

Arbeitsschritte:

(a) Initialisierung des Simulators des MATLAB-Clients

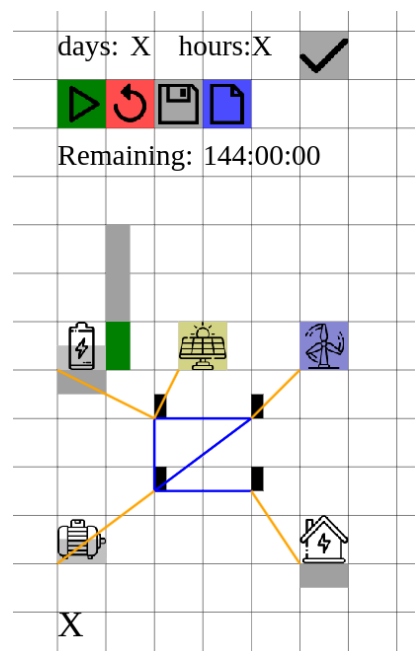
- Erstellen des Simulator-Objekts, konfiguriert durch die Argumente für MG-Voreinstellung, Controller- und Forecaster-Typ etc.
- Aufbau der Client-Server-Kommunikation.
- Möglicherweise Laden einer gespeicherten Simulationsdatei.
- Initialisierung des Shape-Zustands und Senden von Updates an den Server.
- Initialisierung des Steuerungs-GUI-Elements.



(a) Initialization commands in MATLAB

(b) Voreingestelltes MG-Modell und Steuerungs-GUI werden im Frontend geladen.

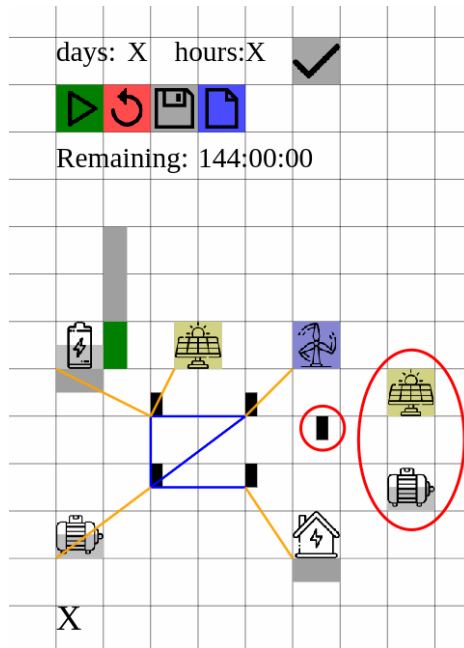
- Der gemeinsame Zustand wird auf den Zustand des Webclients angewendet.
- Simulationsobjekte werden entsprechend ihrer Eigenschaften gezeichnet.



(b) Loading MG and GUI

(c) Hinzufügen von Komponenten durch Kopieren bestehender oder Löschen unerwünschter Komponenten.

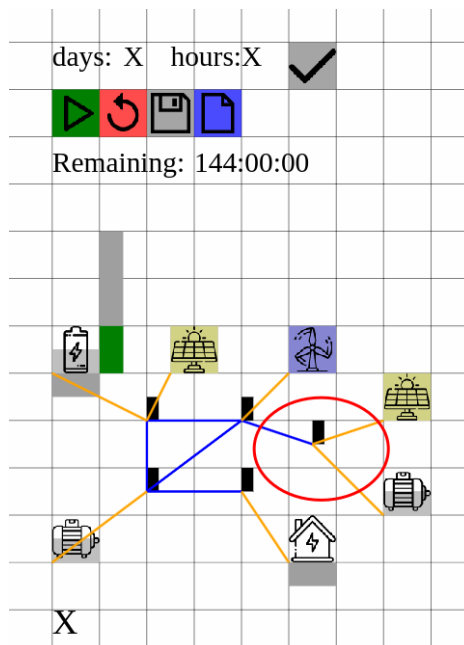
- Kopierte Objekte werden erstellt und den entsprechenden Speicherarrays hinzugefügt.
- Die Bus-zu-Bus-Adjazenzmatrix wird erweitert.
- Die Einheit-zu-Bus-Adjazenzmatrix wird erweitert.
- Neu hinzugefügte und noch nicht verbundene Einheiten werden ausgeschaltet.
- Die Zeitreihe des Kommunikationsobjekts wird erweitert.



(c) anpassend MG

(d) Verbindung der Komponenten mit dem Netz durch Hinzufügen und Platzieren der erforderlichen Leistungs- und Einheit-zu-Bus-Leitungen.

- Einträge in der Bus-zu-Bus-Adjazenzmatrix werden angepasst.
- Einträge in der Einheit-zu-Bus-Adjazenzmatrix werden angepasst.
- Neu verbundene Einheiten werden eingeschaltet.

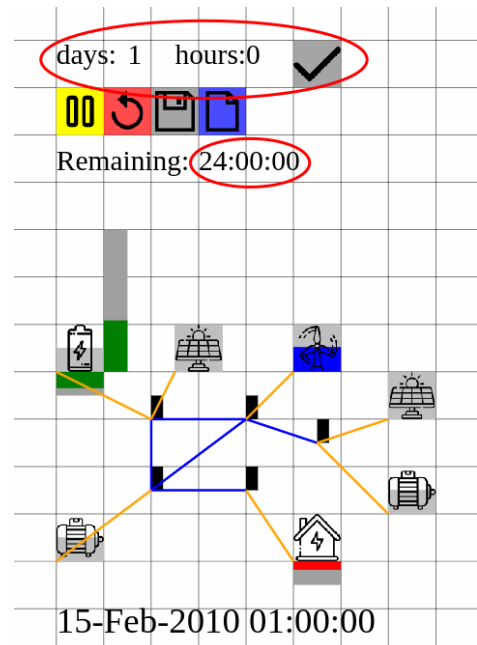


(d) Verbindung von Einheiten und Bus

6. Erzielte Ergebnisse

(e) Eingabe der Simulationsdauer in die Eingabefelder und Bestätigung, anschließend Start der Simulation per Klick auf die Play-Taste.

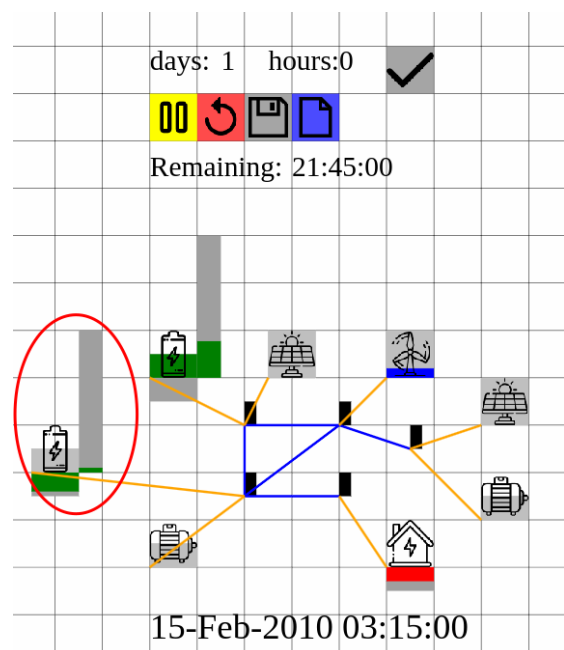
- Der Simulator liest die Eingabefelder für die Dauer und aktualisiert den Simulationszeitraum.
- Der Simulator erkennt den Klick auf die Start-Taste und beginnt mit der Simulation.
- Beim Start der Simulation erkennt der Controller Änderungen im MG und löst einen Neuaufbau aus, um neue Komponenten zu integrieren.



(e) Einstellung von Simulationszeit und -start

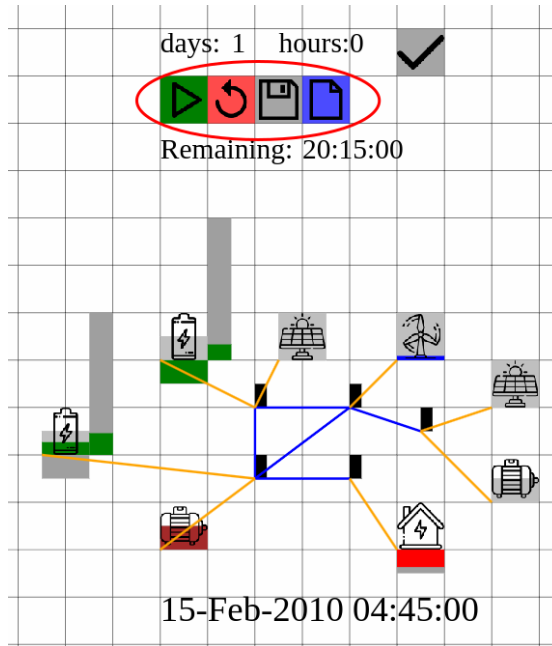
(f) Während die Simulation läuft, Nutzung der Plug-and-Play-Funktionalität zum Hinzufügen einer Einheit.

- Siehe Schritt (c).
- Die hinzugefügte Einheit wird auf die Standardwerte zurückgesetzt und historische Daten werden gelöscht.
- Der Controller erkennt die Änderung und wird neu aufgebaut.



(f) Anpassung per Plug-and-Play

- (g) Nach Abschluss oder Unterbrechung der Simulation können die Ergebnisse grafisch dargestellt, der aktuelle Simulationsstatus als Mat-Datei gespeichert und die Simulationszeit zurückgesetzt werden. Nach dem Zurücksetzen kann ein neuer Simulationslauf durchgeführt werden.



(g) Simulation anhalten und zurücksetzen

Abbildung 6.8.: Arbeitsschritte

6.3.3. Simulationsbeispiel

Eine Simulation wird durchgeführt, um die implementierten Funktionen zu verifizieren. Zu diesem Zweck wird ein benutzerdefiniertes MG erstellt, indem ein voreingestelltes MG erweitert und mit dem *minimaxMPC*-Controller simuliert wird. Die Simulationsergebnisse werden anschließend ausgewertet, um festzustellen, ob die implementierten Funktionen die formulierten Ziele erfolgreich erreichen.

Simulationsaufbau

Die Simulationslaufzeit ist auf einen Tag festgelegt. Die Simulatorparameter sind wie folgt konfiguriert and the microgrid model and controller are as in 6.5.1:

- Microgrid-Typ: *mercury*
- Controller: *minimaxMpc*
- Forecaster: *naive*
- Kommunikationsausfall: *none*
- RES-Droop-Modus: *disabled*
- Droop-Sättigungsmodus: *droopSaturationAtPowerLimits*

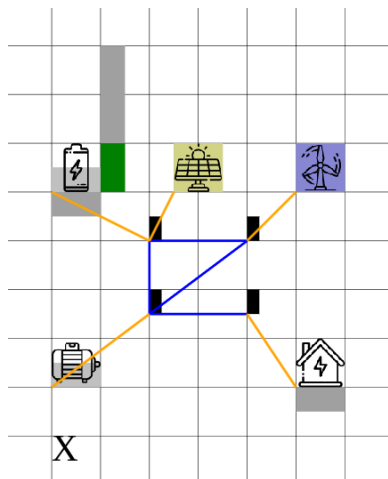
6. Erzielte Ergebnisse

Für das MG dient das Mercury-MG-Modell als Grundlage, siehe Abbildung 6.9a. Das benutzerdefinierte Modell zu Beginn der Simulation ist in Abbildung 6.9b dargestellt und erweitert das Mercury-MG um Folgendes:

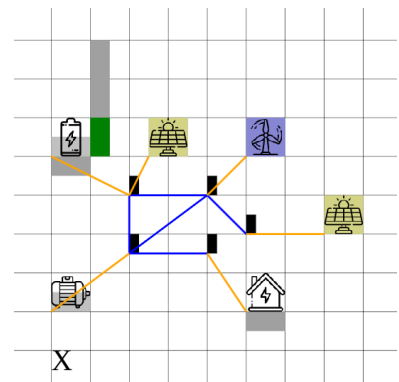
- Das elektrische Netzwerk wird um einen Bus erweitert, der über eine neue Stromleitung mit dem Netz verbunden wird.
- Die erneuerbaren Einheiten werden um eine PV-Anlage erweitert.

Nach der Hälfte der Simulationszeit wird das MG mithilfe der Plug-and-Play-Funktionalität weiter ausgebaut, siehe Abbildung 6.9c. Dabei werden folgende Ergänzungen vorgenommen:

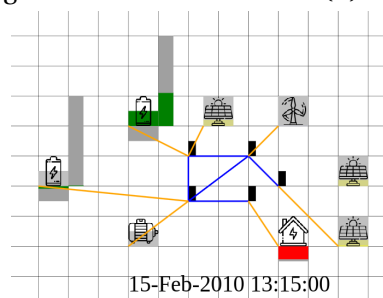
- Die erneuerbaren Einheiten werden um eine PV-Anlage erweitert, die Verbindung zu einer bestehenden PV-Anlage wird entfernt.
- Die netzbildenden Einheiten werden um ein ESS erweitert.



(a) Microgrid-Voreinstellung



(b) Microgrid-Konfiguration beim Start



(c) Microgrid-Konfiguration nach 12 Stunden

Abbildung 6.9.: Microgrid-Konfiguration für die Simulation. Screenshot der in diesem Projekt entwickelten Web-Oberfläche

6.3. Erweiterung einer Simulations-Software (AP 3)

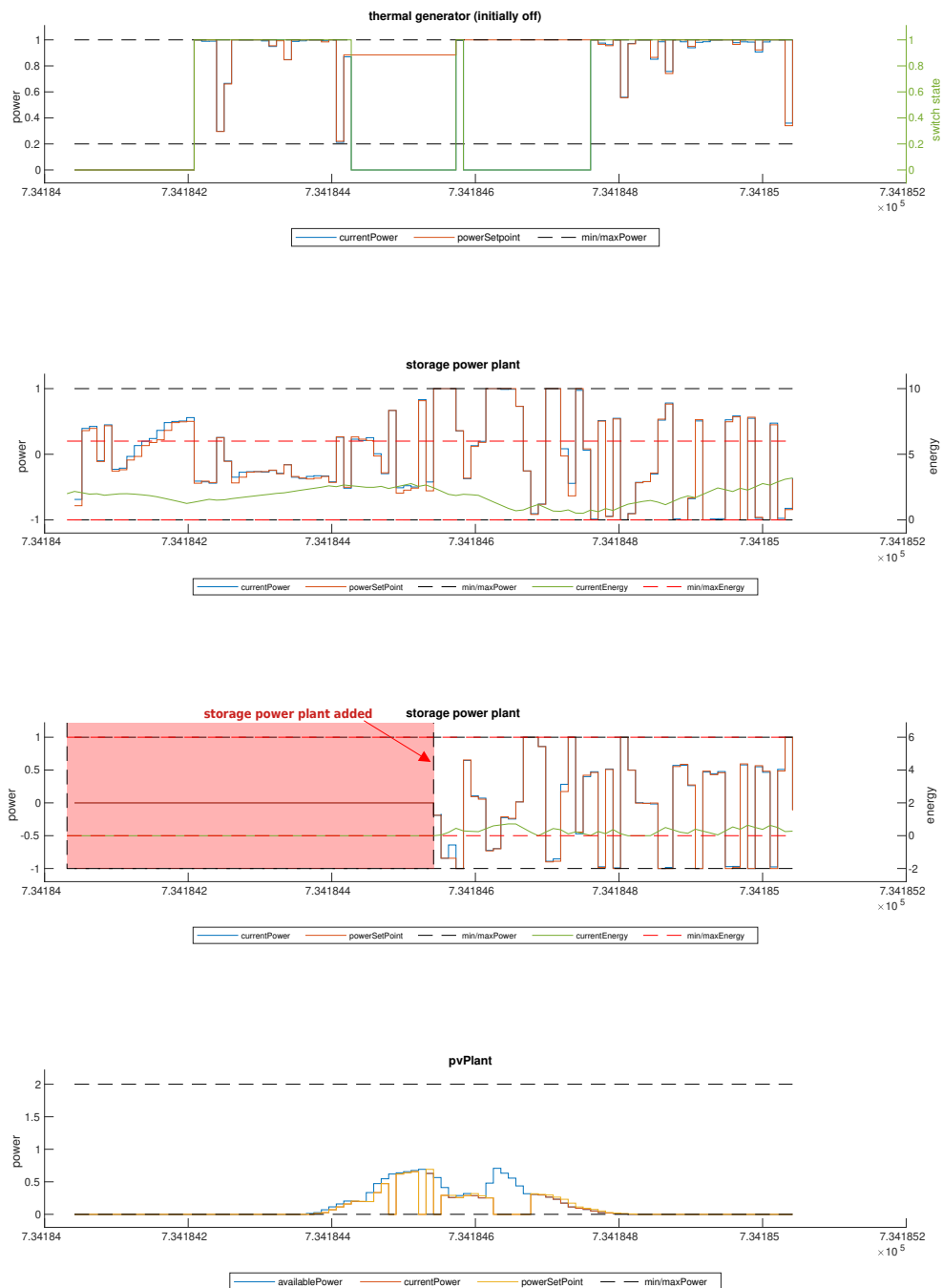


Abbildung 6.10.: Simulationsergebnisse, die die Leistung der Einheit darstellen und hervorheben, dass während einer laufenden Simulation ein Speicherkraftwerk hinzugefügt wurde.

6. Erzielte Ergebnisse

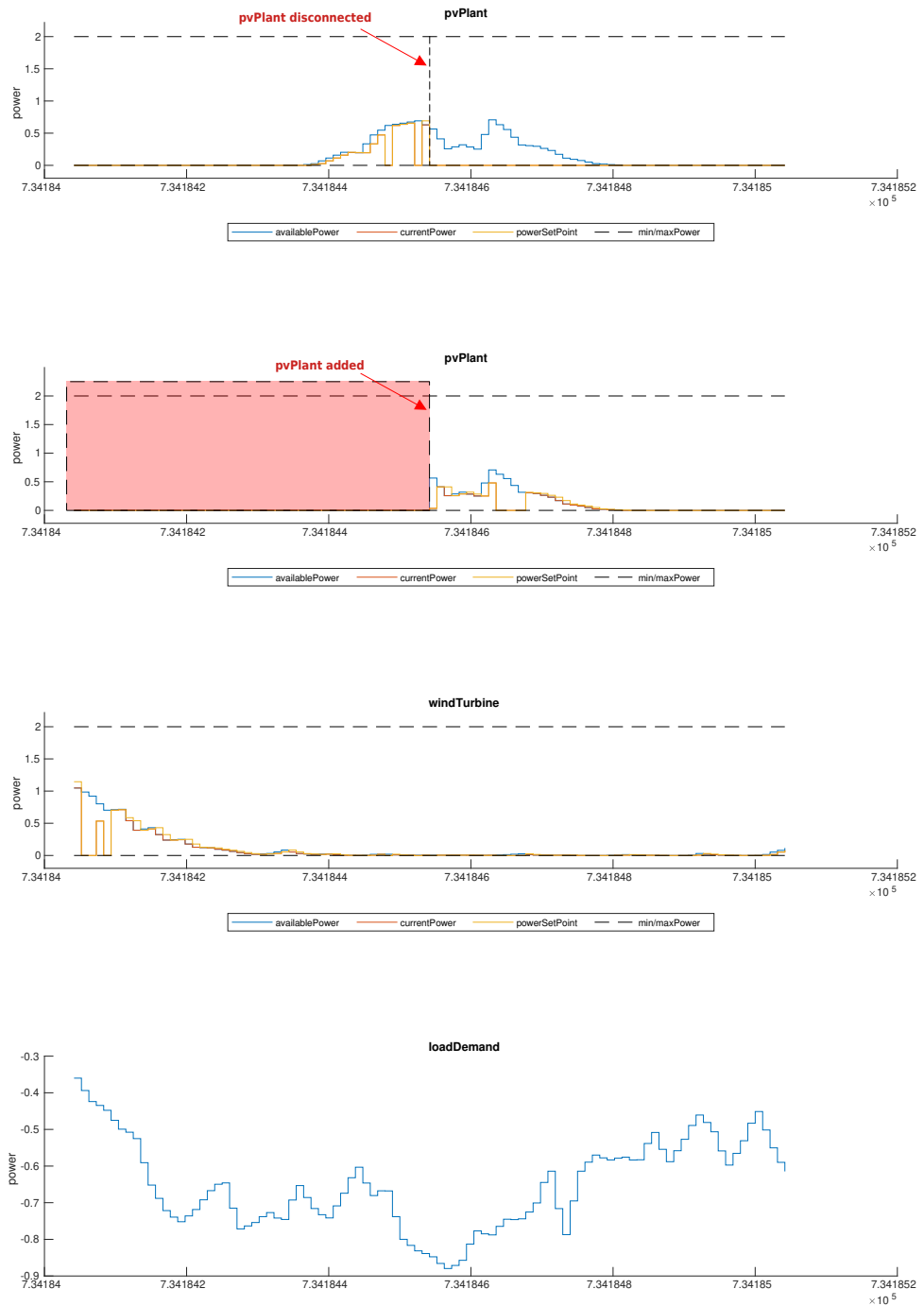


Abbildung 6.11.: Simulationsergebnisse, die die Leistung der Einheit darstellen und hervorheben, dass eine PV-Anlage während einer laufenden Simulation hinzugefügt wurde. Screenshot der in diesem Projekt entwickelten Web-Oberfläche

Die Auswertung der Diagramme in Abbildung 6.11 ermöglicht folgende Schlussfolgerungen über die implementierten Funktionalitäten:

- **Aktualisierung der MG-Struktur entsprechend den Änderungen in der Weboberfläche vor einer Simulation.**
 - Die Diagramme zeigen alle Einheiten, die in der Benutzeroberfläche vorhanden sind, und alle Einheiten liefern Leistung an das Netz.
 - Dies bedeutet, dass die Unit-to-Bus-Adjazenzmatrix des MGs erfolgreich angepasst wurde und die hinzugefügten Einheiten und Lasten enthält.
- **Integration der elektrischen Netzverbindungen in die Weboberfläche und Aktualisierung des elektrischen Netzwerks und seiner DC-Leistungsflussmatrix entsprechend den Änderungen.**
 - Die Erweiterung des elektrischen Netzwerks um einen zusätzlichen Bus und eine Stromleitung führt zur Anpassung der Bus-to-Bus-Adjazenzmatrix und zur Neuberechnung der DC-Leistungsflussgleichung.
 - Dadurch kann die PV-Anlage, die mit diesem Bus verbunden ist, zur Leistungsverteilung beitragen, was im Diagramm beobachtet werden kann.
- **Anpassung der Kommunikation zwischen Controller und Microgrid.**
 - Die Tatsache, dass hinzugefügte Einheiten Leistungsvorgaben vom Controller erhalten, bedeutet, dass das Kommunikationsobjekt korrekt angepasst wurde und die Kommunikation zwischen dem Controller und allen Einheiten des MGs ermöglicht.
- **Bearbeiten und Aktualisieren der MG-Struktur während einer Simulation (Plug-and-Play).**
 - Die PV-Anlage, die nach der Hälfte der Simulationszeit ohne Unterbrechung der Simulation hinzugefügt wird, wird in das MG integriert und trägt zur Leistungsverteilung bei.
 - Die PV-Anlage, die durch das Löschen ihrer Unit-to-Bus-Leitung vom Netz getrennt wird, wird abgeschaltet, sodass ihre Leistungsausgabe null beträgt.
- **Neuinitialisierung kopierter Einheiten.**
 - Im Diagramm kann die Rücksetzung der Eigenschaften kopierter Einheiten an dem ESS beobachtet werden, das nach der Hälfte der Simulationszeit hinzugefügt wird: Der SoC der Einheit wird auf null zurückgesetzt.
- **Löschen historischer Daten kopierter Einheiten.**
 - Die Diagramme der Einheiten, die nach dem Start der Simulation zum MG hinzugefügt werden, zeigen keine Datenpunkte vor ihrer Hinzufügung in der Benutzeroberfläche, was das Löschen der kopierten historischen Daten bestätigt.

6. Erzielte Ergebnisse

- **Neuinitialisierung des Controllers bei Änderungen am MG.**

- Die Diagramme zeigen, dass die neu hinzugefügten Einheiten Leistungsvorgaben vom Controller erhalten.
- Dies bedeutet, dass der Controller bei der Hinzufügung neuer Einheiten erfolgreich neu aufgebaut wird und sie in das Optimierungsproblem einbindet.

Damit wurden die Arbeiten in AP 3 inhaltlich wie geplant durchgeführt. Dabei erfolgte im Rahmen der wissenschaftlichen Schwerpunktsetzung auch eine vertiefte Berücksichtigung bestimmter Aspekte.

6.4. Erstellung von Test-Szenarien aus Felddaten (AP 4)

Die Mitarbeiter des FGRS wurden in die Struktur und Dimensionierung des beispielhaften MG im Nord-Irak eingeführt. Es wurden die installierte Hardware und die bestehende Software des Autarsys-EM diskutiert. Wir haben eine Anlage definiert, an der die Daten gesammelt und bewertet werden sollen. Leider stand die Zustimmung des Betreibers zunächst noch aus. Es wurden über 2 Terrabyte Messdaten aus der Anlage gesichert und aufbereitet. Weiterhin wurde an mehreren Inselnetzen Daten von anderen Anlagen erhoben, die auch noch ausgewertet werden sollten. Dadurch sollte ein möglichst umfassender Satz an verschiedenen Testszenarien erstellt werden. Damit sollte dann im weiteren Verlauf des Projekts die Leistungsfähigkeit des neuen Energiemanagement getestet werden.

Entsprechend den Projektzielen sollte das optimierte Energiemanagement an einem realen, gekoppelten MG bestehend aus 2 unabhängigen Spannungsquellen, getrennten Energieerzeugern in Form von Photovoltaikanlagen und steuerbaren Lasten exemplarisch verbessert werden. Die Anlage befindet sich in einem Flüchtlingscamp im Nord-Irak in Mam Rashan, nahe Mosul. Das MG wird immer dann zur Versorgung der Bewohner eingesetzt, wenn das öffentliche Netz aufgrund von Energieknappheit abgeschaltet wird. Die Betriebs- bzw. Abschaltzeiten des öffentlichen Netzes sind willkürlich und nur scheinbar deterministisch. Autarsys beschaffte ca. 2 Terra Byte historische Daten, um daraus einige typisches Lastprofile zu generieren, mit denen dann ein Energiemanagement-Regler sowohl auf Robustheit als auch auf möglichst hohe und gleichmäßig verteilte Versorgungssicherheit der Summe der elf verschiedenen steuerbaren Lastausgänge getestet werden sollte. Bei der Aufbereitung der Daten ist aufgefallen, dass die unterschiedlichen Energiemessgeräte an den Erzeugern und Lasten nur sehr unzuverlässig und sporadisch auswertbare Daten liefern. Das ist zwar ein Szenario, mit dem der Regler konfrontiert werden soll, allerdings kann mit den Datenlücken im AP 8 keine verlässliche Auswertung und Bewertung der entwickelten Reglerstruktur durchgeführt werden. Deshalb wurde angedacht, die im Projekt geplanten Mittel für schnelle hochgenaue Power-Analysen im Zuge eines getrennt gestellten Antrags auf Umwidmung für die Beschaffung von 13Stk. Smart-Meter einzusetzen.

Mit den bis dahin analysierten Daten konnte leider kein exemplarisches Lastprofil erzeugt werden. Außerdem wurden bei der Analyse der Daten eine Schwing-/ Pendelneigung

6.5. Robustifizierung der zentralen und verteilten EMSe für Vorhersageunsicherheiten (AP 5)

der beiden Spannungsquellen zueinander detektiert. Es war notwendig, diese Probleme in der Kurzzeitstabilität erst zu beheben, bevor verwendbare Daten für den Test des EMS-Reglers extrahiert werden können.

Im Rahmen der Datenauswertung der vorhandenen Messdaten bekräftigte sich ein dringender Nachrüstungsbedarf bei der vorhandenen Hardware im Bereich der Wechselrichter und der vorhandenen Energiezähler. Dazu wurde von der Autarsys GmbH eine Dienstreise vom 07. Februar 2023 bis zum 14. Feb. 2023 in den Nord-Irak durchgeführt, bei der die Wechselrichter-Hardware überarbeitet, die Wechselrichter-Firmware auf den neuesten Stand gebracht und die Energiezähler für die Photovoltaik (PV)-Messung und die Lastdaten erneuert wurden. Nachfolgend wurden dann erneut Messdaten von den beiden Anlagen exportiert und mittels neu entwickelter Abfragemethode in der gewünschten Form dem FGRS zur Verfügung gestellt. Es wurden Minuten Mittelwerte für die folgenden Größen übergeben: Für die Energiespeicher ESS1 und ESS2 wurde jeweils die Leistung der zugehörigen PV-Anlage und die Leistung der Summe aus PV-Anlage und ESS abgefragt. Zusätzlich wurden noch der Ladezustand SoC (State of Charge) jeder einzelnen Batterie übermittelt. Aus diesen Daten kann in Abstimmung mit dem FGRS eine hinreichende Beschreibung der Betriebszustände der Batterie erfolgen.

Damit wurden die Arbeiten in AP 4 inhaltlich wie geplant durchgeführt.

6.5. Robustifizierung der zentralen und verteilten EMSe für Vorhersageunsicherheiten (AP 5)

Die Arbeiten in AP 5 wurden inhaltlich wie geplant durchgeführt. Dabei erfolgte im Rahmen der wissenschaftlichen Schwerpunktsetzung auch eine vertiefte Berücksichtigung bestimmter Aspekte. Im nächsten Abschnitt beschreiben wir zunächst das mathematische Modell eines MGs. In den darauffolgenden Abschnitten wird verschiedene im Rahmen des Projekts entwickelte bzw weiterentwickelte robust EMS-Entwurfsverfahren eingegangen.

6.5.1. Beschreibung des MGs

In diesem Abschnitt beschreiben wir das mathematische Modell eines Insel-MG-Systems einschließlich Droop-Regelung und Sättigungsgrenzen. Das Modell des MGs und die Notation sind aus [44, 47] und verwandten Arbeiten abgeleitet. Dieses Modell wird später für das EMS-Design verwendet.

Für das Modell gehen wir davon aus, dass die unteren Steuerungsebenen (auch als Low-Level-Steuerung bezeichnet), d.h. die primäre und sekundäre Regelung, einen stabilen Betrieb des Systems gewährleisten. Darüber hinaus gehen wir davon aus, dass die Start- und Abschaltzeiten der konventionellen Einheiten im Vergleich zur EMS-Abtastzeit gering sind. Außerdem gehen wir davon aus, dass Speicherverluste im Vergleich zu den durch die Nachfrage nach erneuerbaren Energien und die Last verursachten Unsicherheiten vernachlässigbar sind.

6. Erzielte Ergebnisse

6.5.1.1. Notation

Wir betrachten das MG-Modell mit renewable energy systems (RES) wie Windturbinen und PV-Anlagen, Batteriespeichereinheiten und konventionellen Einheiten wie Dieselgeneratoren. Jede Einheit im MG empfängt Leistungssollwerte vom EMS. Die Unsicherheit sowohl bei der Erzeugung durch die RES als auch bei der Nachfrage erfordert jedoch Leistungsabgaben, die von diesen Sollwerten abweichen.

In dem MG bezeichnen wir die Anzahl der konventionellen Einheiten, Speichereinheiten und erneuerbaren Einheiten jeweils mit T , S und R und die Anzahl der Lasten mit D . Zu einem gegebenen Abtastschritt $k \in \mathbb{N}_{\geq 0}$ bezeichnen wir die Störung mit

$$w(k) = [w_r(k)^\top \ w_d(k)^\top]^\top,$$

wobei $w_r(k) \in \mathbb{R}_{\geq 0}^R$ die verfügbare erneuerbare Einspeisung und $w_d(k) \in \mathbb{R}_{\leq 0}^D$ die Lastnachfrage ist. Die von den EMSen bereitgestellten Leistungssollwerte werden mit

$$u(k) = [u_t(k)^\top \ u_s(k)^\top \ u_r(k)^\top]^\top$$

bezeichnet, wobei $u_t(k) \in \mathbb{R}^T$, $u_s(k) \in \mathbb{R}^S$ und $u_r(k) \in \mathbb{R}^R$ die Sollwerte der konventionellen Einheiten, Speichereinheiten bzw. RES sind. Jede konventionelle Einheit kann ein- oder ausgeschaltet werden, was durch einen Vektor binärer Variablen $\delta_t(k) \in \{0, 1\}^T$ dargestellt wird. Die Ausgangsleistung der Einheiten wird durch $p(k) = [p_t(k)^\top \ p_s(k)^\top \ p_r(k)^\top]^\top$ bezeichnet, wobei $p_t(k) \in \mathbb{R}_{\geq 0}^T$, $p_s(k) \in \mathbb{R}^S$ und $p_r(k) \in \mathbb{R}_{\geq 0}^R$. Das Energieniveau der Speichereinheiten wird durch $x \in \mathbb{R}^S$ angegeben.

6.5.1.2. Microgrid ohne Sättigung und ohne Droop-Regelung erneuerbarer Erzeuger

In einem Inselnetz sollte die lokale Erzeugung zu jedem Zeitpunkt dem lokalen Verbrauch entsprechen. Diese Bedingung des Leistungsgleichgewichts kann durch eine algebraische Gleichung dargestellt werden,

$$\mathbf{1}^\top p_t(k) + \mathbf{1}^\top p_s(k) + \mathbf{1}^\top p_r(k) + \mathbf{1}^\top w_d(k) = 0. \quad (6.1)$$

Die von den erneuerbaren Erzeugern bereitgestellte Leistung hängt von der verfügbaren erneuerbaren Einspeisung $w_r(k)$ und den Leistungssollwerten $u_r(k)$ ab, d.h.

$$p_r(k) = \min(u_r(k), w_r(k)). \quad (6.2)$$

Die unsichere Last $w_d(k)$ und die unsichere verfügbare erneuerbare Einspeisung $w_r(k)$ verursachen ein Ungleichgewicht in der Leistungsbilanz. Diese Diskrepanz wird durch die Batteriespeichereinheiten und konventionellen Einheiten ausgeglichen. [89] Jede Einheit verfügt über eine Low-Level-Droop-Regelung, die eine gewünschte proportionale Leistungsaufteilung gewährleistet (siehe z.B. [59], [90]). Der Anteil jeder Einheit hängt von der inversen Droop-Konstante ab, die wir für die konventionellen Einheiten mit $\chi_t \in \mathbb{R}_{\geq 0}^T$ und für die Speichereinheiten mit $\chi_s \in \mathbb{R}_{\geq 0}^S$ bezeichnen. Diese inversen Droop-Konstante können

beispielsweise entsprechend der Nennleistung der Einheiten gewählt werden. Sie werden zusammengefasst als $\chi = [\chi_t^T \ \chi_s^T]^T$.

Um die Droop-Regelung zu modellieren, betrachten wir eine zusätzliche freie Variable $\rho(k) \in \mathbb{R}$. Diese globale Variable beschreibt die Abweichung der Frequenz im System von der nominalen Netzfrequenz. Unter der Annahme, dass die Regelung auf niedriger Ebene einen stabilen Zustand erreicht hat, kann die Leistung der Speichereinheiten ausgedrückt werden durch

$$p_s(k) = u_s(k) + \chi_s \rho(k). \quad (6.3a)$$

Die Dynamik der Speichereinheiten ist

$$x(k) = x(k-1) - T_s p_s(k), \quad (6.3b)$$

wobei $T_s \in \mathbb{R}_{>0}$ die Abtastzeit des EMS ist. Die Energiespeicherkapazitäten werden in den Nebenbedingungen berücksichtigt:

$$x^{\min} \leq x(k) \leq x^{\max}, \quad (6.3c)$$

mit $x^{\min} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^S$ und $x^{\max} \in \mathbb{R}_{>0}^S$.

Konventionelle Einheiten können ein- oder ausgeschaltet werden. Wenn eine konventionelle Einheit $i \in \mathbb{N}_{[1,T]}$ ausgeschaltet ist, d. h. $\delta_{t,i}(k) = 0$, dann ist ihre Leistung $p_{t,i}(k) = 0$ und sie kann nicht an der Lastaufteilung teilnehmen. Wenn sie eingeschaltet ist, d. h. $\delta_{t,i}(k) = 1$, nimmt sie an der Lastaufteilung teil. Dieses Verhalten kann durch folgende Gleichung modelliert werden:

$$p_t(k) = \delta_t(k) \wedge (u_t(k) + \chi_t \rho(k)). \quad (6.4)$$

Die Beschränkungen für die Leistungswerte und die Leistung der Einheiten sind

$$u^{\min} \leq u(k) \leq u^{\max}, \quad (6.5a)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_t(k) \wedge p_t^{\min} \\ p_s^{\min} \\ p_r^{\min} \end{bmatrix} \leq p(k) \leq p^{\max}, \quad (6.5b)$$

mit $u^{\min} \in \mathbb{R}^{T+S+R}$, $u^{\max} \in \mathbb{R}^{T+S+R}$, $p^{\min} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^T \times \mathbb{R}_{<0}^S \times \mathbb{R}_{\geq 0}^R$ und $p^{\max} \in \mathbb{R}_{>0}^{T+S+R}$. Wir unterteilen diese Grenzen auf die gleiche Weise wie $u(k)$ und $p(k)$, z. B. $p^{\min} = [(p_t^{\min})^T \ (p_s^{\min})^T \ (p_r^{\min})^T]^T$.

6.5.1.3. Microgrid mit Teilnahme erneuerbarer Erzeuger an der Lastaufteilung

Im vorherigen Modell war die Lastaufteilung auf Speichereinheiten und konventionelle Einheiten beschränkt. Da wir jedoch bereits die Begrenzung aufgrund der verfügbaren erneuerbaren Energie berücksichtigt haben, können wir auch erneuerbare Einheiten in die Lastaufteilung einbeziehen. Dazu werden neue inverse Droop-Konstanten $\chi_r \in \mathbb{R}_{\geq 0}^R$ definiert und der Vektor der inversen Droop-Konstanten entsprechend erweitert, $\chi = [\chi_t^T \ \chi_s^T \ \chi_r^T]^T$. Die erneuerbare Leistung (6.2) wird wie folgt neu definiert

$$p_r(k) = \min(u_r(k) + \chi_r \rho(k), w_r(k)). \quad (6.6)$$

6. Erzielte Ergebnisse

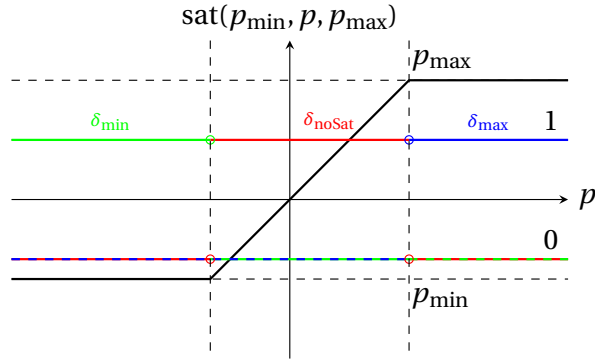


Abbildung 6.12.: [67] Veranschaulichung des Sättigungs-Operators. Der Eingangsbereich wird in drei Segmente aufgeteilt: 1) $p < p_{\min}$, wo $\delta_{\min} = 1$ und $\delta_{\text{noSat}}, \delta_{\max} = 0$; 2) $p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$ wo $\delta_{\text{noSat}} = 1$ und $\delta_{\min}, \delta_{\max} = 0$; 3) $p > p_{\max}$, wo $\delta_{\max} = 1$ und $\delta_{\text{noSat}}, \delta_{\min} = 0$. Man beachte, dass die binären Hilfsvariablen $\delta_{\min}, \delta_{\text{noSat}}, \delta_{\max}$ so beschaffen sind, dass bei gegebenem Eingang p immer genau eine davon 1 ist.

6.5.1.4. Microgrid mit sättigungsbehafteter Droop-Regelung

Wir betrachten die Sättigung als einen harten Begrenzer, der den physikalisch-technisch bedingten sicheren Betriebsbereich einer Einheit erzwingt. Daher wird die Leistungsabgabe von Einheiten mit Droop-Regelung, die durch (6.3a), (6.4), (6.6) gegeben ist, nun als eine nichtlineare Rückkopplung der Variablen $\rho(k)$. Die nichtlineare Sättigungsfunktion einer Variablen (z. B. p) wird definiert als

$$\text{sat}(p^{\min}, p, p^{\max}) := \begin{cases} p^{\min}, & \text{if } p < p^{\min}, \\ p, & \text{if } p \in [p^{\min}, p^{\max}], \\ p^{\max}, & \text{if } p > p^{\max}, \end{cases} \quad (6.7)$$

wobei $p^{\min} \leq p^{\max}$. Wenn p, p^{\min} und p^{\max} Vektoren sind, wird der Operator $\text{sat}(\cdot, \cdot, \cdot)$ elementweise verstanden. Die Parameter $\delta_{\max}, \delta_{\min}$ und δ_{noSat} stellen den Sättigungsstatus von netzbildenden Einheiten unter verschiedenen Bedingungen dar. Insbesondere gibt δ_{\max} an, ob eine Einheit an ihrer maximalen Grenze gesättigt ist ($\delta_{\max}^i = 1$ wenn Einheit i am Maximum gesättigt ist). In ähnlicher Weise gibt δ_{\min} an, ob eine Einheit an ihrer minimalen Grenze gesättigt ist ($\delta_{\min}^i = 1$ wenn Einheit i am Minimum gesättigt ist). Im Gegensatz dazu gibt δ_{noSat} einen allgemeinen Hinweis auf die Sättigung: $\delta_{\text{noSat}}^i = 1$ wenn Einheit i ungesättigt ist, und $\delta_{\text{noSat}}^i = 0$ wenn sie entweder am Minimum oder am Maximum gesättigt ist. Dies kann in Abbildung 6.12 veranschaulicht werden.

Bei Sättigung werden Betriebsbeschränkungen durch Begrenzung der Ausgangsleistung auf der unteren (Low-Level-) Regelebene verwirklicht. Die erneuerbare Leistung (6.6) wird neu definiert als

$$p_r(k) = \text{sat}(p_r^{\min}, u_r(k) + \chi_r \rho(k), w_r(k)). \quad (6.8)$$

Man beachte, dass (6.6) bereits die Sättigung an der oberen Grenze enthält.

Bei konventionellen Generatoren wird die Leistung aus Gleichung (6.4) wie folgt neu definiert

$$p_t(k) = \delta_t(k) \wedge \text{sat}(p_t^{\min}, u_t(k) + \chi_t \rho(k), p_t^{\max}). \quad (6.9)$$

Der Betrieb von Speichereinheiten wird durch Leistungs- und Energiebegrenzungen eingeschränkt. Eine einfache Möglichkeit, eine energiebasierte Sättigung zu implementieren, wäre, die Leistung in dem Moment auf Null zu setzen, in dem die Energie die untere oder obere Grenze erreicht. Um jedoch solche plötzlichen Leistungsänderungen zu vermeiden, die auch zwischen Abtastinstanzen der EMSe auftreten könnten, und um die Analyse einfach zu halten, wählen wir einen anderen Ansatz. Basierend auf der Abtastzeit T_s und dem aktuellen Energieniveau x werden dynamisch angepasste Leistungsgrenzen bestimmt durch

$$\begin{aligned} \bar{p}_s^{\min}(k) &= \max\left(p_s^{\min}, \frac{x(k-1) - x^{\max}}{T_s}\right), \\ \bar{p}_s^{\max}(k) &= \min\left(p_s^{\max}, \frac{x(k-1) - x^{\min}}{T_s}\right), \end{aligned} \quad (6.10a)$$

und die Leistung unterliegt an diesen Grenzen einer Sättigung, d. h.

$$p_s(k) = \text{sat}(\bar{p}_s^{\min}(k), u_s(k) + \chi_s \rho(k), \bar{p}_s^{\max}(k)). \quad (6.10b)$$

Anmerkung 1. Wenn die Lastaufteilungskonstante einer Einheit $\chi_i = 0$ ist, für $i \in \mathbb{N}_{[1, T+S+R]}$, dann nimmt die Einheit nicht an der Lastaufteilung teil. Dies bedeutet Flexibilität bei der Entscheidung, welche Einheiten an der Lastaufteilung teilnehmen können.

Anmerkung 2. Man beachte, dass im sättigungsbasierten Modell die Leistungssollwertgrenzen u^{\min} und u^{\max} in Gleichung (6.5a) von den Leistungsgrenzwerten p^{\min} und p^{\max} abweichen und sogar außerhalb liegen können.

Anmerkung 3. Man beachte, dass die expliziten Energie- und Leistungsbeschränkungen (6.3c) und (6.5b) nun nicht mehr erforderlich sind. Stattdessen werden die Grenzen x^{\min} , x^{\max} , p^{\min} und p^{\max} implizit durch Sättigung erzwungen.

6.5.2. Robustes Sättigungs-bewusstes Minimax MPC Energiemanagement

Das Ziel besteht darin, ein MPC-basiertes EMS zu entwerfen, das robust gegenüber ungewissen verfügbaren erneuerbaren Einspeisungen und Lastanforderungen ist. Wir betrachten eine Minimax (MM)-Formulierung, bei der die Worst-Case-MG-Betriebskosten über alle möglichen Störungsrealisierungen minimiert werden [64]. In diesem Abschnitt definieren wir die Unsicherheit und die Betriebskosten und formulieren später das MM-MPC-Problem.

6.5.2.1. Unsicherheitsmodell

Bei den betrachteten erneuerbaren Einheiten hängt die verfügbare Leistung von den Wetterbedingungen ab (d. h. von der Sonneneinstrahlung bei PV-Anlagen und der Windge-

6. Erzielte Ergebnisse

schwindigkeit bei Windkraftanlagen). Unter Verwendung historischer Daten und eines Vorhersagemoduls können zukünftige untere und obere Grenzen für die verfügbare Leistung abgeleitet werden (siehe z. B. [52]). Wir bezeichnen diese Grenzen zum Zeitpunkt k durch

$$w_r^{\min}(k) \leq w_r(k) \leq w_r^{\max}(k), \quad (6.11)$$

wobei $w_r^{\min}(k) \in \mathbb{R}_{\geq 0}^R$ und $w_r^{\max}(k) \in \mathbb{R}_{\geq 0}^R$ sind. Ebenso sind die Mindest- und Höchstgrenzen für die Lastanforderungen

$$w_d^{\min}(k) \leq w_d(k) \leq w_d^{\max}(k), \quad (6.12)$$

wobei $w_d^{\min}(k) \in \mathbb{R}_{\leq 0}^D$ und $w_d^{\max}(k) \in \mathbb{R}_{\leq 0}^D$ sind. Gleichung (6.11) und Gleichung (6.12) können zusammengefasst werden zu

$$w^{\min}(k) \leq w(k) \leq w^{\max}(k), \quad (6.13)$$

wo $w^{\min}(k) = [w_r^{\min}(k)^T \ w_d^{\min}(k)^T]^T$ und $w^{\max}(k) = [w_r^{\max}(k)^T \ w_d^{\max}(k)^T]^T$.

6.5.2.2. Betriebskosten

Die berücksichtigten Betriebskosten sind wirtschaftlich motiviert. Wir gehen davon aus, dass für den Betrieb erneuerbarer Einheiten keine Kosten anfallen. Die Betriebskosten konventioneller Einheiten umfassen Kraftstoffkosten, Fixkosten (im An-Zustand) und Umschaltkosten, d. h.

$$\ell_t(p_t(k), \delta_t(k), \delta_t(k-1)) = C_t^T p_t(k) + C_{\text{on}}^T \delta_t(k) + C_{\text{sw}}^T |\delta_t(k) - \delta_t(k-1)|, \quad (6.14)$$

wobei $C_t, C_{\text{on}}, C_{\text{sw}} \in \mathbb{R}_{\geq 0}^T$.

In der Regel dienen Speichereinheiten dazu, überschüssige Energie für die zukünftige Nutzung zu speichern. Dies kann durch die Einbeziehung von Kosten für die Leistungsabgabe (bzw. negative Kosten für die Leistungsaufnahme) gefördert werden, d. h.

$$\ell_s(p_s(k)) = C_s^T p_s(k), \quad (6.15)$$

wobei $C_s \in \mathbb{R}_{\geq 0}^S$. Daher ist ℓ_s negativ, wenn Energie gespeichert wird, d. h. wenn $p_s(k)$ negativ ist. Insbesondere halten diese Kosten davon ab, verfügbare erneuerbare Energie zu verschwenden, nur weil sie nicht sofort von der Lastnachfrage verbraucht werden kann.

Die Gesamtbetriebskosten eines MGs ergeben sich aus der Summe aus Gleichung (6.14) und Gleichung (6.15), d. h.

$$\ell(p(k), \delta_t(k), \delta_t(k-1)) = \ell_t(p_t(k), \delta_t(k), \delta_t(k-1)) + \ell_s(p_s(k)). \quad (6.16)$$

6.5.2.3. Minimax MPC

Bei der Certainty-Equivalence-MPC werden die Leistungssollwerte durch Minimierung der Betriebskosten über den Vorhersagehorizont für eine gegebene Störungsrealisierung bestimmt. Daher berücksichtigt diese Formulierung Unsicherheiten nicht rigoros. In einer Minimax-Strategie werden Unsicherheiten durch die Berücksichtigung ihrer Worst-Case-

6.5. Robustifizierung der zentralen und verteilten EMSe für Vorhersageunsicherheiten (AP 5)

Auswirkungen behandelt [64]. Genauer gesagt wird eine Steuerung (hier Leistungswerte und Schaltzustände) so bestimmt, dass die Betriebskosten über robust zulässige Steuerungen minimiert und gleichzeitig über mögliche Störungsrealisierungen maximiert werden. Robust zulässige Steuerungen garantieren, dass die Beschränkungen für alle möglichen Störungsrealisierungen erfüllt werden.

Die Anzahl der Abtastschritte im Vorhersagehorizont der MM MPC sei $N_p \in \mathbb{N}$. Zum Abtastzeitschritt k wird die bei einem zukünftigen Schritt $j \in \{1, \dots, N_p\}$ vorhergesagte Leistung durch $p(k+j)$ angegeben. Es können Matrizen definiert werden, um Profile von Variablen über den Vorhersagehorizont darzustellen:

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\delta}_t &:= [\delta_t(k+1) \cdots \delta_t(k+N_p)], \\
 \mathbf{u} &:= [u(k+1) \cdots u(k+N_p)], \\
 \mathbf{p} &:= [p(k+1) \cdots p(k+N_p)], \\
 \mathbf{x} &:= [x(k+1) \cdots x(k+N_p)], \\
 \mathbf{w} &:= [w(k+1) \cdots w(k+N_p)], \\
 \mathbf{w}^{\min} &:= [w^{\min}(k+1) \cdots w^{\min}(k+N_p)], \\
 \mathbf{w}^{\max} &:= [w^{\max}(k+1) \cdots w^{\max}(k+N_p)].
 \end{aligned} \tag{6.17}$$

Schließlich definieren wir die Betriebskosten über den Vorhersagehorizont als

$$J(\mathbf{p}, \boldsymbol{\delta}_t, \delta_t(k)) := \sum_{j=1}^{N_p} \ell(p(k+j), \delta_t(k+j), \delta_t(k+j-1)). \tag{6.18}$$

Dann kann wie folgt das Minimax MPC-Problem mit Berücksichtigung der Droop-Regelung und Sättigung bei allen Einheiten definiert werden:

Problem 1 (MM MPC mit RES-Droop-Regelung und Sättigung).

$$\min_{\mathbf{u}, \boldsymbol{\delta}_t} \max_{\mathbf{w}} J(\mathbf{p}, \boldsymbol{\delta}_t, \delta_t(k)), \tag{6.19a}$$

wobei $J(\cdot)$ durch Gleichung (6.18) definiert ist, unter Einbeziehung der Modellgleichungen Gleichung (6.1)-(6.16) (über den Vorhersagehorizont) und

6. Erzielte Ergebnisse

$$\text{Anfangsbedingungen} \quad (6.19b)$$

$$x_s(k) = x_{s,0}, \quad \delta_t(k) = \delta_{t,0}, \quad (6.19c)$$

$$\text{Kontrollbeschränkungen} \quad (6.19d)$$

$$\begin{aligned} \delta_t \in \{0, 1\}^{T \times N_p}, \\ u^{\min} \leq \mathbf{u} \leq u^{\max}, \end{aligned} \quad \text{uncertainty model} \quad (6.19e)$$

$$\mathbf{w}^{\min} \leq \mathbf{w} \leq \mathbf{w}^{\max}, \quad (6.19f)$$

$$\text{power and energy constraints} \quad (6.19g)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \delta_t \wedge p_t^{\min} \\ p_s^{\min} \\ p_r^{\min} \end{bmatrix} \leq \mathbf{p} \leq p^{\max}, \\ x^{\min} \leq \mathbf{x} \leq x^{\max}, \end{aligned} \quad (6.19h)$$

Anfangsbedingungen (6.19c), Steuerungsbeschränkungen (6.19e) und Unsicherheitsmodell (6.19f) sowie die Bedingung, dass die Steuerung δ_t , \mathbf{u} gemäß (6.1)-(6.16) (über den Vorhersagehorizont) zulässig sein muss, (6.19c) $\forall \mathbf{w} \in [\mathbf{w}^{\min}, \mathbf{w}^{\max}]$.

Anmerkung 4. In Problem 1 sind die Beschränkungen der Einheitsleistung und der Speichereinheitenenergie in der Sättigungsfunktion enthalten und müssen nicht explizit formuliert werden.

Im Allgemeinen sind Minimax-Probleme schwer zu lösen. Eine effiziente Neuformulierung für robuste ganzzahlige Probleme ohne Berücksichtigung binärer Entscheidungen in der Rückkopplung wird in [79] bereitgestellt. Die Sättigung im obigen Problem führt jedoch zu binären Variablen in der Rückkopplung. In früheren Arbeiten [44] wurde eine effiziente Neuformulierung mit Binärwerten gefunden, die sich auf die Rückkopplung auswirken. Zur Lösung des dort vorgestellten MM-Problems müssen sowohl für die robuste Zulässigkeit als auch für das innere Maximierungsproblem nur zwei Fälle der unsicheren Variablen berücksichtigt werden — einer, bei dem sie zu jeder Zeit minimal sind, und einer, bei dem sie zu jeder Zeit maximal sind. Die in [44] vorgestellte Analyse ist jedoch nicht direkt auf die oben genannten Probleme anwendbar, da sie keine RES-Droop-Regelung und keine Droop-Sättigung beinhaltet. Daher ist es notwendig, effiziente Umformulierungen für die oben genannten Probleme abzuleiten.

6.5.3. Simulationsbeispiel

In diesem Abschnitt zeigen wir die Vorteile des vorgeschlagenen robusten sättigungs-basierten Reglers unter der Annahme des in Abbildung 6.13 dargestellten MGs mit hohem Anteil an erneuerbarer Einspeisung. Das MG besteht aus einer Windkraftanlage, einer PV-Anlage, einer Speichereinheit, einer konventionellen Einheit und einer Last. Die Leistungs- und Energiegrenzen der Einheiten sind in Tabelle 6.1 zusammen mit den Droop-Konstanten und den Gewichten der Kostenfunktion aufgeführt. Man beachte, dass c_s kleiner als c_t ist, um das Laden der Speichereinheit mit konventionell erzeugtem Strom zu verhindern.

6.5. Robustifizierung der zentralen und verteilten EMSe für Vorhersageunsicherheiten (AP 5)

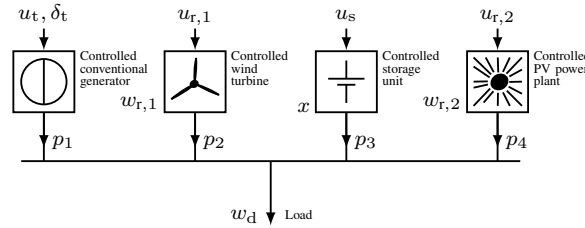


Abbildung 6.13.: Im Rechenbeispiel angenommenes MG

Tabelle 6.1.: Parameter der Einheiten und Gewichte der Kostenfunktion.

Parameter	Value	Weight	Value
$[u_t^{\min} u_s^{\min} u_{r,1}^{\min} u_{r,2}^{\min}]$	$[-5 -5 -5 -5]$ pu	C_t	1
$[u_t^{\max} u_s^{\max} u_{r,1}^{\max} u_{r,2}^{\max}]$	$[5 5 5 5]$ pu	C_{on}	0.2
$[p_t^{\min} p_s^{\min} p_{r,1}^{\min} p_{r,2}^{\min}]$	$[0.2 -1 0 0]$ pu	C_{sw}	0.3
$[p_t^{\max} p_s^{\max}]$	$[1 1]$ pu	C_s	0.9
$[x_{\min} x_{\max}]$	$[0 6]$ puh		
x^0	2 puh		
$[\chi_t \chi_s \chi_{r,1} \chi_{r,2}]$	$[1 1 1 1]$		

Die Abtastzeit des EMS wird auf 15 min festgelegt und der Vorhersagehorizont des MPC beträgt 8 h, d. h. $N_p = 32$. Die Simulationsdauer beträgt 6 Tage, d. h. $N_{si} = 576$.

Die verfügbare erneuerbare Einspeisung wird auf der Grundlage realer Messdaten generiert, die von der Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Climate Research Facility [8] am Flughafen Graciosa auf den Azoren, Portugal, bereitgestellt werden. Die robusten Intervalle für die unsicheren Variablen (RES, Last) werden in der Regel mithilfe eines Vorhersageverfahrens erzeugt [43, 52]. Im Rahmen dieses Simulationsbeispiels nehmen wir hypothetische bandartige robuste Intervalle konstanter Breite zwischen $w^{\min}(k)$ und $w^{\max}(k)$ an. Die resultierenden robusten Intervalle sind in Abbildung 6.14 hervorgehoben. Das robuste Intervall für die Lastanforderung wurde auf ähnliche Weise generiert und ist ebenfalls in Abbildung 6.14 dargestellt.

Für die Simulationen betrachten wir die Worst-Case-Realisierung der unsicheren Variablen, $\mathbf{w} = \mathbf{w}^{\min}$, da dies den Worst-Case-Kosten für den Betrieb im offenen-Regelkreis entspricht.

6.5.3.1. Wissendes MPC-EMS

Ein wissendes MPC-EMS ist ein hypothetischer Regler, der über perfekte zukünftige Kenntnisse der verfügbaren erneuerbaren Einspeisung und des Lastbedarfs verfügt. Insbesondere wird für die Worst-Case-Realisierung \mathbf{w}^{\min} das entsprechende Worst-Case-wissende MPC-EMS auf der Grundlage von Problem 1 wie folgt formuliert. Das Unsicherheitsmo-

6. Erzielte Ergebnisse

dell Gleichung 6.19f wird durch $\mathbf{w} = \mathbf{w}^{\min}$ ersetzt und dementsprechend wird die robuste Zulässigkeitsbedingung durch die Zulässigkeitsbedingung für $\mathbf{w} = \mathbf{w}^{\min}$ ersetzt.

Die Simulation im geschlossenen Regelkreis mit Worst-Case-Realisierung und Worst-Case-wissendem MPC-EMS ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Die entsprechenden Kostenwerte für den offenen Regelkreis, die jedes Mal vorhergesagt werden, wenn das Problem der Worst-Case-wissenden MPC gelöst wird, sind in Abbildung 6.15 enthalten.

Anmerkung 5. Der Kostenwert des offenen Regelkreises, der dem Worst-Case-wissenden MPC-EMS entspricht, ist eine untere Schranke für den Kostenwert, der dem MM MPC Problem 1 entspricht. Tatsächlich sind die Kosten des offenen Regelkreises des vorausschauenden MPC eine untere Schranke für den Kostenwert des offenen Regelkreises, der jedem denkbaren robusten MPC Regler entspricht.

6.5.3.2. Vergleich im offenen Regelkreis

Hier vergleichen wir die Leistung verschiedener MPC-EMS-Regler bei offenem Regelkreis bei gegebenen Anfangsenergieniveaus und -Schaltzuständen und identischen robusten Vorhersageintervallen. Eine Sammlung von 576 Variationen dieser Daten wird aus der Simulation mit geschlossenem Regelkreis mit dem Worst-Case-wissenden MPC-EMS gewonnen.

Die Ergebnisse bei Einsatz der verschiedenen MPC-EMS-Regler sind wie folgt bezeichnet:

1. Prescient: worst-case prescient MPC,
2. MM: Problem with only minimax MPC with $\chi_r = 0$,
3. Sat. MM: Problem 1 with $\chi_r = 0$,
4. RES-droop MM: Problem with renewable droop and no saturation with $\chi_r > 0$,
5. Sat. RES-droop MM: Problem 1 with $\chi_r > 0$.

Abbildung 6.15 zeigt die von diesen Reglern vorhergesagten Kosten im offenen Regelkreis. Folgendes ist zu beobachten:

- Sat. MM MPC reduziert den vorhergesagten Kostenwert im Vergleich zu MM MPC nicht.
- RES-droop MM MPC reduziert den Kostenwert im Vergleich zu MM MPC in Zeiten mit hohem Anteil an erneuerbarer Einspeisung, z. B. zwischen den Tagen 4 und 6.
- Sat. RES-droop MM MPC weist gleiche oder niedrigere Kosten als die übrigen Regler auf. Dies veranschaulicht, dass Sat. RES-droop MM MPC den zulässigen Stellwertbereich im Vergleich zu RES-droop MM MPC vergrößert und dadurch niedrigere Kosten für den offenen Regelkreis erzielt.

Diese Ergebnisse deuten auf eine Synergie zwischen den Merkmalen RES Droop und Sättigung von *allen* Einheiten hin. Tatsächlich stimmen der Kostenwert von Sat. RES-droop MM MPC und der Kostenwert des Worst-Case-wissenden MPC-EMS offenbar über die gesamte Simulationsdauer überein. Dies deutet darauf hin, dass keine denkbare Kombination aus robustem MPC-EMS und Low-Level-Einheitenregelung in diesem Simulationsbeispiel besser abschneiden könnte was die Vorhersage im offenen-Regelkreis betrifft (siehe Anmerkung 5).

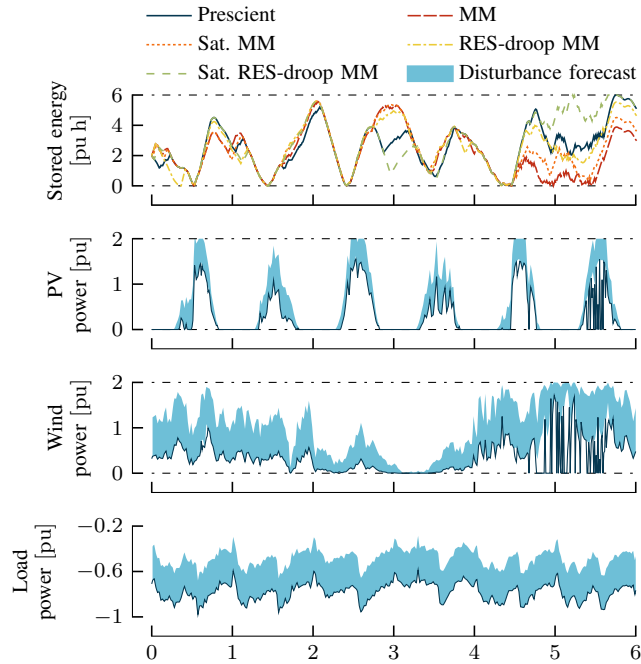


Abbildung 6.14.: Simulation des geschlossenen Regelkreises bei Worst-Case-Realisierung der unsicheren Variablen.

Die durchschnittlichen (über den Zeitraum von 6 Tagen) vorhergesagten Kosten und die durchschnittliche vorhergesagte RES- und konventionelle Einspeisung der Regler. Es treten Unterschiede bei der RES-Einspeisung auf, während konventionelle Einspeisung für alle MPC-EMS-Regler identisch ist. Dies deutet darauf hin, dass niedrigere Kostenwerte hauptsächlich darauf zurückzuführen sind, dass mehr Energie aus RES gewonnen wird, was wiederum zu einer durchschnittlich höheren gespeicherten Energie am Ende des Vorhersagehorizonts führt.

6.5.3.3. Simulation des geschlossenen Regelkreises

Simulationen des geschlossenen Regelkreises mit verschiedenen MPC-EMS-Reglern werden über einen Zeitraum von 6-Tagen durchgeführt und umfassen $N_s = 576$ Abtastinstanzen. Diese Simulationen werden unter der Annahme der Worst-Case-Realisierung der unsicheren Variablen durchgeführt, $w(k) = w^{\min}(k)$. Abbildung 6.14 enthält Trajektorien der gespeicherten Energie, die sich für verschiedene MPC-EMS-Regler ergeben. Sat. RES-droop

6. Erzielte Ergebnisse

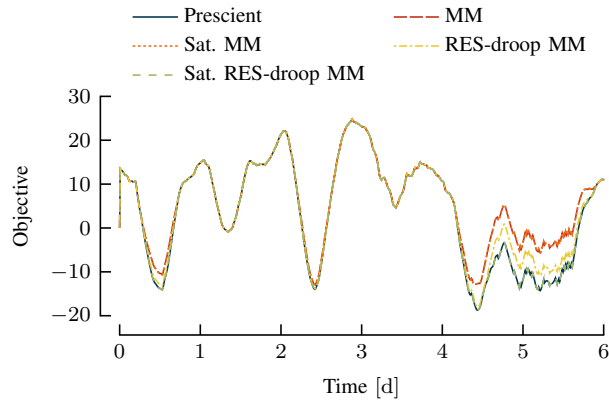


Abbildung 6.15.: Vorhergesagte MPC-EMS-Kosten des offenen Regelkreises für 576 verschiedene Anfangsbedingungen und robuste Vorhersageintervalle (die aus einer Simulation im geschlossenen Regelkreis stammen).

MM MPC neigt dazu, mehr RES-Energie zu gewinnen, was zu höheren Energieniveaus führt.

Basierend auf den Gesamtbetriebskosten (6.16) und der Kostendefinition in Problem 1 werden die Kostenwerte des geschlossenen Regelkreises pro Abtastwert über die gesamten $N_s = 576$ Abtastwerte in der Simulation berechnet durch

$$J^{\text{closed-loop}} := 1/N_s \sum_{k=1}^{N_s} \ell(p(k), \delta_t(k), \delta_t(k-1)), \quad (6.20)$$

wobei $\delta_t(0)$ die gegebenen Anfangsschaltzustände der konventionellen Einheit sind und $p(k), \delta_t(k), k \in \{1, \dots, N_s\}$, die Trajektorien der entsprechenden Variablen sind, die sich aus der jeweiligen Simulation ergeben. Einspeiseenergien (dividiert durch die Anzahl der Abtastschritte) der RES und der konventionellen Einheit werden auf die gleiche Weise definiert. Die Sat. RES-droop MM MPC und die wissende MPC führen zu den gleichen RES- und konventionellen Einspeiseenergien. Die Variation der Kosten ergibt sich aus der höheren Anzahl von Schaltvorgängen bei wissender MPC im Vergleich zur Sat. RES-droop MM MPC.

Die betrachtete MPC-Formulierung verwendet einen endlichen Horizont und führt daher nicht garantiert zu optimalen Kosten im geschlossenen Regelkreis. Darüber hinaus kann die MPC-Formulierung hier mehrere optimale Lösungen mit den gleichen optimalen Kosten haben, was unterschiedliche Stellgrößenentscheidungen erklären könnte. Man erkennt auch, dass – im Gegensatz zur Vorhersage im offenen Regelkreis – die konventionellen Einspeiseenergien im geschlossenen Regelkreis nicht identisch sind.

6.5.4. Robustes Multi-Szenario sättigungs-bewusstes Minimax MPC Energiemanagement

Das zuvor entwickelte Minimax-EMS-Design für Problem 1 hat den Nachteil, dass in seiner Zielsetzung nur die Worst-Case-Kosten berücksichtigt werden. Während im Simulationsbeispiel gezeigt wurde, dass es praktisch die niedrigstmöglichen Kosten verursacht, wenn

das Worst-Case-Szenario tatsächlich eintritt, kann es durch das einfachere, nicht-robuste Certainty-Equivalence-MPC-EMS in (wahrscheinlicheren) Szenarien übertroffen werden.

Im Kontext der MPC stellt sich die Frage, ob es ein Steuerungsprofil (über den Vorhersagehorizont) gibt, das nicht nur in jedem Szenario zulässig ist (also die Modellgleichungen und Beschränkungen erfüllt), sondern auch in jedem Szenario optimal ist. Mathematisch kann dies wie folgt ausgedrückt werden:

Problem 2 (Multi-Szenario MM MPC mit RES-Droop-Regelung und Sättigung).

$$\min_u \max_w (J(u, w) - \min_{u'} J(u', w)) \stackrel{!}{=} 0 \quad (6.21)$$

s.t. Modellgleichungen, wobei die Nebenbedingungen für alle erfüllt sind $w \in [w_{\min}, w_{\max}]$.

Die äußere Minimierung versucht, einen Kompromiss über alle w zu finden. Die Erwartung, dass die Zugehörigen Kosten Null sind, ist eine sehr strenge Anforderung und kann für allgemeine Systeme nicht erfüllt werden. Für das MG-Modell und unter den in früheren Arbeiten (siehe Abschnitt 6.5.2) aufgestellten Annahmen lohnt es sich jedoch, dies zu untersuchen.

Als erste Untersuchung berechnen wir einen Kandidaten des u -Steuerungsprofils nach der folgenden Heuristik: Wir ersetzen die innere Maximierung in Problem 2 über alle w durch das Maximum über zwei spezifische w , von denen bekannt ist (aus einer effizienten Umformulierung in [49]), dass sie dem Worst- und Best-Case entsprechen:

1. Optimierung des Worst-Case-Szenarios

- resultiert in optimalen Worst-Case-Kosten

$$\bar{J} = \min_u \max_w J$$

2. Optimierung des Best-Case-Szenarios

- resultiert in optimalen Best-Case-Kosten

$$\tilde{J} = \min_u \min_w J$$

3. Optimierung des Kompromisses zwischen Worst-Case- und Best-Case-Szenario

$$\min_u (\max \{J(u, w^{\max}) - \bar{J}, J(u, w^{\min}) - \tilde{J}\})$$

Daraus folgt, dass die optimalen Kosten gleich Null sind, wenn das Worst- und das Best-Case-Szenario gleichzeitig optimiert werden können.

Aus Abb. 6.16 geht hervor, dass, wenn wir eine gleichzeitig in Bezug auf den Worst- und den Best-Case optimale Steuerung finden können, wir auch eine gleichzeitig in Bezug auf den Worst-, Best- und Nominal-Case optimale Steuerung finden können (schwächere Aussage). Dies scheint für einen großen Simulationsbereich zu gelten.

In Abb. 6.16 werden diese (im offenen Regelkreis über den jeweiligen Vorhersagehorizont ab dem jeweiligen Simulationszeitpunkt) optimierten Kosten über eine Simulation von 7

6. Erzielte Ergebnisse

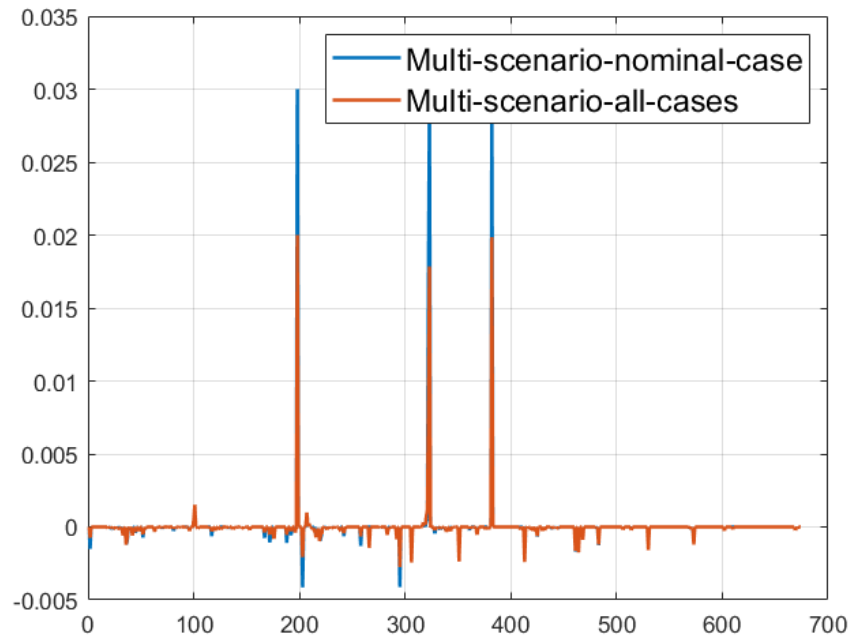


Abbildung 6.16.: Optimale Kostenfunktion der finalen Optimierungs-Iteration, bei der die optimalen Kostenwerte der vorherigen Iterationen als Offset abgezogen werden. Wenn der Wert 0 erreicht werden kann, bedeutet dies, dass die Kostenfunktionen aller vorherigen Iterationen gleichzeitig optimiert werden können. Das Ziel ist es, zu zeigen, dass in allen Fällen, in denen eine optimale Lösung für das 2-Szenario-Problem (Worst-, Best-Case) gefunden werden kann, auch eine Lösung für das 3-Szenario-Problem (Worst-, Best-Case, Nominal Case) gefunden werden kann.

Tagen für das einfache MG-Modell (vgl. Abschnitt 6.5.2) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Kosten in vielen Fällen tatsächlich null sind. Als Nächstes können wir überprüfen, ob die Steuerung zu diesen Zeitpunkten auch unter zusätzlichen Szenarien innerhalb der durch die Worst- und Best-Case-Szenarien definierten Grenzen optimal wäre.

Bei weiteren Untersuchungen betrachten wir sogar eine noch stärkere Aussage: Ist eine in Bezug auf den Worst- und Best-Case optimale Steuerung auch in Bezug auf den Nominal-Case-Fall und alle anderen (unendlich vielen) gemischten Fälle optimal? In Abb. 6.17 sehen wir einige Verstöße in der Simulation, d. h. Zeitpunkte, an denen die Stärkere Aussage widerlegt werden kann. Dies wurde anschließend weiter untersucht, und es konnte wie im Folgenden beschrieben sogar ein Gegenbeispiel anhand eines sehr minimalen MG-Szenarios gefunden werden.

Das in Abb. 6.17 dargestellte einfache Gegenbeispiel zeigt, dass im Allgemeinen Fall aus der gleichzeitigen Optimierung des Worst- und Best-Case-Szenarios keine für alle möglichen Szenarien optimale Sollwertabfolge resultiert. In dem Beispiel besteht das MG nur aus einem Batteriespeicher, einem erneuerbaren Erzeuger und einer Last. Die zuvor eingeführte Kostenfunktion reduziert sich auf die Differenz zwischen Anfangs- und End-Ladezustand des Batteriespeichers. Die Batterie sei zu Beginn vollständig geladen. In der ersten "Halbzeit" (0h–2h) ist nur die Last unsicherheitsbehaftet (Leistung -0.5pu bis 0pu), während der erneuerbare Erzeuger in dieser Phase mit Sicherheit nicht verfügbar ist. Während der zweiten "Halbzeit" (2h–4h) liegt mit Sicherheit kein Lastbedarf vor, während der erneuerbare Erzeuger unsicherheitsbehaftet ist (verfügbare Leistung zwischen 0pu und 0.5pu). Eine konstante Abfolge von 0-Sollwerten ist optimal sowohl für den Worst- als auch den Best-Case. Dies kann einfach begründet werden, da in beiden Szenarien kein Handlungsspielraum besteht: In der ersten "Halbzeit" sind nur Last und Batteriespeicher aktiv und die Last bestimmt unmittelbar, wie schnell die Batterie entladen wird. In der zweiten "Halbzeit" besteht ebenfalls weder im Worst- noch im Best-Case Handlungsspielraum: Im Worst-Case ist keine erneuerbare Leistung verfügbar und die Ladung im Batteriespeicher bleibt in Verbindung mit der sättigungsbehafteten Droop-Regelung konstant. Im Best-Case wäre zwar erneuerbare Leistung verfügbar, aber da der Batteriespeicher noch vollständig geladen ist kann diese nicht entnommen werden (die Leistung der Batterie bzw. die tatsächliche erneuerbare Einspeisung wird ebenfalls aufgrund der sättigungsbehafteten Droop-Regelung zu 0 geregelt). Darüber hinaus zeigt das Beispiel, dass in der zeitlichen Abfolge komplexere Szenarien existieren können, für die auch aus einer Worst-, Best- und nominellen Multi-Szenarien-Optimierung resultierende Sollwertabfolgen nicht optimal sind. Bei dem hier gewählten Misch-Szenario tritt in der ersten "Halbzeit" der Worst-Case und in der zweiten "Halbzeit" der Best-Case auf. Die Sollwertabfolge in der ganz rechten Spalte der Abbildung ist jedoch gleichzeitig für alle eingezeichneten Szenarien optimal.

6. Erzielte Ergebnisse

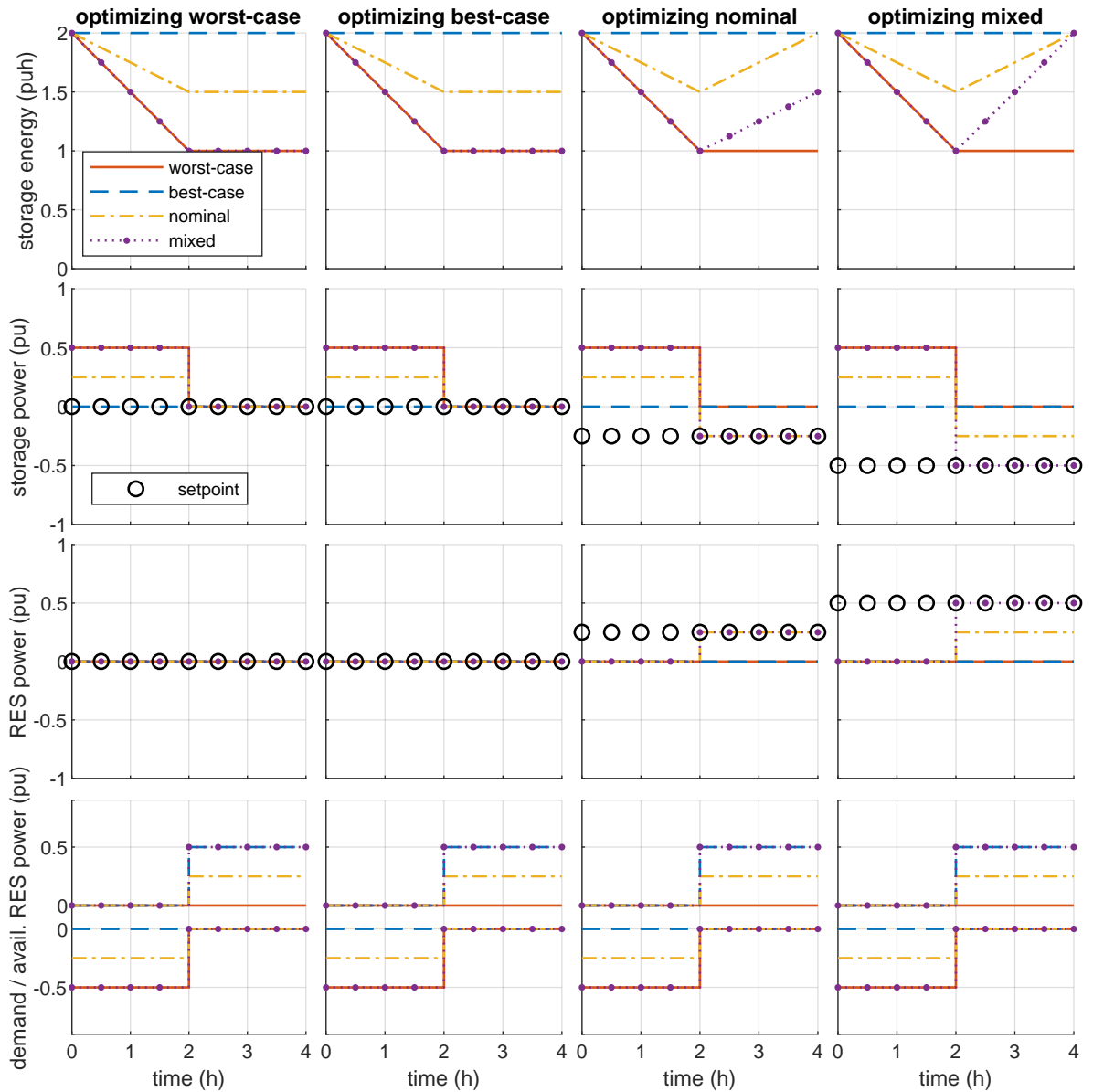


Abbildung 6.17.: Fallstudie, bei der die *eine* das Worst- und Best-Case-Szenario optimierende Sollwertabfolge nicht gleichzeitig optimal in Bezug auf das nominelle Szenario ist. Darüber hinaus ist *eine* das Worst-, Best- und nominelle Szenario optimierende Sollwertabfolge nicht optimal in Bezug auf ein in der zeitlichen Abfolge komplexeres Misch-Szenario. Die in der ganz rechten Spalte eingezeichneten Sollwerte aus der Optimierung des Misch-Szenarios sind jedoch optimal in Bezug auf alle Szenarien.

6.5.5. Sättigungsbewusstes MM MPC-EMS mit Berücksichtigung der Leistungsgrenzen der Übertragungsleitungen

Hier führen wir zunächst eine Analyse des MG-EMS-Systems mit Sättigung durch, die dann zur Entwicklung eines EMS-Designs verwendet werden, das die Leistungsgrenzen der Übertragungsleitungen berücksichtigt.

6.5.5.1. Systemanalyse

Die Leistungsabgabe der Einheiten im MG mit Sättigung wird durch die folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\begin{aligned}
 P_t &= \delta_{sw}^t \odot (P_t^{\text{fix}}(\Delta_t, U_t) + \delta_{\text{noSat}}^t \odot \chi_t \rho), \\
 P_s &= P_s^{\text{fix}}(\Delta_s, U_s) + \delta_{\text{noSat}}^s \odot \chi_s \rho, \\
 P_r &= \min(U_r, W_r), \\
 \mathbf{1}_{n_t}^\top P_t + \mathbf{1}_{n_s}^\top P_s + \mathbf{1}_{n_r}^\top P_r + \mathbf{1}_{n_d}^\top W_d &= 0
 \end{aligned} \tag{6.22}$$

Ebenso gilt: $P_k := [P_r^\top, W_d^\top]^\top$, $P_g := [P_t^\top, P_s^\top]^\top$, und $U_g := [U_t^\top, U_s^\top]^\top$, wobei P_k die Leistungsabgabe erneuerbarer Einheiten und Lasten darstellt, P_g die Leistungsabgabe netzbildender Einheiten bezeichnet und U_g ihren Leistungssollwerten entspricht.

Gemäß Gleichung 6.22,

$$P_g = \underbrace{\begin{bmatrix} \delta_{sw}^t \\ \mathbf{1}_{n_s} \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} P_t^{\text{fix}}(\Delta_t, U_t) \\ P_s^{\text{fix}}(\Delta_s, U_s) \end{bmatrix}}_{P_g^{\text{fix}}(\Delta, U_g, \delta_{sw}^t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} \delta_{sw}^t \\ \mathbf{1}_{n_s} \end{bmatrix} \odot \begin{bmatrix} \delta_{\text{noSat}}^t \\ \delta_{\text{noSat}}^s \end{bmatrix}}_{\delta_{\text{noSat}}} \odot \underbrace{\begin{bmatrix} \chi_t \\ \chi_s \end{bmatrix}}_{\chi} \rho \tag{6.23}$$

Dementsprechend können die Gleichungen für die Leistungsabgabe wie folgt umgeschrieben werden:

$$P_g = \underbrace{\left(\mathbf{I} - \frac{\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{sw}^t \\ \mathbf{1}_{n_s} \end{bmatrix} \odot \delta_{\text{noSat}} \odot \chi \end{pmatrix} \mathbf{1}_{n_g}^\top}{\mathbf{1}_{n_g}^\top \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{sw}^t \\ \mathbf{1}_{n_s} \end{bmatrix} \odot \delta_{\text{noSat}} \odot \chi \end{pmatrix}} \right)}_{f_{\text{-sat}}(\Delta, U_g, \delta_{sw}^t)} P_g^{\text{fix}}(\Delta, U_g, \delta_{sw}^t) + \underbrace{\frac{-\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{sw}^t \\ \mathbf{1}_{n_s} \end{bmatrix} \odot \delta_{\text{noSat}} \odot \chi \end{pmatrix} \mathbf{1}_{n_k}^\top}{\mathbf{1}_{n_g}^\top \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{sw}^t \\ \mathbf{1}_{n_s} \end{bmatrix} \odot \delta_{\text{noSat}} \odot \chi \end{pmatrix}}}}_{\Phi_{\text{sat}}(\delta_{\text{noSat}}, \delta_{sw}^t)} P_k \tag{6.24}$$

Für feste U und δ_{sw}^t kann P_g als eine stückweise affine Funktion von P_k interpretiert werden. Wie zuvor besprochen, ist es schwierig, einen expliziten Ausdruck für diese stückweise affine Funktion zu bestimmen. Dennoch kann eine Menge aller möglichen Koeffizientenmatrizen durch Iteration über alle möglichen Kombinationen aktiver netzbildender Einheiten aufgelistet werden.

$$\mathcal{S}_g := \left\{ \Phi \in \mathbb{R}^{n_g \times (n_r + n_d)} \mid \Phi = - \frac{\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{sw}^t \\ \mathbf{1}_{n_s} \end{bmatrix} \odot \delta_{\text{noSat}} \odot \chi \end{pmatrix} \mathbf{1}_{n_k}^\top}{\mathbf{1}_{n_g}^\top \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{sw}^t \\ \mathbf{1}_{n_s} \end{bmatrix} \odot \delta_{\text{noSat}} \odot \chi \end{pmatrix}} \forall \delta_{\text{noSat}} \in \{0, 1\}^{n_g} \setminus \mathbf{0}, \delta_{sw}^t \in \{0, 1\}^{n_t} \right\}. \tag{6.25}$$

6. Erzielte Ergebnisse

In Gleichung 6.25 ist δ_{sw}^t redundant, da die Menge aller möglichen δ_{noSat} äquivalent zur Menge aller möglichen $[\delta_{sw}^t, \mathbf{1}_{n_s}^\top]^\top \odot \delta_{\text{noSat}}$ ist. Daher kann die Gleichung wie folgt vereinfacht werden.

$$\mathcal{S}_g = \left\{ \Phi \in \mathbb{R}^{n_g \times n_k} \left| \Phi = - \frac{(\delta_{\text{noSat}} \odot \chi) \mathbf{1}_{n_k}^\top}{\mathbf{1}_{n_g}^\top \delta_{\text{noSat}} \odot \chi}, \forall \delta_{\text{noSat}} \in \{0, 1\}^{n_g} \setminus \mathbf{0} \right. \right\}. \quad (6.26)$$

Es ist offensichtlich, dass die Matrix Φ_{sat} nur nicht-positive Elemente enthält, wodurch sichergestellt wird, dass P_g immer monoton abnehmend in Bezug auf P_k ist. Da P_k bekanntermaßen monoton in W ansteigt, können wir außerdem schließen, dass P_g monoton in der Unsicherheit W abnimmt.

$$\begin{aligned} P_g &= f_{\text{sat}}(U, \delta_{sw}^t, P_k(W)), \\ \frac{\partial f_{\text{sat}}}{\partial P_k} &\in \mathcal{S}_g. \end{aligned} \quad (6.27)$$

Zusammenfassend lässt sich die Leistungsabgabe der netzbildenden Einheiten im MG als Funktion der Leistungssollwerte U , der Schaltzustände konventioneller Einheiten δ_{sw}^t und der Unsicherheiten in erneuerbaren Einheiten und Lasten W darstellen. Darüber hinaus nimmt P_g monoton mit W ab, und die Menge aller möglichen Koeffizientenmatrizen in Bezug auf W ist in Gleichung 6.26 definiert.

6.5.5.2. Analyse der Übertragungsleitungen in MGs mit Sättigung

Gemäß Abschnitt 6.5.5.1 kann die Einheitenleistungsausgabe als stückweise affine Funktion der Unsicherheiten W für gegebene Leistungs-Sollwerte U und Schaltzustände δ_{sw}^t dargestellt werden. Eine explizite Darstellung ist schwer abzuleiten; dennoch kann die Menge aller möglichen Koeffizientenmatrizen in Bezug auf P_k aufgezählt werden.

$$\begin{aligned} P_g &= f_{\text{sat}}(U, \delta_{sw}^t, P_k(W)), \\ \frac{\partial P_g}{\partial P_k} &\in \left\{ \Phi \in \mathbb{R}^{n_g \times (n_r + n_d)} \left| \Phi = - \frac{(\delta_{\text{noSat}} \odot \chi) \mathbf{1}_{(n_r + n_d)}^\top}{\mathbf{1}_{n_g}^\top \delta_{\text{noSat}} \odot \chi}, \forall \delta_{\text{noSat}} \in \{0, 1\}^{n_g} \setminus \mathbf{0} \right. \right\}. \end{aligned} \quad (6.28)$$

Ähnlich kann die Leitungsleistung wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} P_e &= [\epsilon_g \quad \epsilon_k] \begin{bmatrix} P_g \\ P_k \end{bmatrix}, \\ &= \epsilon_g P_g + \epsilon_k P_k, \\ &= \epsilon_g f_{\text{sat}}(U, \delta_{sw}^t, P_k(W)) + \epsilon_k P_k. \end{aligned} \quad (6.29)$$

Die Matrix E wird in zwei Blockmatrizen unterteilt: $\epsilon_g \in \mathbb{R}^{m \times n_g}$ und $\epsilon_k \in \mathbb{R}^{m \times n_k}$, die den Koeffizienten von P_g und W_k entsprechen.

Offensichtlich kann die Leitungsleistung auch als stückweise affine Funktion von P_k für gegebene Leistungs-Sollwerte U und Schaltzustände δ_{sw}^t dargestellt werden. Darüber hinaus kann die Koeffizientenmatrix von P_e in Bezug auf P_k wie folgt berechnet werden:

$$\frac{\partial P_e}{\partial P_k} = \epsilon_g \frac{\partial P_g}{\partial P_k} + \epsilon_k. \quad (6.30)$$

6. Erzielte Ergebnisse

U_g , und die Extremwerte der Leistungsleistung können immer an den Grenzen von P_k erreicht werden.

Es ist leicht zu zeigen, dass die Leistungsleistung P_e monoton in P_k ist, wenn alle Elemente in \mathcal{S}_k vorzeichenkonsistent sind¹. In solchen Fällen können die Worst-Case-Szenarien für die Überprüfung der Leistungsleistungsbeschränkungen identifiziert werden. Falls jedoch die Monotonie der Leistungsleistung P_e nicht gewährleistet ist, ist die Einhaltung der Leistungsleistungsbeschränkungen für die Worst-Case-Szenariomenge nicht mehr gleichbedeutend mit ihrer Einhaltung im gesamten Unsicherheitsbereich. Dennoch kann die Worst-Case-Szenariomethode, die auf Monotonie basiert, weiterhin angewendet werden, unter der Annahme, dass P_e innerhalb des zulässigen Bereichs von P_k überwiegend monoton ist. Die Zuverlässigkeit dieser Annahme kann durch eine sorgfältige Gestaltung der MG-Topologie weiter verbessert werden. Um die Anzahl der Worst-Case-Szenarien für die Leistungsleistungsbeschränkungen zu reduzieren, sollte die MG so gestaltet werden, dass die Anzahl der Elemente in \mathcal{S}_e , die Vorzeichenkonsistenz aufweisen, maximiert wird. Falls für eine gegebene MG alle Elemente in \mathcal{S}_e vorzeichenkonsistent sind, dann ist die Leistungsleistung P_e monoton in P_k .

6.5.5.3. MM-MPC-Entwurf für das MG mit Beschränkung der Übertragungsleistungen

In diesem Abschnitt integrieren wir die Übertragungsleistungsbeschränkungen in die MM-MPC.

Zu jedem Abtatschritt im Vorhersagehorizont kann die Leistungs-Übertragungsleistung P_e ohne Beschränkung der Allgemeingültigkeit wie folgt berechnet werden:

$$P_e(k+j) = \epsilon_g P_g(k+j) + \epsilon_k P_k(k+j), \quad \forall j = 1, \dots, N_p.$$

Darüber hinaus können die Profile der Leistungsleistung über den Vorhersagehorizont \mathbf{P}_e wie folgt dargestellt werden:

$$\mathbf{P}_e = \mathbf{E}_g \mathbf{P}_g + \mathbf{E}_k \mathbf{P}_k, \quad (6.32)$$

wobei

$$\mathbf{E}_g = \begin{bmatrix} \epsilon_g & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \epsilon_g & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \epsilon_g \end{bmatrix}_{(m \cdot N_p) \times (n_g \cdot N_p)} \quad \mathbf{E}_k = \begin{bmatrix} \epsilon_k & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \epsilon_k & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \epsilon_k \end{bmatrix}_{(m \cdot N_p) \times (n_k \cdot N_p)}$$

6.5.5.4. MM-MPC mit Berücksichtigung der Sättigung und Übertragungsleistungsbeschränkungen

Für MGs mit Sättigung werden die Worst-Case-Szenarien der Übertragungsleistungen durch die Schaltzustände δ_{sw}^t bestimmt, die Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems

¹Zwei Matrizen werden als vorzeichenkonsistent definiert, wenn ihre entsprechenden Elemente das gleiche Vorzeichen haben. Hierbei wird Null sowohl als positiv als auch als negativ betrachtet.

6.5. Robustifizierung der zentralen und verteilten EMSe für Vorhersageunsicherheiten (AP5)

sind. Dies kann durch die Einbeziehung aller Worst-Case-Szenarien mit allen möglichen δ_{sw}^t angegangen werden.

Die Worst-Case-Szenarien \mathbf{W}_{sat}^* der Übertragungsleistungen werden durch die Anwendung des Algorithmus 1 auf alle Elemente der Menge \mathcal{S}_κ erzeugt, also auf alle möglichen Koeffizientenmatrizen von P_e in Bezug auf P_k .

Algorithmus 1 Finden der optimalen Lösungsmenge für eine matrix-affine Funktion in einer Box-Region

Require: Matrix-affine Funktion $F(x) = Cx + d$, wobei $C \in \mathbb{R}^{m \times n}$; Box-Beschränkungen $a_i \leq x_i \leq b_i$ für $i = 1, 2, \dots, n$.

Ensure: Menge S , die alle Punkte x enthält, an denen jedes $f_j(x) = C_j x + d_j$ sein Minimum oder Maximum innerhalb der Box erreicht.

- 1: Initialisiere $S = \emptyset$
 - 2: **for** jede Zeile $j = 1, 2, \dots, m$ der Matrix C **do**
 - 3: Initialisiere x_{\min} und x_{\max} als leere Vektoren
 - 4: **for** jede Variable x_i mit den Beschränkungen $a_i \leq x_i \leq b_i$ **do**
 - 5: **if** $C_{j,i} \geq 0$ **then**
 - 6: Setze $x_{\min,i} = a_i$; $x_{\max,i} = b_i$
 - 7: **else**
 - 8: Setze $x_{\min,i} = b_i$; $x_{\max,i} = a_i$
 - 9: **end if**
 - 10: **end for**
 - 11: Füge x_{\min} und x_{\max} zu S hinzu
 - 12: **end for**
 - 13: **return** S , die Menge aller eindeutigen Lösungen
-

Problem 3. Sättigungsbewusste MM-MPC mit Berücksichtigung der Übertragungsleistungsbeschränkungen.

$$\begin{aligned}
 & \min_{\mathbf{U}, \delta_t} \mu \\
 & \text{s.t.} \\
 & \left. \begin{aligned}
 & L(\mathbf{P}_t, \mathbf{P}_s, \delta_t, \delta_t(k)) \leq \mu \\
 & X_{\min} \leq \mathbf{X} \leq X_{\max}, \\
 & P_e^{\min} \leq \mathbf{P}_e \leq P_e^{\max},
 \end{aligned} \right\} \forall \mathbf{W} \in \Omega \\
 & \mathbf{X} = \mathbf{G}_{\text{sat}}^s(\mathbf{U}, \delta_t, \mathbf{W}, X(k)), \\
 & \mathbf{P}_g = \mathbf{F}_{\text{sat}}(\mathbf{U}, \delta_t, \mathbf{W}), \\
 & \mathbf{P}_r = \min(\mathbf{U}_r, \mathbf{W}_r), \\
 & \mathbf{P}_e = \mathbf{E}_g \mathbf{P}_g + \mathbf{E}_k \mathbf{P}_k, \\
 & \Omega = \{\mathbf{W}^{\min}, \mathbf{W}^{\max}, \mathbf{W}_{\text{sat}}^*\} \\
 & U_{\min} \leq \mathbf{U} \leq U_{\max}, \\
 & \delta_t \in \{0, 1\}^{N_p \times n_t}.
 \end{aligned}$$

6. Erzielte Ergebnisse

Man beachte, dass das in 3 definierte Problem des sättigungsbewusstes MM-MPC die Einhaltung der Übertragungsleistungsbeschränkungen für alle möglichen Realisierungen der Unsicherheiten gewährleisten kann, vorausgesetzt, dass die Übertragungsleistung P_e in Bezug auf die Unsicherheiten W monoton bleibt. Mit anderen Worten müssen alle Elemente in S_κ vorzeichenkonsistent sein. Darüber hinaus kann die Größe der Menge W^* durch die Auswahl einer geeigneten MG-Topologie reduziert werden.

6.5.5.5. Simulationsbeispiel

Im vorherigen Abschnitt wurde ein MM-MPC-Ansatz entwickelt, um die Übertragungsleistungsbeschränkungen zu adressieren, indem zusätzliche Worst-Case-Szenarien einbezogen wurden, in denen die Extremwerte der Übertragungsleistungen erreicht werden. Diese Szenarien wurden durch die Aufzählung aller möglichen Zustände der netzbildenden Einheiten identifiziert. In diesem Kapitel wird der vorgeschlagene MM-MPC-Ansatz, der zur Berücksichtigung der Übertragungsleistungsbeschränkungen entwickelt wurde, durch Simulationen evaluiert und mit dem Certainty-Equivalence-MPC hinsichtlich Betriebsleistung und Einhaltung der Beschränkungen verglichen.

Der vorgeschlagene Regelalgorithmus für das MG wurde mithilfe der in 6.3.1 beschriebenen MATLAB-basierten MG-Simulationssoftware validiert, wie in Abbildung 6.19 dargestellt. Zu jedem Abtastzeitpunkt erhält der Regler Zustandsinformationen aus dem MG-Modell sowie Prognosen zur erneuerbaren Energieeinspeisung und Lasten vom Vorhersagemodul, formuliert und löst ein Optimierungsproblem und wendet den ersten Stellgrößenvektor des erhaltenen Stellgrößenprofils an, um die Zustände des MG-Modells zu aktualisieren.

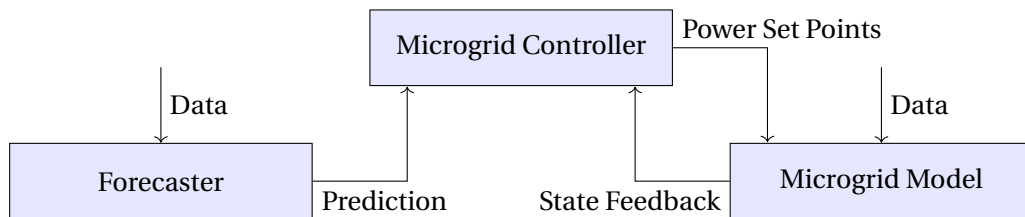


Abbildung 6.19.: Struktur der MG-Simulation

Dieser Prozess wird während des gesamten Simulationszeitraums mit einer 15MG-minütigen Abtastzeit und einer 6MG-tägigen Simulationsdauer für alle hier vorgestellten Fälle wiederholt. Es werden reale Wetter- und Lastanforderungsdaten verwendet, um realistische Bedingungen zu gewährleisten.

Das in der Simulation verwendete MG ist in Abbildung 6.20 dargestellt. Es besteht aus einem konventionellen Generator, zwei erneuerbaren Einheiten -- einer PV-Anlage und einer Windkraftanlage -- und einem Batteriespeicher und einer Last.

Im Folgenden sind alle Werte auf ein Per-Unit-System (pu) mit einem Basiswert von 1 normiert. Die Parameter sowie die Betriebsgrenzen der Einheiten sind in Tabelle 6.3 dargestellt.

6.5. Robustifizierung der zentralen und verteilten EMSe für Vorhersageunsicherheiten (AP 5)

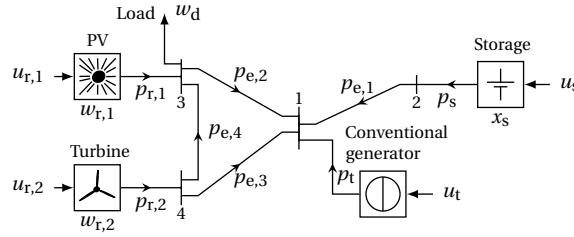


Abbildung 6.20.: Aufbau des MGs im Simulationsbeispiel.

Tabelle 6.3.: Parameter and operational limits of units.

	Convent. generator	Storage unit	PV	Wind turbine
max. output power [pu]	1	1	2	2
min. output power [pu]	0.2	-1	0	0
Droop gain	1	1	/	/
max. power set-point [pu]	5	5	5	5
min. power set-point [pu]	-5	-5	-5	-5
max. energy level [pu h]	/	6	/	/
min. energy level [pu h]	/	0	/	/

Wie zuvor erwähnt, kann die Topologie eines MGs die Effektivität der Übertragungsleistungsbeschränkungen bei der MM-MPC beeinflussen, da die Übertragungsleistungen nicht immer monoton in Bezug auf Unsicherheiten für alle MG-Topologien sind. Vor der Fallstudie wurde eine MG-Topologie vorausgewählt, die unsere Monotonieanforderungen erfüllt. In dieser Topologie sind die Einheiten über vier miteinander verbundene Busse verbunden, die gemäß dem durch die folgende Adjazenzmatrix A und der Einheit-zu-Bus-Matrix U definierten Graphen angeordnet sind.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.33)$$

Die Parameter und Betriebsgrenzen des elektrischen Netzwerks sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4.: Parameter and operational limits of electrical network.

max. line power [pu]	min. line power [pu]	line admittance
0.65	-0.65	20

In dieser Fallstudie werden die Certainty-Equivalence-MPC, die MM-MPC und die sätti-

6. Erzielte Ergebnisse

gungsbewusste MM-MPC angewendet. Der Vorhersagehorizont wird auf 8 Stunden festgelegt. Die Gewichtungen der Kostenfunktion sind wie folgt gewählt.

Tabelle 6.5.: Weights of the cost function.

C_t	C_{on}	C_{sw}	C_s
1	0.2	0.3	0.9

Das Vorhersagemodul erstellt Vorhersagen der unsicheren Variablen, also der verfügbaren Einspeisung erneuerbarer Erzeuger und der Lastanforderung, die vom Regler für die Entscheidungsfindung genutzt werden. In dieser Simulation liefert das Vorhersagemodul zwei Arten von Vorhersagen: eine verrauschte nominelle Vorhersage und untere und obere Grenzen. Die verrauschte nominelle Vorhersage wird vom der Certainty-Equivalence-MPC verwendet, während die unteren und oberen Grenzen von der MM-MPC genutzt werden.

6.5.5.6. Simulationsergebnisse

Die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Regler wird anhand der folgenden sechs Schlüsselindikatoren bewertet:

- **Wert der Kostenfunktion über den geschlossenen Regelkreis:** Die tatsächlichen Kostenwerte, die während der Simulation berechnet und über die Simulationsdauer integriert wurden.
- **Einspeisung erneuerbarer Einheiten:** Die aus erneuerbaren Quellen gewonnene Energie.
- **Einspeisung konventioneller Einheiten:** Die von den konventionellen Generatoren bereitgestellte Energie.
- **Verletzung der Energiebeschränkung:** Die Dauer, in der die Energiegrenzwerte überschritten wurden.
- **Verletzung der Leistungsgrenze von Einheiten:** Die Dauer, in der die Leistungsgrenzen der Einheiten überschritten wurden.
- **Verletzung der Übertragungsleistungsbeschränkungen:** Die Dauer, in der die Leistungsgrenzen der Übertragungsleitungen überschritten wurden, sowie das Ausmaß der Überschreitung (um etwa eine Beurteilung über eine unzulässige Erwärmung der Leitungen treffen zu können).

Die mit den verschiedenen Reglern erhaltenen Schlüsselindikatoren werden in Tabelle 6.6 verglichen. Die Certainty-Equivalence-MPC schneidet in Bezug auf die Kosten im geschlossenen Regelkreis, die erneuerbare Einspeisung und die konventionelle Einspeisung am besten ab, überschreitet jedoch häufig die Übertragungsleistungsbeschränkungen.

Sowohl die MM-MPC als auch die sättigungsbewusste MM-MPC gewährleisten die Einhaltung der Betriebsbeschränkungen. Bemerkenswert ist, dass diese beiden robusten MPC-Ansätze nahezu identische Leistungsfähigkeitswerte liefern.

Tabelle 6.6.: Comparison of performance indicators.

	CE	MM	Sat. MM
Cost	188.463	239.796	240.672
RES [pu h]	53.247	44.669	44.078
Convent. [pu h]	36.243	44.374	44.713
ESS [h]	0	0	0
Unit Power [h]	0	0	0
Line Power [h/pu h]	17.5 / 0.951	0 / 0	0 / 0

Abbildung 6.21 zeigt die Leistungsprofile der Übertragungsleitungen für die in diesem Abschnitt genannten Regelungsmethoden.

Es ist zu erkennen, dass die Leistung der Leitung $P_{e,1}$ im Fall des Certainty-Equivalence-MPC-Ansatzes die Grenze überschreitet. Jedoch bleibt sie im Fall der MM-MPC und der sättigungsbewussten MM-MPC innerhalb der Grenzen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass zwar die einfache MPC eine bessere Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Kosten im geschlossenen Regelkreis erzielt, jedoch die MM-MPC und die sättigungsbewusste MM-MPC in Bezug auf die Robustheit gegenüber Unsicherheiten überlegen sind, insbesondere bei der Sicherstellung der Einhaltung kritischer Einschränkungen wie der Leistungsgrenzen der Übertragungsleitungen.

6.6. Resilienter zentraler und verteilter EMS-Entwurf (AP 6)

Es sei angemerkt, dass die im Rahmen von AP 5 erhaltenen Ergebnisse zum Robusten Reglerentwurf auch die Resilienz des Systems gegenüber Ereignissen wie Kommunikationsausfällen erhöhen können. Insbesondere erlaubt die an den Leistungs- bzw. Energiegrenzen sättigende Droop-Regelung eine erhöhte Autonomie der einzelnen Einheiten. Wir planen in zukünftigen Arbeiten, dies explizit weiter zu untersuchen und beispielsweise den Einheiten zu ermöglichen, zuvor erhaltene Steuerprofile im Fall eines Kommunikationsverlusts Schritt für Schritt abzarbeiten (anstatt wie bei MPC üblich nur den ersten Wert umzusetzen). So könnte die Optimalität der Steuerung auch bei Kommunikationsverlust annähernd erhalten bleiben.

Zunächst haben wir in AP 6 aus Vorarbeiten stammende Ergebnisse zum Abschluss gebracht, so dass diese in [86] veröffentlicht werden konnten. Bei diesem verteilten EMS-Entwurfsansatz wird ein Optimierungsproblem verteilt gelöst, was eine Kommunikation zwischen mehreren lokalen Instanzen (Einheiten) erfordert. Die Wirksamkeit in Form einer koordinierten Entscheidungsfindung und Steigerung der Leistungsfähigkeit, kann dabei

6. Erzielte Ergebnisse

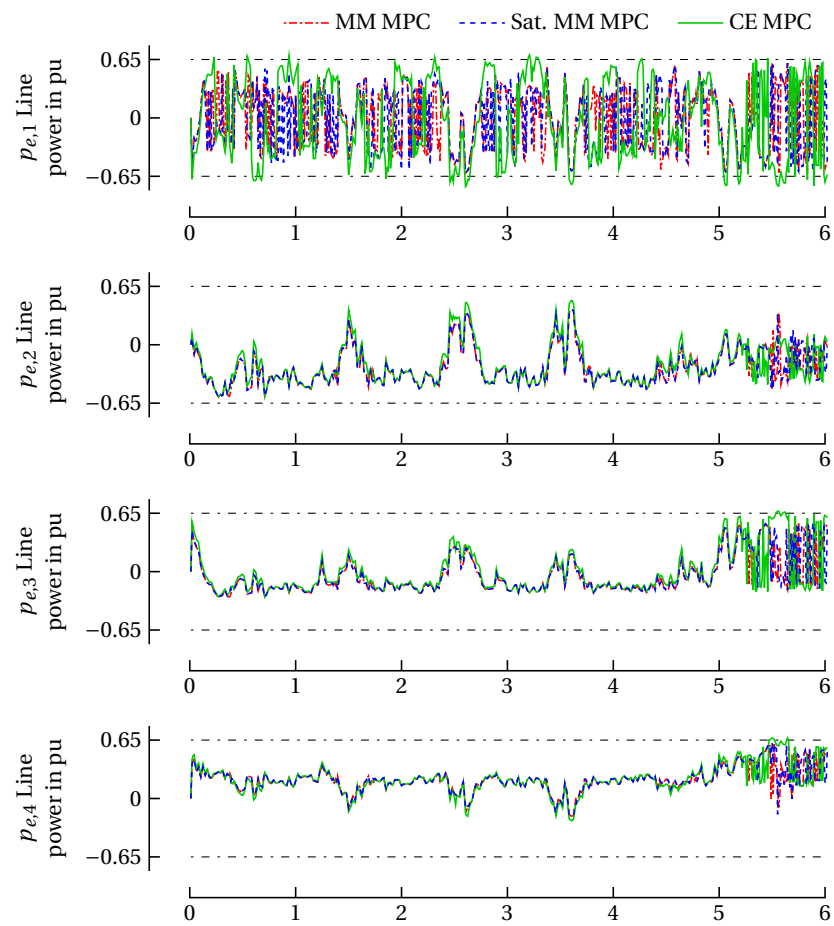


Abbildung 6.21.: Leistungsflüsse der Leitungen mit verschiedenen Reglern.

6.6. Resilienter zentraler und verteilter EMS-Entwurf (AP 6)

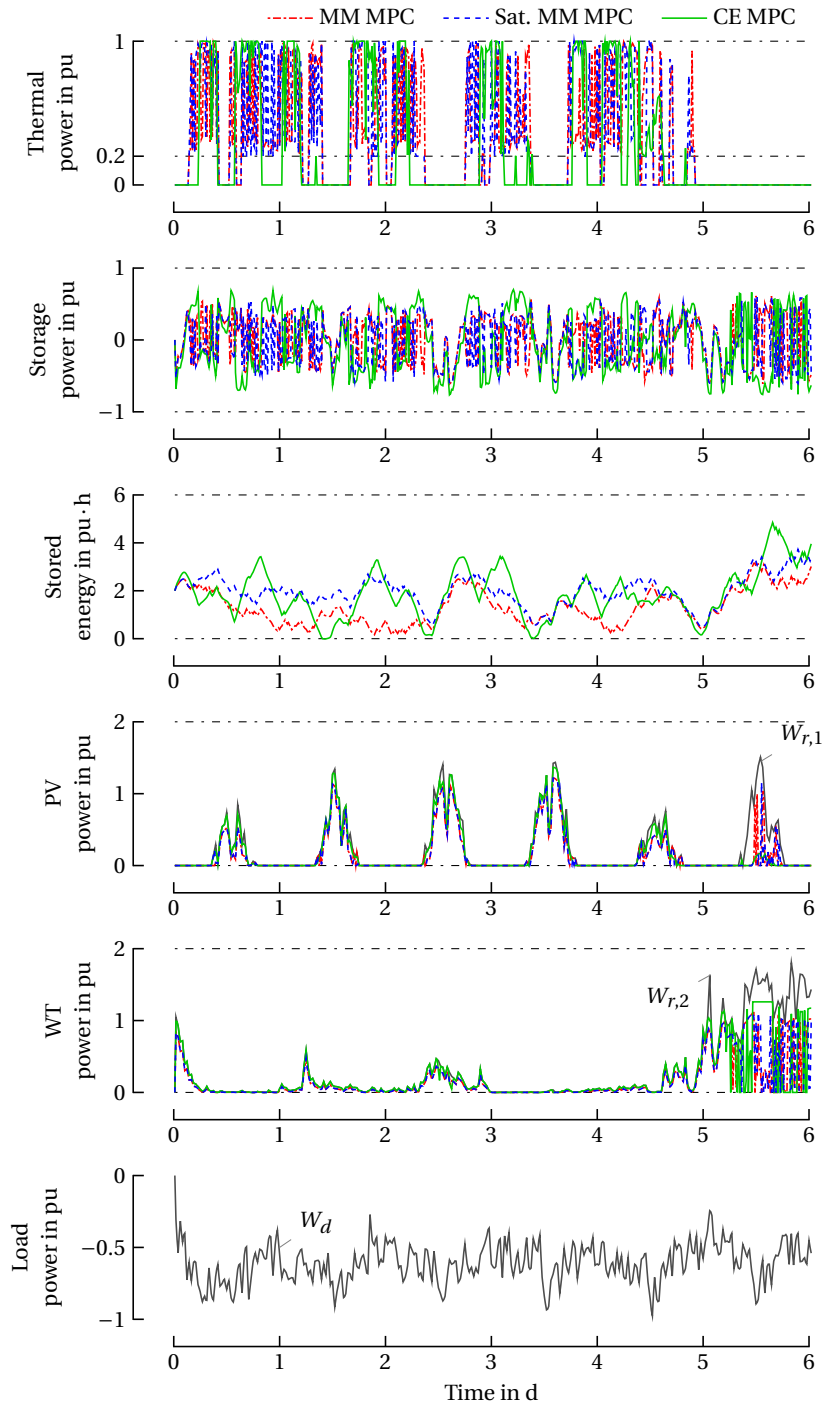


Abbildung 6.22.: Leistungsabgabe der Einheiten und Energieniveaus der Speichereinheiten mit verschiedenen Reglern.

6. Erzielte Ergebnisse

also nur bei funktionierender Kommunikation gewährleistet werden. Im Gegensatz dazu wird im Folgenden eine neue Richtung vorgeschlagen. Konkret haben wir ein Rahmenwerk untersucht, in dem lokale Steuerungen mit einem höheren Grad an Autonomie arbeiten, so dass insbesondere bei Kommunikationsausfällen ein sicher und effizienter Weiterbetrieb ermöglicht werden soll. Dieser Aspekt führt zu Herausforderungen im Zusammenhang mit der Koordinierung der lokalen Instanzen (Einheiten) in Bezug auf die Berechnung der optimalen Steuerung.

6.6.1. Dezentrales Multi-Agenten EMS

Bei dem "dezentralen Multi-Agenten EMS" handelt es sich um eine Abwandlung eines verteilten MPC-basierten Ansatzes.

Eine unzureichende Autonomie der lokalen Einheitensteuerungen in Verbindung mit zentralisierten EMSen für MGs bedeutet eine hohe Abhängigkeit von den Kommunikationsverbindungen. Diese Abhängigkeit kann zu Schwachstellen im System führen, was den Bedarf an dezentralen Designalternativen erhöht. In diesem Abschnitt untersuchen wir den Parallelbetrieb von (teilweise) autonomen MPC- und optimierungsbasierten EMS-Modulen (auf Basis der Ergebnisse aus 6.5), die auf mehrere Einheiten innerhalb der MGs verteilt sind.

In einem MG ist das Kommunikationsnetz verschiedenen Störungen ausgesetzt, wie z.B. einer Unterbrechung aufgrund eines Softwarefehlers oder eines gezielten Angriffs. Diese Störung kann zu einem kompletten Verlust der Kommunikation zwischen dem EMS und den zugehörigen Einheiten führen und wird als Kommunikationsausfall bezeichnet. In einem Kommunikationsnetzmodell bezeichnen wir den Kommunikationsstatus einer Einheit mit ζ , wobei $\zeta = 1$ eine aktive Kommunikation bedeutet, während $\zeta = 0$ einen Kommunikationsausfall (CF) bedeutet.

Im Falle eines Kommunikationsausfalls kann das EMS weder neue Messungen empfangen noch die Leistungssollwerte an die Einheiten senden. Die effektiven Leistungssollwerte einer Einheit in einem Kommunikationsnetzwerk wurden in einer Vorgängerarbeit wie folgt festgelegt [66]:

$$\text{com}(u, d, \zeta) = (1 - \zeta) \cdot d + \zeta \cdot u.$$

wobei u der vom EMS festgelegte Leistungssollwert und d ein Standardleistungssollwert ist. Der Kommunikationsstatus der konventionellen Generatoren, der Batteriespeichereinheiten und der erneuerbaren Erzeugereinheiten ist jeweils ζ_t , ζ_s und ζ_r . Um jede Leistungsabgabe $p(k)$ zum Zeitpunkt k bestimmen zu können, müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden.

Die Leistungsabgabe der verschiedenen Einheiten kann wie folgt geschrieben werden [66]:

$$p_r(k) = \min(\text{com}(u_r(k), d_r(k), \zeta_r(k)), w_r(k)) \quad (6.34)$$

$$p_s(k) = \text{com}(u_s(k), d_s(k), \zeta_s(k)) + \chi_s \cdot \rho(k) \quad (6.35)$$

$$p_t(k) = \text{com}(\delta_t(k), \delta_d(k), \zeta_t(k)) \wedge \chi_t \cdot \rho(k) + \text{com}(u_s(k), d_s(k), \zeta_s(k)) \quad (6.36)$$

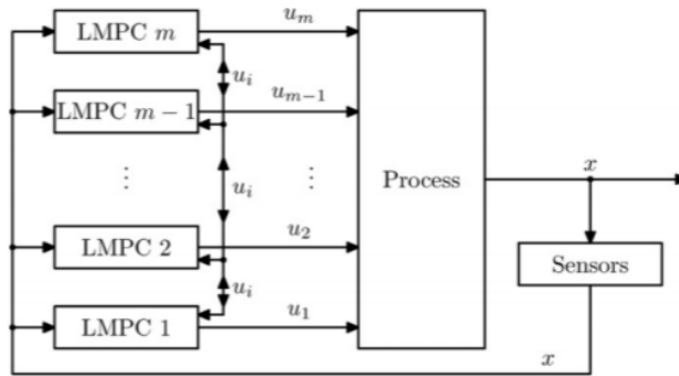


Abbildung 6.23.: Iterative cooperative Distributed Model Predictive Control (DMPC) [25].

Ein Kommunikationsverlust könnte die Funktionalität von Reglern beeinträchtigen, die auf den Austausch von Informationen angewiesen sind. Eine Lösung kann die Verwendung eines verteilten EMS anstelle eines zentralen EMS sein. Dabei kann jeder lokale Regler während eines Kommunikationsverlusts lokale Informationen verwenden, wodurch das Gesamtsystem eine gewisse Widerstandsfähigkeit gegenüber Kommunikationsverlusten erlangt.

Insbesondere verwenden wir einen Ansatz, der als eine Anpassung des kooperativen Distributed Model Predictive Control (DMPC) interpretiert werden kann. Beim kooperativen DMPC führt jeder lokale Regler (oder Agent) eine Optimierung seiner eigenen Stellgrößen auf der Grundlage desselben vollständigen Systemmodells und derselben Kostenfunktion durch, und die endgültigen vereinbarten Stellgrößen werden in einem iterativen Verfahren unter Einbeziehung der Kommunikation bestimmt [25]. Da unser Ziel darin besteht, unabhängig von der Kommunikation zu werden (zumindest für eine gewisse Zeit), werden die Handlungen anderer Agenten nicht kommuniziert, sondern stattdessen auf der Grundlage des Systemmodells, des globalen Optimierungsproblems und der Schätzungen des Systemzustands und der Störungen vorhergesagt. Es kann beispielsweise davon ausgegangen werden, dass die Störungen (wie Wetterbedingungen) in anderen Teilen des MGs annähernd bekannt sind (d.h. bis auf Messunsicherheiten wie Rauschen), da jeder Agent über eigene Umgebungssensoren verfügt. Darüber hinaus misst jeder Agent die globale Systemfrequenz, was dabei hilft, Leistung und Ladezustand in anderen Netzsegmenten zu verfolgen. Daher führt jeder Agent eine globale Optimierung auf der Grundlage einer leicht abweichenden Kopie des aktuellen Systemzustands durch. Anschließend wird der Teil der Lösung, der den eigenen Stellgrößen entspricht, auf das System angewendet. Daraus leitet sich eine wichtige Anforderung ab, nämlich dass die Optimierungsergebnisse aller Agenten konsistent sein sollten. Dazu muss das globale optimale Steuerungsproblem immer eine eindeutige Lösung haben. Darüber hinaus sollte die Lösung in gewissem Maße kontinuierlich vom Zustand des Systems abhängen (damit kleine Mess- oder Schätzfehler keine stark voneinander abweichenden Lösungen des Optimierungsproblems und somit inkompatible Stellgrößen verursachen können).

Bei unserem Ansatz werden vom System die tatsächlichen Energiemengen in den ver-

6. Erzielte Ergebnisse

schiedenen Einheiten geschätzt. Dazu werden die aus der Lösung des globalen Optimierungsproblems abgeleiteten Leistungs-Sollwerte verwendet, um die erwartete Leistungsausgabe zu berechnen. Messungen wie Frequenz- und Wetterdaten liefern Echtzeitbeobachtungen der im gesamten MG gültigen Systembedingungen. Eine entscheidende Neuerung dieses Ansatzes ist die Fähigkeit, das Verhalten anderer Einheiten zu beobachten und infolgedessen unabhängig dieselben Steuerungsentscheidungen zu treffen, selbst bei fehlender direkter Kommunikation. Dadurch wird das System anpassungsfähig und resilient, um einen stabilen und effizienten Betrieb trotz Kommunikationsausfällen zu gewährleisten. Dies stellt eine weitere Verbesserung gegenüber [66] dar.

6.6.1.1. Simulationsbeispiel

In diesem Abschnitt wird eine Simulation durchgeführt, um die Gesamtleistung der verteilten kooperativen EMS-Architektur zu untersuchen und zu analysieren, d. h. das Verhalten der redundantMpc unter Berücksichtigung von Kommunikationsfehlern und kooperierenden lokalen EMS-Modulen. Für Simulationen verwenden wir das gleiche MG wie in Abb. 6.13.

Die Tabelle im Abb. 6.24 zeigt verschiedenen Werte, nämlich die verschwendete (also verfügbare aber nicht eingespeisete erneuerbare Energie), der tatsächlich eingespeiste erneuerbare Energie, die eingespeiste Energie konventioneller Erzeuger und die Anzahl der Schaltvorgänge konventioneller Erzeuger, die sich aus der Simulation der vier Szenarien ergeben. Die Simulation wurde über fünf Tage durchgeführt, wobei die Dauer des Ausfalls

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
controller type	simpleMpc	RedundantMpc	simpleMpc	RedundantMpc
SEED	2	2	5	5
resInfeedEnergy	30.583	35.669	30.648	35.187
thermalInfeedEnergy	42.407	37.369	42.401	37.83
resWastedEnergy	8.8387	3.7526	8.7737	4.2349
ThermalSwitchingActions	26	24	28	28
durationUnitPowerOutOfBounds	4.5	2.75	5.5	3
durationUnitEnergyOutOfBounds	54.75	38.75	53.75	34.5

Abbildung 6.24.: Comparison of different mpc EMS

auf vier Stunden täglich von 10 bis 14 Uhr festgelegt wurde. Der Ausfall betraf jedes Mal eine andere Einheit und schließlich alle Einheiten gleichzeitig. Am ersten Tag tritt der CF in Einheit 1 auf, die der thermische Generator ist, dann am darauffolgenden Tag in Einheit 2, die die Speichereinheit ist, am dritten Tag in der dritten Einheit (PV-Anlage) und am vierten Tag in der Windturbine. Am letzten Tag der Simulation wirkt sich der CF auf alle Einheiten gleichzeitig aus. Der Störungsfehler bleibt während des gesamten Simulationszeitraums aktiv, wobei sein Wert variiert, der jedes Mal zufällig generiert und als Rauschen für die Bestrahlung der PV-Anlage, die Windgeschwindigkeit und die Stromenergie im Speicherkraftwerk hinzugefügt wird. Die dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich die hohe effektive

Leistung des redundantMpc. In Szenario 3 beispielsweise ist die verschwendete Energie doppelt so hoch wie in Szenario 4. Ebenso ist die erneuerbare Energie in der Einspeiseenergie im vierten Szenario höher und die thermische Einspeiseenergie niedriger. Das bedeutet, dass in dem mit simpleMpc durchgeführten Szenario eine hohe Abhängigkeit von der thermischen Energie besteht, was zu höheren Betriebskosten führt. Die verschwendete Energie der erneuerbaren Energiequellen war in allen Szenarien für den redundantMpc im Vergleich zum simpleMpc sehr niedrig, was eine wichtige Rolle bei der Minimierung der Betriebskosten spielt. Die Abbildungen 6.25 und 6.26 veranschaulichen die Echtzeit-Leistungspegel und Leistungssollwerte für den thermischen Generator, die Speichereinheit, die PV-Anlage und die Windkraftanlage zusammen mit der aktuellen Energie der Batterie, der verfügbaren erneuerbaren Energie und der Lastanforderung. Auch die Zeiträume, in denen die Kommunikation für jede Einheit ausfällt, sind dargestellt. Die Diagramme zeigen die Effektivität der verteilten EMS-Architektur, insbesondere bei Kommunikationsausfällen, bei denen der Systembetrieb reibungslos weiterläuft und sich an Störungen in allen Einheiten anpasst. Dies wird besonders deutlich in den Speicherenergie-Diagrammen, in denen negative Werte im simpleMPC-Ansatz auftreten, nicht jedoch im redundantMPC. Im Gegensatz dazu hat die zentralisierte Architektur mit simpleMPC bei Kommunikationsausfällen Probleme, da sie aufgrund des fehlenden Kommunikations- und Datenaustauschs zwischen den Einheiten wichtige Informationen verliert. Dies zeigt sich am deutlichsten in den fehlenden Leistungssollwerten während dieser Intervalle. Obwohl es bei den von lokalen Agenten an bestimmten Punkten der Simulation gefundenen Optimierungslösungen zu geringfügigen Abweichungen kommt, verbessert das verteilte EMS-Design insgesamt die Wirtschaftlichkeit. Es senkt die Betriebskosten, indem es den Wechsel zwischen erneuerbaren Energiequellen und dem thermischen Generator optimiert und gleichzeitig die Systemstabilität bei unerwarteten Ereignissen und Kommunikationsausfällen verbessert.

6.7. Digital-Twin-HiL-Tests der EMSe – Parallelbetrieb mit operativen MGs

Es wurden im Berichtszeitraum folgende Arbeiten durchgeführt und Ergebnisse erzielt: Für das Digital-Twin-HiL-System hat die Autarsys GmbH leistungsstärkere Steuerrechner der Firma Beckhoff angeschafft und in einen für das Projekt vorgesehenen Schaltschrank eingebaut und an die notwendige Hardware angeschlossen. Es wurde sowohl die interne Vernetzung mit den Wechselrichtern des Teststandes als auch die Anbindung der Fernwartungsschnittstelle für das FGRS eingerichtet. So können die vom FGRS entwickelten Reglerstrukturen in der entwickelten Simulatorplattform und anschliessend im DT-Teststand getestet werden, siehe Abb. 6.27. Der Teststand wurde für die Tests in Zusammenarbeit mit dem FGRS reserviert und in Absprache mit dem FGRS betrieben.

Von der Autarsys GmbH wurden außerdem die Einheitensteuerungen um eine Sättigungsfunktion bei der Droop-Regelung erweitert, wie im Folgenden beschrieben wird: Die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)-Steuerungslogik der Autarsys GmbH kombiniert ei-

6. Erzielte Ergebnisse

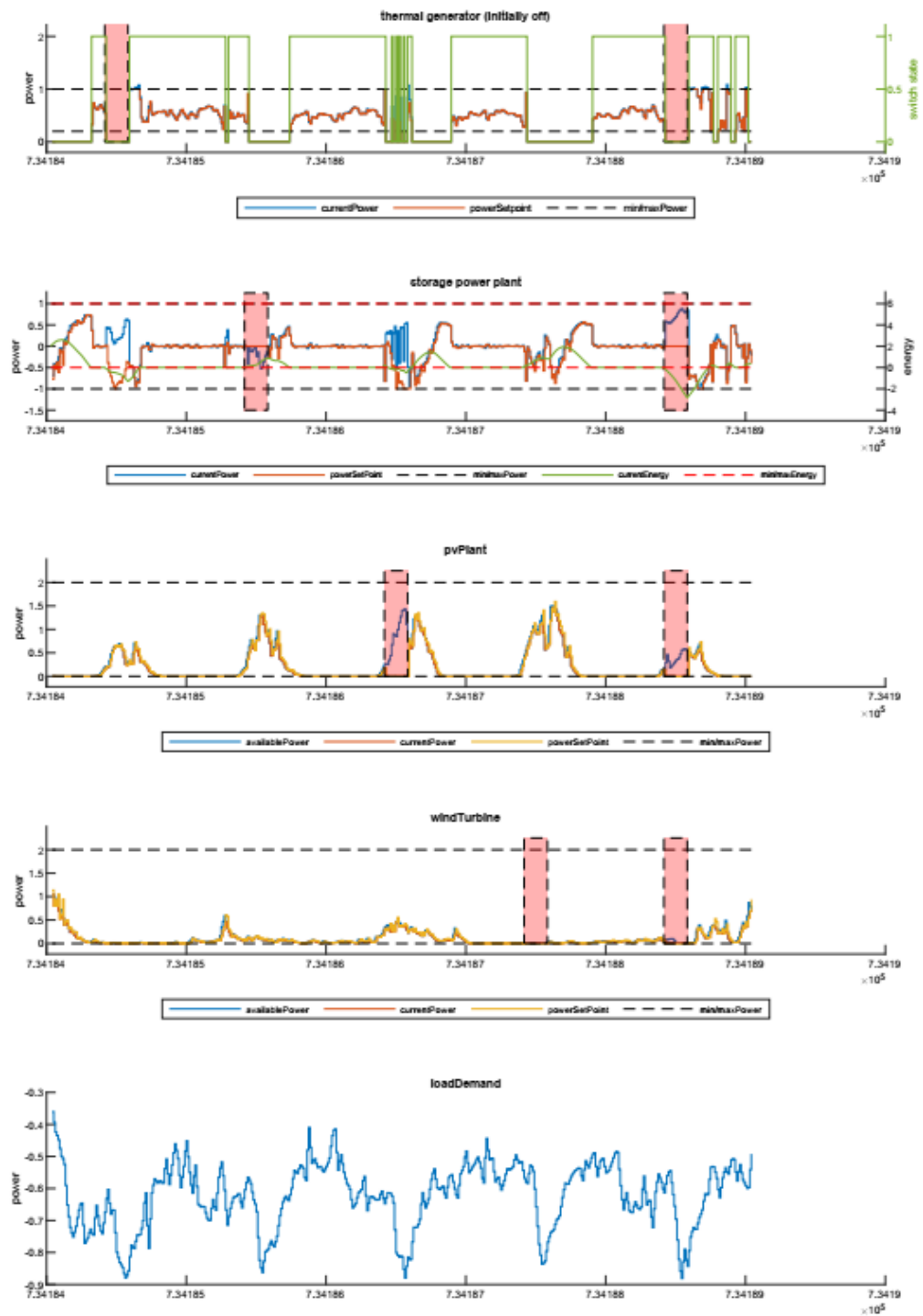


Abbildung 6.25.: Szenario 3

6.7. Digital-Twin-HiL-Tests der EMSe – Parallelbetrieb mit operativen MGs (AP 7)

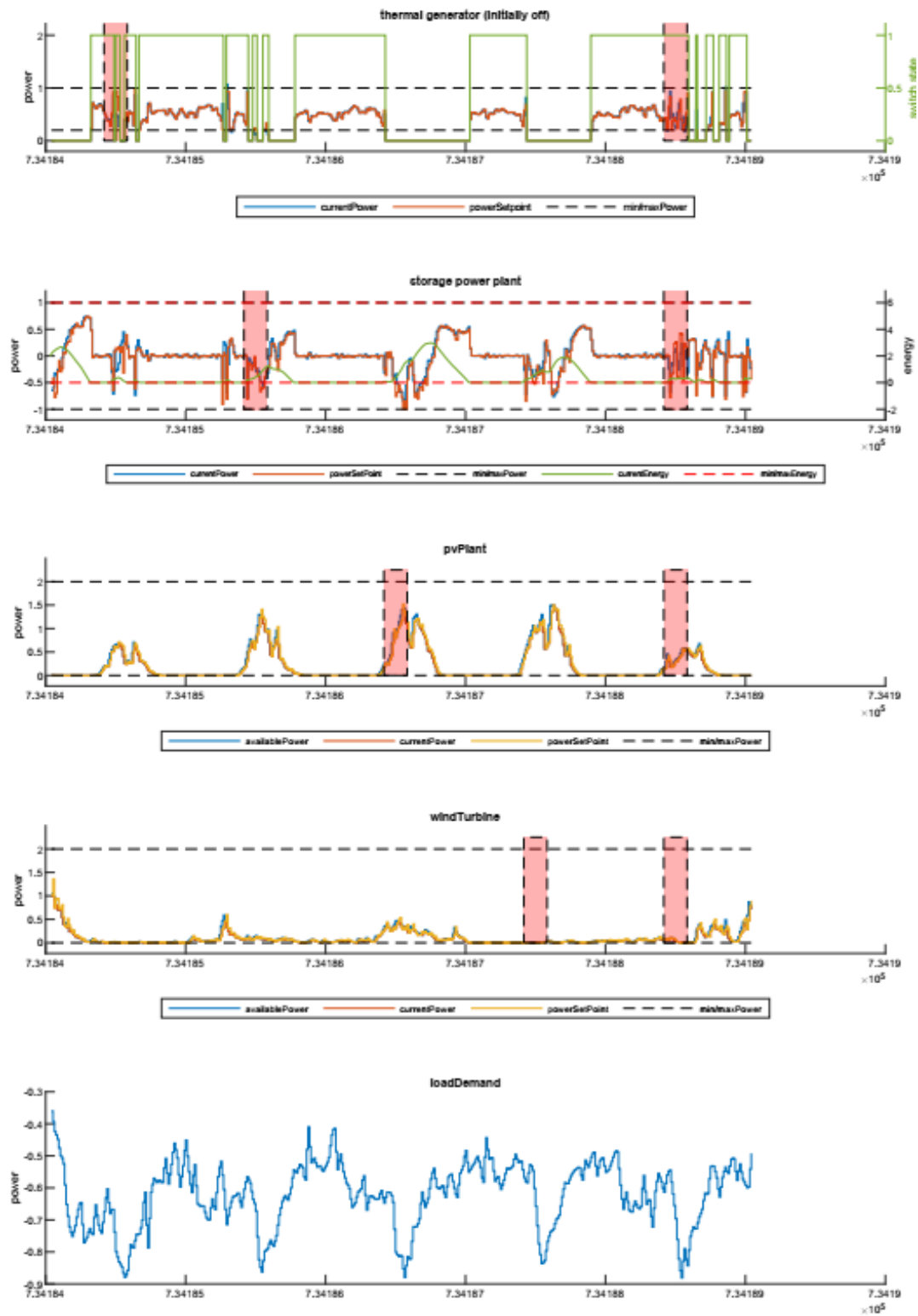


Abbildung 6.26.: scenario 4

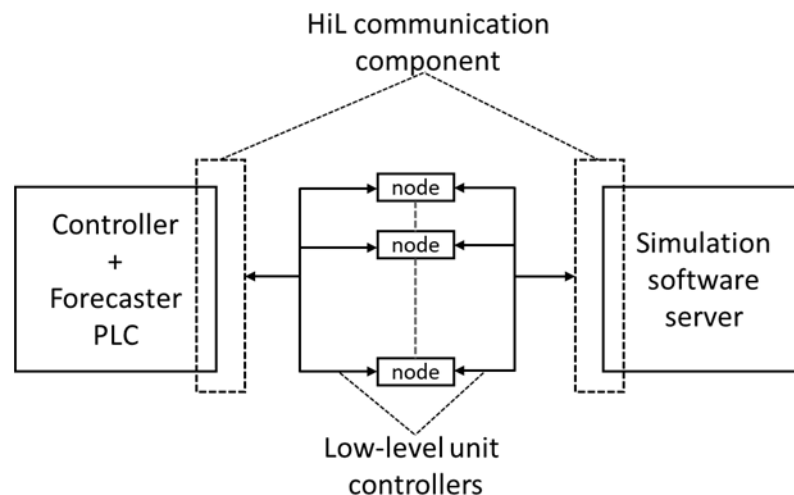


Abbildung 6.27.: Blockdiagramm des HiL-Simulators

ne statische Offset-Berechnung auf der Grundlage des eingehenden Leistungssollwerts mit einem PID-Regler zur Feinabstimmung. Das Hauptziel besteht darin, ein stabiles Netz aufrechtzuerhalten, indem sichergestellt wird, dass die Leistungsabgabe dem Sollwert folgt, während die Energie und Ausgangsleistung des Systems innerhalb der festgelegten Mindest- und Höchstgrenzen bleiben. Außerdem wird sichergestellt, dass das Netz innerhalb der Betriebsparameter bleibt. Das System bestimmt zunächst einen anfänglichen Frequenzsollwert, indem es den eingehenden Leistungssollwert relativ zu den Nennwerten skaliert und eine Frequenzabfallkennlinie anwendet. Eine Rampenfunktion glättet Frequenzänderungen, um abrupte Schwankungen zu vermeiden. Anschließend werden die Energie- und Leistungsbeschränkungen ausgewertet, und wenn die verfügbare Energie unter oder über vordefinierte Schwellenwerte fällt, werden die internen Leistungsgrenzen entsprechend angepasst. Der PID-Regler korrigiert Abweichungen in der tatsächlichen Leistungsabgabe des Wechselrichters und sorgt so für eine stabile Reaktion. Er passt die Regelleistung dynamisch an die Leistungsabweichungen an, hebt aber die Begrenzungen bei Bedarf auf, um Schwingungen zu vermeiden. Die endgültigen Spannungs- (U) und Frequenzsollwerte (F) integrieren die geglättete Frequenz, die PID-Korrektur und alle Rekuperationsanpassungen und gewährleisten, dass der Wechselrichter innerhalb sicherer und effizienter Grenzen arbeitet.

Von der Autarsys GmbH wurden vorbereitende reale Tests mit Wechselrichtern und Sensorik im Labor durchgeführt, um die Gültigkeit der Schnittstellen zur MG-Simulationssoftware (zeit Section Abschnitt 6.3.1) zu verifizieren.

6.8. Lab-in-the-Loop Feldtest (AP 8)

In Bezug auf Arbeitspaket 8 (Lab-in-the-Loop Feldtest) hat das FGRS die Kommunikationsschnittstellen zu den von Autarsys bereitgestellten Low-Level-Einheitensteuerungen überarbeitet. Wir haben uns auch auf bestimmte EMS-Regler für den Feldtest geeinigt, insbe-

sondere auf die sättigungsbewusste MM-MPC. Wir haben auch an der Konfiguration der MG-Simulationssoftware entsprechend der Struktur (siehe Abb 6.28), Kommunikationsstruktur (siehe Abb 6.29), den Parametern und den Daten der Anlage im Irak gearbeitet. Das webbasierte Frontend (siehe Section Abschnitt 6.3.2) wurde ebenfalls verbessert, um eine Online-Änderung der Systemstruktur und der Parameter zu ermöglichen.

Das Modul hilCommunication dient der Kommunikation für die Übertragung von Informationen zwischen den MG-Einheiten und dem EMS-Modul oder den -Modulen. Dabei können die MG-Einheiten entweder die von der Autarsys GmbH eingesetzten Einheitensteuerungen auf den SPSen oder die Schnittstellen virtueller Einheiten auf einem Simulationsserver sein. Erstere kommunizieren dann entweder SPS-intern mit Low-Level-Steuerungen und letztlich z.B. mit den realen Inverter-Modulen. Diese erste Testphase wird insbesondere zur Überprüfung der reibungslosen Interoperabilität der vom FGRS und der Autarsys GmbH programmierten Kommunikationsschnittstellen benötigt. Die Kommunikation zwischen den Steuerungen und den Wechselrichtern verwendet auf der untersten Ebene das Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP). Darauf aufbauend werden selbst definierte Datenframes versendet und empfangen. In der MATLAB-basierten Software des FGRS erfolgt eine Konvertierung zwischen den Datenframes und den Struktur-Datentypen. Während der Initialisierung stellt Modul hilCommunication eine Verbindung zwischen den Geräten her, einschließlich der SPS und dem Server. Das Modul enthält Sende- und Empfangsbefehle, um den Datenaustausch zwischen Geräten zu ermöglichen. Diese Befehle bilden die Grundlage für ein Framework, das die Informationsübertragung sowohl in zentralisierten als auch in verteilten EMS unterstützt.

Leider konnte der Lab-in-the-Loop-Feldtest bis zum Ende des Projekts nicht vollständig abgeschlossen werden. Allerdings haben wir erfolgreich den wichtigsten Schritt auf dem Übergang von der Simulation zur realen Steuerung gemeistert, die Schnittstelle und einen sicheren Kommunikationskanal zwischen den SPSen bei Autarsys GmbH und den PCs bei FGRS mit dem remote installierten MATLAB.

Der verteilte Low-Level-Sättigungsregler wurde von Autarsys GmbH implementiert und in der realen Anwendung erprobt. Der eigentliche Fortschritt mit der Einrichtung der sicheren Kommunikation besteht darin, diesen Low-Level-Sättigungsregler durch das EMS entweder zentralisiert oder dezentralisiert an die voraus berechnete Optimierung anzupassen. Der letzte Schritt, nämlich die Kalibrierung dieses Reglers in einem zentralisierten oder verteilten EMS, konnte nicht durchgeführt werden. Die Absicht ist, dies in Zusammenarbeit zwischen Autarsys GmbH und FGRS abzuschließen und die Ergebnisse anschließend in einem Artikel zu veröffentlichen. Obwohl der letzte Schritt nicht erreicht werden konnte, haben wir wertvolle wissenschaftliche Erkenntnisse und Wissen über die Integration von sättigungsbewussten Reglern in realen Anwendungen gewonnen.

6.8. Lab-in-the-Loop Feldtest (AP 8)

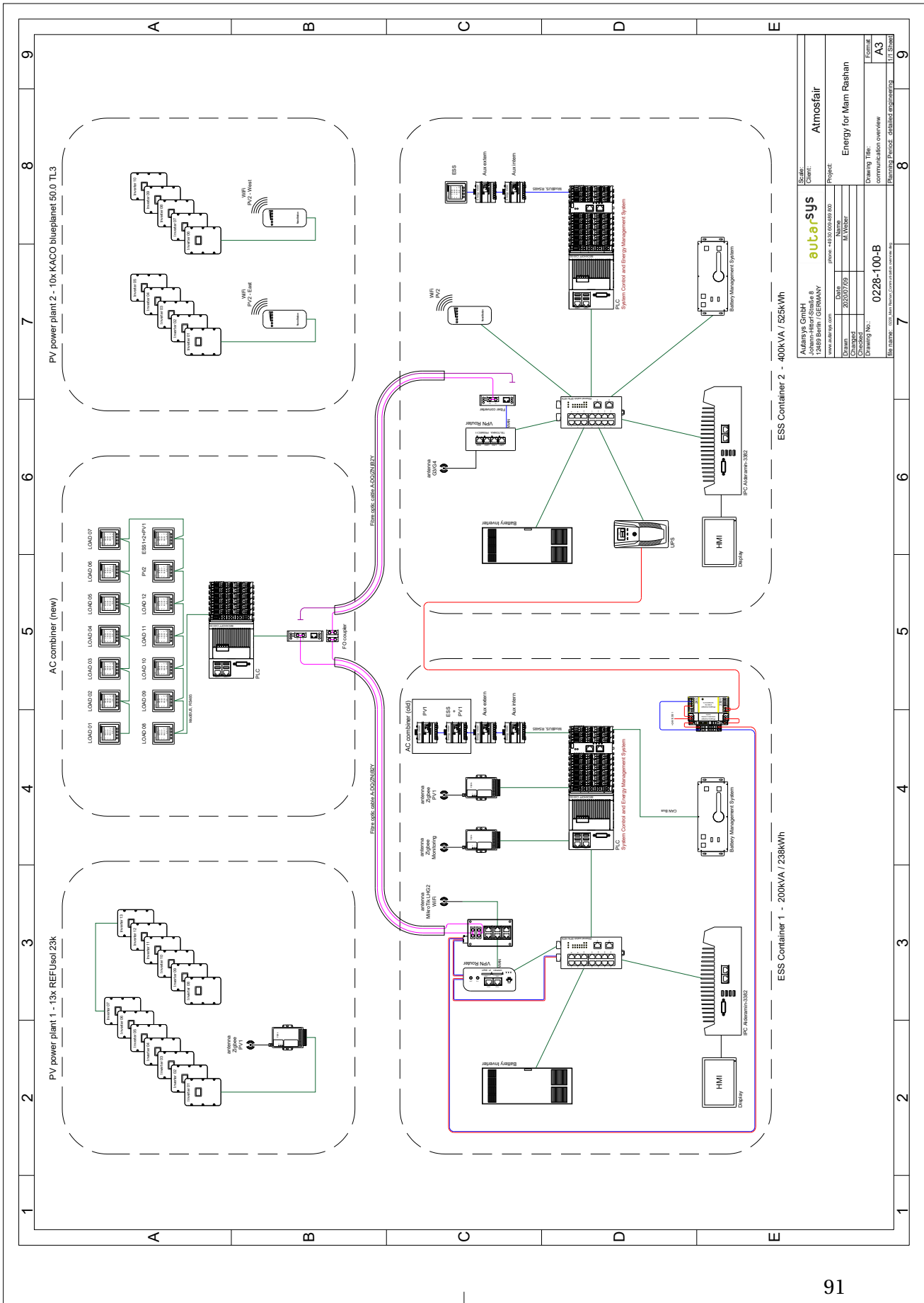


Abbildung 6.29.: Mam Rashan Kommunikationsdiagramm

7. Zahlenmäßiger Nachweis

Im Folgenden wird nacheinander auf die zahlenmäßigen Nachweise für das FGRS und die Autarsys GmbH eingegangen.

7.1. Fachgebiet Regelungssysteme

Eine Übersicht über die bewilligten und tatsächlichen Ausgaben des FGRS finden sich in Tabelle 7.1. Beide Teilprojekte wurden auf Antrag des FGRS bzw. der Autarsys GmbH kostenneutral um 6 Monate verlängert. Die Mittel setzen sich aus Personalkosten, Reisekosten, Literatur, Vergabe von Aufträgen (lt. Antrag 2 Abonnements für einen Online-Übersetzungsdienst) sowie Investitionen (1 Simulationsserver, 2 Messlaptops) zusammen.

Die Personalkosten sollten sich lt. Antrag durch die Parallelbeschäftigung zweier wissenschaftliche Mitarbeiter, TV-L E14 und TV-L E13, und einer studentischen Hilfskräfte mit 40 h pro Monat, ergeben. Tatsächlich arbeiteten bedingt durch Personalwechsel insgesamt 3 wissenschaftliche Mitarbeiter und 2 studentische Hilfskräfte am Projekt mit. Die tatsächlichen Ausgaben lagen mit 510.391,65 € um 12.976,65 € über den zu Projektbeginn bewilligten Personalkosten. Grund für die erhöhten Kosten waren tarifliche Lohnsteigerungen, eine erhöhte Erfahrungsstufe eines wissenschaftlichen Mitarbeiters und die Verlängerung des Projekts, welche durch Einsparungen in anderen Bereichen (wie im Folgenden aufgeführt) jedoch kostenneutral durchgeführt werden konnte.

Als Reisekosten waren zu Projektbeginn 19.261,00 € bewilligt. Bei unserer Publikationstrategie hat sich jedoch eine Verschiebung zu Gunsten von Zeitschriftenartikeln anstelle von Konferenzbesuchen ergeben. Diese Verschiebung begründet sich darin, dass für die entstandenen Ergebnisse aufgrund ihrer Komplexität eine direkte Veröffentlichung als Zeitschriftenartikel als bessere Wahl erachtet wurde. Aufgrund dieser Verschiebung wurden die im Projektantrag genannten Konferenzen nicht besucht. Der geplante Besuch einer Summer-School wurde bedingt durch die Pandemie und Verzögerungen bei der Personaleinstellung ebenfalls nicht realisiert. Somit sind keine Reisekosten entstanden. Die dadurch freigewordenen Mittel wurden größtenteils anderweitig verwendet (im Rahmen eines Mehrbedarf bei Investitionen sowie für Personalkosten im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung).

Mit dem Start von AP 2 wurde für das Projektvorhaben Fachliteratur zu projektrelevanten Themen wie Regelung von MGs, Cyber-Sicherheit, Optimierungsverfahren, etc. benötigt, die nicht an der TU Berlin vorhanden war. Ursprünglich war geplant, im Rahmen des Projekts Fachliteratur zu diesen Themen anzuschaffen. Auf den Neuerwerb der konkreten, im Projektantrag genannten Bücher konnte jedoch aufgrund alternativer, über die Universitätsbibliothek online bzw. leihweise bezogener Literatur verzichtet werden.

7. Zahlenmäßiger Nachweis

Wie im Projektantrag und dem Gesamtfinanzierungsplan beschrieben, war der Abschluss von 2 Abonnements über 3 Jahre eines Online-Übersetzungsdienstes geplant. In der Praxis war jedoch ein Abonnement über einen geringeren Zeitraum für das Projekt benötigt. Trotz eines gegenüber dem Antragszeitpunkt gestiegenen Preises konnten so Mittel eingespart werden, d.h. statt der angesetzten 431,00 € wurden nur 179,76 € benötigt.

Für das Projekt wurden, wie im Antrag vorgesehen, ein Simulationsserver und zwei Messlaptops angeschafft. Der Simulationsserver war während der gesamten Laufzeit für rechenintensive Simulationen von MGs mit unterschiedlichen Regelungsstrategien unabdingbar. Er wurde nur für das Projekt benötigt und ist nicht Teil der Grundausstattung des FGRS. Die Messlaptops wurden schon zu Projektbeginn angeschafft, um sie ausser in der praktischen Erprobungsphase auch bei Projekttreffen, während mobiler Arbeitsphasen und auf Konferenzen einsetzen zu können. Sie wurden nur für das Projekt benötigt und gehören nicht zur Grundausstattung des FGRS. Die endgültigen Anschaffungskosten für Server und Laptops in der geforderten Ausstattung sind nach erneutem Einholen von Angeboten zum Anschaffungszeitpunkt mit 16.227,67 € und zwei mal 2.528,40 € aufgrund der angespannten Marktsituation höher ausgefallen als zum Antragszeitpunkt ermittelt. Die Mehrkosten konnten durch die Einsparungen in anderen Bereichen ausgeglichen werden. Wir streben nun an, den Simulationsserver und die Messlaptops für weitere wissenschaftliche Arbeiten zu verwenden.

Schlussendlich liegen die tatsächlichen Gesamtausgaben des FGRS um 4.102,12 € unter den für das FGRS eingeplanten Gesamtmitteln. Die tatsächlichen Projektkosten haben den geplanten Kostenrahmen also nicht überschritten.

7.2. Autarsys GmbH

Im Antragsverfahren für die Förderung dieses Projektes wurde der Gesamtaufwand für die Autarsys GmbH mit einer Summe von 350.324,00 € abgeschätzt.

Diese Summe der Gesamtvorkalkulation setzt sich aus Lohn- und Gemeinkosten mit einer Summe von 337.438,00 € und den veranschlagten Reisekosten mit einer veranschlagten Summe von 12.886,00 € zusammen.

Die im Laufe des Projektes angefallenen Lohn- und Gemeinkosten (gemäß Nr. 5.6 NKBF 98 mit einem pauschalierten Aufschlag von 120%) inklusive dem pauschalierten Gemeinkostenaufschlag sind mit 194.855,44 € deutlich geringer (nur 60% der veranschlagten Kosten). Für die Einsparungen lassen sich folgende Gründe angeben:

- a. Durch den Einsatz der neuen leistungsstärkeren Steuerrechner wurde sehr viel Programmieraufwand vermieden in dem MATLAB direkt auf dem Rechner läuft. Dieser wird allerdings dann zum Teil doch wieder anfallen, wenn die beste und zuverlässigste Regelstrategie für unsere jeweilige Applikation gefunden wurde. Diese werden wir dann im Nachgang in TwinCat code umsetzen.
- b. Durch den Wegfall von Reisen wurde der Überhang an Arbeitszeit als Reisezeit eliminiert.

- c. Weiterhin ist die Arbeit im Labor viel effizienter als Vorort, da mittels Parameter-File die aktuelle Wetterlage, Lastsituation und Netz-Verfügbarkeit deterministisch vorgegeben werden kann. Das erleichtert dann auch die Auswertung und Bewertung der verschiedenen Regler und die Validierung der Simulation.

Aufgrund dieser zusätzlichen oder erzwungenen Effizienzsteigerungsmaßnahmen wurde das Team von Autarsys GmbH entlastet. Bei den Reisekosten wurden zum einen die Teilnahme an zwei Tagungen und eine Selbstkostenübernahme für drei Reisen in den Irak zu einem realen etwas komplexeren MG geplant (siehe Abb. 6.28). Aufgrund der Reisebeschränkungen bei der Pandemiebekämpfung und Empfehlungen der Bundesregierung zur Reise in den Irak.

Anstatt der Reisen zu den Messen und Konferenzen wurden diese soweit nötig und möglich als online Version am Schreibtisch durchgeführt. Weiterhin wurde eine erste Reise in den Irak noch von Autarsys GmbH unternommen. Die Kosten dafür wurden mit Eigenmittel getragen. die Begründung dafür ist, dass neben dem Besuch der Anlage im Flüchtlingscamp Mam Rahan auch noch weitere Irakische Kunden der Autarsys GmbH besucht wurden. Bis zum Ende der Projektlaufzeit wurden von Autarsys GmbH keine Reisekosten abgerechnet.

Die 'Sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten' sind nicht in der Vorkalkulation, da sie erst im Rahmen der Abarbeitung notwendig geworden sind. Sie gliedern sich wie folgt:

- a. Ersatz der bestehenden 13 Stk. Smartmeter von Schneider electric im MG und Verschrottung. Ersatzbeschaffung und Austausch Dieser Schritt wurde im Rahmen der Datenakquisen unabdingbar. Die Material-Kosten für neuen Zähler betragen zusammen 2045,40 €. Die Austauscharbeiten wurden von den lokalen Elektrikern kostenneutral durchgeführt.
- b. Der zweite Posten bezieht sich auf die neuen Steuer-Computer von Beckhoff. Dieser Schritt wurde aufgrund der Effizienz notwendig. Die von uns normalerweise verwendeten Steuercomputer bieten leider nicht die nötige Performance um direkt auf dem Betriebssystem der Steuerung ein MATLAB zu installieren und zu betreiben. Der Ansatz beim Erstellen des Projektantrags war, dass das mit der Simulation erstellte Reglerkonstrukt jeweils in TwinCat 3.0 übersetzt werden müsste und dann als neue Softwarekomponente auf die Kongruenz zur Simulation getestet werden müsste. Erst danach könnte dann der eigentlich Reglerfunktionstest erfolgen. (Bearbeitungsdauer ohne Fehlersuche > 2 Woche pro zu testende Reglerstruktur)

Durch die Beschaffung der wesentlich leistungsstärkeren SteuerungsPCs kann die Entwicklungsumgebung vom FGRS direkt auf den Steuercomputern installiert werden. Die Kosten für die neuen SteuerPC belaufen sich netto ohne USt. auf 5906,20 €. Da diese Steuerungen nicht für unsere Produkte freigegeben sind, können wir diese nach Abschluss des Projektes nicht mehr weiter verwenden. Deshalb wurden diese Rechner nicht ins Inventar aufgenommen und es wird deshalb auch nicht nur die Abschreibung fällig sondern die komplette Anschaffungssumme. Die Mehrkosten für die Hardware werden um ein Vielfaches durch die verbesserte Effizienz bei der Bearbeitung des Tests aufgewogen.

7. Zahlenmäßiger Nachweis

Tabelle 7.1.: Finanzierungsplan des FGRS

	Gesamt- finanzierungsplan	Entstandene Ausgaben
Personalkosten in €	497.415,00	510.391,65
Reisekosten in €	19.261,00	0,00
Literatur in €	235,00	0,00
Abonnements Übersetzungsdienst in €	431,00	179,76
1 Simulationsserver in € und 2 Messlaptops und 1 portabler Projektor	18.616,00	21.284,47
Gesamtausgaben in € des Vorhabens	535.958,00	531.855,88

Tabelle 7.2.: Finanzierungsplan der Autarsys GmbH

	Gesamtvor- kalkulation	Abgerufene Kosten	Noch verfü- bare Kosten
Lohn- und Gemeinkosten in €	337.438,00	194.864,39	142.573,61
Reisekosten in €	12.886,00	0,00	12.886,00
Vorhabensspezifische Abschreibungen in €	0.000,00	0.000,00	00,00
Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten in €	00.000,00	7.951,60	-7.951,60
Selbstkosten des Vorhabens in €	350.324,00	202.807,04	147.516,96

Schlussendlich wurden nur etwa 58 % der für die Autarsys GmbH bewilligten Mittel eingesetzt. Die tatsächlichen Projektkosten sind also hinter den geplanten Kosten zurückgeblieben. Die Einsparungen wurden möglich aufgrund des abgesagten Feldtests im Irak und auf den Verzicht von sehr komplexer Messtechnik vor Ort im Irak. Nach der Neudefinition des AP 8 und der kostenneutralen Laufzeitverlängerung des Projekts konnten nahezu alle geplanten Projektziele erreicht werden.

8. Geleistete Arbeit

Für die Durchführung des Projektes wurden die in Tabelle 8.1 genannten Arbeitsstunden eingeplant. Für das FGRS waren zwei wissenschaftliche Mitarbeiter und eine studentische Hilfskraft vorgesehen. Für die Autarsys GmbH war ein mit dem Projekt in Teilzeit beschäftigter Entwicklungsingenieur während der gesamten Projektlaufzeit und ein Techniker während des Feldtests (AP 8) eingeplant.

Nach Abschluss des Projektes wurden die tatsächlich geleisteten Stunden ermittelt (siehe Tabelle 8.2). Vom FGRS wurden etwas mehr Arbeitsstunden geleistet als geplant. Dies hängt mit der Weiterbeschäftigung zweier wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen der kostenneutralen Verlängerung zusammen, was die verspätete Einstellung zu Projektbeginn und Fehlzeiten aufgrund von Personalwechsel überwiegt.

Leider gab es auch bei Autarsys GmbH aufgrund von Verzögerungen durch die Pandemie, durch Personalmangel und durch Lieferengpässe bei den Industriesteuerungen Abweichungen von der Projektplanung. Wie geplant wurden die Entwicklungsarbeiten im Projekt von zwei Dipl.-Ings. auf der Seite der Autarsys GmbH durchgeführt. Es konnte allerdings bei Autarsys GmbH sehr viel Arbeitszeit durch die Verbesserung der Hardware (neue SPS mit der Möglichkeit direkt ein MatLab installieren zu können) und den damit einhergehenden Wegfall der TwinCat-Programmierung für jeden zu testenden Reglertyp eingespart werden. Außerdem wurde statt des aufwändigen Feldtests im Irak ein Lab-in-the-Loop Feldtest im Labor der Autarsys eingerichtet. Durch diese Änderungen konnten auf Seiten der Autarsys GmbH ca. 40% der angesetzten Personalstunden eingespart werden. so konnte z. B. auch auf die Zuarbeit eines Technikers im Autarsys GmbH Teststand verzichtet werden, weil die vorhandene Infrastruktur mit den neuen SPSen mit kleineren Änderungen in der Kommunikationsanbindung eingerichtet werden konnte, ohne aufwändigen Verkabelungsarbeiten durchführen zu müssen. Mit den definierten Testszenarien, die jederzeit wiederholt werden können, könnten die gewünschten Vergleichsergebnisse der unterschiedlichen Reglerstrukturen erreicht werden.

8. Geleistete Arbeit

Tabelle 8.1.: Geplante Produktivstunden laut Arbeitsplan pro AP

	AP 1	AP 2	AP 3	AP 4	AP 5	AP 6	AP 7	AP 8
∑ FGRS	793,5	873,5	1815,5	0	2238	2238	548	1256
Wiss. Mitarbeiter	753,5	753,5	1575,5	0	1918	1918	548	1096
Stud. Hilfskräfte	40	120	240	0	320	320	0	160
∑ Autarsys GmbH	210	210	140	1120	280	280	1120	1120
Entw.-Ings.	210	210	140	1120	280	280	1120	560
Techniker	0	0	0	0	0	0	0	560

Tabelle 8.2.: Tatsächliche geleistete Produktivstunden pro AP

	AP 1	AP 2	AP 3	AP 4	AP 5	AP 6	AP 7	AP 8
∑ FGRS	916,8	856,3	1992,8	0	2597,3	2076,6	628	1069,7
Wiss. Mitarbeiter	876,8	856,3	1752,8	0	2227,3	1996,6	628	909,7
Stud. Hilfskräfte	40	0	240	0	370	80	0	160
∑ Autarsys GmbH	72	40	88	456	24	24	1056	904
Entw.-Ings.	72	40	88	456	24	24	1056	904
Techniker	0	0	0	0	0	0	0	0

9. Voraussichtlicher Nutzen

9.1. Fachgebiet Regelungssysteme

Als hauptsächliches Projektergebnis wurde ein theoretisch fundiertes EM-Konzept für MGs mit hohem Anteil an Erneuerbaren Energien in den bedeutenden Bereichen Robustheit und Resilienz entscheidend weiterentwickelt. Damit wurden die Voraussetzungen geschaffen zum Feldeinsatz eines resilienten EMS als Komplettsystem, bestehend aus Vorhersagemodul, robustem optimierungsbasiertem Regler, fortschrittlicher Low-Level-Einheitenregelung (Droop-Regelung mit Sättigung) sowie Behandlung kritischer Ereignisse. Mit Hilfe von Ergebnissen zur Berücksichtigung von Beschränkungen der Übertragungsleitungen und somit der Netzwerkstruktur ist das System auch für größere MGs geeignet.

Wir erwarten, dass die Ergebnisse auch in mit MGs verwandten Bereichen nutzbar sind. Derzeit arbeitet das FGRS zusammen mit der Universität Kassel, der University of Oxford, Siemens und weiteren Partnern an einem Horizon 2025-Projektantrag zu einer neuen Generation von flexiblen und resilienten Verteilernetzen.

Aus den entwickelten theoretisch fundierten Lösungen für den EMS-Entwurf ergeben sich eine Reihe von Perspektiven für zukünftige Forschung und technische Innovation. Wie sich an unterschiedlichen Punkten gezeigt hat, können dabei auch die unteren Schichten von hierarchischen Regelungsansätzen für MGs (bzw. Stromnetze) eine Rolle spielen.

Die erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse (siehe Abschnitt 11.2) lieferte bereits während des Projekts einen wichtigen Beitrag, um die Konkurrenzfähigkeit des FGRS in dem aktuellen und bedeutenden Gebiet der Regelung von Stromnetzen mit hohem Anteil EE zu sichern. Durch das RESUME Projekt und mögliche darauf aufbauende Forschung kann somit auch das Profil der TU Berlin gestärkt werden. Dabei ist hervorzuheben, dass das Projekt zwei der sechs strategischen Forschungsschwerpunkte („Key Application Areas“) der TU Berlin überdeckt: „Digital Transformation“ und „Energy Systems, Mobility, and Sustainable Resources“. Somit wurde indirekt auch der Wissenschaftsstandort Deutschland gestärkt.

Während der gesamten Laufzeit fand ein reger Austausch mit anderen wissenschaftlichen Mitarbeiter_innen am Fachgebiet statt, die sich mit projekt-verwandten Themen (z. B. Gleichstrom-MGs) oder mit anderen Schichten der Reglerhierarchie in Stromnetzen beschäftigt haben. Das Projekt hat daher wesentlich dazu beigetragen, die bestehende Expertise des FGRS im Bereich der Regelung von Stromversorgungssystemen auszuweiten und so dessen wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit zu sichern. Des Weiteren konnten während des Projekts der Austausch bzw. die Kooperation mit anderen wissenschaftlichen Institutionen gestärkt werden. Während des Projekts wurde beispielsweise eine Kooperation mit der Polytechnic University of Bari begonnen, in der eine Anwendung für das Energie-

9. Voraussichtlicher Nutzen

management in einem aus Ladestationen für solarbetriebene elektrische Fahrzeuge (solar powered vehicles, SPVs) untersucht wird. Die Anwendung der sättigungsbewussten MM-MPC hat auch hier das Potential, die Kosten zu senken und zur Resilienz des Gesamtsystems aus solarbetriebenen Ladestationen und zu variablen Zeitpunkten an- und abzukopelnden solarbetriebenen Fahrzeugen beizutragen.

Das Projekt hat zur Heranbildung wissenschaftlichen Nachwuchses beigetragen, indem zahlreiche Studierende im Rahmen von Abschlussarbeiten (siehe Abschnitt 11.1) oder als studentische Mitarbeiter zu den wissenschaftlichen Ergebnissen beigetragen haben. Hervorzuheben ist beispielsweise die Leistung von Herrn Xiaozhu Luo, der sowohl zeitweise als studentischer Mitarbeiter angestellt war als auch seine MSc-Arbeit im Rahmen des Projekts angefertigt hat. Seine fundierten Ergebnisse zur Einbindung von Leitungsbeschränkungen der Übertragungsleitungen in den robusten Reglerentwurf (siehe Abschnitt 6.5.5.3) sind wesentlich für das Projekt, und wir bereiten zusammen mit Herrn Luo eine Veröffentlichung in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift vor. Herr Luo wurde durch die Mitarbeit in seinem Entschluss, eine Promotion anzustreben, bestärkt.

Das Projekt hatte auch eine soziale Auswirkung durch eine der studentischen Abschlussarbeiten. Ein Masterstudent an der FGRS, Nadim Mouawad, führte eine Fallstudie mit dem MG durch, das in der Step Together Association School for Special Needs im Libanon installiert wurde. In dieser Masterarbeit wurden sowohl unmittelbare als auch langfristige Verbesserungen der Energieeffizienz und der finanziellen Nachhaltigkeit für die Einrichtung untersucht. Kurzfristig würde die Implementierung des sättigungsbewussten EMS die Nutzung der verfügbaren erneuerbaren Energien maximieren, die Abhängigkeit von der unsicheren Netzstromversorgung verringern und die Betriebskosten senken. Dies würde der Schule direkt zugute kommen, indem eine stabilere und kostengünstigere Energieversorgung und somit letztlich eine verbesserte Lernumgebung der Schüler erreicht würde. Über die unmittelbaren Gewinne hinaus umfasste das Projekt auch eine langfristige Finanzanalyse zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Integration fortschrittlicher Energielösungen. Durch die Bewertung der Speicherkosten und der potenziellen Skalierbarkeit könnten die Ergebnisse mit einigen Verbesserungen möglicherweise als Modell für andere Institutionen dienen, die ähnliche Strategien für erneuerbare Energien einführen möchten.

Eine Anmeldung von Schutzrechten oder eine Lizenzierung ist von Seiten der TU Berlin derzeit nicht geplant. Die Möglichkeit der wirtschaftlichen Verwertung (ggf. in einem breiteren Anwendungsfeld) wird untersucht und in Abstimmung mit der Autarsys GmbH unter Berücksichtigung des Kooperationsvertrags zu erfolgen haben.

9.2. Autarsys GmbH

Die Autarsys GmbH entwickelt und betreibt MGs in Entwicklungsländern. Das, im Rahmen des EMERGE-Projektes entstandene und im RESUME-Projekt weiterentwickelte Energiemanagement-Regelsystem verschafft der Autarsys GmbH einen entscheidenden Marktvorteil bei der großflächigen Elektrifizierung von ländlichen Gebieten zum Beispiel in Sub Sahara Afrika. Der Vorteil ist vor allem darin zu sehen, dass mehrere aneinander angrenzende

MGs über zum Teil sehr schwache Übertragungsleitungen ein gemeinsames Energiemanagement ermöglichen. Somit kann automatisiert ein Ausgleich der Erzeugungs-Leistungen und Energiemengen zwischen den lose gekoppelten MGs unter Berücksichtigung der Übertragungskapazität der Verbindungsleitungen und auch der Leistungsfähigkeit der einzelnen Spannungsquellen im neuen Verbundnetz erfolgen. Da die MGs auch im Falle des Auftrennens der Kopplung stabil unterbrechungsfrei weiterarbeiten erreicht man einen höheren Grad an Resilienz gegenüber Fehlern im System und auch bei immer häufigen auftretenden Naturkatastrophen.

Der Wert der erreichten Entwicklungsergebnisse ist für die Autarsys GmbH vor allem in einem Marktvorteil gegenüber starker Konkurrenz aus dem Ausland zu sehen. Da die Autarsys GmbH einen zusätzlich USP ohne wesentlichen Mehraufwand in der Hardware geltend machen kann. Außerdem ermöglicht eine zumindest lose Kopplung über mehrere Siedlungen hinweg einen Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch in einem größeren "Verbundnetz". Dadurch wird der Einsatz von Dieselgeneratoren und auch der Wartungsaufwand reduziert. Dies führt direkt zu einem geringeren CO₂-Ausstoss und optimierten Betriebskosten folglich auch niedrigeren Strompreisen. Für die Überführung der im Projekt entwickelten Reglerstrukturen in ein kommerzielles Produkt müssen noch abschließende Tests in realen MGs erfolgen. Für diese Tests muss dann die ausgewählte Reglerstruktur von MathLab in TwinCat übersetzt werden dadurch wird auch eine zusätzliche Robustifizierung erreicht.

Eine Anmeldung von Schutzrechten oder eine Lizenzierung ist von Seiten der Autarsys GmbH derzeit nicht geplant. Die wirtschaftliche Verwertung des optimierten EMS-Konzepts wird bei realen Anwendungen getestet und partiell in die Autarsys GmbH EMS-Controller-Software integriert. Dies erfolgt in Abstimmung mit dem FGRS unter Berücksichtigung des Kooperationsvertrags.

10. Fortschritte Anderer

Im Folgenden werden zuerst wissenschaftliche und danach technische Ergebnisse Anderer besprochen.

10.1. Wissenschaftlicher Fortschritt

Es soll im Folgenden zunächst auf eine begrenzte Auswahl aus unserer Sicht vielversprechender Übersichtsartikel eingegangen werden, die alle seit 2019 veröffentlicht wurden.

- [7, 31, 55, 70, 83, 115], stellen jeweils umfangreiche Übersichten zum Entwurf von EMSen dar, oft speziell im MG-Kontext.
- Eine Reihe von Übersichtsartikeln beschäftigen sich mit miteinander verbundenen MGs (u.a. als Networked MGs oder Multi-MGs bezeichnet), teils mit Fokus auf bestimmten Aspekten, z.B. [22] (u.a. Resilienz), [53] (u.a. Energiemanagement).
- Mit der Resilienz von Stromnetzen beschäftigen sich [27, 54], speziell von MGs [109]. Einige Artikel beschäftigen sich auch speziell mit Resilienz bzw. Cyber-Sicherheitsaspekten von Störungen oder Ausfällen der Kommunikationsverbindungen (z.B. [4]).
- Oft überlappend mit Resilienzaspekten ist die Besprechung von Schutzkonzepten für elektrische Fehler wie z.B. Kurzschluss und andere Fehler bzw. Ausfälle. Viele Artikel (z.B. [78]) beschäftigen sich auch speziell mit diesen Schutzkonzepten.
- Mit der (Cyber-) Sicherheit im weiter gefassten Bereich Cyber-physikalischer Systeme aus regelungstechnischer Sicht beschäftigen sich z.B. [29, 114], mit der Cyber-Sicherheit speziell bei Smart Grids [34, 62], bei MGs [56].
- [13] beschäftigt sich mit Digital Twins für MGs und behandelt dabei Aspekte wie Datenerhebung im Feld, Synchronisation bzw. Verknüpfung von physikalischem System und Digital Twin, sowie Anwendungen Digitaler Twins, insbesondere zur Herstellung bzw. Verbesserung der Resilienz und Cyber-Sicherheit. Die Definition bzw. Beurteilung der Resilienz kann dabei beispielsweise anhand der Phasen *pre-disturbance*, *disturbance progress*, *post-disturbance*, *post-restoration* erfolgen (siehe Abb. 10.1).
- [50] beschäftigt sich mit Cybersicherheitsaspekten von Digital Twins im weiter gefassten Anwendungsbereich.
- [111] ist ein in regelungstechnischer Zeitschrift veröffentlichter Übersichtsartikel zu verteilter Optimierung.

10. Fortschritte Anderer

- Mit verteilten bzw. Multi-Agentenbasierten Regelungskonzepten beschäftigen sich im MG-Kontext [96] sowie in sehr ausführlicher Weise im Kontext verbundener MGs [119] (hier findet sich wie bei vielen Übersichtsartikeln auch eine tabellarische Referenzierung anderer bestehender Übersichtsartikel).
- [110] beschäftigt sich mit Design- (Dimensionierung, Platzierung) und Regelungsapekten bei der Einbindung von Energiespeichern.
- [81] ist eine äußerst umfangreiche Übersicht zu Vorhersagemethoden und -Anwendungen.
- [26] beschäftigt sich umfassend mit Kurzfristvorhersagen der Sonneneinstrahlung mit verschiedensten datenbasierten und bildgebenden Methoden.
- Speziell mit Reinforcement Learning im Bereich Energiesysteme beschäftigen sich beispielsweise [40, 112]. Auf weitere Details zu diesem Bereich wird weiter unten separat eingegangen.

In einigen Übersichtsartikeln werden spezielle Methoden der Literaturrecherche bzw. Auswertung verfolgt, oder es werden Bibliometrische Analysen erstellt.

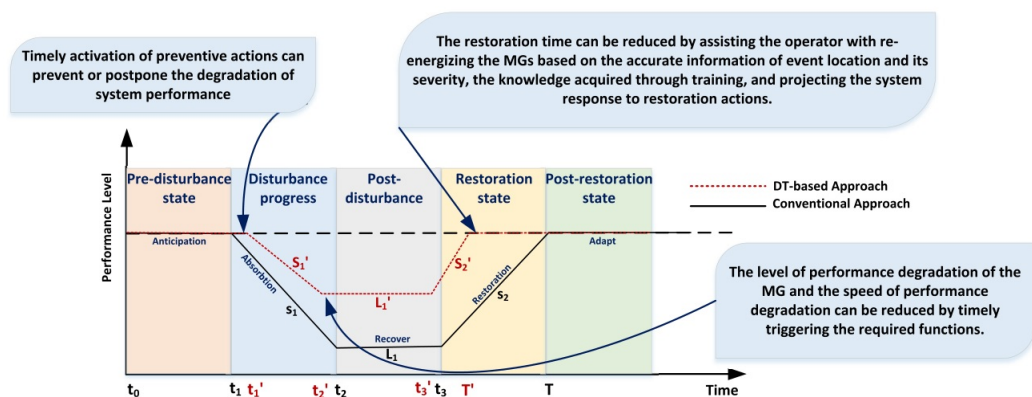


Abbildung 10.1.: Zur Definition von Resilienz [13] (im Kontext von Digital Twin, DT).

Maschinelles Lernen hat in den letzten Jahren einen enormen Aufschwung erlebt, vor allem dank der Fortschritte in der Deep-Learning-Theorie [41] und der Verfügbarkeit von Open-Source-Software [42]. Die Anwendungen decken alle möglichen technischen Bereiche ab, von der Bildverarbeitung über die Objekterkennung bis zur Erkennung von Anomalien in Prozessen [17].

Maschinelles Lernen gliedert sich in Supervised Learning, Unsupervised Learning und Reinforcement Learning (RL) [37]. Beim Supervised Learning verwenden die Algorithmen Paare von Eingaben und beschrifteten Ausgaben. Die Algorithmen finden dann passende Beziehungen. Wenn der Lernprozess konvergiert, können die Algorithmen die Muster reproduzieren und weiter verallgemeinern. Beim Unsupervised Learning verwenden die

Algorithmen nur Eingaben, und das Lernen besteht darin, Strukturen zu schaffen und versteckte Muster in den Eingaben zu erkennen. Beim RL beinhaltet das Konzept einen Agenten bzw. Regler, der durch ein System von Belohnungen und Rückmeldungen von seiner Umgebung lernt. In den folgenden Ausführungen steht RL im Mittelpunkt.

Die Theorie des RL umfasst diskrete und zeitkontinuierliche Dynamik sowie stochastische und deterministische Systeme [19]. RL weist viele Gemeinsamkeiten mit der dynamischen Programmierung auf, außer dass letztere ein Systemmodell benötigt, während ersteres kein explizites Modell benötigt. Abb. 10.2 zeigt die Struktur des RL für einen einzelnen Agenten (Single-Agent-RL). Der Regler greift in den Prozess ein, überwacht den Zustand des Prozesses und bewertet die ergriffenen Maßnahmen und die daraus resultierenden Bedingungen mit Hilfe einer Belohnungsfunktion. Im nächsten Schritt korrigiert der Regler seine Aktionen, und das Gesamtziel ist die Optimierung der langfristigen Leistung, gemessen an der akkumulierten Belohnung. Multi-Agent-RL umfasst mehrere interagierende Agenten, die ihre kumulierte Belohnung maximieren. Zur Berechnung des Reglers werden zahlreiche Strategien verwendet, die sich aus algorithmischer Sicht in Value-Iteration, Policy-Iteration und Policy-Search (Policy bezieht sich auf die Steuerung) einteilen lassen. Die Familie der Value-Iteration-Algorithmen (bekannt als V-Learning und Q-Learning) iteriert im Value Function Space unter Verwendung der Bellman-Gleichung und zielt darauf ab, die optimale kumulierte Belohnung zu finden. Die Policy-Iteration iteriert zwischen der Bewertung der Policy (Steuerung) und deren anschließender Verbesserung (Actor-Critic-Algorithmen fallen in diese Kategorie). Die Policy-Search basiert auf einer direkten Suche nach der optimalen Steuerung, wobei in der Regel eine Funktionsannäherung verwendet wird. RL ist sehr rechenintensiv, und in der Regel wird eine Annäherung der verschiedenen beteiligten Funktionen verwendet, um den Suchraum weiter zu reduzieren. In der Tat wurden Deep-Neural-Network-Approximatoren erfolgreich eingesetzt, um die erhebliche Dimensionalität des Steuerungs- und Zustandsraums zu bewältigen [20]. Wir haben Hunderte von Ar-

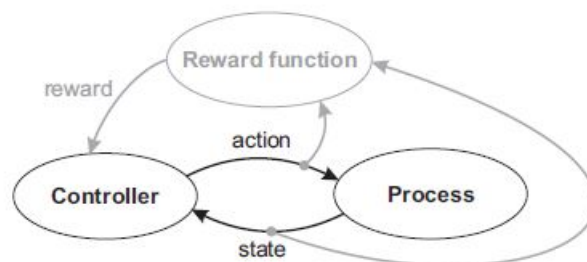


Abbildung 10.2.: Schematische Darstellung des Reinforcement Learning (RL).

beiten im Bereich des maschinellen Lernens und insbesondere des RL durchgesehen. Im Folgenden findet sich eine Aufstellung der aus unserer Sicht wichtigsten Referenzen.

1. Single-Agent-RL: Einführungsmaterial und theoretische Grundlagen finden sich in [102] für Markov-Entscheidungsprozesse und in [108] und [105] für kontinuierliche, zeitdiskrete und adaptive Systeme.

10. Fortschritte Anderer

2. Multi-Agent-RL: Einführungsmaterial und theoretische Grundlagen finden sich in [18], [15], [100] und [74].
3. Die Anwendung auf MG-Systeme steckt aufgrund der Herausforderungen des Multi-Agenten-Ansatzes noch in den Kinderschuhen. In der Tat ist die Konvergenz der verschiedenen vorgeschlagenen Algorithmen schwer nachzuweisen, und es können Schwierigkeiten bei der Einstellung der Hyperparameter unter Echtzeitanforderungen auftreten. Dennoch wurden in diesem Bereich einige Arbeiten veröffentlicht, siehe z.B. [51], [101], [21], [117] und [9].
4. Cyber-Sicherheitsaspekte stellen neuere Anwendungen dar und werden z.B. in [120] und den Referenzen in [24] behandelt.

10.2. Technischer Fortschritt

Außer den oben besprochenen wissenschaftlichen Ergebnissen sind uns trotz gründlicher Recherche während des Projekts keine für das Thema relevanten Innovationen bekannt geworden. Wir haben also in dieser Zeit auch von keinen relevanten alternativen Konstruktionen, Lösungen, Verfahren bzw. damit verbundenen Schutzrechten Kenntnis erlangt. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass andere Unternehmen oder Stellen diesbezügliche nicht-öffentliche Forschung betreiben.

11. Veröffentlichung der Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Abschlussarbeiten und die veröffentlichten Zeitschriften- und Konferenzartikel eingegangen. Geplante Veröffentlichungen werden danach besprochen.

11.1. Abschlussarbeiten

Die folgenden Abschlussarbeiten haben dazu beigetragen, bestimmte Herausforderungen im Projekt anzugehen. Während des Projekts sind die folgenden Abschlussarbeiten entstanden.

- A. Gharbi. Robust energy management for microgrids accounting for saturation in droop control and possible communication loss. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2021
- K. Mejri. Assessing and enhancing non-worst case performance of a saturation-aware minimax mpc for microgrids. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2022
- I. Nagga. Cooperative autonomous distributed energy management for microgrids. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2022
- R. Tan. Modelling and control of a pv/battery/diesel microgrid system. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2022
- F. Heimann. Control and optimization of microgrid with evs and chp units. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2023
- M. Abu Hasan. Energy forecasting for robust energy management of microgrids. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2023
- A. A. A. Mahmoed. Enhancing and benchmarking a rule-and saturation-based microgrid control. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2023
- L. Kornmann. Contributions to a multi-user cooperative simulation software for robust ems in microgrids. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2024
- N. Mouawad. Proof of concept for saturation aware mm-mpc in a microgrid located in lebanon. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2024
- X. Luo. Robust ems design for microgrids accounting for line power restrictions. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2024

11.2. Bestehende Veröffentlichungen

Hier wird auf die während des Projekts unter Mitwirkung der Projektpartner entstandenen Artikel und deren Rolle für die projektbezogene Forschungs- und Entwicklungstätigkeit eingegangen.

- A. K. Sampathirao, S. Hofmann, J. Raisch, and C. A. Hans. Distributed conditional cooperation model predictive control of interconnected microgrids. *Automatica*, 157: 111258, 2023. ISSN 0005-1098. doi: 10.1016/j.automatica.2023.111258. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109823004193>
 - In diesem Artikel wird eine annähernd optimale Steuerung für miteinander verbundene MGs in einem iterative Vorgehen berechnet. Dabei wird sichergestellt, dass jedes MG, das am Energieaustausch mit den anderen MGs teilnimmt, auch individuell davon profitiert, d. h. seine Betriebskosten im Vergleich zum Inselbetrieb senken kann.

11.3. Geplante Veröffentlichungen

Es sind Veröffentlichungen geplant, deren Inhalte sich auf die im Projekt entwickelten zentralen und verteilten EMSe sowie auf die Methodik, Technik und Ergebnisse der HiL-Tests und des Feldversuchs konzentrieren. Außerdem planen wir, im Kontext verteilter EMS- bzw. Reglerarchitekturen theoretische Untersuchungen zur Auswirkung und Bewältigung von Kommunikationsausfällen sowie zum Einfluss der Sättigung in den unteren Reglerschichten durchzuführen und zu veröffentlichen.

Die folgenden Manuskripte wurden bereits verfasst und sollen in Kürze zur Veröffentlichung eingereicht werden:

- S. Hofmann, A. Sampathirao, C. A. Hans, J. Raisch, A. Heidt, and E. Bosch. Saturation-aware model predictive energy management for droop-controlled islanded microgrids, 2021. URL <https://arxiv.org/abs/2107.02719>
 - In diesem Artikel wird ein MPC-basierter robuster (*minimax*) zentraler EMS-Entwurf vorgestellt, der Sättigung an Leistungs- und Energiegrenzen der Einheiten in den unteren Reglerschichten mit einplant. Es wird gezeigt, dass die Effizienz gegenüber einem früher veröffentlichten *minimax* EMS-Entwurf [45] gesteigert werden kann, während ein sicherer Betrieb trotz Vorhersageunsicherheiten (EE, Verbraucher) nach wie vor gewährleistet ist.
- Multiobjective offline and online optimization for microgrids with saturating droop control
 - In diesem Artikel integrieren wir Kosten, die nicht dem Worst-Case entsprechen, in der Kostenfunktion und untersuchen im Wesentlichen, ob eine Steuerung existiert, die zusätzlich zur Erfüllung der Beschränkungen unter jedem möglichen Szenario auch in Bezug auf alle möglichen Szenarien optimal ist. Siehe Abschnitt 6.5.4.

- Resilient EMS design with distributed cooperative autonomous MPC
 - Eine unzureichende Autonomie der lokalen Einheitensteuerungen in Verbindung mit zentralisierten EMSen für MGs bedeutet eine hohe Abhängigkeit von den Kommunikationsverbindungen. Diese Abhängigkeit kann zu Schwachstellen im System führen, was den Bedarf an dezentralen Designalternativen erhöht. In diesem Artikel untersuchen wir den Parallelbetrieb von (teilweise) autonomen MPC- und optimierungsbasierten EMS-Modulen die auf mehrere Einheiten innerhalb der MGs verteilt sind. Siehe Abschnitt 6.6.1.
- Saturation-aware EMS for islanded microgrids with line power restrictions
 - In diesem Artikel wird das robuste EMS-Design um Einschränkungen der Übertragungsleistungen (Leistungsflüsse durch die Übertragungsleitungen) erweitert und eine effiziente Reformulierung des resultierenden MM-MPC-Problems bereitgestellt. Darüber hinaus wird untersucht und analysiert, wie die Topologie von MGs die Umsetzung und Wirksamkeit von Einschränkungen der Übertragungsleistungen beeinflusst. Siehe Abschnitt 6.5.5.

A. Literaturverzeichnis

- [1] Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2019. Aktualisierung: dritte Version. <https://www.energy-charts.info/>. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE., Jan. 2020. URL <https://www.energy-charts.info/>.
- [2] M. Abu Hasan. Energy forecasting for robust energy management of microgrids. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2023.
- [3] S.-J. Ahn, J.-W. Park, I.-Y. Chung, S.-I. Moon, S.-H. Kang, and S.-R. Nam. Power-sharing method of multiple distributed generators considering control modes and configurations of a microgrid. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3):2007–2016, July 2010. ISSN 1937-4208. doi: 10.1109/tpwr.2010.2047736. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5484641>.
- [4] O. S. Akinwale, D. F. Mojisola, and P. A. Adediran. Mitigation strategies for communication networks induced impairments in autonomous microgrids control: A review. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 5(4):342–375, 2021. ISSN 2578-1588. doi: 10.3934/electreng.2021018. URL <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/electreng.2021018>.
- [5] U. Akram, M. Khalid, and S. Shafiq. An improved optimal sizing methodology for future autonomous residential smart power systems. *IEEE Access*, 6:5986–6000, 2018. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/access.2018.2792451. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8255587>.
- [6] S. Alghamdi, J. Schiffer, and E. Fridman. Synthesizing sparse and delay-robust distributed secondary frequency controllers for microgrids. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29(2):691–703, March 2021. ISSN 1558-0865. doi: 10.1109/tcst.2020.2977300. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9036092>.
- [7] M. Ali, K. Prakash, M. A. Hossain, and H. R. Pota. Intelligent energy management: Evolving developments, current challenges, and research directions for sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 314:127904, 2021. ISSN 0959-6526. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127904. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621021223>.
- [8] ARM. Atmospheric Radiation Measurement Climate Research Facility, Surface Meteorology System (MET), Eastern North Atlantic Facility ARM Data Archive: Oak Ridge, USA. Accessed July 14, 2011.

A. Literaturverzeichnis

- [9] E. O. Arwa and K. A. Folly. Reinforcement learning techniques for optimal power control in grid-connected microgrids: A comprehensive review. *IEEE Access*, 8:208992–209007, 2020. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/access.2020.3038735. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9261330>.
- [10] P. Asmus, A. Forni, and L. Vogel. Microgrid analysis and case studies report - california, north america, and global case studies. Technical Report CEC-500-2018-022, California Energy Commission, Aug. 2018. URL <https://www.energy.ca.gov/publications/2018/microgrid-analysis-and-case-studies-report-california-north-america-and-glo>
- [11] N. Baeckeland, D. Chatterjee, M. Lu, B. Johnson, and G.-S. Seo. Overcurrent limiting in grid-forming inverters: A comprehensive review and discussion. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(11):14493–14517, Nov 2024. ISSN 1941-0107. doi: 10.1109/tpel.2024.3430316. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10603443>.
- [12] M. Ban, M. Shahidehpour, J. Yu, and Z. Li. A cyber-physical energy management system for optimal sizing and operation of networked nanogrids with battery swapping stations. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(1):491–502, Jan 2019. ISSN 1949-3037. doi: 10.1109/tste.2017.2788056. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8241836>.
- [13] N. Bazmohammadi, A. Madary, J. C. Vasquez, H. B. Mohammadi, B. Khan, Y. Wu, and J. M. Guerrero. Microgrid digital twins: Concepts, applications, and future trends. *IEEE Access*, 10:2284–2302, 2022. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/access.2021.3138990. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9663369>.
- [14] A. Belloni, L. Piroddi, and M. Prandini. A stochastic optimal control solution to the energy management of a microgrid with storage and renewables. In *2016 American Control Conference (ACC)*, pages 2340–2345, July 2016. doi: 10.1109/acc.2016.7525267. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7525267>.
- [15] D. P. Bertsekas. Multiagent reinforcement learning: Rollout and policy iteration. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(2):249–272, February 2021. ISSN 2329-9274. doi: 10.1109/jas.2021.1003814. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9317713>.
- [16] P. Braun, L. Grüne, C. M. Kellett, S. R. Weller, and K. Worthmann. A distributed optimization algorithm for the predictive control of smart grids. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(12):3898–3911, Dec 2016. ISSN 1558-2523. doi: 10.1109/tac.2016.2525808. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7399348>.
- [17] S. L. Brunton and J. N. Kutz. *Data-Driven Science and Engineering*. Cambridge University Press, 2019. ISBN 978-1-108-42209-3. doi: 10.1017/9781108380690. URL <https://www>.

cambridge.org/core/books/datadriven-science-and-engineering/77D52B171B60A496EAFE4DB662ADC36E.

- [18] L. Buşoniu, R. Babuška, and B. De Schutter. Multi-agent reinforcement learning: An overview. In D. Srinivasan and L. C. Jain, editors, *Innovations in Multi-Agent Systems and Applications - 1*, pages 183–221. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-14435-6. doi: 10.1007/978-3-642-14435-6_7. URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-14435-6_7.
- [19] L. Buşoniu, R. Babuška, B. De Schutter, and D. Ernst. *Reinforcement learning and dynamic programming using function approximators*. Automation and Control Engineering Series. CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4398-2108-4.
- [20] L. Buşoniu, T. de Bruin, D. Tolić, J. Kober, and I. Palunko. Reinforcement learning for control: Performance, stability, and deep approximators. *Annual Reviews in Control*, 46:8–28, 2018. ISSN 1367-5788. doi: 10.1016/j.arcontrol.2018.09.005. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578818301184>.
- [21] D. Cao, J. Zhao, W. Hu, N. Yu, F. Ding, Q. Huang, and Z. Chen. Deep reinforcement learning enabled physical-model-free two-timescale voltage control method for active distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(1):149–165, Jan 2022. ISSN 1949-3061. doi: 10.1109/tsg.2021.3113085. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9539872>.
- [22] B. Chen, J. Wang, X. Lu, C. Chen, and S. Zhao. Networked microgrids for grid resilience, robustness, and efficiency: A review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1):18–32, Jan 2021. ISSN 1949-3061. doi: 10.1109/tsg.2020.3010570. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9170837>.
- [23] F. Chen, M. Chen, Q. Li, K. Meng, Y. Zheng, J. M. Guerrero, and D. Abbott. Cost-based droop schemes for economic dispatch in islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(1):63–74, Jan 2017. ISSN 1949-3053. doi: 10.1109/tsg.2016.2581488.
- [24] W. Chen, X. Qiu, T. Cai, H.-N. Dai, Z. Zheng, and Y. Zhang. Deep reinforcement learning for internet of things: A comprehensive survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 23(3):1659–1692, 2021. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/comst.2021.3073036. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/9403369>.
- [25] P. D. Christofides, R. Scattolini, D. Muñoz de la Peña, and J. Liu. Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions. *Computers & Chemical Engineering*, 51:21–41, 2013. ISSN 0098-1354. doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.05.011. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135412001573>. CPC VIII.
- [26] Y. Chu, M. Li, C. F. M. Coimbra, D. Feng, and H. Wang. Intra-hour irradiance forecasting techniques for solar power integration: A review. *iScience*, 24(10):

A. Literaturverzeichnis

- 103136, 2021. ISSN 2589-0042. doi: 10.1016/j.isci.2021.103136. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004221011044>.
- [27] A. Dehghani, M. Sedighzadeh, and F. Haghjoo. An overview of the assessment metrics of the concept of resilience in electrical grids. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, page e13159, 2021. doi: 10.1002/2050-7038.13159. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2050-7038.13159>.
- [28] Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. 2012 DOE microgrid workshop summary report. Technical report, Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2012.
- [29] S. M. Dibaji, M. Pirani, D. B. Flamholz, A. M. Annaswamy, K. H. Johansson, and A. Chakraborty. A systems and control perspective of cps security. *Annual Reviews in Control*, 47:394–411, 2019. ISSN 1367-5788. doi: 10.1016/j.arcontrol.2019.04.011. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578819300185>.
- [30] F. Dörfler, J. W. Simpson-Porco, and F. Bullo. Breaking the hierarchy: Distributed control and economic optimality in microgrids. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 3(3):241–253, Sept 2016. ISSN 2325-5870. doi: 10.1109/tcns.2015.2459391. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7164313>.
- [31] A. Elmouatamid, R. Ouladsine, M. Bakhouya, N. El Kamoun, M. Khaidar, and K. Zine-Dine. Review of control and energy management approaches in micro-grid systems. *Energies*, 14(1), 2021. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en14010168. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/168>.
- [32] B. Falahati, Y. Fu, and L. Wu. Reliability assessment of smart grid considering direct cyber-power interdependencies. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3):1515–1524, Sep. 2012. ISSN 1949-3053. doi: 10.1109/tsg.2012.2194520.
- [33] B. Falahati, A. Kargarian, and Y. Fu. Impacts of information and communication failures on optimal power system operation. In *2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, pages 1–6, Feb 2013. doi: 10.1109/isgt.2013.6497860. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6497860>.
- [34] D. Faquir, N. Chouliaras, V. Sofia, K. Olga, and L. A. Maglaras. Cybersecurity in smart grids, challenges and solutions. *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 5(1): 24–37, 2021. ISSN 2578-1588. doi: 10.3934/electreng.2021002. URL <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/electreng.2021002>.
- [35] P. Fortenbacher, A. Ulbig, and G. Andersson. Optimal placement and sizing of distributed battery storage in low voltage grids using receding horizon control strategies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(3):2383–2394, May 2018. ISSN 1558-0679. doi: 10.1109/tpwrs.2017.2746261. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8017574>.

- [36] J. Gao, Y. Xiao, J. Liu, W. Liang, and C. L. P. Chen. A survey of communication/networking in smart grids. *Future Generation Computer Systems*, 28(2):391–404, 2012. ISSN 0167-739X. doi: 10.1016/j.future.2011.04.014. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X11000653>.
- [37] A. Géron. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow*. O’Reilly Media, 2 edition, 2019. ISBN 978-1-492-03264-9.
- [38] A. Gharbi. Robust energy management for microgrids accounting for saturation in droop control and possible communication loss. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2021.
- [39] J. A. Giraldo, E. Sarkar, A. A. Cárdenas, M. Maniatakos, and M. Kantarcioglu. Security and privacy in cyber-physical systems: A survey of surveys. *IEEE Design Test*, 34(4): 7–17, Aug 2017. ISSN 2168-2356. doi: 10.1109/mdat.2017.2709310. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7935369>.
- [40] M. Glavic. (deep) reinforcement learning for electric power system control and related problems: A short review and perspectives. *Annual Reviews in Control*, 48: 22–35, 2019. ISSN 1367-5788. doi: 10.1016/j.arcontrol.2019.09.008. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578819301014>.
- [41] I. Goodfellow, Y. Bengio, and A. Courville. *Deep Learning*. Adaptive Computation and Machine Learning. The MIT Press, 2016. ISBN 978-0-262-03561-3.
- [42] L. Graesser and W. L. Keng. *Foundations of Deep Reinforcement Learning: Theory and Practice in Python*. Data & Analytics Series. Pearson Addison-Wesley, 2020. ISBN 978-0-13-517238-4.
- [43] C. A. Hans and E. Klages. Very short term time-series forecasting of solar irradiance without exogenous inputs. In *ITISE 2019: International Conference on Time Series and Forecasting*, volume 2, pages 1007–1018, Sept. 2019. ISBN 978-84-17970-78-9. URL https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:52048969.
- [44] C. A. Hans, V. Nenchev, J. Raisch, and C. Reincke-Collon. Minimax model predictive operation control of microgrids. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3):10287–10292, 2014. ISSN 1474-6670. doi: 10.3182/20140824-6-za-1003.00683. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016432465>. 19th IFAC World Congress.
- [45] C. A. Hans, V. Nenchev, J. Raisch, and C. Reincke-Collon. Approximate closed-loop minimax model predictive operation control of microgrids. In *2015 European Control Conference (ECC)*, pages 241–246, 2015. doi: 10.1109/ecc.2015.7330551. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7330551>. 15-17 July 2015.
- [46] C. A. Hans, P. Sopasakis, A. Bemporad, J. Raisch, and C. Reincke-Collon. Scenario-based model predictive operation control of islanded microgrids. In *2015 54th IEEE*

A. Literaturverzeichnis

- Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 3272–3277, Dec 2015. doi: 10.1109/cdc.2015.7402711. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7402711>.
- [47] C. A. Hans, P. Sopasakis, J. Raisch, C. Reincke-Collon, and P. Patrinos. Risk-averse model predictive operation control of islanded microgrids. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 28(6):2136–2151, Nov. 2020. ISSN 1063-6536. doi: 10.1109/TCST.2019.2929492. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8792379>.
- [48] F. Heimann. Control and optimization of microgrid with evs and chp units. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2023.
- [49] S. Hofmann, A. Sampathirao, C. A. Hans, J. Raisch, A. Heidt, and E. Bosch. Saturation-aware model predictive energy management for droop-controlled islanded microgrids, 2021. URL <https://arxiv.org/abs/2107.02719>.
- [50] D. Holmes, M. Papathanasaki, L. A. Maglaras, M. A. Ferrag, S. Nepal, and H. Janicke. Digital twins and cyber security – solution or challenge? In *2021 6th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, pages 1–8, Sep. 2021. doi: 10.1109/seeda-cecnsm53056.2021.9566277. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9566277>.
- [51] B. Huang and J. Wang. Deep-reinforcement-learning-based capacity scheduling for pv-battery storage system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(3):2272–2283, May 2021. ISSN 1949-3061. doi: 10.1109/tsg.2020.3047890. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9310351>.
- [52] R. J. Hyndman and G. Athanasopoulos. *Forecasting: principles and practice*. OTexts, 2018.
- [53] M. Islam, F. Yang, and M. Amin. Control and optimisation of networked microgrids: A review. *IET Renewable Power Generation*, 15(6):1133–1148, 2021. doi: 10.1049/rpg2.12111. URL <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/rpg2.12111>.
- [54] M. Izadi, S. H. Hosseinian, S. Dehghan, A. Fakharian, and N. Amjady. A critical review on definitions, indices, and uncertainty characterization in resiliency-oriented operation of power systems. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(1):e12680, 2021. doi: 10.1002/2050-7038.12680. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2050-7038.12680>.
- [55] S. Jamal, N. M. L. Tan, and J. Pasupuleti. A review of energy management and power management systems for microgrid and nanogrid applications. *Sustainability*, 13(18), 2021. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/su131810331. URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/18/10331>.

- [56] N. Jamil, Q. S. Qassim, F. A. Bohani, M. B. Mansor, and V. K. Ramachandaramurthy. Cybersecurity of microgrid: State-of-the-art review and possible directions of future research. *Applied Sciences*, 11(21), 2021. ISSN 2076-3417. doi: 10.3390/app11219812. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/9812>.
- [57] C. Ju, P. Wang, L. Goel, and Y. Xu. A two-layer energy management system for microgrids with hybrid energy storage considering degradation costs. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6):6047–6057, Nov 2018. ISSN 1949-3061. doi: 10.1109/tsg.2017.2703126. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7924330>.
- [58] L. Kornmann. Contributions to a multi-user cooperative simulation software for robust ems in microgrids. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2024.
- [59] A. Krishna, C. A. Hans, J. Schiffer, J. Raisch, and T. Kral. Steady state evaluation of distributed secondary frequency control strategies for microgrids in the presence of clock drifts. In *2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, pages 508–515, July 2017. doi: 10.1109/med.2017.7984168. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7984168/>.
- [60] A. Krishna, J. Schiffer, and J. Raisch. A consensus-based control law for accurate frequency restoration and power sharing in microgrids in the presence of clock drifts. In *2018 European Control Conference (ECC)*, pages 2575–2580, June 2018. doi: 10.23919/ecc.2018.8550191. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8550191>.
- [61] A. Krishna, J. Schiffer, and J. Raisch. Distributed secondary frequency control in microgrids: Robustness and steady-state performance in the presence of clock drifts. *European Journal of Control*, 51:135–145, 2020. ISSN 0947-3580. doi: 10.1016/j.ejcon.2019.08.003. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0947358018305375>.
- [62] F. Liberati, E. Garone, and A. Di Giorgio. Review of cyber-physical attacks in smart grids: A system-theoretic perspective. *Electronics*, 10(10), 2021. ISSN 2079-9292. doi: 10.3390/electronics10101153. URL <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/10/1153>.
- [63] Y. Liu, Z. Qu, H. Xin, and D. Gan. Distributed real-time optimal power flow control in smart grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5):3403–3414, Sep. 2017. ISSN 1558-0679. doi: 10.1109/tpwrs.2016.2635683. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7769193>.
- [64] J. Löfberg. *Minimax approaches to robust model predictive control*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, 2003.
- [65] L. M. Lopez-Ramos, V. Kekatos, A. G. Marques, and G. B. Giannakis. Two-timescale stochastic dispatch of smart distribution grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5):

A. Literaturverzeichnis

- 4282–4292, Sep. 2018. ISSN 1949-3061. doi: 10.1109/tsg.2017.2654220. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7820228>.
- [66] I. Löser, A. K. Sampathirao, S. Hofmann, and J. Raisch. Fallback strategies in operation control of microgrids with communication failures. In *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 3885–3891, Dec 2019. doi: 10.1109/cdc40024.2019.9029632. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9029632>.
- [67] X. Luo. Robust ems design for microgrids accounting for line power restrictions. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2024.
- [68] A. A. A. Mahmoed. Enhancing and benchmarking a rule-and saturation-based microgrid control. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2023.
- [69] K. Mejri. Assessing and enhancing non-worst case performance of a saturation-aware minimax mpc for microgrids. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2022.
- [70] M. Meliani, A. El Barkany, I. El Abbassi, A. M. Darcherif, and M. Mahmoudi. Energy management in the smart grid: State-of-the-art and future trends. *International Journal of Engineering Business Management*, 13:18479790211032920, 2021. doi: 10.1177/18479790211032920. URL <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/18479790211032920>.
- [71] N. Mouawad. Proof of concept for saturation aware mm-mpc in a microgrid located in lebanon. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2024.
- [72] I. Nagga. Cooperative autonomous distributed energy management for microgrids. Bsc thesis, TU Berlin, Germany, 2022.
- [73] S. P. Nandanoori, S. Kundu, W. Du, F. K. Tuffner, and K. P. Schneider. Distributed small-signal stability conditions for inverter-based unbalanced microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(5):3981–3990, Sep. 2020. ISSN 1558-0679. doi: 10.1109/tpwrs.2020.2982795. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9050535>.
- [74] T. T. Nguyen, N. D. Nguyen, and S. Nahavandi. Deep reinforcement learning for multiagent systems: A review of challenges, solutions, and applications. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 50(9):3826–3839, Sep. 2020. ISSN 2168-2275. doi: 10.1109/tcyb.2020.2977374. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9043893>.
- [75] I. U. Nutkani, P. C. Loh, and F. Blaabjerg. Droop scheme with consideration of operating costs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(3):1047–1052, March 2014. ISSN 0885-8993. doi: 10.1109/tpel.2013.2276251.

- [76] I. U. Nutkani, P. C. Loh, P. Wang, and F. Blaabjerg. Cost-prioritized droop schemes for autonomous ac microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(2):1109–1119, Feb 2015. ISSN 0885-8993. doi: 10.1109/tpel.2014.2313605. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6778016/>.
- [77] A. Parisio, E. Rikos, and L. Glielmo. A model predictive control approach to microgrid operation optimization. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 22(5):1813–1827, Sept. 2014. ISSN 1063-6536. doi: 10.1109/tcst.2013.2295737.
- [78] B. Patnaik, M. Mishra, R. C. Bansal, and R. K. Jena. Ac microgrid protection – a review: Current and future prospective. *Applied Energy*, 271:115210, 2020. ISSN 0306-2619. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115210. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920307224>.
- [79] J. Pauphilet, D. Kiner, D. Faille, and L. El Ghaoui. A tractable numerical strategy for robust milp and application to energy management. In *2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 1490–1495, Dec 2016. doi: 10.1109/cdc.2016.7798477.
- [80] B. Pawar, E. I. Batzelis, S. Chakrabarti, and B. C. Pal. Grid-forming control for solar pv systems with power reserves. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(4):1947–1959, Oct 2021. ISSN 1949-3037. doi: 10.1109/tste.2021.3074066. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9408416>.
- [81] F. Petropoulos, D. Apiletti, V. Assimakopoulos, M. Z. Babai, D. K. Barrow, S. Ben Taieb, C. Bergmeir, R. J. Bessa, J. Bijak, J. E. Boylan, J. Browell, C. Carnevale, J. L. Castle, P. Cirillo, M. P. Clements, C. Cordeiro, F. L. Cyrino Oliveira, S. De Baets, A. Dokumentov, J. Ellison, P. Fiszeder, P. H. Franses, D. T. Frazier, M. Gilliland, M. S. Gönül, P. Goodwin, L. Grossi, Y. Grushka-Cockayne, M. Guidolin, M. Guidolin, U. Gunter, X. Guo, R. Guseo, N. Harvey, D. F. Hendry, R. Hollyman, T. Januschowski, J. Jeon, V. R. R. Jose, Y. Kang, A. B. Koehler, S. Kolassa, N. Kourentzes, S. Leva, F. Li, K. Litsiou, S. Makridakis, G. M. Martin, A. B. Martinez, S. Meeran, T. Modis, K. Nikolopoulos, D. Önkal, A. Paccagnini, A. Panagiotelis, I. Panapakidis, J. M. Pavía, M. Pedio, D. J. Pedregal, P. Pinson, P. Ramos, D. E. Rapach, J. J. Reade, B. Rostami-Tabar, M. Rubaszek, G. Sermipinis, H. L. Shang, E. Spiliotis, A. A. Syntetos, P. D. Talagala, T. S. Talagala, L. Tashman, D. Thomakos, T. Thorarinsdottir, E. Todini, J. R. Trapero Arenas, X. Wang, R. L. Winkler, A. Yusupova, and F. Ziel. Forecasting: theory and practice. *International Journal of Forecasting*, 2022. ISSN 0169-2070. doi: 10.1016/j.ijforecast.2021.11.001. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169207021001758>.
- [82] I. Prodan, E. Zio, and F. Stoican. Fault tolerant predictive control design for reliable microgrid energy management under uncertainties. *Energy*, 91:20–34, 2015. ISSN 0360-5442. doi: 10.1016/j.energy.2015.08.009. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215010579>.

A. Literaturverzeichnis

- [83] J. M. Raya-Armenta, N. Bazmohammadi, J. G. Avina-Cervantes, D. Sáez, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero. Energy management system optimization in islanded microgrids: An overview and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149:111327, 2021. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2021.111327. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121006134>.
- [84] K. Rudion, A. Orths, Z. A. Styczynski, and K. Strunz. Design of benchmark of medium voltage distribution network for investigation of dg integration. In *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pages 1–6, June 2006. ISBN 1932-5517. doi: 10.1109/PES.2006.1709447. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1709447>.
- [85] K. A. Saleh, H. H. Zeineldin, and E. F. El-Saadany. Optimal protection coordination for microgrids considering $n - 1$ contingency. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(5):2270–2278, Oct 2017. ISSN 1941-0050. doi: 10.1109/tii.2017.2682101. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7878584>.
- [86] A. K. Sampathirao, S. Hofmann, J. Raisch, and C. A. Hans. Distributed conditional cooperation model predictive control of interconnected microgrids. *Automatica*, 157:111258, 2023. ISSN 0005-1098. doi: 10.1016/j.automatica.2023.111258. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109823004193>.
- [87] I. Saviuc, H. Peremans, and S. Van Passel. Ecosmic. Technical report ta user project, ERIGrid – European Research Infrastructure supporting Smart Grid Systems Technology Development, Validation and Roll Out, Apr. 2018. URL <https://erigrd.eu/wp-content/uploads/2019/03/ECOSMIC-TA-Project-Report.pdf>.
- [88] J. Schiffer. *Stability and power sharing in microgrids*. Doctoral thesis, Technische Universität Berlin, Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik, Berlin, 2015. URL <https://depositonce.tu-berlin.de/handle/11303/4878>.
- [89] J. Schiffer, R. Ortega, A. Astolfi, J. Raisch, and T. Sezi. Conditions for stability of droop-controlled inverter-based microgrids. *Automatica*, 50(10):2457–2469, 2014. ISSN 0005-1098. doi: 10.1016/j.automatica.2014.08.009. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109814003100>.
- [90] J. Schiffer, C. A. Hans, T. Kral, R. Ortega, and J. Raisch. Modeling, analysis, and experimental validation of clock drift effects in low-inertia power systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(7):5942–5951, July 2017. ISSN 0278-0046. doi: 10.1109/tie.2016.2638805.
- [91] J. Schiffer, D. Efimov, and R. Ortega. Global synchronization analysis of droop-controlled microgrids—a multivariable cell structure approach. *Automatica*, 109:108550, 2019. ISSN 0005-1098. doi: 10.1016/j.automatica.2019.108550. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000510981930411X>.

- [92] Q. Shafiee, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez. Distributed secondary control for islanded microgrids—a novel approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2):1018–1031, Feb 2014. ISSN 1941-0107. doi: 10.1109/tpel.2013.2259506. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6507301>.
- [93] J. W. Simpson-Porco, F. Dörfler, and F. Bullo. Synchronization and power sharing for droop-controlled inverters in islanded microgrids. *Automatica*, 49(9):2603–2611, 2013. ISSN 0005-1098. doi: 10.1016/j.automatica.2013.05.018. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109813002884>.
- [94] J. W. Simpson-Porco, F. Dörfler, F. Bullo, Q. Shafiee, and J. M. Guerrero. Stability, power sharing, & distributed secondary control in droop-controlled microgrids. In *2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pages 672–677, Oct 2013. doi: 10.1109/smartgridcomm.2013.6688036. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6688036>.
- [95] R. Siqueira de Carvalho and S. Mohagheghi. Impact of communication system on smart grid reliability, security and operation. In *2016 North American Power Symposium (NAPS)*, pages 1–6, Sep. 2016. doi: 10.1109/naps.2016.7747932. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7747932>.
- [96] E. Smith, D. Robinson, and A. Agalgaonkar. Cooperative control of microgrids: A review of theoretical frameworks, applications and recent developments. *Energies*, 14(23), 2021. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en14238026. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/23/8026>.
- [97] K. Smith, A. Saxon, M. Keyser, B. Lundstrom, Z. Cao, and A. Roc. Life prediction model for grid-connected li-ion battery energy storage system. In *2017 American Control Conference (ACC)*, pages 4062–4068, May 2017. doi: 10.23919/acc.2017.7963578. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7963578>.
- [98] L. E. Sokoler, P. J. Dinesen, and J. B. Jørgensen. A hierarchical algorithm for integrated scheduling and control with applications to power systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 25(2):590–599, March 2017. ISSN 1558-0865. doi: 10.1109/tcst.2016.2565382. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7484269>.
- [99] B. V. Solanki, K. Bhattacharya, and C. A. Cañizares. A sustainable energy management system for isolated microgrids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(4):1507–1517, Oct 2017. ISSN 1949-3037. doi: 10.1109/tste.2017.2692754. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7895194>.
- [100] C. Sun, W. Liu, and L. Dong. Reinforcement learning with task decomposition for cooperative multiagent systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(5):2054–2065, May 2021. ISSN 2162-2388. doi: 10.1109/tnnls.2020.2996209. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9119863>.

A. Literaturverzeichnis

- [101] J. Sun, G. Qi, N. Mazur, and Z. Zhu. Structural scheduling of transient control under energy storage systems by sparse-promoting reinforcement learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(2):744–756, Feb 2022. ISSN 1941-0050. doi: 10.1109/tii.2021.3084139. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9442353>.
- [102] R. S. Sutton and A. G. Barto. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Adaptive Computation and Machine Learning Series. The MIT Press, 2 edition, 2018. ISBN 978-0-262-03924-6.
- [103] R. Tan. Modelling and control of a pv/battery/diesel microgrid system. Msc thesis, TU Berlin, Germany, 2022.
- [104] M. Tozak, S. Taskin, I. Sengor, and B. P. Hayes. Modeling and control of grid forming converters: A systematic review. *IEEE Access*, 12:107818–107843, 2024. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/access.2024.3437236. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10620991>.
- [105] K. G. Vamvoudakis, Y. Wan, F. L. Lewis, and D. Cansever, editors. *Handbook of Reinforcement Learning and Control*. Studies in Systems, Decision and Control. Springer, Cham, 1 edition, 2021. ISBN 978-3-030-60989-4. doi: 10.1007/978-3-030-60990-0. URL <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-60990-0>.
- [106] T. L. Vandoorn, J. D. M. De Kooning, B. Meersman, and L. Vandeveldel. Voltage-based droop control of renewables to avoid on–off oscillations caused by overvoltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(2):845–854, April 2013. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/tpwrd.2013.2241793.
- [107] T. L. Vandoorn, J. C. Vasquez, J. D. M. De Kooning, J. M. Guerrero, and L. Vandeveldel. Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(4):42–55, Dec 2013. ISSN 1941-0115. doi: 10.1109/mie.2013.2279306. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6681994>.
- [108] D. Vrabie, K. G. Vamvoudakis, and F. L. Lewis. *Optimal Adaptive Control and Differential Games by Reinforcement Learning Principles*, volume 81 of *IET Control Engineering Series*. The Institution of Engineering and Technology, 2013. ISBN 978-1-84919-489-1.
- [109] Y. Wang, A. O. Rousis, and G. Štrbac. On microgrids and resilience: A comprehensive review on modeling and operational strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134:110313, 2020. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2020.110313. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120306018>.
- [110] L. A. Wong, V. K. Ramachandaramurthy, P. Taylor, J. B. Ekanayake, S. L. Walker, and S. Padmanaban. Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network. *Journal of Energy Storage*, 21:489–

- 504, 2019. ISSN 2352-152X. doi: 10.1016/j.est.2018.12.015. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X18303803>.
- [111] T. Yang, X. Yi, J. Wu, Y. Yuan, D. Wu, Z. Meng, Y. Hong, H. Wang, Z. Lin, and K. H. Johansson. A survey of distributed optimization. *Annual Reviews in Control*, 47: 278–305, 2019. ISSN 1367-5788. doi: 10.1016/j.arcontrol.2019.05.006. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578819300082>.
- [112] T. Yang, L. Zhao, W. Li, and A. Y. Zomaya. Reinforcement learning in sustainable energy and electric systems: a survey. *Annual Reviews in Control*, 49:145–163, 2020. ISSN 1367-5788. doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.03.001. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578820300079>.
- [113] M. Yazdani and A. Mehrizi-Sani. Distributed control techniques in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6):2901–2909, Nov 2014. ISSN 1949-3061. doi: 10.1109/tsg.2014.2337838. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6870484>.
- [114] Y. Zacchia Lun, A. D’Innocenzo, F. Smarra, I. Malavolta, and M. D. Di Benedetto. State of the art of cyber-physical systems security: An automatic control perspective. *Journal of Systems and Software*, 149:174–216, 2019. ISSN 0164-1212. doi: 10.1016/j.jss.2018.12.006. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121218302681>.
- [115] Y. Zahraoui, I. Alhamrouni, S. Mekhilef, M. R. Basir Khan, M. Seyedmahmoudian, A. Stojcevski, and B. P. Horan. Energy management system in microgrids: A comprehensive review. *Sustainability*, 13(19), 2021. ISSN 2071-1050. doi: 10.3390/sul31910492. URL <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/19/10492>.
- [116] A. Zerrahn, W.-P. Schill, and C. Kemfert. On the economics of electrical storage for variable renewable energy sources. *European Economic Review*, 108:259–279, 2018. ISSN 0014-2921. doi: 10.1016/j.eurocorev.2018.07.004. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014292118301107>.
- [117] Q. Zhang, K. Dehghanpour, Z. Wang, F. Qiu, and D. Zhao. Multi-agent safe policy learning for power management of networked microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(2):1048–1062, March 2021. ISSN 1949-3061. doi: 10.1109/tsg.2020.3034827. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9244070>.
- [118] Y. Zhang, N. Gatsis, and G. B. Giannakis. Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(4): 944–953, Oct 2013. ISSN 1949-3037. doi: 10.1109/tste.2013.2255135. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/6510507>.
- [119] Q. Zhou, M. Shahidehpour, A. Paaso, S. Bahramirad, A. Alabdulwahab, and A. M. Abu-sorrah. Distributed control and communication strategies in networked microgrids. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 22(4):2586–2633, Fourthquarter 2020. ISSN

A. Literaturverzeichnis

- 1553-877X. doi: 10.1109/comst.2020.3023963. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9197633>.
- [120] Y. Zhou, K. G. Vamvoudakis, W. M. Haddad, and Z.-P. Jiang. A secure control learning framework for cyber-physical systems under sensor and actuator attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 51(9):4648–4660, Sep. 2021. ISSN 2168-2275. doi: 10.1109/tcyb.2020.3006871. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9153942>.
- [121] A. Zidan, M. Khairalla, A. M. Abdrabou, T. Khalifa, K. Shaban, A. Abdrabou, R. El Shatshat, and A. M. Gaouda. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: State-of-the-art and future trends. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5):2170–2185, Sep. 2017. ISSN 1949-3061. doi: 10.1109/tsg.2016.2517620. URL <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7398152>.

B. Akronyme

AP Arbeitspaket

BMWi Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

DMPC Distributed Model Predictive Control

DT Digital Twin

EE Erneuerbaren Energien

EM Energiemanagement

EMERGE Verteiltes Energiemanagement für Microgrids mit hohem Anteil erneuerbarer Energien

EMS Energiemanagementsystem

FGRS Fachgebiet Regelungssysteme

FP Förderpunkt

HiL Hardware-in-the-Loop

MG Microgrid

MILP gemischt-ganzzahliges lineares Programm

MM Minimax

MPC Model Predictive Control

PNP Plug-and-Play

PTJ Projektträger Jülich

PV Photovoltaik

RES renewable energy systems

RESUME Resilientes Energiemanagement für Microgrids mit Schwerpunkt auf volatilen erneuerbaren Erzeugern

SPS speicherprogrammierbare Steuerung

TRL Technology Readiness Level

TU Berlin Technische Universität Berlin

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Abschlussbericht: Resilientes Energiemanagement für Microgrids mit Schwerpunkt auf volatilen erneuerbaren Erzeugern	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] <ul style="list-style-type: none"> • Steffen Hofmann (Fachgebiet Regelungssysteme (FGRS), Technische Universität (TU) Berlin) • Ujjwal Pratap (FGRS, TU Berlin) • Jörg Raisch (FGRS, TU Berlin) • Erich Bosch (Autarsys GmbH) 	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2024
	6. Veröffentlichungsdatum 17.03.2025
	7. Form der Publikation Sonderdruck(Buch)
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <ul style="list-style-type: none"> • Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623, Berlin, Deutschland • Autarsys GmbH, Bruno-Bürgel-Weg 69-81, 12439 Berlin, Deutschland 	9. Ber. Nr. Durchführende Institution ---
	10. Förderkennzeichen 03EI6042A+B
	11. Seitenzahl 133
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 121
	14. Tabellen 13
	15. Abbildungen 39
16. Zusätzliche Angaben ---	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) ---	
18. Kurzfassung Dieses Projekt wurde in Zusammenarbeit des Fachgebiets Regelungssysteme (FGRS) mit der Autarsys GmbH erfolgreich durchgeführt. Zunächst wurde die Problembeschreibung präzisiert und eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Anschließend und begleitend zur Energiemanagementsystem (EMS)-Entwicklung wurde vom FGRS eine bestehende Simulationsoftware erweitert. Parallel dazu hat die Autarsys GmbH Betriebsdaten aus einem von ihr betriebenen und für einen späteren Feldtest vorgesehenen Microgrid (MG) erhoben und für die Verwendung in der Simulation aufbereitet. Im Rahmen der zentralen Arbeitspakete wurden vom FGRS aus Vorarbeiten stammende Model Predictive Control (MPC)-basierte EMSe weiterentwickelt. Hauptaugenmerk hierbei war einerseits eine Robustifizierung im regelungstechnischen Sinn und andererseits die Herstellung von Resilienz, die z. B. als eine Ertüchtigung zur Bewältigung kritischer Ereignisse wie Kommunikationsausfällen aufgefasst werden kann. Die Autarsys GmbH konzentrierte sich im Mittelteil des Projekts auf die Entwicklung von Soft- und Hardwarekomponenten zur Errichtung eines Digital Twin (DT) und zur Vorbereitung von Hardware-in-the-Loop (HiL)-Tests und des Feldtests. Während des Projekts wurden zur Vorbereitung dieser Tests und zur Erprobung der EMSe umfangreiche Simulationen durchgeführt. Aufgrund von Personalwechsel und geopolitischen Bedingungen wurde in Abstimmung mit dem Projektträger Jülich (PTJ) der Zeitplan kostenneutral um 6 Monate verlängert und der geplante Feldtest in einen Laboraufbau-basierten Lab-in-the-Loop-Feldtest abgewandelt.	
19. Schlagwörter Microgrids, Erneuerbare Energien, Energiemanagement, Robuste Regelung, Resilienz, Digital Twin	
20. Verlag ---	21. Preis ---

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN Planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Final report: Resilient Energy Management System for Microgrids with Focus on Volatile Renewable Generation (RESUME)	
4. author(s) (family name, first name(s)) <ul style="list-style-type: none"> • Steffen Hofmann (Fachgebiet Regelungssysteme (FGRS), Technische Universität (TU) Berlin) • Ujjwal Pratap (FGRS, TU Berlin) • Jörg Raisch (FGRS, TU Berlin) • Erich Bosch (Autarsys GmbH) 	5. end of project 31.07.2024
	6. publication date 17.03.2025
	7. form of publication Book
8. performing organization(s) (name, address) <ul style="list-style-type: none"> • Technische Universität Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623, Berlin, Deutschland • Autarsys GmbH, Bruno-Bürgel-Weg 69-81, 12439 Berlin, Deutschland 	9. originator's report no. ---
	10. reference no. 03EI6042A+B
	11. no. of pages 133
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	13. no. of references 121
	14. no. of tables 13
	15. no. of figures 39
16. supplementary notes ---	
17. presented at (title, place, date) ---	
18. abstract <p>This project was successfully carried out in collaboration between the Department of Control Systems (FGRS) and Autarsys GmbH. First, the problem description was rendered more precisely and extensive literature research was carried out. Subsequently and in parallel to the development of the energy management system (EMS), FGRS expanded an existing simulation software. At the same time, Autarsys GmbH collected operating data from a microgrid (MG) operated by them and intended for a later field test, and prepared it for use in the simulation. As part of the central work packages, Model Predictive Control (MPC)-based EMSs, based on previous research, were enhanced and further developed by FGRS. The main focus was, on the one hand, robustification in the control engineering sense and, on the other hand, the creation of resilience. The latter can be understood, for example, as an upgrade to cope with critical events such as communication failures. In the middle part of the project, Autarsys GmbH concentrated on the development of software and hardware components for setting up a digital twin (DT) and on preparation of hardware-in-the-loop (HiL-) tests and the field test. Extensive simulations were carried out during the project to prepare for these tests and to try the EMSs. Due to personnel changes and geopolitical conditions, the schedule was extended by 6 months in agreement with the Projektträger Jülich (PTJ) on a cost-neutral basis and the planned field test was changed to a laboratory setup-based lab-in-the-loop field test.</p>	
19. keywords Microgrids, Renewable energies, Energy management, Robust Control, Resilience, Digital twin	
20. publisher ---	21. price ---