GEFÖRDERT VOM

Schlussbericht

Verbund: 05M2018 - KONSENS

Zuwendungsempfänger:	Technische Universität Ilmenau
Projektleitung:	Jun.-Prof. Dr. Karl Worthmann
E-Mail:	karl.worthmann@tu-ilmenau.de

Förderkennzeichen:	05M18SIA
Förderzeitraum:	01.01.2018 - 30.06.2021
Zuwendung:	284.214,22 €
Projektträger:	Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:	kathleen.schunder@tu-ilmenau.de
Zusätzlicher Name:	Kathleen Schunder

Genutzte Großgeräte:	**Labor**	**Gerät**	**Experiment**

Diplomarbeiten:	0
Dissertationen:	1
Habilitationen:	0
Referierte Publikationen:	14
Andere Veröffentlichungen:	9
Patente:	0
Bachelorarbeiten:	0
Masterarbeiten:	0
Staatsexamen:	0

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 15.06.2022 17:57 für eine Veröffentlichung freigegeben.

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Ilmenau

Projektleitung: Prof. Dr. Thomas Hotz, Prof. Dr. Karl Worthmann

Verbund: *KONSENS: Konsistente Optimierung und Stabilisierung elektrischer Netzwerksysteme* unter der Koordination von Prof. Dr. Christoph Helmberg

Thema: Verteilte Optimierung und Regelung für Microgrids (Teilprojekt 1)

Zusammenfassung

Ziel des Verbundprojekts In der stabilen Steuerung von Stromnetzen stellen die zunehmend flächendeckende Verfügbarkeit und Einspeisung von alternativen Energiequellen wie Windturbinen oder Solarpaneelen sowie die Nutzung von Energiespeichern, seien es Batterien in Häusern und Fahrzeugen oder Großanlagen von Energieunternehmen, die Netzbetreiber vor neue Herausforderungen und Möglichkeiten. Insbesondere von Übertragungsnetzbetreibern fordern die Regularien einen sicheren Betrieb unter einer dem Gemeinwohl dienlichen, möglichst effizienten Nutzung der Ressourcen. Als Stabilisierungsmaßnahmen kommen auf Transmission System Operator (TSO)-Ebene der Höchstspannungsnetze sowie teils auch auf der Distribution System Operator (DSO)-Ebene der Hoch-, Mittel- und Verteilnetze bisher jeweils pro Ebene isoliert Flexible AC Transmission Systems (FACTS) sowie Anpassungen in der jeweiligen Netzwerktopologie, notfalls kombiniert mit regulatorischen Ab- oder Zuschaltungsmaßnahmen von Kraftwerken oder Verbrauchern in Betracht. Die Wirkung lang- und mittelfristiger Entscheidungen zur Steuerung werden zwar mittels mathematischer Lastflussmodelle jeweils ebenenspezifisch unter Einbeziehung weniger Netzebenenübergangsknoten berechnet und simuliert, jedoch gibt es selbst ebenenweise noch keine Optimierungsverfahren, die automatisiert die Entscheidungsfindung in vollem Umfang unterstützen. Ziel des Verbundprojekts KONSENS war die Entwicklung von Konzepten und Methoden, die langfristig über ebenenspezifische Betrachtungen hinaus ebenenübergreifend mit minimaler Kommunikation automatisiert den optimierten Einsatz der Steuerungselemente zur Nutzung der in den Teilnetzwerken und -ebenen verfügbaren Flexibilitäten für stabilitätsfördernde Lastanpassungen erlauben.

Das entwickelte Gesamtkonzept des Verbunds Grundlage bildet ein hierarchischer Ansatz, in dem zuerst von den Verteilnetzen beginnend die verfügbaren Flexibilitätsspannen über ebenenspezifische Optimierungsaufgaben ermittelt werden. Pro Spannungsebene werden diese, auch um die Anonymität der Verbraucherdaten gewährleisten zu können, als vom Teilnetz leistbare Lastbereichsintervalle mit konvex approximierter Kostenstruktur für Abweichungen gegenüber den idealen Lastwerten in den Netzebenenübergangsknoten der jeweils nächsten Ebene als Eingangsparameter zur Verfügung gestellt. Auf der Höchstspannungsebene erfolgt der Lastausgleich unter Berücksichtigung der Anforderungen an Stabilität und Ausfallsicherheit über konvex relaxierte Lastflussoptimierung mit lokaler Nachoptimierung. Die daraus ermittelten Lastvorgaben an den Übergangsknoten werden nun sukzessive über Lastflussoptimierung hierarchisch über Hoch- und Mittelspannungsebene bis hin zur Verteilnetzebene zurückübertragen und umgesetzt. Zentrales Element zur Flexibilitätserhöhung über summarische Nutzbarmachung individueller Batteriekapazitäten auf Haushaltsebene ist dabei das in enger Absprache mit den TSO- und DSO-Anwendungspartnern als tauglich betrachte Konzept einer vertraglich vereinbarten Reservierung gewisser Batteriekapazitätsanteile für den TSO.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Methodische mathematische Entwicklungen zur Umsetzung des Konzepts Für die Optimierung der in den Microgrids verteilten Batteriekapazitäten unter Berücksichtigung der Privatinteressen entwickelte das Teilprojekt Worthmann der TU Ilmenau parallelisierbare Algorithmen zur modellprädiktiven Regelung. Das Teilprojekt Grundel des MPI Magdeburg erarbeitete geeignete Modellreduktionsverfahren für die effizienten Zusammenfassung von Lastdaten in handhabbaren Ersatzmodellen der hierarchischen Netzebenen. Das Teilprojekt Streif der TU Chemnitz entwickelte Stabilitätskriterien und daraus abgeleitete Nebenbedingungen für die Lastflussoptimierung. Das Teilprojekt Helmberg der TU Chemnitz erweiterte semidefinite Relaxationsansätze zur Lastflussoptimierung, sodass FACTS, Topologieentscheidungen und Stabilitätsbedingungen in der Bestimmung guter Näherungslösungen einbezogen werden können. Die Erprobung des Zusammenwirkens aller Komponenten über mehrere Netzebenen erfolgte an einem akademischen Demonstratorbeispiel und zeigte die grundsätzliche Tauglichkeit des Gesamtansatzes.

[TP1] Verteilte Optimierung und Regelung von Microgrids (TU Ilmenau): Das Team um Prof. Worthmann hat sich mit der optimalen Steuerung von Microgrids auf der Niederspannungsebene beschäftigt. Die dabei zu steuernde Flexibilität setzt sich aus lokalen Energiespeichern auf Haushaltsebene zusammen. Das Schlüsselelement, um eine optimale Steuerung aller Speicher zu erzielen, ohne sensible Daten austauschen zu müssen, bildet die verteilte Optimierung.

Erweiterungsprojekt im Zusammenhang mit der COVID-19 Pandemie Das Konsortium hat im zweiten Halbjahr 2020 zusätzliche Forschungsgelder erhalten, um einen Beitrag zur Bekämpfung der Pandemie zu leisten. Hierfür wurde das Team durch die Arbeitsgruppe „Wahrscheinlichkeitsrechnung und Mathematische Statistik“ um Prof. Hotz (TU Ilmenau) unterstützt. Gemeinsam mit dem MPI Magdeburg (Dr. Grundel) haben beide Teams der TU Ilmenau (Prof. Hotz und Prof. Worthmann) an der Modellierung der Ausbreitung der Pandemie sowie dem Einfluss von Gegenmaßnahmen gearbeitet. Besonderes Augenmerk lag dabei einerseits auf der Notwendigkeit von Kontaktbeschränkungen in der frühen Phase der Pandemie sowie dem Nutzen altersgruppenspezifischer Maßnahmen. Im weiteren Pandemieverlauf wurde die Analyse in Bezug auf das Zusammenwirken dieser Maßnahmen mit Impfangeboten erweitert. Des Weiteren wurde intensiv die Länge des benötigten Vorhersagehorizonts untersucht, um einerseits eine mittel- bis langfristig (approximativ) optimale Strategie zu realisieren und, andererseits, zeitnah auf neue Entwicklungen (inklusive der zeitvarianten Modellparameter) reagieren zu können. Dies ist über eine Analyse modellprädiktiver Regelungsverfahren erfolgt, die ein rollierendes Zeitfenster als Optimierungshorizont verwenden.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Bericht

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Energiewende, ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Emissionsreduktion, bringt neue Herausforderungen für die Betreiber der Energienetze mit sich. Erneuerbare Energiequellen und deren im Gegensatz zu klassischen Kraftwerken flächendeckende Verteilung, führen zu deutlich geänderten Netzlasten, die schwerer vorherzusagen und zu kontrollieren sind. Der Netzausbau ist ein langsames, teures und aus ökologischen Gesichtspunkten schwieriges Unterfangen. Daher muss es gelingen, existierende Energienetze mit neuen Technologien und Netzkomponenten schon heute effizienter zu steuern. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die immer häufiger im Netz verteilten flexiblen Prosumer, die sowohl Energie produzieren als auch aufnehmen können und dadurch Lastflexibilitäten im Netz eröffnen. Die veränderten Bedingungen bringen Übertragungsnetzbetreiber und ihre Operatoren an ihre technologischen Grenzen. Eine effiziente Nutzung der neuen Steuerungselemente und Flexibilitäten über die hierarchischen Netzebenen hinweg (s. Abb. 5) erfordert neue Methoden zur Sicherstellung der Energieversorgung sowie zur Stabilitätsanalyse der elektrischen Energienetze.
Die in diesem Projekt beteiligten Industriepartner gewährleisten einen repräsentativen Einblick in die Probleme und Herausforderungen im Energienetzbetrieb. Insbesondere die Weitergabe von praktischem Wissen und Anwendungsmöglichkeiten durch die beteiligten Verteilnetz- sowie Übertragungsnetzbetreiber war essentiell für die Entwicklung der Modelle durch das akademische Konsortium, das aus der TU Chemnitz, der TU Ilmenau und dem Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme bestand. Die Kompetenzen der Gruppen umfassten modelprädiktive Regelung flexibler Energienetze (TP1, TU Ilmenau), Modellreduktion für komplexe Systeme (TP2, MPI Magdeburg), Stabilitätsanalyse dynamischer Systeme (TP3, TU Chemnitz, ACSD), gemischtganzzahlige semidefinite Optimierung (TP4, TU Chemnitz, ADM).
Von Juli 2020 bis Dezember 2020 widmete sich das akdemische Konsortium mit Unterstützung der Arbeitsgruppe von Prof. Hotz der TU Ilmenau aus Anlass von COVID-19 in einem Erweiterungprojekt mathematischen Modellen und Methoden zur Eindämmung des Infketionsgeschehens.

2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die optimale Steuerung und der Betrieb großer cyber-physischer Systeme führt auf eine Vielzahl an Herausforderungen. Unter anderem sind dies der Fluch der Dimension (curse of dimensionality), Sicherheitsaspekte in Bezug auf die Kommunikation sensibler Daten und die Plug-and-Play-Fähigkeit (bspw. Hinzufügen neuer Teilsysteme ohne die Notwendigkeit einer Koordination seitens einer zentralen Instanz). Dabei kommen Verfahren der verteilten Optimierung zum Einsatz (z.B. duale Dekomposition), deren Ursprünge bis in die frühen 1960er zurückgehen [2; 9; 10]. Das (zu) große Optimierungsproblem wird in kleinere, unabhängige Teilprobleme aufgespalten, welche anschließend parallel oder sequentiell gelöst werden. Die Leistungsfähigkeit dieser Algorithmenklasse hängt eng mit der Verbreitung von Mehrkern-Prozessoren zusammen, die es erlaubt, das volle Potential dieser Verfahren auszureizen. Das ADMM Verfahren dient als Prototyp verteilter Optimierungsverfahren [14; 13] und ist – zusammen mit anderen Algorithmen der verteilten Optimierung – ausgiebig in [24; 3] untersucht. Seine neuerliche Renaissance ist belegbar durch den viel zitierten Beitrag von Boyd et al. [5] und die Entwicklung neuer Methoden, siehe bspw. [20; 21; 19] sowie die darin enthaltenen Referenzen.
ADMM in Schemata mit rollierendem Horizont (receding horizon) im Kontext von Microgrids sind bspw. [8] und [23]. In diesen Referenzen wird eine Nachbar-zu-Nachbar-Kommunikation genutzt; Hierarchien bleiben ohne Berücksichtigung, weshalb die Ausnutzung von Flexibilität oder der Kommunikationsstruktur nicht im Fokus dieser Arbeiten steht. Dies geschieht vielmehr in [1; 22; 12]. Z.B. wird in [12] die elektrisch betriebene Fahrzeugflotte bzgl. ihres Ladeverhaltens

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

optimiert. Unsicherheitsaspekte bzgl. der Umsetzung, wie sie in einer Anwendung in Form modellprädiktiver Regelungsschemata zu behandeln sind, bleiben jedoch unberücksichtigt.
Des Weiteren gibt es zahlreiche so genannte Kompartmentmodelle zur Beschreibung der Verbreitung von Infektionskrankheiten [17; 16; 7]. In [18; 4; 6; 11; 15] wurden darüber hinaus optimale Interventionsstrategien gegen die Ausbreitung von Infektionskrankheiten untersucht.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens sowie Kooperation mit Dritten

Das Projekt betrachtete hierarchische Problemkonfigurationen, von der Berechnung verfügbarer Flexibilität auf den untersten Niedrigspannungsebenen (TP1, TUIlm), über die Transmission der Flexibilität durch die Mittelspannungsebenen und letztlich der Nutzung dieser Flexibilität auf der Hoch- und Höchstspannungsebene. Die Flexibilitätsinformation wurde jeweils in Form eines Verfügbarkeitsintervalls mit quadratischer Zielfunktion zusammengefasst und weitergegeben. Da die Netzwerke speziell unterhalb der Hoch- und Höchstspannungsebenen meist von beachtlicher Größe sind, wurden zur effizienten Bestimmung und Zusammenfassung der Flexibilitäten Modellreduktionstechniken erforscht und angewendet (TP2, MPI). Die Berechnung des optimalen Lastflusses (TP4, TUC ADM) mit Stabilitätsanalyse (TP3, TUC ACSD) fand auf den Hoch- und Höchstspannungsebenen statt, um die dynamischen Anforderungen an das gesamte Energienetz sicherzustellen. Diese Information wurde anschließend durch die Mittelspannungsebenen wieder zurück zu den Niedrigspannungsebenen transferiert.
Dieser Ansatz wurde in Kooperation mit den Industriepartnern TenneT TSO und ENSO NETZ GmbH (Sachsennetze) in zahlreichen kleinen Workshops und Projekttreffen wechselseitig vor Ort und später überwiegende virtuell diskutiert und entwickelt, um die praktischen Anforderungen des Energienetzes und gangbarer Wege der Informationsübermittlung zu berücksichtigen. Im Wesentlichen folgte der Ablauf dem projektierten Plan. Etwas länger als ursprüglich veranschlagt benötigte dabei die Entwicklung eines netzebenenübergreifenden hierarchischen Konzepts, das die aus praktischer Sicht erforderlichen Aspekte zu berücksichtigen erlaubte. Die daraus entstehenden Lastflussoptimierungsprobleme stellten sich dann in der Lösung als ausgesprochen anspruchsvoll und aufwendig heraus, sodass geeignete approximative Lösungstechniken gefunden werden mussten. Dennoch konnten zum Ende des Projekts erste übergreifende Simulationsstudien mit prototypischen Netzwerken der einzelnen Spannungsebenen durchgeführt und mit der Arbeit an Netzwerken realistischer Größe begonnen werden.
Es erfolgte eine Kooperation mit Prof. Houska (ShanghaiTech University, China) und dessen Doktoranden Y. Jiang zur Übertragung des Algorithmus ALADIN zur verteilten Optimierung auf die Steuerung von Energiespeichern in Microgrids. Hierfür besuchte Herr Jiang das Team an der TU Ilmenau 2018 und 2019 für jeweils mehrwöchige Forschungsaufenthalte. Zudem verbrachte Herr Sauerteig 2019 insgesamt 4 Monate an der ShanghaiTech University. Aus der gemeinsamen Forschung sind der Fachzeitschriftbeitrag [J3] sowie das Konferenzproceeding [C1] entstanden.
Erwähnenswert ist an dieser Stelle außerdem das Einschubprojekt (Juni bis November 2020) anlässlich der Coronakrise, in der gemeinsam mit Prof. Hotz (TU Ilmenau) zur mathematisch fundierten Bestimmung von Infektionseindämmungsstrategien geforscht wurde. Eine Gruppe (MPI, TUIlm und ACSD der TUC) untersuchte dabei geeignete Steuerungsstrategien über dynamische Systeme, eine zweite (TUIlm und ADM der TUC) die Bestimmung von Impfverteilungsquoten für Bevölkerungsgruppen mittels semidefiniter Relaxationen nichtlinearer gemischtgannzzahliger Modelle nebst deren Erprobung in Simulationen. Der Optimalsteuerungsansatz der ersten Gruppe führte zu sehr aussagekräftigen Modellrechnungen. Die von der zweiten Gruppe ermittelten Impfstrategien erlaubten zwar beobachtbare Verbesserungen in den Simulationen, diese waren jedoch für die Praxis nicht ausreichend stark, um damit sinnvoll zur Dikussion der Impfstrategien beitragen zu können. Während des Einschubprojekts konnten die Aufgaben des Ursprungsprojekts in sinnvoller Weise mit reduzierter Intensität weitergeführt werden.
Darüber hinaus erfolgte eine Kooperation mit Prof. Chudej (Universität Bayreuth) zur Übertragung der entwickelten Methoden aus den Publikationen [J4; J5] von Mensch-zu-Mensch-Infektionskrankheiten auf vektorübertragene Krankheiten am Beispiel von Denguefieber. Hieraus ist das

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Konferenzproceeding [C3] hervorgegangen.

4 Verwendung der Zuwendung (wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, z.B. Investitionen, Personalmittel)

Die meisten der mit dem Projekt verbundenen Kosten waren Personalkosten, die ca. 93.3% der Ausgaben ausmachten. Der Rest deckte die Reisekosten.

5 Erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vereinbarten Ziele

Im Teilprojekt 1 (TUIlm) wurden drei Hauptergebnisse erzielt, die im Folgenden erläutert werden: Übertragung des Algorithmus ALADIN zur verteilten Optimierung auf ein Peak-Shaving Problem in Microgrids, Entwicklung eines hierarchischen Optimierungsalgorithmus zur verteilten Optimierung gekoppelter Microgrids in Verbindung mit Ersatzmodellen zur Reduktion der Kommunikation und Rechenzeit, Herausarbeiten einer Schnittstelle zwischen Microgrids und DSO-Ebene zur Nutzbarmachung von Flexibilitäten in Form von Energiespeichern auf Haushaltsebene. Das zugrundeliegende linear-quadratische Ausgleichsproblem hat die Form

$$\min_u \quad \|Au - b\|_2^2 \tag{1a}$$

$$\text{s.t.} \quad Du \leq d. \tag{1b}$$

Hier beschreibt u die Steuerung der lokalen Energiespeicher (z.B. Batterien), siehe auch Abbildung 1.

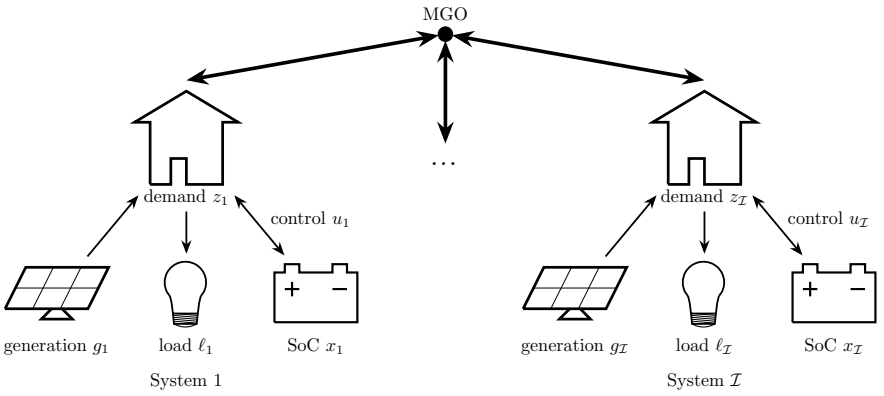

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Microgrids.

Verteilte Optimierung mittels ALADIN: Verteilte Optimierung auf Haushaltsebene ist essentiell, um globale Ziele zu erreichen, ohne lokal sensitive Daten austauschen zu müssen. Standard-Algorithmen in diesem Bereich sind beispielsweise Duale Dekomposition und ADMM (alternating direction of multipliers) [5]. Diese konvergieren jedoch nur mit linearer Rate, d.h., um eine gute Approximation der optimalen Lösung zu erreichen, sind sehr viele Iterationen nötig. Diese Iterationen bedeutet zum einen Rechnenaufwand, zum anderen Kommunikation von gewissen Daten zwischen den Haushalten und dem Verteilnetzbetreiber. Um die Anzahl der benötigten Iterationen zu reduzieren, wurde in enger Zusammenarbeit mit Yuning Jiang und unter Betreuung von Prof. Houska (ShanghaiTech University) der kürzlich entwickelte Algorithmus ALADIN für die Anwendung im Peak-Shaving Problem handhabbar gemacht [J3]. Der Hauptvorteil gegenüber ADMM besteht in der lokal-quadratischen Konvergenz ähnlich dem Newton-Verfahren, siehe auch Abbildung 2.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

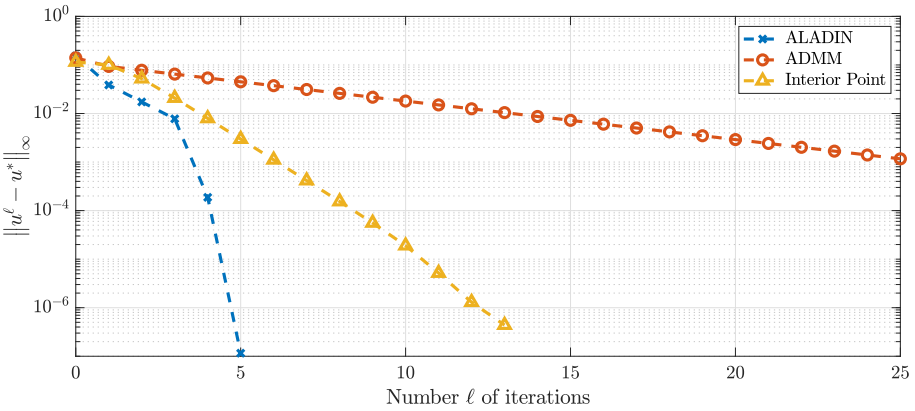

Abbildung 2: Vergleich der Konvergenzrate von ALADIN mit Standard-Algorithmen, wobei u^ℓ die approximative Lösung während der ℓ-ten Iteration und $u^\star$ die optimale Lösung beschreiben.

Hierarchische Optimierung und Ersatzmodelle: Betrachtet man mehrere miteinander gekoppelte Microgrids, so kann durch Energieaustausch zwischen benachbarten Microgrids die globale Performanz verbessert werden [K1]. Zu diesem Zweck wurde in [J6] ein iteratives Verfahren entworfen, welches sowohl die Steuerung der Energiespeicher auf Haushaltsebene als auch den Energieaustausch zwischen benachbarten Microgrids optimiert. In jeder Iteration dieses Verfahrens muss für jedes einzelne Microgrid das Problem (1) gelöst werden. Um hierbei erneut sowohl Rechenzeit als auch Kommunikationsaufwand möglichst gering zu halten, wurde in [K2; J1] der Einsatz von Ersatzmodellen untersucht. Hierfür wurden radiale Basisfunktionen und ein künstliches neuronales Netz trainiert, um die Abbildung

$$\text{Problemstellung (1)} \;\mapsto\; \text{optimale Lösung } u^\star$$

zu „lernen“, siehe auch Abbildung 3.

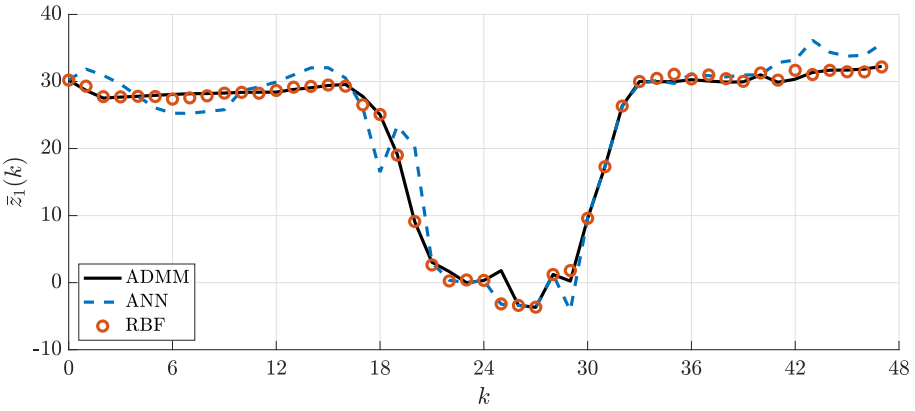

Abbildung 3: Vergleich zwischen optimaler Lösung via ADMM und radialen Basisfunktionen (RBF) und künstlichen neuronalen Netzen (ANN). Hierbei beschreibt $\bar{z}_1(k)$ die aggregierte Nachfrage in Microgrid 1 zum Zeitpunkt k.

Bereitstellung von Flexibilität: Typischerweise ist der Netzbetreiber nicht nur an Peak-Shaving interessiert, sondern verfolgt eine Reihe weitere Ziele, wie z.B. CO_2-Neutralität, Betriebssicherheit, Flexibilität, ... In [J2] wurde das Optimierungsproblem (1) um ein weiteres Ziel ergänzt, nämlich die Bereitstellung von Flexibilität in Form eines Korridors, in dem sich der aggregierte Strombedarf bewegen muss. In diesem Zusammenhang wurde die Paretofront analysiert, um

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

dem Netzbetreiber Informationen für die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Erfüllung der beiden konkurrierenden Ziele zu geben (Stichwort Schattenpreis). Darüber hinaus wurden in [B1] Schnittstellen zwischen den einzelnen Netzebenen konzipiert, die es ermöglichen, die Flexibilitätsinformation durch die gesamte Netzhierarchie (Abb. 5) zu kommunizieren und somit für die Lastflussoptimierung auf der Übertragungsnetzebene nutzbar zu machen.

Erweiterungsprojekt zu COVID-19: In dem Zeitschriftenartikel [J5] wurde ein detailliertes Modell zur Beschreibung der Ausbreitung der Infektionskrankheit COVID-19 entwickelt. Ziel war es, spezielle Merkmale von COVID-19 wie z.B. Inkubationszeit, altersabhängiger Verlauf sowie Verzögerungen bei Tests und Hospitalisierungen abzubilden. Zu diesem Zweck wurde das Standard *susceptible-infectious-recovered* (SIR)-Kompartmentmodell

$$\dot{S} = -\beta SI \tag{2a}$$
$$\dot{I} = \beta SI - \eta I \tag{2b}$$
$$\dot{R} = \eta I \tag{2c}$$

um vier Kompartmente erweitert, manche davon unterteilt gemäß der Schwere des Krankheitsverlaufes. Das resultierende SEITPHR-Kompartment ist in Abb. 4 schematisch dargestellt ist. Zusätzlich wurde die Population in drei Altersgruppen eingeteilt, um alterspezifische Krankheits-

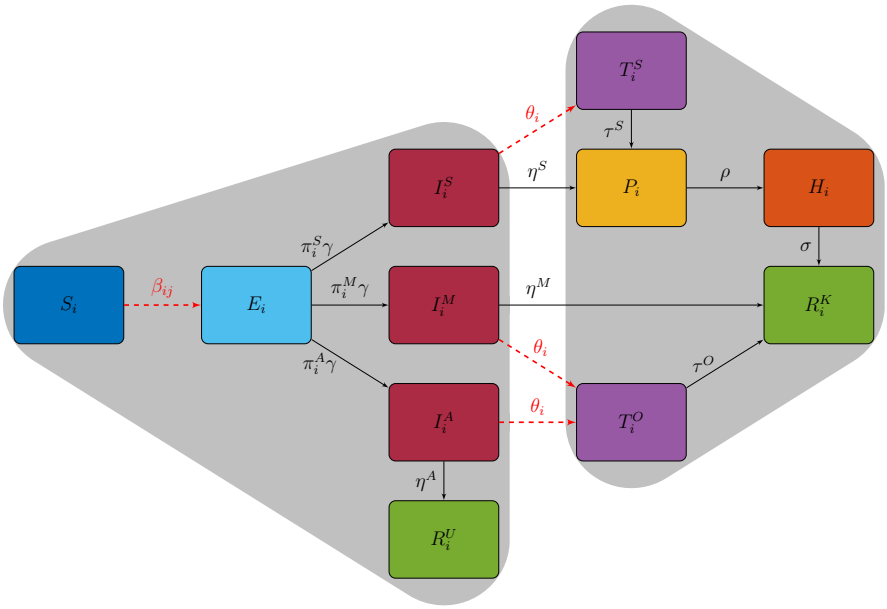

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Übergänge zwischen den einzelnen Kompartmenten des SEITPHR-Modells. Der Index i bezeichnet die Altersgruppe i; die Größen β und θ sind Steuergrößen, die Kontaktbeschränkungen und Testraten darstellen.

verläufe sowie Impfstrategien [J4] zu integrieren.

In den Zeitschriftenartikeln [J5; J4] wurden verschiedene Optimalsteuerungsprobleme formuliert und approximation mittels modellprädiktiver Regelung (MPC) gelöst, um optimale Test-, Kontaktbeschränkungs- und Impfstrategien zu ermitteln. Dabei galt es immer, eine harte Infektionsschranke mit möglichst geringem Steueraufwand einzuhalten. Die Hauptresultate aus diesen Publikationen können zur Entscheidungsfindung unterstützend herangezogen werden: Sowohl ohne als auch mit der Möglichkeit der Impfung ist ein kurzer und harter Lockdown zu Beginn der Pandemie unausweichlich. Mit Impfung kann dieser jedoch deutlich abeschwächt werden. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Länge des betrachteten rollierenden Zeitfensters auf die MPC-Lösung untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass es auf kurze Sicht am wichtigsten ist,

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

die Personen mit dem höchsten Risiko eines schweren Infektionsverlaufes zuerst zu impfen, da diese direkt das Gesundheitssystem belasten. Ist der betrachtetete Zeitraum jedoch lang genug, ist es effizientesten die Personen mit den meisten Kontakten zuerst zu impfen, um das Infektionsgeschehen zu entschleunigen.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Entwicklung dieses hochkomplexen Modells von Microgrids über mehere Netzebenen hin bis zum Höchstspannungsnetz kombiniert mit geeigneten Lösungsverfahren konnte nur durch die Zusammenarbeit von Experten aus den beteiligten mathematischen Disziplinen der Optimalsteuerung (TUIlm und ACSD), der Modellreduktion (MPI), der robusten Stabiltiätsanalyse (ACSD) und der gemischtganzzahligen semidefiniten Opimierung (ADM) gepaart mit dem Knowhow der Industriepartner gelingen. Das BMBF-Förderprogramm unterstützt genau dies, ist in dieser Hinsicht einzigartig und unverzichtbar für mathematisch angewandte Forschungs- und Entwicklungsprojekte dieser Art.
Für die Erarbeitung eines Modells mit realitätsnahen Parametern zur Beschreibung der Ausbreitung der Infektionskrankheit COVID-19 sowie passender Inverventionsmaßnahmen war die Zusammenarbeit mit den Stochastikern um Prof. Hotz (TU Ilmenau) unabdingbar.

7 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Projekt entwickelte hierarchische Lastflussoptimierung unter Berücksichtigung neuer Steuerelemente wurde als Proof of Concept erstellt und getestet [B1]. Die prinzipielle Eignung des Ansatzes wurde von den beteiligten Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern geprüft und für gut befunden. Für den praktischen Einsatz ist zum einen ein weiterer Ausbau hin zu realistischen Netzgrößen sowie eine professionelle Implementierung seitens eines Softwareproviders wie Venios erforderlich. Dies ist machbar, jedoch sehr wohl noch aufwendig und erfordert mathematisches Verständnis. Dieser Schritt lohnt sich, denn er erlaubt einen effizienteren und vollautomatisierten Betrieb von Stromnetzen.
Hinsichtlich des Flexibilitätskonzepts und des Informationsaustausches bestehen weitere nichtmathematische Herausforderungen. So müssen etwa gesellschaftlich akzeptierte Vertragsformen entwickelt werden, die den Netzbetreibern die reservierte Nutzung und Steuerung kleiner Anteile lokaler Batteriekapazitäten gegen Entgelt ermöglichen.

8 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach unserer Literaturrecherche sind im Projektzeitraum keine Arbeiten im Bereich der netzwerkebenenübergreifenden Übertragung von Flexibiltitätsinformationen erschienen. Das Projekt betrachtet in einzigartiger Weise die Lastflussoptimierung über die gesamte Hierarchie der Stromnetze, von der Niederspannung bis zur Höchstspannung. Dies etabiliert gleichzeitig einen neuen Prozess des Informationsaustausches zwischen diesen Ebenen und identifiziert auf jeder Ebene spezifische Optimierungsprobleme.
Die Erforschung der Ausbreitungsdynamiken von Infektionskrankheiten hat während der Coronapandemie einen Aufschwung erlebt. Es wurden verschiedene Modelle entwickelt, um diverse Aspekte der Infektionskrankheit und der Gegenmaßnahmen abbilden zu können. Das von TUIlm und MPI in [J5; J4] entwickelte Modell war darauf ausgelegt, möglichst zuverlässige Parameter bestimmen und somit qualitativ wertvolle Aussagen im Hinblick auf den Einfluss der Gegenmaßnahmen treffen zu können.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

9 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

9.1 Referierte Publikationen (z.B. in Fachzeitschriften oder -büchern und referierte Konferenzproceedings)

Beiträge in Fachzeitschriften

[J6] **P. Sauerteig**. Bidirectional Optimisation for Load Shaping within Coupled Microgrids. Submitted.

[J5] S. Grundel, **S. Heyder**, **T. Hotz**, T. K. S. Ritschel, **P. Sauerteig**, **K. Worthmann**. How much testing and social distancing is required to control COVID-19? Some insight based on an age-differentiated compartmental model, *SIAM J. Control Opt.* 60(**2**), S145–S169 (2022)

[J4] S. Grundel, **S. Heyder**, **T. Hotz**, T. K. S. Ritschel, **P. Sauerteig**, **K. Worthmann**. How to Coordinate Vaccination and Social Distancing to Mitigate SARS-CoV-2 Outbreaks, *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.*, 20(**2**), 1135–1157 (2021)

[J3] Y. Jiang, **P. Sauerteig**, B. Houska, **K. Worthmann**. Distributed Optimization using ALADIN for Model Predictive Control in Smart Grids, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 29 (**5**), 2142–2152 (2021)

[J2] **P. Sauerteig**, **K. Worthmann**. Towards multiobjective optimization and control of smart grids, *Optimal Control - Applications and Methods (OCAM); special issue MPC for Energy Systems: Economic and Distributed Approaches* 2020; 41:128–145.

[J1] M. Baumann, S. Grundel, **P. Sauerteig**, **K. Worthmann**. Surrogate models in bidirectional optimization of coupled microgrids, *at - Automatisierungstechnik*, **67**(12), 1035–1046 (2019)

Konferenzproceedings

[C3] **P. Sauerteig**, **K. Worthmann**, K. Chudej. Towards Model Predictive Control for Maintaining a Hard Infection Cap during an Outbreak of Dengue Fever. (to appear)

[C2] **P. Sauerteig**, W. Esterhuizen, M. Wilson, T. K. S. Ritschel, **K. Worthmann**, S. Streif. Model Predictive Control Tailored to Epidemic Models. (to appear)

[C1] **P. Sauerteig**, Y. Jiang, B. Houska, **K. Worthmann**. Distributed Control Enforcing Group Sparsity in Smart Grids, *IFAC-PapersOnLine*, 53(**2**), 13269–13274 (2020)

Bücher

[B1] T. Aschenbruck, W. Esterhuizen, B. Filipecki, S. Grundel, C. Helmberg, **P. Sauerteig**, S. Streif, T. K. S. Ritschel, **K. Worthmann**. Exploiting Flexibility from Residential Batteries throughout the Power Grid. *SpringerBriefs* (to appear)

Buchkapitel

[K4] T. Aschenbruck, M. Baumann, W. Esterhuizen, B. Filipecki, S. Grundel, C. Helmberg, **P. Sauerteig**, S. Streif, T. K. S. Ritschel, **K. Worthmann**. Optimization and Stabilization of Hierarchical Electrical Networks. In S. Göttlich, M. Herty, and A. Milde, editors, *Mathematical Modeling, Simulation, and Optimization for Power Engineering and Management*, Springer, 171–198 (2021)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

[K3] **P. Sauerteig**, M. Baumann, J. Dickert, S. Grundel, **K. Worthmann**. Reducing transmission losses via reactive power control. In S. Göttlich, M. Herty, and A. Milde, editors, *Mathematical Modeling, Simulation, and Optimization for Power Engineering and Management*, Springer, 219–232 (2021)

[K2] S. Grundel, **P. Sauerteig**, **K. Worthmann**. Surrogate models for coupled microgrids. In I. Faragó, F. Izsák, P. L. Simon, editors, *Progress in Industrial Mathematics at ECMI 2018*, volume 30 of Mathematics in Industry, Springer, 477–483 (2019)

[K1] P. Braun, **P. Sauerteig**, **K. Worthmann**. Distributed optimization based control on the example of microgrids. In M. J. Blondin, P. M. Pardalos, and J. Saéz, editors, *Computational Intelligence and Optimization Methods for Control Engineering*, volume 150 of Springer Optmization and Its Applications, Springer, 173–200 (2019)

9.2 Andere Veröffentlichungen (z.B. Konferenzbeiträge wie Vorträge und Poster, unreferierte Proceedings, Conference Notes)

Vorträge

2022 27–29/7 „Towards Model Predictive Control for Maintaining a Hard Infection Cap during an Outbreak of Dengue Fever“, *MATHMOD*, Wien
12–15/7 „Model Predictive Control Tailored to Epidemic Models“, *European Control Conference*, London
12/01 „Coordination of Countermeasures against Epidemics based on Compartmental Models“, *MODUS Seminar*, Universität Bayreuth (eingeladen)

2021 14/04 „How to Coordinate Countermeasures against COVID-19“, *21st European Conference on Mathematics for Industry*, Wuppertal (virtuell)

2020 13–17/07 „Distributed Control Enforcing Group Sparsity in Smart Grids“, *IFAC World Congress 2020*, Berlin (virtuell)
21/02 „Verteilte Optimierung von Energiespeichern in Smart Grids“, *Siegmundsburg Workshop*

2019 10/06 „Current Research Topics in Distributed Optimization of Smart Grids“, *SIST Seminar*, ShanghaiTech University (eingeladen)

2018 22/06 „Control of Residential Energy Systems using Energy Storages & Controllable Loads“, *20th European Conference on Mathematics for Industry*, Budapest
14–15/03 „Verteilte Optimierung“, *Siegmundsburg Workshop*

Poster

2018 03–05/09 „Control of Residential Energy Systems using Energy Storages & Controllable Loads“, *Summer School on Optimization of Dynamical Systems*, Bremen

9.3 Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Diplom, Staatsexamen, Promotion, Habilitation)

Promotion

2022 **P. Sauerteig**. Optimisation-Based Control in Electrical Grids and Epidemiology, PhD Thesis, Technische Universität Ilmenau, Deutschland (voraussichtliche Abgabe 08/2022)

Literatur

[1] I. Atzeni, L. G. Ordóñez, G. Scutari, D. P. Palomar, and J. R. Fonollosa. Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(**2**):866–876, 2013.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

[2] J. F. Benders. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. Numerische Mathematik, 4(**1**):238–252, 1962.

[3] D. P. Bertsekas and J. N. Tsitsiklis. *Parallel and Distributed Computation: Numerical Methods*. Athena Scientific, Belmont, MA, USA, 1989.

[4] L. Bolzoni, E. Bonacini, C. Soresina, and M. Groppi. Time-optimal control strategies in SIR epidemic models. *Mathematical Biosciences*, 292:86–96, 2017.

[5] S. Boyd, N. Parikh, E. Chu, B. Peleato, and J. Eckstein. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 3(**1**):1–122, 2011.

[6] E. H. Bussell, C. E. Dangerfield, C. A. Gilligan, and N. J. Cunniffe. Applying optimal control theory to complex epidemiological models to inform real-world disease management. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 374:20180284, 2019.

[7] V. Capasso. Mathematical Structures of Epidemic Systems, *volume 97 of Lecture Notes in Biomathematics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1993.

[8] C. Conte, T. Summers, M. N. Zeilinger, M. Morari, and C. N. Jones. Computational aspects of distributed optimization in model predictive control. In *Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 6819–6824, 2012.

[9] G. B. Dantzig and P. Wolfe. Decomposition principle for linear programs. *Operations Research*, 8(**1**):101–111, 1960.

[10] H. Everett. Generalized Lagrange multiplier method for solving problems of optimum allocation of resources. *Operations Research*, 11(**3**):399–417, 1963.

[11] A. Fischer, K. Chudej, and H. J. Pesch. Optimal vaccination and control strategies against dengue. *Math. Methods Appl. Sci.*, 42(**10**):3496–3507, 2019.

[12] C. L. Floch, F. Belletti, S. Saxena, A. M. Bayen, and S. Moura. Distributed optimal charging of electric vehicles for demand response and load shaping. In *Proceedings of the 54th Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 6570–6576, 2015.

[13] M. Fortin and R. Glowinski. On decomposition-coordination methods using an augmented Lagrangian. In M. Fortin and R. Glowinski, editors, *Augmented Lagrangian Methods: Applications to the numerical solution of Boundary-Value Problems*. North-Holland: Amsterdam, 1983.

[14] D. Gabay. Applications of the method of multipliers to variational inequalities. In M. Fortin and R. Glowinski, editors, *Augmented Lagrangian Methods: Applications to the Solution of Boundary-Value Problems*. North-Holland: Amsterdam, 1983.

[15] E. Hansen and T. Day. Optimal control of epidemics with limited resources. *J. Math. Biol.*, 62:423–451, 2011.

[16] H. W. Hethcote. Three basic epidemiological models. In L. Gross, T. G. Hallam, and S. A. Levin, editors, *Applied Mathematical Ecology*, pages 119–144. Springer-Verlag, Berlin, 1989.

[17] H. W. Hethcote. The mathematics of infectious diseases. *SIAM Reviews*, 42(**4**):599–653, 2000.

[18] H. W. Hethcote and P. Waltman. Optimal vaccination schedules in a deterministic epidemic model. *Math. Biosci.*, 18(**3–4**):365–381, 1973.

[19] B. Houska, J. Frasch, and M. Diehl. An Augmented Lagrangian Based Algorithm for Distributed Nonconvex Optimization. *SIAM Journal on Optimization*, 26(**2**):1101–1127, 2016.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

[20] D. Jakovetić, J. Xavier, and J. M. F. Moura. Fast distributed gradient methods. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(**5**):1131–1146, 2014.

[21] S. S. Kia, J. Cortés, and S. Martínez. Distributed convex optimization via continuous-time coordination algorithms with discrete-time communication. *Automatica*, 55:254–264, 2015.

[22] M. Kraning, E. Chu, J. Lavaei, and S. P. Boyd. Dynamic network energy management via proximal message passing. *Foundations and Trends in Optimization*, 1(**2**):70–122, 2013.

[23] P. Scott and S. Thiébaux. Distributed multi-period optimal power flow for demand response in microgrids. In *Proceedings of the 2015 ACM Sixth International Conference on Future Energy Systems*, pages 17–26. ACM, 2015.

[24] J. N. Tsitsiklis. *Problems in Decentralized Decision Making and Computation*. PhD thesis, MIT, Cambridge, MA, USA, 1984.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

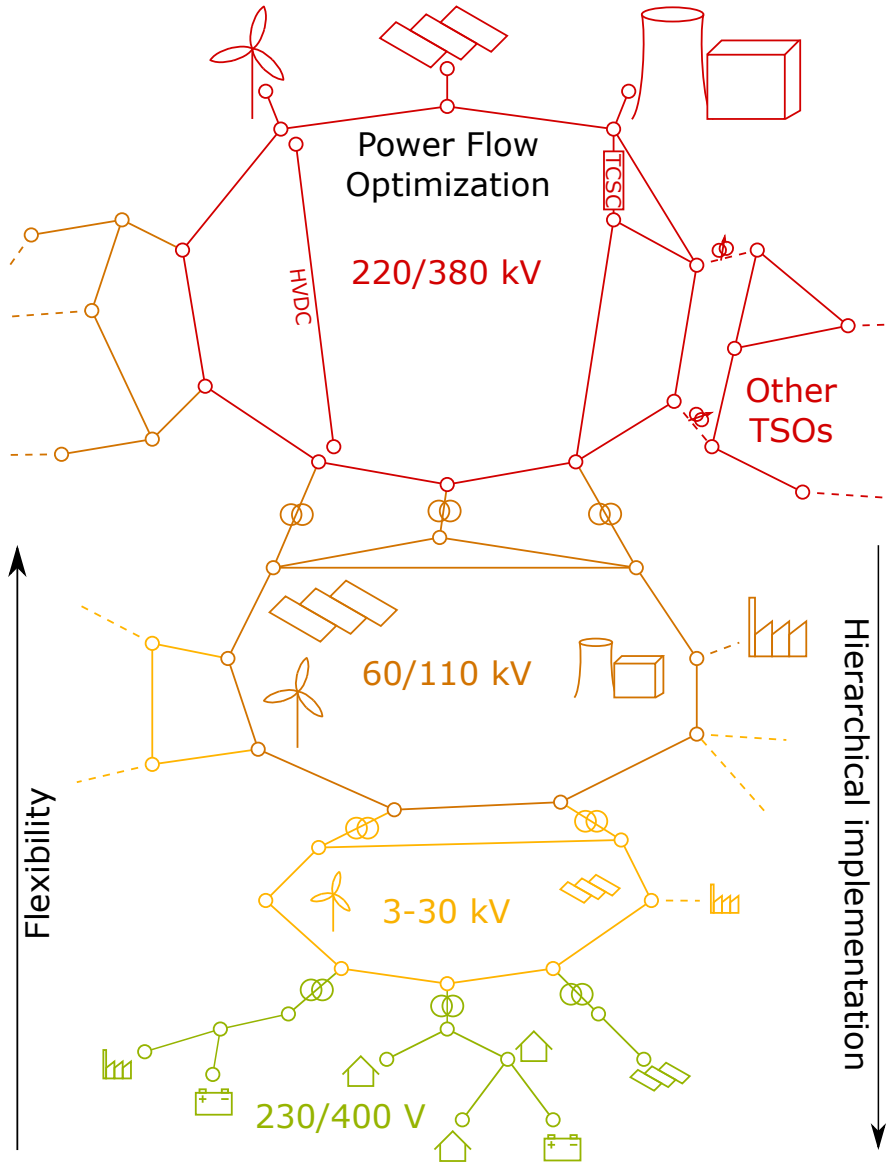

Abbildung 5: Hierarchische Struktur des elektrischen Netzes in Deutschland.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Ilmenau
Projektleitung: Prof. Dr. Thomas Hotz, Prof. Dr. Karl Worthmann
Verbund: KONSENS: Konsistente Optimierung und Stabilisierung elektrischer Netzwerksysteme
unter der Koordination von Prof. Dr. Christoph Helmberg
Thema: Verteilte Optimierung und Regelung für Microgrids (Teilprojekt 1)

Kurzbericht

Der stetig wachsende Anteil erneuerbarer Energiequellen und sowie die wachsende Zahl an Energiespeichern, von Autobatterien bis zu großskaligen Anlagen, stellt die Betreiber in der Betriebsführung der Stromnetze vor neue Herausforderungen und Möglichkeiten. Übertragungsnetzbetreiber sind dabei regulatorisch zu einem sicheren Betrieb unter möglichst effizienter Ressourcennutzung verpflichtet. Stabilisierungsmaßnahmen für Höchstspannungs- sowie teils auch für Hoch-, Mittel- und Verteilnetze umfassen Flexible AC Transmission Systems (FACTS) sowie Anpassungen der Netzwerktopologie, notfalls kombiniert mit regulatorischen Ab- oder Zuschaltungen. Steuerungsentscheidungen werden derzeit mittels mathematischer Lastflussmodelle ebenenspezifisch berechnet und simuliert, jedoch fehlen Werkzeuge, die eine automatisierte Entscheidungsfindung vollumfänglich unterstützen.

Ziel des Verbundprojekts war die Entwicklung neuartiger Konzepte und Methoden, den optimierten Einsatz der Steuerungselemente zur Nutzung der in den Teilnetzwerken und -ebenen verfügbaren Flexibilitäten für stabilitätsfördernde Lastanpassungen erlauben. Dies sollte ebenenübergreifend, mit geringem Kommunikationsaufwand sowie möglichst automatisiert erfolgen.

Lösungsansatz: Im Konsortium wurde ein hierarchischer Ansatz entwickelt. In diesem wird, beginnend im Verteilnetz, die verfügbare Flexibilität optimierungsbasiert ermittelt und der nächsthöheren Netzebene übergeben. Dies geschieht in Form von Lastbereichsintervallen um Nominalwerte mit konvexen Abweichungskosten, was auch die Gewährleistung der Datenanonymität sicherstellt. Auf der Höchstspannungsebene erfolgt der Lastausgleich unter Berücksichtigung der Anforderungen an Stabilität und Ausfallsicherheit mittels einer konvex relaxierten Lastflussoptimierung mit lokaler Nachoptimierung. Die so ermittelten Lastvorgaben werden hierarchisch über Lastflussoptimierung der Hoch- und Mittelspannungs- bis hin zur Verteilnetzebene zurückgespielt und umgesetzt. Der Entwurf des Ansatzes erfolgte in enger Abstimmung mit den Anwendungspartnern, um dessen Praxistauglichkeit sicherzustellen.

Methodische Entwicklungen: Für die Optimierung der in den Microgrids verteilten Batteriekapazitäten auf Haushaltsebene entwickelte das Teilprojekt der TU Ilmenau (Prof. Worthmann) parallelisierbare Algorithmen zur prädiktionsbasierten verteilten Optimierung und Regelung. Das Teilprojekt des MPI Magdeburg (Dr. Grundel) erarbeitete geeignete Modellreduktionsverfahren für die effiziente Zusammenfassung von Lastdaten in handhabbaren Ersatzmodellen der hierarchischen Netzebenen. An der TU Chemnitz wurden unter Leitung von Prof. Streif neue Stabilitätskriterien hergeleitet, aus denen Nebenbedingungen für die Lastflussoptimierung abgeleitet wurden. Das von Prof. Helmberg verantwortete zweite Teilprojekt der TU Chemnitz erweiterte semidefinite Relaxationsansätze zur Lastflussoptimierung um FACTS, Topologieentscheidungen und Stabilitätsbedingungen. Die Erprobung des Zusammenwirkens aller Kompo-

nenten über mehrere Netzebenen erfolgte an einem akademischen Demonstratorbeispiel und zeigte die grundsätzliche Tauglichkeit des Gesamtansatzes.

Verteilte Optimierung und Regelung von Microgrids (**TU Ilmenau**): Das Team um Prof. Worthmann hat sich mit der optimalen Steuerung von Microgrids auf der Niederspannungsebene beschäftigt. Die dabei zu steuernde Flexibilität setzt sich aus lokalen Energiespeichern auf Haushaltsebene zusammen. Das Schlüsselelement, um eine optimale Steuerung aller Speicher zu erzielen, ohne sensible Daten austauschen zu müssen, bildet die *verteilte Optimierung*. Die erzielten Ergebnisse werden im folgenden Berichtsteil detailliert beschreiben.

Erweiterungsprojekt im Zusammenhang mit der *COVID-19 Pandemie*: Das Konsortium hat im zweiten Halbjahr 2020 zusätzliche Forschungsgelder erhalten, um einen Beitrag zur Bekämpfung der Pandemie zu leisten. Hierfür wurde das Team durch die Arbeitsgruppe "Wahrscheinlichkeitsrechnung und Mathematische Statistiküm Prof. Hotz (TU Ilmenau) unterstützt. Gemeinsam mit dem MPI Magdeburg (Dr. Grundel) haben beide Teams der TU Ilmenau (Prof. Hotz und Prof. Worthmann) an der Modellierung der Ausbreitung der Pandemie sowie dem Einfluss von Gegenmaßnahmen gearbeitet. Besonderes Augenmerk lag dabei einerseits auf der Notwendigkeit von Kontaktbeschränkungen in der frühen Phase der Pandemie sowie dem Nutzen altersgruppenspezifischer Maßnahmen. Im weiteren Pandemieverlauf wurde die Analyse in Bezug auf das Zusammenwirken dieser Maßnahmen mit Impfangeboten erweitert. Des Weiteren wurde intensiv die Länge des benötigten Vorhersagehorizonts untersucht, um einerseits eine mittel- bis langfristig (approximativ) optimale Strategie zu realisieren und, andererseits, zeitnah auf neue Entwicklungen (inklusive der zeitvarianten Modellparameter) reagieren zu können. Dies ist über eine Analyse modellprädiktiver Regelungsverfahren erfolgt, die ein rollierendes Zeitfenster als Optimierungshorizont verwenden.