

Grundlagenforschung Smart- und Microgrids

Innovative, selbstlernende Systemregler für
dezentrale Energieressourcen & Microgrids

ENDBERICHT

Datum 30.06.2022

Nummer K3-F-755/001-2017

Projektleitung Michael Zellinger michael.zellinger@best-research.eu

Projektleitung Michael Stadler michael.stadler@best-research.eu

Mitarbeit Armin Cosic

Mitarbeit Christian Oberbauer

Mitarbeit Christine Mair

Mitarbeit Muhammad Mansoor

Mitarbeit Nikolaus Houben

Mitarbeit Pascal Liedtke

Mitarbeit Stefan Aigenbauer

Projektnummer N441090

Projektlaufzeit 01.12.2018 – 31.09.2021

Mit Unterstützung von Amt der NÖ Landesregierung, NÖ Wirtschafts- und
Tourismusfonds

BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH

Standort Wieselburg

Gewerbepark Haag 3
A 3250 Wieselburg-Land
T +43 (0) 7416 52238-10
F +43 (0) 7416 52238-99
office@best-research.eu
www.best-research.eu

Firmensitz Graz

Innfeldgasse 21b, A 8010 Graz
FN 232244k
Landesgericht für ZRS Graz
UID-Nr. ATU 56877044



Bericht

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Rahmendaten	7
2.1	Technologie und Kostendaten	7
3	Aufbau selbstlernende Controller Algorithmen	11
3.1	Model Predictive Control (MPC)	12
3.2	System Architektur	14
3.3	Integration/ Schnittstellen	15
3.3.1	Modbus TCP/IP	15
3.3.2	M-Bus	16
3.3.3	Representational State Transfer (REST)	17
3.3.4	FTP/CSV	18
3.4	Forecasting	19
3.4.1	Fast Fourier Transformation (FFT)	19
3.4.2	Selbstlernende maschinelle Prognosealgorithmen	21
3.5	Visualisierung	28
4	Aufbau der Modellszenarien für Potenzialstudie	32
4.1	Überblick über die Modellszenarien	32
4.2	Methodik zur Potenzialerhebung von übergeordneten Systemreglern in österreichischen Energiegemeinschaften	32
4.2.1	Gegenüberstellung der Regler	33
4.2.2	Framework	34
4.2.3	Extrapolation der Ergebnisse	34
5	Ergebnisse Einsatzszenarien und Potenzialanalysen	36
5.1	Einsatzszenarien Controller in Testsystemen	36
5.1.1	Microgrid Lab Wieselburg	36
5.1.2	Kärnten Use Case	44
5.2	Potenzialanalysen	48
5.2.1	Microgrid-Potenziale	48
5.2.2	Microgrid Potenziale für niederösterreichische Gemeinden	48
5.2.3	Potenziale von Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften in Österreich	50
5.2.4	Potenziale von Energiegemeinschaften in Europa	52
5.2.5	Zusammenfassung der Potenzialanalysen	52
6	Koordination mit COMET und Weiterentwicklung Richtung TRL 6-753	

7	Publikationen	55
8	Ausblick und Empfehlungen	57
9	Verzeichnisse	59
9.1	Tabellenverzeichnis	59
9.2	Abbildungsverzeichnis	59
10	Literaturverzeichnis	62

1 Einleitung

Mikro-Netze (Microgrids), ein Unterbereich der Intelligenten Strom/Energie-Netze (Smartgrids), die sich durch eine enge räumliche Bindung von Energieerzeugungseinheiten und Verbraucher auszeichnen wird international ein sehr starkes Wachstum zugeschrieben. Microgrids sind kleine, lokale Energienetze für Strom, Wärme und Kälte, die Haushalte, Betriebe und Gemeinden mit Energie versorgen. Diese lokalen und regionalen Konzepte der Energieversorgung können in Zukunft einen wesentlichen Beitrag in Richtung Energieunabhängigkeit und effizientere Integration von Erneuerbaren in das Energiesystem leisten. Sie können ihren Energiebedarf selbstständig aus erneuerbaren Energien oder anderen Energieformen decken, etwa Biomasse, Wärmepumpen, PV, Windräder oder Kraftwärmekopplungen. Diese können nach den individuellen Zielen der Gemeinden, Haushalte oder der Betriebe gesteuert werden, um Kostenreduktionen, CO₂ Einsparungen oder eine Erhöhung des Unabhängigkeitsgrades zu realisieren. Sie berechnen den aktuellen und zukünftigen Verbrauch und können Energie im Bedarfsfall dorthin verlagern, wo sie gerade benötigt wird, oder sie reduzieren den Energieverbrauch direkt.

Die Herausforderung besteht einerseits in der effektiven Planung: Wo sollen welche Technologien in welchem Umfang installiert werden und was sind die Kosten und Einsparungen? Andererseits ist die automatisierte, anpassungsfähige und effektive Steuerung des Systems notwendig: Wann sollen Elektroautos geladen werden oder wie sollen elektrische Speicher betrieben werden, um den maximalen Nutzen für den Kunden zu erreichen?

Die verschiedenen Märkte zeichnen sich durch verschiedene Technologiemixe aus. So z.B. wird sowohl Biomassevergasung als auch Nahwärme und Kälte im asiatischen Raum eine Rolle im Bereich Microgrids spielen. Im nordamerikanischen Raum werden Photovoltaik und Kraft-Wärme-Kopplungen, in Kombination mit Speichertechnologien wichtig sein. Alle diese Technologien müssen im Einsatz koordiniert und gesteuert werden.

BEST ist ein technologischer Vorreiter im Bereich Steuerungssysteme für Bioenergietechnologien und konnte im Zuge dieses Projektes dieses Wissen mit dem weltweit führenden Microgrid Optimierungstool DER-CAM vom Lawrence Berkeley National Laboratory der Universität von Kalifornien vereinen.

Durch dieses Grundlagenforschungsprojekt wurde der Grundstein für innovative, selbstlernende Regelungskonzepte von Microgrids gesetzt, die Wärme, Strom, E-Mobilität und Bio-Synthetic Natural Gas (SNG) oder Biogas enthalten. Aufbauend auf die Entwicklungen in diesem Grundlagenforschungsprojekt wurden bereits weitere Projekte initiiert, welche sich mit Weiterentwicklung der selbstlernenden Controller Algorithmen beschäftigen. Darüber hinaus wurden auch erste Schritte in Richtung Standardisierung von Kommunikationsstrukturen gemacht, um die effiziente Umsetzung von ganzheitlichen Steuerungskonzepten für eine möglichst große Anzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle zu ermöglichen und das Einsatzspektrum sukzessive zu erweitern.

Zur Evaluierung der entwickelten mathematischen und physikalischen Modelle wurden relevante Fallstudien durchgeführt, im Rahmen derer mögliche Energieeinsparpotenziale durch den optimierten Betrieb von Erzeugungs- und Speichertechnologien und die daraus resultierenden CO₂ Einsparungen untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigen die Potenziale für die neue Systemregelungstechnologie auf lokaler Ebene aber auch das extrapolierte Potential für größere Regionen. Mit diesem Projekt wurde der Grundstein gelegt in diesem sehr stark international angesiedelten Feld eine führende Rolle einzunehmen.

2 Rahmendaten

Für die Sicherstellung einer ganzheitlichen Strategie in Richtung Versorgung durch erneuerbare Technologien und Reduktion der Abhängigkeit von ausländischen Energieimporten ist es wesentlich, einen ganzheitlichen Prozess von der Energiesystemplanung bis hin zur Implementierung und Steuerung der Systeme zu integrieren. Im Grundlagenforschungsprojekt Smart- und Microgrids wurde vor allem der Aspekt der Systemintegration von unterschiedlichen Erzeugern und Verbraucherin in dezentrale Energiesysteme sowie deren übergeordnete Regelung beforscht.

2.1 Technologie und Kostendaten

Im ersten Schritt des Projekts wurden für die Planung und den Betrieb von Energiesystemen relevante Technologien und Kostendaten umfangreich erhoben.

Diese ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen sind wichtig, um diese in die mathematischen Modelle einfließen zu lassen. Die ökonomischen Parameter behandeln sowohl die Investitionskosten dezentraler Technologien als auch deren Wartungskosten bezogen auf ein Jahr und die Betriebskosten, allen voran die Energiepreise für elektrischen Strom, fossile oder biogene Brenn- und Kraftstoffe. Aufgrund des liberalen Strommarkts ergibt sich für Prosumer¹ eine Vielzahl an Möglichkeiten, Strom günstig zu erwerben oder gewinnbringend zu vermarkten. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Tarifmodelle und Stromanbieter, die anhand von Modellregionen in verschiedenen Use Cases angewendet wurden, erhoben.

Für die Betrachtung des ökologischen Einflusses von Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung wurden die CO₂-Emissionen und weitere Treibhausgase mittels CO₂-äquivalenten Faktoren ermittelt. Da Österreichs Stromimporte seit der Jahrtausendwende die Stromexporte überschritten haben und das Defizit im Jahr 2016 bei 26,9% lag, wurden beim elektrischen Strom sowohl nationale als auch internationale CO₂-Emissionsbilanzen erhoben.

Essentiell für mathematische Modellierungen sind neben ökonomisch-ökologischen Parametern auch Last- oder Verbrauchsdaten von Gebäuden. Für diesen Zweck wurden diverse synthetische Lastdaten zu Strom-, Wärme und Kälteverbrauch aufbereitet.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind alle identifizierten Technologien aufgelistet, wie sie für unterschiedliche Use-Cases verwendet wurden. Hierbei ist anzumerken, dass die Daten für den Leistungsbereich zwischen 20 bis 200kW angegeben sind. Details können dem Bericht E1_11-2018_K3-F-755001-2017 entnommen werden.

¹ Prosumer vereint die Begriffe „Producer“ und „Consumer“ und bezeichnet damit jemanden, der ein bestimmtes Gut sowohl produzieren als auch konsumieren kann – in diesem Fall Energie

Tabelle 1: Zusammenfassung der Technologien Stand 2019

Technologien	Fix-kosten	Variable Kosten	Lebens-dauer	Wartungs-kosten
Ölheizung	8180 [€]	233 [€/kW _{th}]	25 [a]	0,36 [€/(kW _{th} ·M)]
Gasheizung		658 [€/kW _{th}]	25 [a]	1,18 [€/(kW _{th} ·M)]
Hackschnitzel	13821 [€]	270 [€/kW _{th}]	25 [a]	1,72 [€/(kW _{th} ·M)]
Scheitholzheizung	11822 [€]	51 [€/kW _{th}]	25 [a]	1,29 [€/(kW _{th} ·M)]
Pellets	12390 [€]	323 [€/kW _{th}]	25 [a]	1,26 [€/(kW _{th} ·M)]
Luftwärmepumpe		4722 [€/kW _{th}]	15 [a]	2,55 [€/(kW _{th} ·M)]
Solewärmepumpe		6498 [€/kW _{th}]	20 [a]	3,87 [€/(kW _{th} ·M)]
Solarthermie		796 [€/kW _{th}]	20 [a]	n.A [€/(kW _{th} ·M)]
Photovoltaik	2400 [€]	990 [€/kW _p]	25 [a]	n.A [€/(kW _{el} ·M)]
Windkraft		8000 [€/kW _{el}]	25 [a]	6,67 [€/(kW _{el} ·M)]
Zentralkühlung Raumkühlung		2730 [€/kW _{el}]	20 [a]	n.A [€/(kW _{el} ·M)]
Zentralkühlung Kühlräume		2300 [€/kW _{el}]	20 [a]	n.A [€/(kW _{el} ·M)]
Absorptionskälte- maschine Raumkühlung	71095 [€]	4425 [€/kW _{Cool}]	20 [a]	1,08 [€/(kW _{Cool} ·M)]
Absorptionskälte- maschine Kühlräume	102110 [€]	3395 [€/kW _{Cool}]	20 [a]	1,53 [€/(kW _{Cool} ·M)]
Wärmespeicher	520 [€]	22 [€/kW _{h_{th}}]	25 [a]	n.A [€/(kW _{h_{th}} ·M)]
Kältespeicher	520 [€]	55 [€/kW _{h_{th}}]	25 [a]	n.A [€/(kW _{h_{th}} ·M)]
Stromspeicher		500 [€/kW _{h_{el}}]	8 [a]	n.A [€/(kW _{h_{el}} ·M)]
Flow Batterie Energy		400 [€/kW _{h_{el}}]	20 [a]	n.A [€/(kW _{h_{el}} ·M)]
Flow Batterie Power		1250 [€/kW _{el}]	20 [a]	n.A [€/(kW _{el} ·M)]
Elektrofahrzeug		150 [€/kW _{h_{el}}]	8 [a]	3,60 [€/(kW _{h_{el}} ·M)]

Für die laufenden Betriebskosten einer Anlage ist vor allem der Energiepreis ausschlaggebend. Dieser wurde für die heimisch üblichen Energieformen erhoben und zusammengetragen. Die Energiepreise für national verwendete Kraftstoffe, Naturgase und elektrische Energie als auch unterschiedliche Stromtarifmodelle sind in detaillierter Form im Bericht E1_11-2018_K3-F-755001-2017 Kapitel 3 und Kapitel 4 zu finden.

Um das ökologische Potential für dezentrale Stromerzeugungsanlagen zu demonstrieren, wurde eine Analyse bezüglich der CO₂-Emission in kg/kW_{h_{el}} auf nationaler Ebene erstellt. Abbildung 1 zeigt die prozentuelle Aufbringung der elektrischen Stromversorgung in Österreich für das Jahr 2016.

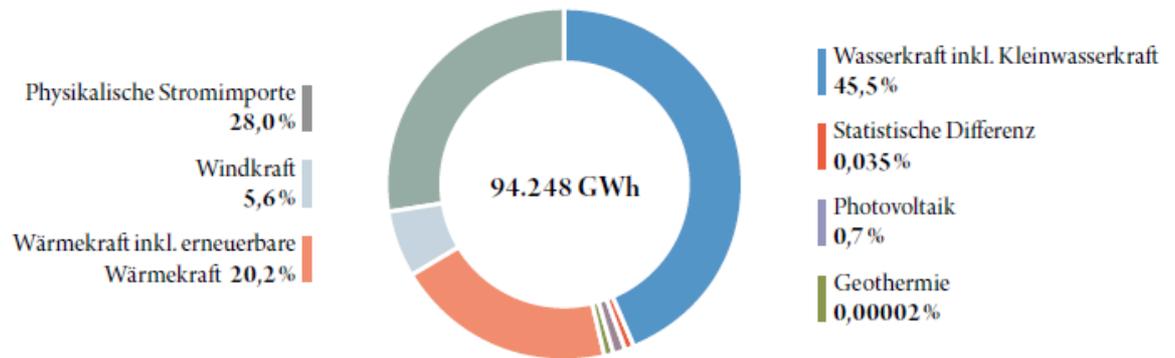


Abbildung 1: Struktur der Aufbringung von elektrischem Strom in Österreich, gesamte Versorgung im Jahr 2016 (BMNT, 2017)

Da Österreich seit 2000 mehr Stromimporte als -exporte aufweist, kann in der Analyse der CO₂-Emissionswerte nicht nur der heimische Durchschnitt verwendet werden. Daher wurden die Stromimporte nach ihren Herkunftsländern und deren CO₂-Belastung pro Kilowattstunde Strom kalkuliert.

Die prozentuelle Aufteilung der Stromimporte und die durchschnittlichen CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde elektrischen Stroms der Importländer sind in Tabelle 2 aufgelistet. Durch die Stromimporte und deren CO₂-Belastungen kann ein durchschnittlicher CO₂-Emissionswert der Kilowattstunde Strom errechnet werden.

Tabelle 2: Stromimporte Österreichs und deren CO₂-Belastungen

	Deutschland	Schweiz	Italien	Slowenien	Ungarn	Tschech. Republik
Stromimport [TWh/a]	14,85	0,39	0,07	0,37	0,43	10,26
Anteil der importierten Stromerzeugung [%]	0,56	0,01	0,00	0,01	0,02	0,39
durchschnittliche CO ₂ -Belastung [kg/kWh _e] ²	0,471	0,149	0,229	0,178	0,206	0,670

² Literaturquellen für die durchschnittlichen CO₂-Emissionen der Importländer: Deutschland (BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2017), Schweiz (Alig et al, 2017); Italien; Slowenien, Ungarn (European Environment Agency, 2017), Tschechische Republik (Jursová, 2018)

Mit den nationalen und internationalen CO₂-Emissionswerten können monatlich gemittelte CO₂-Belastungen der Stromaufbringung Österreichs erstellt werden. In Tabelle 3 wird dazu die Stromaufbringung Österreichs für das Jahr 2016 und deren monatliche Zusammenstellung dargestellt.

Tabelle 3: Stromspezifische CO₂-Emissionen pro Monat [kg/kWh_{el}]

	Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
CO ₂ kg/kWh _{el}	0,193	0,249	0,205	0,232	0,195	0,177	0,122	0,147	0,168	0,200	0,203	0,198	0,195

3 Aufbau selbstlernende Controller Algorithmen

Der übergeordnete Systemregler ist für die Optimierung von unterschiedlichen Erzeugungs- und Speichertechnologien, sowie deren Koordination und Abstimmung in Echtzeit mit dem gesamten System zuständig. Der Modellierungsrahmen des übergeordneten Systemreglers der BEST GmbH basiert auf Modellprädiktiver Regelung (engl. Model Predictive Control - MPC). Die grundsätzliche Struktur ist in Abbildung 2 ersichtlich:

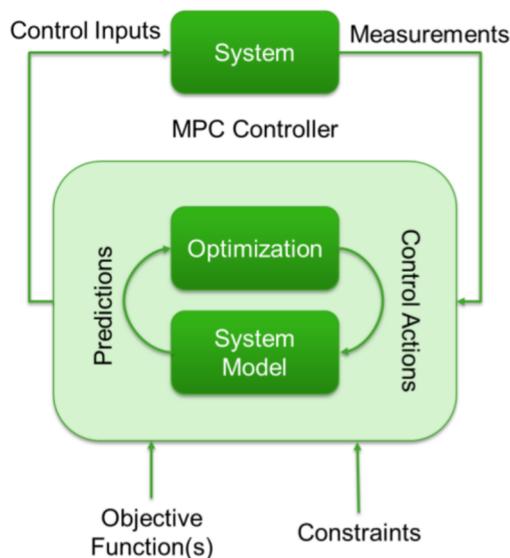


Abbildung 2: MPC Framework (BEST GmbH)

Bei jedem Zeitschritt, das können 5- 15 Min Schritte sein, berechnet der übergeordnete Systemregler die Regelungswertwerte durch die Lösung eines mathematischen Optimierungsproblems in einem offenen Regelkreis für einen Vorhersagehorizont und wendet dann die ersten Werte der Sequenz auf das System an. Beim nächsten Zeitschritt werden die aktualisierten Zustände und Messwerte des Systems vom Systemregler erfasst, woraufhin der Optimierungsschritt wiederholt wird. Das heißt, dass die entwickelten übergeordneten Controller Algorithmen im Stande sind, auf Basis von Prognosen auf die sich ändernden Rahmenbedingungen in Echtzeit zu reagieren und die Betriebsstrategie laufend hinsichtlich eines optimalen Betriebs anzupassen.

In der aktuellen Entwicklung wurden 5-Min Zeitschritte für die Optimierungsberechnung festgelegt. Der Vorhersagehorizont beträgt 48 Stunden (zwei Tage im Voraus). Die mathematischen Optimierungsmodelle wurden als gemischt ganzzahliges Optimierungsproblem (MILP) in der Programmiersprache GAMS modelliert und beinhalten zwei unterschiedliche Zielfunktionen. Einerseits kann der Systemregler das Ziel der Kostenminimierung des gesamten Systems verfolgen und andererseits die Minimierung der aus dem Betrieb entstehenden CO₂